

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

December
2021

夢想和幸福 零距離的接軌

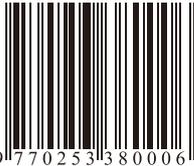


國土安全監測平台

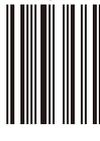
整合干涉合成孔徑雷達(InSAR)、遙測影像、地質等資訊，開發「國土安全監測平台」即時掌握各地地表形變狀況，達到提前預警、避災的功效。

www.ceci.com.tw

ISSN 0253- 3804



NT\$350



Volume 48, No. 6

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

地下水資源

專 輯

特別報導

110年年會大會及
土木水利工程論壇簡報



中華鋁門窗帷幕牆

取悅生活達最高靜界
極致氣密守護您的家



TEL : 02-25993456



夢想和幸福 零距離的接軌
台灣世曦工程顧問股份有限公司

土木水利半月集

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠營建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

土木水利



社團法人中國土木工程學會會刊

發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：劉格非（國立臺灣大學土木學系教授、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：http://www.ciche.org.tw

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十四屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：宋裕祺

常務理事：李順敏 高宗正 張荻薇 楊偉甫

理事：王宇睿 余信遠 林呈 林曜滄 邱琳濱 胡宣德 胡湘麟

高銘堂 張政源 許泰文 陳仲賢 陳彥伯 黃慧仁 壽克堅

廖學瑞 鄭燦鋒 賴建信 謝啟萬

常務監事：王昭烈

監事：呂良正 李建中 沈景鵬 林其璋 楊永斌 謝佳伯

中國土木工程學會任務

1. 研究土木工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第518號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第0248號

110 年年會大會及土木水利工程論壇特別報導 110 年 11 月 27 日於新北市政府舉行



新北市政府
New Taipei City Government

共同主辦

3

「地下水資源」專輯 (客座主編：徐國錦教授／李振誥教授)

- | | | |
|--------------------------|---------------------------------|-----|
| 專輯序言：地下水資源 | 徐國錦／李振誥 | 26 |
| 臺灣地區地下水庫之永續經營 | 張良正／江崇榮／林燕初／陳祐誠 | 27 |
| 地下水管理水位之演進與運用 | 吳益裕／林啓峰／劉瓊玲／溫志超／林建利 | 35 |
| 臺灣山區水文地質特性以及地下水資源分布概況 | 李振誥／林宏奕／龔文瑞 | 41 |
| 地下水人工補注與伏流水開發之回顧與前瞻 | 丁澈士 | 46 |
| 海水入侵回顧與調查分析 | 羅偉誠／李哲璋 | 59 |
| 地層下陷成因與防治 | 徐國錦／林政偉 | 68 |
| 電與電磁地球物理調查方法協助地下水資源調查之應用 | 林鼎竣／張竝瑜／嚴精明／韓怡娜／尤納坦／林格瑞／曾俊儒／謝孟勳 | 75 |
| 環境變遷與地下水之永續發展 | 葉信富／黃嘉琦 | 84 |
| 地下水污染整治與健康風險評估 | 王聖璋／高雨瑄／梁菁萍／陳瑞昇 | 90 |
| 放射性廢棄物地質處置之地下水流動與傳輸分析 | 倪春發／余允辰／李奕賢／Vu, Phuong Thanh | 101 |

廣告特搜

- | | |
|--------------------------------------|-----|
| 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌 | 封面 |
| 華揚室內裝修設計股份有限公司 — 室內裝修工程・景觀規劃設計 | 封底 |
| 中華鋁門窗帷幕牆 — 取悅生活達最高靜界・極致氣密守護您的家 | 封面裡 |
| 奇博科技股份有限公司 — 光纖光柵感測技術領導者 | 封底裡 |
| 安固工程股份有限公司 — 建築修復結構補強 | 109 |
| 經濟部水利署南區水資源局 — 曾文南化聯通管統包工程 A1 標・消能豎井 | 110 |

庚寅金虎迎春 敬祝 2022 健康快樂

社團法人中國土木水利工程學會 理事長 宋絡祺 敬賀



110年年會大會 盛大舉行 光彩奪目

110年11月27日



新北市政府
New Taipei City Government

共同主辦

大會主席開幕致詞

宋裕祺理事長



各位貴賓與會員先進，大家好！

中國土木水利工程學會（CICHE）自1973年成立迄今已有48年，在所有前輩、理事長與理監事們的辛勤耕耘下，學會已成為產官學研的有效聯繫平台，致力於學術提升、技術精進、政策研議與國際交流等工作。本學會為台灣土木水利工程領域的最大專業學會。在國際土木專業領域中，CICHE也是亞洲土木工程聯盟的創始會員，對亞洲甚至是全世界土木工程也有相當貢獻。

這一年來，因應全球新冠肺炎疫情的發展並配合政府相關管制措施，學會在活動的舉辦方面相較於去年減少很多，但學會仍積極善盡職責，無論是法令研議、技術創新、政策建議與國際交流等面向，在社會各界賢達鼎力相助之下，仍有一些作為，茲略舉數端如下：

- (1) 辦理「2021年電子計算機於土木水利工程應用研討會」，邀請國內外學者專家發表專題演講，並舉行16場次之論文報告，會議為期2天，成果豐碩。
- (2) 辦理「2021年防災科技線上研討會」，邀請國內產官學各界專家發表專題演講。
- (3) 辦理「工程環境與美化獎評獎」活動，國內各工程主辦機構報名踴躍。
- (4) 與各大專院校相關土木系合作辦理多場「培力土木新青年系列活動」校園開講活動。
- (5) 與中工程教育機構（IEET）及中華民國工程技術顧問商業同業公會辦理「2021全國大專院校學生工程創意競賽」活動。
- (6) 與台北市捷運局辦理「臺北捷運萬大一期及信義東延段施工經驗暨南環段設計理念成果發表會」。
- (7) 與台北市捷運局辦理「捷運工程技術優化與知識資產創新價值」研討會。
- (8) 與財團法人台灣非破壞檢測協會（SNTCT）及日本非破壞檢測學會（JSNDI）合辦為期兩天的「第十一屆（2021）公共工程非破壞檢測技術研討會暨2021台日非破壞檢測研習會」。



- (9) 與中工會辦理「第二屆青年工程師聯誼交流」。
- (10) 與社團法人台灣循環經濟、財團法人臺灣營建研究院辦理「BIM 資訊管理與循環營建之推動實務研討會」。
- (11) 與中華鋪面工程辦理「智慧道路與運輸研討會」。
- (12) 持續自主辦理技術顧問機構有關設計與監造費率改善建議案。為求客觀，學會特別邀集不同規模的數家相關業者參與研究，續能對政府提出具體建議。
- (13) 出版【土木 401 -110】「混凝土工程設計規範與解說」，並辦理多場講習會。
- (14) 辦理亞洲土木水利工程聯盟第40屆執行委員會，利用視訊方式與各國代表就全世界土木工程相關議題進行討論。
- (15) 增加會員的互動與聯誼，凝聚土木水利工程同業的向心力。

此外，針對2021/05/11經濟部公布「離岸風電區塊開發選商規劃」草案，其中產業關聯審查中有關「工程設計」僅列為佔比相當低的加分項目而非必選工作，將無法落實離岸風電工程設計本土化之問題，本學會對經濟部、能源局、工業局與工程會提出五次陳情文，提出具體建議改善方法，亦與相關官員與業者代表開過數次協調會議，目前經濟部尚在重新研議修正辦法中。

以上種種，都是學會近年來默默耕耘的成果，感謝各會員及相關單位的大力協助，懇請大家持續給予學會支持與鼓勵，如有服務不周之處，也請不吝鞭策與指教，讓我們一起為開創土木水利工程的新里程碑而努力！



110 年年會大會貴賓合影

貴賓致詞

陳純敬副市長 / 新北市政府

開幕貴賓由新北市政府陳副市長純敬代表致詞。陳副市長台大農工畢業後赴美國北卡州立大學攻讀土木營建管理碩士及博士，2002 年再獲東吳大學法學碩士學位。陳副市長曾第一線參與國內多項重大工程建設，如翡翠水庫、第二高速公路等等，蒞臨大會有如回娘家般的親切，陳副市長也代表主辦單位之一向所有會員表達歡迎之意。



大會專題演講

數位科技時代下的人文思維演變

黃榮村院長 / 考試院

演講摘要

歷史上與社會中常因為定見與不當情緒，迫害或不尊重人與學術主張，進入數位科技時代後，人文與倫理違犯仍然一再重演，當前人類社會集體行為中的負面情緒與溝通不良，以及在自私與圖利之下違犯倫理情事，四處可見，教養與人文關懷顯然需要一再強調。理性是感性的僕人，如何讓善的力量成長，以培養良善面的感性，是醫學教育中經常強調的人文元



素，也是大學的通識教育在推動典範學習與實踐的過程中，需要研議提出有效方案的困難所在。工程倫理與人才養成，當然會面對同樣的問題。

本次演講以此為基礎，提出若干具體實例加以說明，最後並以全球暖化在不確定下做決策、基因科技世代的人性看法、與孤獨社會的共感互動為例，說明心中一定要對這些問題有感覺有認同有關懷，才能在當前技術基礎之上找到出路。正如要成功經營流域文化與海洋文化，首先心中對流域文化要先有感覺要先有憧憬，而且需要與土地、人、及山水多作接觸，之後才能找出最合適的工程方案。

演講簡報

進入數位科技時代後，
人文與倫理違犯
仍然一再重演，
教養與人文關懷
顯然需要一再強調。

歷史上常因為定見與不當情緒 迫害或不尊重人與學術主張

1. 19世紀Paul Broca在社會成見引導下，認定女性腦容量小於男性，因此較不聰明。歷史的吊詭是：Broca的腦容量低於平均水準。

2. 時至今日，歷史仍然重演。James Watson的失言風波，再掀黑人智能的先天與後天爭議。

3. 最嚴重的則是德國納粹的politics is biology主張，在1943年提出與實施消滅猶太人的□最終處理方案□。

集體行為中的(不良)情緒與溝通

很多人都說台灣的選舉太過感性，情勝於理，反映的是台灣的民主政治尚未深化。但是依據 Drew Westen (2007) . The political brain. New York: PublicAffairs.

天下烏鴉似乎一般黑：

1. 選民投票給有感總統候選人，而非最會論理之人。
2. 政黨感情決定了投票行為，對候選人的情緒感覺遠比其人格與能力重要，候選人的政策主張祇有小部分影響。

3. 投票行為中情感與理性的比重大約是 80：20。叛逃者主要是有焦慮感的投票者。
4. 驅使行動的力量，往往來自情緒（包括對公平正義之渴求），而非認知因素。

鐵板一塊的情緒作用

核四與統獨爭議

若事件以情緒為主（如不安全感、不信任），或誘發出情緒（如社會正義感、悲觀、恐懼）之時，則難以溝通，此所以為什麼核電與統獨鐵板一塊：

- (1) 不隨時間而變化， $\frac{d}{dt}(\text{信念})=0$ ；
不因證據或資訊而變化，
 $p(\text{信念}/\text{data})=p(\text{信念})$ 。
- (2) 情緒誘發下的信念難改變，如核四建廠，溝通一年後，依然故我。
- (3) 精神疾病中的偏執與妄想症狀，皆有此特性。

自私與圖利下的倫理現身

塔斯基吉梅毒實驗計畫(The Tuskegee Syphilis Experiment, 1932-1972)，是一項前美國衛生署(PHS)在阿拉巴馬州Tuskegee所進行的臨床實驗計畫。

實驗開始之初（1932年），梅毒還是無藥可醫的絕症，但1943年醫學界發現青黴素可有效醫治梅毒後，研究人員為了使該實驗繼續進行，故意不對患者施以有效治療手段，甚至企圖阻止參與實驗的梅毒患者去接受有效治療。後被揭發，成為醫界之恥。

美蘇冷戰時期，心理學家曾協助CIA發展各種偵訊技術，包括使用幻覺誘發藥物與催眠術。

2001年911恐攻後，APA在2005年開始與國防部及CIA合作，未能遵守相關的研究倫理，替CIA發展偵訊與折磨技術，反向製造受拘押者的沮喪狀態，以獲取資訊。

美國醫界與精神醫學界，以違犯研究倫理加以抵制。

RIKEN (日本理化研究所)是一間年度預算超過十億美金的日本高等研究機構。一位剛拿到博士學位的小保方晴子(Haruko Obokata)，在2014年1月Nature同一期上發表兩篇論文。

她們主張體細胞經由外界刺激環境誘發(如微酸液體，就像把體細胞放入柳丁汁中一樣)，即可表現出類似胚胎幹細胞的功能(簡稱為STAP)。

10

Haruko Obokata 事件

假作真時真亦假。



11

不自然的直線 (unnatural straight lines)

FIG 1

< RIKEN 野依良治的道歉 >

12



13



14

理性與情緒如何均衡

David Hume：理性是感性的僕人，讓善的力量成長。感性leads, 理性隨之實踐。但不好的情緒會帶來不好或致命的結果。

情緒/感性與IQ不同，可以後天培育。
良性的感性可以培養，如醫學教育強調的人文元素。

15

先從兩件事談起：台大與東海的通識(科技學人文、人文學科技)、醫學人文(認同生信心)，常以調理知性與感性為主軸。

這是古老的教育手段，是否還適合用在數位科技時代？

16

五十多年前大一的左傳與史記課

--- 台灣通識教育的雛形

大一國文課上，共讀左傳與史記，左傳寫春秋寫到鄭伯克段於鄆，母子為親情反目弄到「不及黃泉，無相見也」的困境，最後才想到可以挖地道闢地及泉，母子隧而相見之類的記述，故事性十足，怪不得古文觀止會將其放在篇首。

17

- ▶ 史記寫說在呂后夷韓信三族後，漢高祖回來後見信死，且喜且憐之，問：「信死亦何言？」呂后曰：「信言恨不用蒯通計。」高祖曰：「是齊辯士也。」乃詔齊捕蒯通。蒯通至，上曰：「若教淮陰侯反乎？」對曰：「然，臣固教之。豎子不用臣之策，故令自夷於此。如彼豎子用臣之計，陛下安得而夷之乎！」上怒曰：「亨之。」通曰：「嗟乎，冤哉亨也！」-----。
- ▶ 一提起這一段，就想到在那個時代當為一位真英雄的宿命，韓信若個性如張良說不定可以保身，但卻可能當不了被百般惋惜與懷念的開朝英雄。

這是一個浪漫的通識校園

推不推動通識教育已是次要問題

- ▶ 另外則是無意中經營出來的通識校園，如台大與東海大學。

在兩種理念下擺盪的台灣通識教育

1. 博雅教育

文藝復興時期，強調人的教養、自由與解放、經典作品、核心課程。

von Humboldt 在1810年創建柏林大學（之後改稱Humboldt大學）時，即標舉大學之功能在於做好科學（取其廣義說法）與教養的教育。

2. 現代化的通識教育

- ▶ 有鑑於大學生知識基礎普遍不足，為期人才培育不致偏頗，主張修習人文社會科學為專業者，亦應修習較簡單之自然科學與生命科學基礎課程。
- ▶ 同理，修習理工者，亦應兼修人文學與社會科學之基礎課程。



台大文學院 / 行政大樓軸線東側：茄冬、鳳凰花木、樟樹、正榕



東海大學文理大道

醫學人文中，經常是感性先行，理性隨之

不忍人之心：公平與正義觀的人性關懷
將解剖學習當為第一個專業與人文介面的起點
先學做人再做醫生
典範學習：重返史懷哲之路（重返南丁格爾之路、重返中醫的鑑真與張仲景之路）
毋忘初衷，job、career、與calling
建立醫療奉獻傳統

將選舉惡質影響下，洩漏病人隱私，當為警惕。
將生醫研究的違犯倫理案件，當為警惕與知恥架構。

To do good or to do no harm

通識教養中的典範學習

史懷哲何以決定到非洲行醫
(因此在30歲時開始讀Strasbourg醫學院)

年少求學時經常到阿爾薩斯省Colmar市一處公園
深深被Bartholdi所雕刻一座非洲年輕人雕像上的
悲苦表情所感動。



影響史懷哲到非洲行醫的Bartholdi黑人雕像

26

(1) 在2008年6月14日一場聖嚴師父與
單國璽樞機主教的對談中，我以主持
人身份提出一個假設性問題：

「有一群你信得過的科學家，他們來
說技術已經成熟了，大家都景仰你
的能力、智慧、與品格，而且你也已
經成就了燦爛的一生，不知是否能夠
同意以基因科技來複製你，繼續陪伴
與引領大家走過下一個世代？」

30

獻身與墓園



27

(2) 他們的回答都是清楚的“No”。理由：

- ① 沒有必要讓複製人活在「原版者」的陰影之下。
- ② 身體短暫，精神與靈性才是久遠的。身體也許可以複製，但靈性、品格、教養、與信仰是難以複製的。
- ③ 不可能複製出一個與我完全一樣的人。
- ④ 生死是自然過程，能走完一生已是無上的恩寵。

若科技予以干預進行複製，會引起很多難以預測且不能控制的風險。

31

常持警惕之心

十八世紀康德道德律的第三種表述

在任何情形下，無論是對待自己或對待別人，總是要把人當作目的，而不要把人當作工具。

28

(3) 他們的回答，相當程度呼應了基於 Francis Crick 所提出 Central Dogma 的引申：「後天性狀（如品格、教養、靈性與信仰）無法反轉錄到 DNA，並遺傳給下一代或複製的人。」

32

「人類複製」：
聖嚴師父與
單國璽樞機主教的
對話



39

全球暖化
與不確定下做決策



33

全球暖化在沿海大都會、海島國家、海岸區（如雅加達、台灣西海岸）、窮困國家、與南北極的相對模擬，與COP26以降的國際協議，各有不同的不確定存在。

如21世紀末海平面上升的估計，從0.5-2.0 m，可見不確定性甚高，但也表示人的警覺性與努力的空間大。現在的科學演算，基本上應是decision under risk的問題；但國際協議如何進行與是否實踐，則偏向decision under uncertainty。

決策時有不同類型，包括：

1. 確定性下做決策 (Decision under Certainty)
2. 風險(Risk)下做決策 (已知機率與後果)：

全球氣候變遷中之西海岸規劃與搬遷方案如何研擬？為提升工程或技術品質，如何採用限制性招標或最有利標？

3. 模糊不明下做決策 (Decision under Ambiguity)

全球暖化與能源配比，以及兩岸互動，係擺盪於第二與第三種決策類型之間，一般是走「不確定性消滅」(uncertainty-reduction)路線，從 ambiguity 降為 risk 再降為 certainty，比較能解決問題。

各類型決策難度各有不同，第一種需要執行力；第二種是在已知的機率與後果(outcome)下計算，以求損害極小化與利益極大化；第三種則顯然資訊不足不明，富含情緒強度(包括公平正義問題)，需要在多重指標下尋找共識以求最適化，或延時解決。

河流、海域、與關鍵通道的歷史地景

但是以上都是理性方案，最重要的還是要對地球與所居住地有感覺。就像做河流工程的人，心中對流域文化要有感覺與憧憬。我們需有土地、人、與山水的接觸。

流域文化的經營，包括泰晤士河、塞納河、萊茵河等，還有好幾個可以壯遊可以憧憬的地方，如蘇伊士運河、直布羅陀、巴拿馬運河、好望角、Cape Hoorn 等地。

想想黃河、長江、濁水溪、淡水河，就知道情感上的認同，在改善或重建工程上扮演了非常重要的角色。同理，對地球的情感認同如何建立，才是難題。

心中流動一生的河流與海峽

幼發拉底河與底格里斯河(兩河流域，蘇美與巴比倫文化、亞述帝國、肥沃月灣，農業緣起)

博斯普魯斯海峽與拜占庭文化以及君士坦丁堡(歐亞分界線)的遺跡

神話故鄉萊茵河
文人與藝術家輩出的Times River與塞納河

庶民的密西西比河(馬克吐溫的母親河)

黃河長江與濁水溪淡水河流動的是什麼？

心中流動一生的河流、海域、與關鍵通道



同理，數位時代一直標榜網路、虛擬空間、meta-verse、AI、社會性機器人，若未能引入感性與人文接觸，則與人的世界關聯性低，異化的程度將愈來愈高。

英國首相梅伊於2018年1月接受下議院Jo Cox Commission on Loneliness 2017年12月提出總結報告之建議，首設孤獨大臣Minister of Loneliness，協調政府各部門的孤獨減降策略與方案。

過去Karl Marx在倫敦提出異化(alienation)說，可能也與英國工業革命以來的社會發展有關，並非專指老年，而是普遍之社會現象。Loneliness的一部份原因來自異化。

日本內閣於2021年在COVID-19與自殺率上升之後跟進，由於孤獨(solitude)與自殺、貧窮、「齟齬」等社會議題，設置孤獨事務大臣，負責「孤獨、孤立對策担当室」。

但是要將人的元素與數位時代中的high-ends結合，還需要新的心智科學。

Eric Kandel (2012)：腦部的掃描可能發現了憂鬱的神經訊號，但貝多芬交響樂則展現了對該一憂鬱狀態的真正感覺。這類情感經驗，在藝術音樂中經常出現，但affective neuroscience難以回答，若勉強做也有太過簡化與不當的化約論問題。

如何處理共感、1st-person experience、感動、內在情緒經驗、與自我意識？我們的理解還相當有限，有待下一個50年的研究，也將深刻影響下一代AI與機器人的面貌！這也是數位時代必須補上的人文思維。



頒獎典禮

110 年度「土木水利 工程獎章」終身成就類 得獎人：陳吉紀先生



陳吉紀先生

宇泰工程顧問有限公司董事長 國立中山大學兼任教授
台灣海洋大學榮譽講座教授 國立臺灣大學兼任教授級專技人員

特殊事蹟：

宇泰：

1. 榮獲第一、二、八、十五、二十屆行政院公共工程金質獎（七座）
2. 第十二屆國家磐石獎
3. 中國工程師學會「傑出事業機構獎」
4. 交通部工程特優獎、中國工程師學會工程優良獎…等多座
5. 海洋工程學會、海下技術協會技術獎章、榮譽獎章

個人：

1. 海洋界最高榮譽「第六屆海洋貢獻獎」（民國 108 年）
2. 國立臺灣大學教學優良獎（民國 109 年）



評獎委員會張蕙薇主任委員報告評獎經過



大會於新北市政府舉行

陳吉紀先生率領宇泰顧問工作團隊負責之國內外重大港灣工程：

- 台灣水泥（股）公司和平工業區用港工程
- 長榮海運（股）公司巴拿馬簡朗貨櫃轉運中心
- 台中港務局 921 地震 1~4A 碼頭災後重建工程
- 台中港務局第二期擴建工程 – 北防波堤延伸工程
- 台灣電力（股）公司興達電廠外海卸煤碼頭與連絡棧橋工程
- 萬海航運（股）公司高雄港 63-64 號碼頭改建及浚深工程
- 台灣港務公司高雄港 #68、#69 碼頭加深改建工程

110 年度當選會士 柯武德先生



柯武德先生

正修科技大學土木與空間資訊系副教授兼國際事務處副處長

成就簡述：

1. 2016 年取得日本土木學會（JSCE）會士，JSCE 國際活動合作獎首位得獎人。
2. 中華民國隧道協會「潛盾隧道設計及施工準則」研訂小組召集人與中華民國大地工程學會「沉箱設計施工準則」編修小組召集人。
3. 擔任本學會國際關係委員會委員與亞洲土木工程聯盟委員會委員，對會務推動助益良多。



各類獎牌琳瑯滿目



北科大研究生彬彬有禮、井然有序

110 年中國土木工程學會論文獎

Investigation of the internal stability and active earth pressure distributions of superimposed geosynthetic reinforced earth walls

(本文刊載於：中國土木工程學刊第 32 卷第 2 期第 171-186 頁)

洪汶宜 / 國立中央大學土木工程學系教授

范日方 / Graduate Engineer - Transport & Water GHD Pty Ltd

王信偉 / 勁鋁企業有限公司經理

論文摘要：

近年來大地工程結構物的發展日益興盛，以擋土系統的發展來說，依據結構類型及勁度大小可將加勁擋土結構物分成重力式擋土牆、堆疊式石牆、預鑄牆面擋土牆、蛇籠及加勁擋土牆等。加勁擋土牆可用來保護及穩固高速公路、碼頭或軍事基地等重要的結構物，且基於牆面坡度設計考量，加勁結構物可以分為單階或多階式擋土牆，而雙階式加勁擋土牆因施工容易且承載性能優異，近十幾年來也被廣泛使用。雙階式加勁擋土牆多依據現場幾何條件與理論或經驗的土壓力分布進行設計，本研究的目的為釐清雙階式加勁擋土牆中的力學機制、破壞行為以及其內部穩定性分析，基於內部斷裂破壞行為的條件下，提供建議的修正側向土壓力法，以及加勁擋土結構物穩定分析法，應用於設計雙階式擋土牆的尺寸與穩定性評估。

能耗最佳化之鐵路班表調整模式

(本文刊載於：中國土木工程學刊第 32 卷第 2 期第 201-210 頁)

李宇欣 / 國立成功大學土木工程學系教授

盧立昕 / 研究員

論文摘要：

鐵路是一種高效率的運輸系統，具有高度之計畫性，必須在事前規劃班表及諸多計畫。然而實務上班表多僅考慮旅客需求、機車性能等因素，而未考慮執行所需之能耗，過往文獻亦多聚焦於極小化單一列車的能耗。為此本研究提出有系統之方法，在維持列車既有順序的前提下調整班表，以降低整體能耗。本研究首先使用多目標最短路徑模式求得列車的能源曲線，再以線性回歸歸納能耗與運行時間關係式，據以利用線性規劃模式調整班表。以臺鐵班表測試結果顯示，微幅增加列車運行時間，可有效降低班表能耗，顯示本研究具有實務運用價值。

氫氧化鈉和矽酸鈉溶液對爐石基無機聚合物工程性質之影響

(本文刊載於：中國土木工程學刊第 32 卷第 4 期第 351-358 頁)

張大鵬 / 國立臺灣科技大學營建系特聘教授

翁子軒 / 臺北市政府捷運工程局第一區工程處工程員

陳柏翰 / 國立臺灣科技大學營建工程系碩士

論文摘要：

本研究探討氫氧化鈉或矽酸鈉激發溶液對爐石基無機聚合物漿體工程性質之影響，以激發劑溶液之鹼爐比、莫爾濃度以及矽鈉比等三項配比因子作為配比設計之主要變數，試驗結果顯示：(1) 鹼爐比對新拌性質工作性影響最大，隨後依序為矽鈉比及莫爾濃度。(2) 模數 1.0 矽酸鈉溶液及氫氧化鈉溶液之莫爾濃度對凝結時間之影響最大，模數 2.0 矽酸鈉溶液之鹼爐比影響最大；(3) 矽鈉比對抗壓強度之影響權重最大，隨後依序為莫爾濃度及鹼爐比，最高 28 天抗壓強度為 109.38 MPa；(4) SEM 影像顯示氫氧化鈉激發後之聚合物呈現塊狀組織，而矽酸鈉激發之後聚合物呈現片狀結構。

以深度學習與建築資訊模型及虛擬實境技術探討室內聲音定位

(本文刊載於：中國土木工程學刊第 32 卷第 5 期第 383-392 頁)

張智雄 / 國立中央大學土木所博士候選人

談家成 / 國立中央大學土木所博士候選人

王如觀 / 國立中央大學土木所博士候選人

吳佰餘 / 國立中央大學土木所 博士候選人

周建成 / 國立中央大學土木系教授兼教務處註冊組組長

論文摘要：

在救災時於建築物室內可快速定位為相當重要的需求。隨著軟體技術演進，應用建築資訊模型與虛擬實境技術已能模擬真實世界建築物之 3D 視覺場景與聲響效果，例如人物在虛擬世界漫遊可感受到聲音吸收、散射、傳輸與距離等特徵。因此，本研究旨在將某建築空間建構虛擬複本，前處理虛擬空間各點聲音資料，以深度學習法進行聽音辨位，將來能以實際空間任一點聲音值，透過演算法預測室內位置。最後總結研究成果在室內定位應用與未來方向。

台灣 BIM 指南應用成本分配方式之研究

(本文刊載於：中國土木水利工程學刊第 32 卷第 6 期第 531-542 頁)

余文德 / 朝陽科技大學特聘教授
張憲寬 / 朝陽科技大學博士後研究員
王明德 / 台賓科技公司資深顧問
邱奕聖 / 桃園市住宅發展處副處長

論文摘要：

過去有關 BIM 應用成本之估算原則和分配方式之研究極為少見，若沒有這樣的原則，業主很難在有限的預算下選擇最適當的 BIM 應用項目，在 BIM 專案執行過程中也缺乏進度付款的依據。為解決上述問題，本研究應用層級分析方法 (AHP)，以內政部建築研究所「台灣 BIM 指南」中所定義的 25 項 BIM 應用為對象，蒐集桃園市 10 件公營住宅之實際 BIM 應用案例資料，並訪談 50 位業界實務參與者，作為分析 BIM 應用所需之相對成本估算與預算編列依據。本研究依據問卷分析出成本分配結果，據以在 BIM 應用服務預算編列方面提出設計階段及施工階段編列直接工程費之比例建議。本研究所提出方法對於業主單位之專案承辦人員，在編列 BIM 應用服務預算時，提供了一套實用之預算分配與編列方式參考。

110 年中國土木工程學會學生獎學金

曾養甫獎學金

陳冠亦 / 國立臺灣大學土木工程學系
黃奕宸 / 國立成功大學土木工程學系

家源獎學金

李詠微 / 逢甲大學建設學院水利工程與資源保育學系

朱光彩獎學金

邱譯瑩 / 淡江大學土木工程學系
廖姿渝 / 國立中興大學土木工程學系



中興社程禹紀念獎學金

蔡尚恩 / 國立陽明交通大學土木工程學系
黃翰萬 / 國立臺灣海洋大學河海工程學系
徐昊安 / 國立臺灣科技大學營建工程系
黃冠智 / 國立臺北科技大學土木工程系
曾彥宇 / 國立高雄科技大學土木工程系
吳莉甄 / 國立雲林科技大學營建工程系
鄧宇雯 / 中原大學土木工程學系



中國土木工程學會獎學金

賴俊嘉 / 國立暨南國際大學土木工程學系
劉震野 / 國立高雄大學土木與環境工程學系
馮馨柔 / 國立中央大學土木工程學系
黃炳翔 / 國立嘉義大學土木與水資源工程學系
林庭安 / 國立宜蘭大學土木工程學系
李若縉 / 國立屏東科技大學土木工程系
張旻軒 / 淡江大學水資源及環境工程學系
林琦珍 / 建國科技大學土木工程系
許嘉雯 / 朝陽科技大學營建工程系
郭彥合 / 中華大學土木工程學系
蔡佳勳 / 陸軍專科學校土木工程科
劉明維 / 陸軍軍官學校土木工程學系



2021 年工程數位創新應用獎「競賽頒獎

興達電廠燃氣機組更新改建計畫冷卻循環水系統工程

泛亞工程建設股份有限公司

台灣電力股份有限公司核能火力發電工程處南部施工處



台北都會區捷運系統

萬大 - 中和 - 樹林線 (第二期工程) 細部設計

台北市政府捷運工程局



出火橋下游野溪整治工程

行政院農委會水土保持局台南分局



161kV 大潭新 - 林口線地下電纜管路統包工程 (第二工區)

中興工程顧問股份有限公司

台灣電力股份有限公司輸變電工程處北區施工處



新北市 3D 智慧管線查詢及管理系統建置

亞新工程顧問股份有限公司

新北市政府養護工程處



桃園捷運綠線 GC01 標高架段土建統包工程

美商同棧國際工程顧問股份有限公司台灣分公司

桃園市政府捷運工程局



桃園市共同管道設施設備管理系統行動裝置智慧化應用

桃園市政府養工處



109 年度道路預約式契約維護修繕工程 (第 1 標)

聖東營造股份有限公司

台北市政府工務局新建工程處



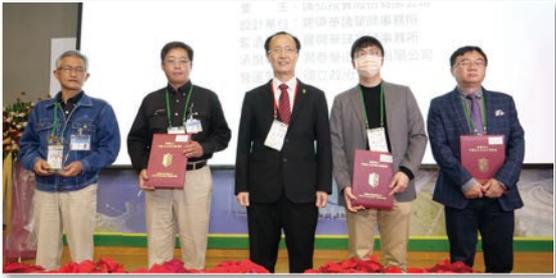
「110 年工程環境與美化獎」競賽頒獎

【工程美化與景觀類】

首獎工程

國立政治大學指南山莊校區達賢圖書館新建工程

業 主：匯弘投資股份有限公司
 設計單位：羅興華建築師事務所
 監造單位：羅興華建築師事務所
 承攬廠商：潤泰營造股份有限公司
 營運管理：國立政治大學



特優工程

高雄港第三船渠大港橋新建工程

業 主：臺灣港務股份有限公司
 設計單位：台灣世曦工程顧問股份有限公司
 監造單位：台灣世曦工程顧問股份有限公司
 承攬廠商：宏華營造股份有限公司
 營運管理：臺灣港務股份有限公司



CJ930 臺中捷運烏日文心北屯線 G10 至 G17 站及全線電梯 / 電扶梯區段標工程

業 主：臺北市政府捷運工程局第二區工程處
 設計單位：中興工程顧問股份有限公司
 監造單位：臺北市政府捷運工程局第二區工程處土木第六工務所、
 臺北市政府捷運工程局第二區工程處水環第二工務所、
 臺北市政府捷運工程局機電系統工程處電扶梯工務所
 承攬廠商：大陸工程股份有限公司
 營運管理：臺中捷運股份有限公司



臺北市立大學圖書館改建工程

業 主：臺北市政府工務局新建工程處
 設計單位：王正源建築師事務所
 設計監造：王正源建築師事務所
 承攬廠商：遠碩營造股份有限公司



台 14 線 40K-45K 景觀改善工程

業 主：交通部公路總局第二區養護工程處
 設計單位：榆園環境設計有限公司
 監造單位：交通部公路總局第二區養護工程處南投工務段
 承攬廠商：昌興營造有限公司
 營運管理：交通部公路總局第二區養護工程處



光復馬太鞍吉利潭周邊環境改善工程

業 主：行政院農業委員會水土保持局花蓮分局
 設計單位：創源工程技術顧問有限公司
 監造單位：創源工程技術顧問有限公司
 承攬廠商：東新營造有限公司



大園區橫山書法公園暨書法藝術館興建工程

業 主：桃園市政府新建工程處
 設計單位：潘天壹建築師事務所
 監造單位：潘天壹建築師事務所
 承攬廠商：志偉營造股份有限公司



優等工程

臺鐵林口線路廊活化工程

業 主：桃園市政府捷運工程局
 設計單位：台灣世曦工程顧問股份有限公司
 監造單位：台灣世曦工程顧問股份有限公司
 承攬廠商：尚谷營造有限公司、日富營造股份有限公司、
 稻田營造股份有限公司



環狀線 CF640 區段標工程

業 主：臺北市政府捷運工程局第一區工程處
 設計單位：中興工程顧問股份有限公司
 監造單位：臺北市政府捷運工程局第一區工程處土木第一工務所、
 臺北市政府捷運工程局第一區工程處水環第一工務所
 承攬廠商：皇昌營造股份有限公司
 營運管理：臺北大眾捷運股份有限公司



台 8 線南勢至天輪公路景觀改善工程

業 主：交通部公路總局第二區養護工程處
 設計單位：交通部公路總局第二區養護工程處谷關工務段
 監造單位：交通部公路總局第二區養護工程處谷關工務段
 承攬廠商：錦澄企業有限公司



淡海輕軌運輸系統計畫第一期統包工程（藍海線）

業 主：新北市政府捷運工程局
 專案管理：中興工程顧問股份有限公司
 設計單位：中國鋼鐵 / 聯鋼營造工程股份有限公司
 監造單位：亞新工程顧問股份有限公司
 營運管理：新北大眾捷運股份有限公司



臺北市文山區永建國民小學遷校校舍新建工程

業 主：臺北市政府工務局新建工程處
 設計單位：戴嘉惠建築師事務所
 監造單位：戴嘉惠建築師事務所
 承攬廠商：世久營造探勘工程股份有限公司
 營運管理：臺北市文山區永建國民小學



新店區中央新村北側社會住宅新建統包工程

業 主：新北市政府城鄉發展局
 專案管理：中興工程顧問股份有限公司
 設計單位：九典聯合建築師事務所
 監造單位：王正源建築師事務所
 承攬廠商：皇昌營造股份有限公司



花蓮南濱海岸改善計畫

業主：經濟部水利署第九河川局
設計單位：經濟部水利署第九河川局
監造單位：經濟部水利署第九河川局
承攬廠商：友上營造有限公司
運營管理：經濟部水利署第九河川局



大湖鄉石門水環境體驗周邊環境改善工程

業主：行政院農業委員會水土保持局臺中分局
設計單位：泰禹工程技術顧問有限公司
監造單位：泰禹工程技術顧問有限公司
承攬廠商：營豐營造有限公司



109 年度臺北水源特定區 2 號集水區治理工程

業主：經濟部水利署台北水源特定區管理局
設計單位：紘業水土保持技師事務所
監造單位：紘業水土保持技師事務所
承攬廠商：承盈營造有限公司
運營管理：經濟部水利署台北水源特定區管理局



「110 年工程環境與美化獎」競賽頒獎

【工程生態與景觀類】

首獎工程

三層坪農塘及周邊綠環境營造工程

業主：行政院農業委員會水土保持局臺北分局
設計監造：昇暉工程顧問有限公司
承攬廠商：晉通營造有限公司
運營管理：宜蘭縣員山鄉公所



特優工程

台 9 線南迴公路安朔至草埔段 C1 橋梁標新建工程

業主：交通部公路總局西部濱海公路南區臨時工程處
設計監造：台灣世曦工程顧問股份有限公司
承攬廠商：根基營造股份有限公司
運營管理：交通部公路總局第三區養護工程處



出火橋下游野溪整治二期工程

業主：行政院農業委員會水土保持局臺南分局
設計監造：剡盛工程顧問有限公司
承攬廠商：啟輝營造有限公司



四角林野溪整治工程

業 主：行政院農業委員會水土保持局臺中分局
 設計監造：亞際工程技術顧問有限公司
 承攬廠商：高振營造有限公司
 營運管理：東勢林場



福德坑溪上游野溪災害防治二期工程

業 主：行政院農業委員會水土保持局臺北分局
 設計監造：山立工程顧問有限公司
 承攬廠商：正芳營造有限公司



優等工程

雙溪區牡丹溪五分橋上游災害防治工程

業 主：新北市政府農業局
 設計監造：豐華工程顧問股份有限公司
 承攬廠商：唯峰營造股份有限公司



打鐵坑溪櫻花隧道旁野溪治理工程

業 主：行政院農業委員會水土保持局臺北分局
 設計監造：森堡工程技術顧問有限公司
 承攬廠商：勇翔營造有限公司



桃園市楊梅區人本示範道路 - 校前路 (秀才路至環南路段) 道路多目標改善工程

業 主：桃園市政府養護工程處
 設計單位：和建工程顧問股份有限公司
 監造單位：和建工程顧問股份有限公司
 承攬廠商：傑瀚營造有限公司



卑南溪卑南堤防環境改善工程

業 主：經濟部水利署第八河川局
 設計單位：黎明工程顧問股份有限公司
 監造單位：經濟部水利署第八河川局卑南工務所
 承攬廠商：鴻程營造有限公司
 營運管理：經濟部水利署第八河川局



三芝樂天社區田心子農田漫遊改善工程

業 主：新北市政府農業局
 設計單位：紘業水土保持技師事務所
 監造單位：紘業水土保持技師事務所
 承攬廠商：富國營造有限公司
 營運管理：新北市三芝區公所



麗太溪東富田橋上游整治工程

業主：行政院農業委員會水土保持局花蓮分局
設計單位：台典工程顧問股份有限公司
監造單位：台典工程顧問股份有限公司
承攬廠商：東誠營造有限公司



南科高雄園區滯洪池 B 綠化及生態營造二期工程(L28 標)

業主：科技部南部科學園區
設計監造：台灣世曦工程顧問股份有限公司
監造單位：台灣世曦工程顧問股份有限公司
承攬廠商：旭德營造工程有限公司
營運管理：科技部南部科學園區



新店區雙峰路電信桿 (青潭幹 150 支 23) 旁道路災害復建工程

業主：新北市政府農業局
設計單位：銘美工程技術顧問有限公司
監造單位：銘美工程技術顧問有限公司
承攬廠商：振崧營造有限公司

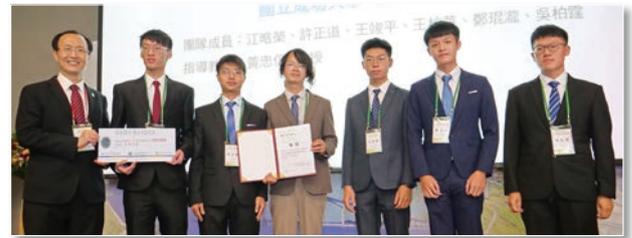


2021 全國大專院校工程創意競賽

金獎 抱歉喔！沒注意到鐘聲

國立成功大學土木工程學系

團隊成員：江皓榮、許正道、王竣平、王柏華、鄭琨瀧、吳柏霆
指導教授：黃忠信 教授



銀獎 以獎金微生

國立台北科技大學土木工程系

團隊成員：李思穎、黃詩涵、蕭琮敬、廖芝萸
指導教授：陳立憲、杜敏誠 教授



銅獎 Apollo Window

國立台灣科技大學營建工程系

團隊成員：孟哲霆、Ulf Erik Strübing Moreno、Daniela Bogarin、Joquin Maldonado
指導教授：楊錦懷 教授



銅獎 梅花火雞肉飯

國立嘉義大學土木與水資源工程學系

團隊成員：吳峻毅、陳炯亘、林珈汝、劉品呈、陳晉笙
指導教授：劉玉雯 教授



110 年土木水利工程論壇

論壇一

土木工程論壇



主持人：朱惕之 副秘書長 / 新北市市政府

專業簡述

建築計畫、營建管理、使用管理、道路工程

新北市城市翻轉人本環境改善計畫

詹榮鋒
新北市市政府工務局局長

簡報公開

摘要

隨著時代演進與都市發展，城市時常衍生許多交通壅塞與空氣汙染等問題，因而世界各大先進國家開始推動人本環境與綠色運具，亦呼應著政府應朝向「人本環境」概念發展，不應再侷限以車行為交通主軸的既定印象，改變以「人」作為城市建設之核心根本。

新北市透過「城市加減法」，以「減法」作為主軸，在建設的同時將城市不該存在與不必要的空間進行整理，包含五股垃圾山整頓、低度使用妨礙人行環境的陸橋拆除等案件，再以「加法」推動建設，給市民更安全的居住空間，達到宜居城市目標。

侯市長上任後，先從翻轉市政團隊內在思維，以五股「夏綠地」為例，改變垃圾山的沈痾，化不可能為可能，將大破大立的新思維，塑造行政團隊的新文化，形成推動翻轉市政的新力量。

新北市近期美學概念導入，分別於市區北端「淡水亮點計畫」、核心區「板橋美學示範基地」及市區南端「三鶯文創整合計畫」開始綻放新城市美學的魅力，將城市美麗外在的改變，並透過市政資源盤點、分工合作實現及全體齊心合力，以人本新思維，打造新北宜居城市。

金門大橋海上施工技術與挑戰

柯明佳
台灣世曦工程顧問股份有限公司計畫經理

簡報公開

摘要

金門大橋銜接大、小金門島，為台灣首座大規模跨海橋梁，橋址地質為花崗岩地盤堅硬，岩盤深度變化大，大口徑基樁貫入岩盤，且水深達 23 m，又金烈水道海流快速、東北季風強勁，施工面臨艱鉅挑戰。又鋼箱圍堰為台灣首見水下工法，過程中須克服浮力與滲水問題。

金門大橋主橋高梁穗心造型墩柱由於線條複雜、結構線形變化大；而橋塔呈現內外不同斜率直線漸變收頭，結構需搭配外置預力鋼殼及內置預力鋼棒等複雜界面。如何準確呈現整體橋型結構之優美線條，並在海上環境的背景管理作業空間得以完美呈現此造型橋墩柱，為工程一大挑戰。

大橋目前已進入最後橋塔及節塊外置預力鋼索上纜併行作業階段，整個施工過程中除了工程技術與環境因素的困難克服外，有關大型船機、設備之選用及工法規劃實為本工程成敗之關鍵。本議題主要分享金門大橋之施工規劃與挑戰，期透過金門大橋工程經驗，未來可作為其他海域工程之參考。

離岸風電土建之施工挑戰

蔡殿豐
台電海域風電施工處經理

簡報公開

摘要

為響應政府綠色能源政策，台電公司於 103 年獲得能源局離岸風電示範獎勵資格，於 104 年底完成海氣象觀測塔、110 年完成離岸示範風場 21 部風力發電機組，本演講就示範風場施工階段在土建部分所遭遇的問題作扼要的概述，包括 Covid-19 疫情嚴峻，海上工作船外籍人員由商履申請、隔離直至出境期間的掌控回報等防疫管制措施；

鋼管樁打設時因地質軟弱發生滑樁之處理及探討；我國試驗室對連結鋼管樁與套筒桁架之超高壓無收縮水泥砂漿強度試驗能量問體之探討；水下灌漿應注意事項及遙控潛水無人載具（ROV）之水下監控問體之探討。

我國離岸風電仍在萌芽階段，藉此論壇經驗回饋並相互交流，以期離岸風電永續發展。

台南圖書館及桃園美術館之結構設計



張盈智

築遠工程顧問有限公司負責人兼總經理



簡報公開

摘要

◆ 台南市立圖書館總館結構體採用鋼骨造二元系統（韌性抗彎矩構架 + 挫屈束制斜撐），地下室結構為鋼筋混凝土及鋼骨混合構造。藉由完整之立體梁柱構架來傳遞垂直力；以抗彎矩韌性構架與 BRB 斜撐來抵抗側力（地震力與風力）。而支撐建物之柱是由 4 支圓鋼柱所組成，結構分析與一般單柱不同，運用專業結構程式 ETABS 分析得各柱承受之軸力、彎矩及剪力，再各別檢核組合柱及單柱之強度是否滿足需求。

由於建物量體由下至上逐層加大，因此外圍有 12.1 ~ 17.5 長之細長組合柱，為使鋼梁端應力能平順傳至鋼圓柱，設計時在組合柱梁翼板處，設置外加勁板，避免鋼圓柱太過細長造成軸力強度折減太多，將四支圓鋼柱連結，使柱有較佳之迴轉半徑。

◆ 桃園市立美術館新建工程，主要包含本館、兒童美術館及連接空橋三個部分。美術館地上結構體採用鋼造特殊同心斜撐配置鋼骨與鋼筋混凝土邊界構材（剪力牆），地下室則採用鋼筋混凝土結構系統。

系統以立體鋼結構梁柱構架傳遞垂直力，而美術館核心展覽空間則以密集桁架系統達成大跨距無柱空間；同心斜撐及鋼筋混凝土剪力牆則作為抵抗側向力（地震力及風力）之用，結構短向結構屋頂板呈現 30 度斜率坡度，由地表面開始朝向高側抬升，除承擔垂直向載重外亦須視為側力系統之一部分。

同時藉由上述各種高勁度側力系統最大限度分擔地震力，外露之結構圓柱可將外尺寸減小至法規限度，藉此得到空間通透感及建築師表現意象。

論壇二

水利工程論壇：防汛智慧化的運用與思維



主持人：陳純敬 副市長 / 新北市政府

學歷

東吳大學法學碩士

美國北卡州立大學土木工程系營建管理碩、博士
臺灣大學農業工程學系學士

經歷

台灣世界展望會會長

內政部、交通部政務次長

行政院公共工程委員會副主任委員

安信商務律師事務所資深顧問

安信國際風險管理公司經理

交通部國道新建工程局主任秘書、第二、第三區工程處處長

交通部北部第二高速公路工程處副處長

交通部南宜快速公路工程籌備處副處長

國立臺灣科技大學營建系副教授

氣象預報新進展



賈新興

台灣整合防災顧問公司總監



簡報公開

摘要

聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於 2021 年 8 月 9 日公布氣候變遷第六次評估報告（IPCC AR6）- 第一工作小組報告。報告指出極端高溫、豪雨、部分地區的乾旱的發生頻率與強度增加、強烈熱帶氣旋比例增加。世界氣象組織（WMO）指出，這次 2021 年西歐國家在 2 天內降下相當於 2 個月的雨量，極端氣候變化事件造成嚴重洪水災情。今年 6 月 4 日午後大雷雨，台大公館 3 小時驚人雨量。2019 年 7 月 22 日、2018 年 9 月 8 日及 2015 年 6 月 15 日，雙北均因午後熱對流旺盛下起暴雨，造成雙北多處成汪洋。另外，8 月 6 日盧碧颱風引進西南氣流，造成中南部嚴重災情。然而，去年梅雨季後至今年 5 月底前，卻遭逢百年來最嚴峻乾旱。

面對全球暖化問題日趨嚴重，極端天氣和氣候事件發生頻率與強度增加，強烈熱帶氣旋比例增加等問題。氣象科學的進展，要如何面對及解決這些棘手的問題呢？在大數據、AI、數位分身（Digital Twins）及元宇宙（Metaverse）的大浪來襲下，氣象預報的新進展到底是如何呢？

韌性城市防汛新思維



宋德仁

新北市政府水利局局長

重要事蹟

1. 服務經濟部水利署水源特定區管理局時期（74.12 ~ 99.1）：使翡翠水庫歷年來「平均年淤積量約 40 萬立方公尺」，遠低於「年計畫淤積量 117 萬立方公尺」，大幅增加水庫蓄容量並延長水庫壽命；另水庫「水質優養指標」歷年來均維持在「貧養與普養之間」，有全國最佳水質美譽，使「共飲翡翠水」為大台北都會區民眾最大期盼。
2. 服務新北市政府時期（99.1 ~ 迄今）：以打造「六水新北 嚮居水都」為目標，已完成及推動的各項工作成果概述如下：
 - (1) 水安全（治水）
 - 完成新北市「四大黑龍江」三重溪美大排、新莊中港大排、蘆洲鴨母港溝、板橋湳仔溝之積淹水整治與河川環境營造工程。
 - 完成 126 件排水改善工程、127 公里雨水下水道建置及多項重大積淹水改善，包括新店區大鵬堤防及橫移門、三峽區、樹林區、中和區排水改善工程，解決新店溪最後一個防汛缺口及北大特區、中和環球購物中心等 62 處積淹水問題。
 - 首創「市區抽水站預抽」、「提早起抽」機制，可增加市區排水約 10 萬 6,000 立方公尺蓄洪空間，大幅降低積淹水機率。
 - 108 年領先各縣市首創成立新北市偵水志工隊，並增設強化三級開設機制，有效應對突發降雨事件。
 - (2) 水清淨（清水）
 - 督導完成新北市一百萬用戶接管里程碑，全國用戶接管數第一名、污水處理率達 89.77%。大幅改善淡水河系水質及民眾居家環境衛生，顯著提升市民生活品質。
 - 完成日處理量 2 萬 8,500CMD 之江翠礮間處理廠及日處理量 6000CMD 之光復礮間處理廠，利用大自然生態工法輔助淨化新店溪水體水質。
 - 完成土城、新海、華江、沙崙、西盛、塔寮坑等 6 處污水截流站，總計可截流 4 萬 85,000CMD 晴天污水，改善大漢溪水體水質。
 - 完成三峽 MBR 薄膜污水處理廠，每日可處理 5,500CMD 生活污水，解決北大特區生活污水問題。
 - 完成三鶯水資中心新建與淡水水資中心擴建，每日處理 4 萬 2,000CMD 生活污水，提升三鶯、淡水地區居住環境衛生及改善淡水河之水質。

- 完成大漢河流域城林、浮洲、新海第三期及華江等 4 處人工溼地，可處理 5 萬 5,500CMD 晴天污水量，改善大漢溪水體水質。
 - 協助推動完成板二供水改善計畫，改善新北市民用水穩定度及品質。
 - 推動新店區花園新城自來水上山，解決社區 1280 戶長期飲用簡易自來水問題。
- (3) 水育樂（親水）
 - 完成開闢新北市河濱公園 8 大主題園區共 1,382 公頃，建構 202 公里長河濱自行車道路網，48 處休閒場地、282 座運動設施、15 個自行車租借站，提供多元服務滿足民眾需求，使新北市轄河濱公園使用人次每年高達 2 千 6 百萬人次以上，提供大台北都會地區民眾平日通勤及假日休憩新去處。
 - 完成等 5 座以人本考量，專供人與自行車通行景觀橋，成為當地地景地標，並完成跨堤 12 座友善電梯，打造無障礙環境，讓民眾便利安全享受河濱公園建設成果。
 - 新北都會公園利用堤坡發揮創意完成地景溜滑梯、滑草場等設施，提供民眾不同河濱體驗，扭轉早期二重疏洪道藏汙納垢的印象，並於 108 年榮獲全球卓越建設獎公部門基礎建設 / 環境示意工程類銀獎的肯定。
 - (4) 水滲透（透水）：
 - 全國首創制定「新北市透保水自治條例」，法規標準「80mm/hr 零流出」全國最高，自 100 年起審查及核發約 7000 件開發建案，共增加 140 萬立方公尺透保水量（相當 560 座標準游泳池），有效提高都市抗洪能力。
 - 完成 7 處透保水示範工程，合計 1 萬 8,100 立方公尺貯留水量，並以每年 2 座為目標，帶頭示範公有建物設置透保水設施，以向公、私部門推廣透保水經驗，成效卓越。
 - (5) 水生態
 - 都市型河川大窠坑溪、藤寮坑溝，均為三面光混凝土的溝渠，透過近自然河川營造方式，期能逐步恢復生態功能。自然型河川有大屯溪、八連溪以及公司田溪，改善護岸及固床工落差，符合洄游生物需求及棲地營造，期為市民營造優質的河川生態環境與優質親水空間。
 - (6) 水文化
 - 在基礎水利建設達成階段性目標後，率先啟動水文化倡議，並融入新北河川治理工程，讓水文化反應在水環境與住民意識中。目前正執行的淡水公司田溪，沿途盡是淡水開發史的遺跡，其中滬尾水道工程，為台灣帶來了第一次的自來水經驗。位於樹林的後村圳，去年調查出深埋地下已久的舊引水箱涵，成功引進清淨水源，為水環境的營造增添新元素；今年將持續深化相關文史的盤點外，並進行貴子坑溪、瓦寮溝以及湳仔溝等水文化的重新認識，融入水環境營造的具體行動，讓市民更認識家園、更增加對新北市的認同感。

水資源物聯網 - 為水利產業注入豐沛永續能量



賴建信
經濟部水利署署長

專業簡述

賴博士擔任經濟部水利署署長，綜整全國水利業務，拓展學術研究，致力人才培育；為因應氣候變遷挑戰，以建構永續與韌性臺灣為目標，完成再生水資源發展條例、用水計畫審查與逕流分擔及出流管制等法制作業，推動前瞻水環境建設計畫、促成水利署與各農田水利署管理處、中科院、氣象局、國家災害防救科技中心及台積電等單位，發展合作夥伴關係，並落實行政透明、資訊公開、公私協力及水利產業永續發展等工作。此外，賴署長致力推動國家各項重大水利建設計畫，注重工程品質及工地良好職業安全環境的提升，屢獲行政院公共工程金質獎及勞動部金安獎的肯定。賴署長並於 2021 年榮獲中國工程師學會傑出工程師獎。

論壇五 工程教育論壇



主持人：宋裕祺 理事長
中國土木水利工程學會
臺北科技大學特聘教授

專業簡述

橋梁工程、地震工程、結構最佳化設計、人工智慧在結構工程之應用

Our World Our Work 我們的世界，我們的工作



莫仁維
亞新工程顧問股份有限公司董事長

摘要

「我們的世界，我們的工作」演講的主旨在於探討以工程教育培養未來的工程師因應氣候變遷、科技擾動、以及技術服務商業化等全球性挑戰時，知識、技術、態度及價值的重要性及需求。演講部分內容擷取了 ASCE 出版的「The Vision for Civil Engineering 2025」及「Civil Engineering Body of Knowledge Preparing the Future Civil Engineer Third Edition」、ICE 發行的「Engineering Rebellion」、IEA 出版的「Graduate Attributes & Professional Competencies」，以及 the Chronicle of Higher Education 的評論紀要「Holistic Engineering」等文件或文章的重點。對廣博的知識、批判性的思考、溝通技巧與領導技術的強調，以及對自覺、同理心、職責、專業倫理、以及持守核心價值，不因誘惑或壓力而妥協，不以利益決定自己的言行等道德基礎的重要性說明構成本演講的主軸。本演講最後以面對複雜的全球性挑戰以及由常態性的波動與不確定性所形成的新常規時，培養未來的土木工程師所涉及議題的行動需求作為結論。

工程教育的未來想像



謝尚賢
國立臺灣大學土木工程學系教授兼系主任



簡報公開

摘要

過去 20 多年的科技發展突飛猛進，人類在地球上的居住環境也受到持續加速的氣候變遷的嚴峻挑戰，社會經濟的發展也隨之變動加劇，未來 30 年的世界雖難預知，但可確定的是，一定會與今天的世界非常不同，屆時回頭看今天，很可能就像我們現在回頭看 60 年前的世界一樣。而教育是培養未來所需人才的關鍵投資，必須要有足夠的前瞻性與多元性，才能讓人類社會克服未來危機並永續進步，工程教育當然也不例外。在本演講中，演講人試圖提出對人居环境與社會經濟的未來可能的一些想像，及相對應所需面對的挑戰，來檢視未來世界對工程人才的需求，並藉以討論工程教育該如何做出因應與準備，期待關心工程教育的論壇參與者們能集思廣益，為更前瞻及更優質的工程教育提出建言。

工程人的人文素養



顧寶鼎

立恩威國際驗證股份有限公司首席工程師



簡報公開

摘要

生物學之父達爾文在他的自傳中說：「一直到三十歲，各體的詩都使我感到甚大愉快，在學校時我對莎士比亞曾發生濃厚興趣，尤其是他的歷史劇，但現在許多年來我不能忍受再讀一行詩。最近讀莎士比亞，竟令我作嘔。我的心變成了一架機器，何以我欣賞藝術的腦趨於貧弱，我真是莫名其妙。」這樣的大科學家如此走火入魔，很值得同情。我是學理工的，大概知道達爾文的心路歷程。我們作艱深研究時，全副心思不得不放在課題上，這是自己作不了主的，必然如此，實在是無任何閒情。他的課題又是當世第一等的難題，他應該是幾十年無休止的作研究，所以變成了他口中的「莫名其妙」。達爾文等於是自殘，把他的詩情切掉了。

以上是許多工程人面對之共同問題，太專注於自身工作而對人文素養不知如何著手。敝人閒暇之餘以寫作文史部落格「一言九鼎文史筆記」為興趣，目前有粉絲一萬五千餘人，此次演講將分享我對人文素養的理解。藝術對人生的影響從嬰幼兒即始，音樂如「寶寶的莫扎特」可幫助幼兒腦部發展眾所周知，音樂對人生之影響可見一斑。演講中將對東西方歷史文化作一簡略概括性描述，配合工程人熟知之科學思維模式，對人類目前面臨之大氣暖化問題作一探討。科技發展至今，雖對人類福祉有不可磨滅之貢獻，但也對永續發展造成重大威脅。工程人應從公式、運算之中擴大出來，對世界整體培養出人文關懷。如此，工程人不僅能對工業發展奉獻，更應有知識分子之原本擔當，以人文面向關懷世界，對人類做出更大贡献。

論壇六

先進技術論壇



主持人：高宗正 副董事長
亞新工程顧問公司
先進技術委員會主任委員

專業簡述

工作生涯持續推動資訊科技於土木水利工程應用，北捷局成立之初除負責建立捷運建設管理資訊系統外，並率先推動 GIS、CAD、GPS 等應用於公共工程規劃設計與施工等作業，民國七十八年帶領北捷資訊團隊自力開發完成國內第一套中文化工程專案管理系統，自民國八十年起即參與營建自動化相關推展工作。近年積極推動公私部門營建工程的 BIM 及各項資訊科技與數位化工程應用領域之發展。

從工人智慧到人工智慧 — 看土木產業之發展方向



韓仁毓

國立臺灣大學土木工程學系教授

國震中心與臺大土木系合設 AI 中心副主任



簡報公開

摘要

土木工程為國家重要產業，於經濟發展初期在國家基礎設施建設上扮演重要角色。然而隨著國家基礎建設漸次完善，加上土木工程產業長期以來所提供為高度客製化產品，相當仰賴專業人員之經驗累積，對於新技術之導入較無迫切需求，也因此整個工業化過程中逐漸落後其它產業，並加深大眾對於土木產業之傳統刻板形象。反觀其它工業領域，隨著自動化與資訊化的腳步，早已營造出科技產業之新氣象，而在人才有限且自由市場機制下，落後的薪資水準與產業形象正成為土木產業吸引人才與永續經營的最大危機。然而這樣的危機或許可視為土木工程認真面對產業技術創新提升最好的動力來源，配合近年逐漸成熟的人工智慧技術，其特性與土木工程強調經驗傳承不謀而合，倘若能將土木工程人員長期累積經驗的過程轉移給電腦進行訓練學習，將能利用智慧化資訊技術取代許多重複且繁瑣的工作，讓土木工程人員更有效率且精準的執行業務。本演講透過人工智慧技術現況與特性的簡介，並配合幾個土木工程智慧化應用案例分享，希望可以讓土木人思考探索土木工程領域更多的創新技術發展方向，並重新檢視土木工程產業對於人才培養以及技術發展的策略，讓這個逐漸老化且人才嚴重流失的重要產業能有機會扭轉大環境劣勢，在提高待遇以吸引優秀年輕人才的同時，並妥善利用智慧新科技為土木產業累積能永續經營成長的技術價值。

營建業循環經濟的永續發展思維



何曉菁

弼達營建科技整合公司董事長
慧築營建科技公司副總



簡報公開

摘要

2021 年此時回頭看，全球經歷氣候變遷帶來的巨大災害，所引致的生命財產損失可觀。2021 年 6 月，國際組織樂施會 (Oxfam) 和瑞士再保險研究所 (Swiss Re Institute) 發布報告指出，如果 G7 經濟體沒有積極應對氣候變遷，致氣溫上升 2.6°C，則在 2050 年前每年將平均損失 8.5% 的 GDP，這將是新冠肺炎造成 GDP 損失的 2 倍。

歐盟於 2020 年中頒布永續分類標準 (Taxonomy) 定義「永續經濟活動」，主要旨在將金融市場資金導向永續經濟，並避免企業「漂綠」行為。其中 6 大環境目標框架之一即為「轉型至循環經濟」。

營建產業是屬於高耗能、高碳排、高度使用資源與廢棄物的產業，故我們對環境永續實在肩負著高度當責性。營建產業是否該共同思考提升對抗氣候變遷的方向和力道，在營運中積極布局及投入環境永續技術與人力，協助對抗氣候變遷和環境污染。

因應國際淨零排放或是再生能源 (綠電、風力發電...等) 的永續發展趨勢產業，不論從各項土木、建築基礎設備設施著手，營建產業可以積極運籌帷幄於如何運用策略及管理的手段，從規劃設計開始納入循環經濟的設計思維，以創新科技進行技術提升、進行跨領域的整合，從人才、供應鏈、施工面投入循環經濟思維應該是未來產業的新面貌與機會所在。

本次先進技術論壇中，提出可以國際標準的方法檢視與盤點，提供國際的循環經濟作法供參，希望能對營建產業循環經濟在永續發展下有所幫助，集結業界、學界及政府力量讓我們生存的環境更好。

統包工程智能化



韓榮裕

中鼎工程公司顧問與總經理特別助理
兼任創新研發長

摘要

在工業 4.0 的浪潮下，全球各產業紛紛引入先進的製造技術，結合物聯網、雲端運算、大數據、人工智慧等新一代資訊科技，將生產過程環節高度客製化及智慧化，以即時因應市場的快速變化。統包工程智能化的研究與開發，打造數位化、智能化工程平台，透過持續導入各種高科技的運用，在全球的工作串連愈來愈優化，專案的執行也更快、更好、更精準、更有競爭力。

統包工程智能化能帶來什麼優勢？

大幅改善統包工程執行各階段的工作模式，包括將設計、採購、建造、試車各階段獨立系統自動串連，並立即更新各階段的變動資訊，使工作串連更為優化，提升工作的效率、品質與安全性，同時輔助決策與管理、優化工程人員的工時配置，有效降低成本並避免工期延宕。

統包工程智能化為客戶帶來附加價值

統包工程智能化在提升工作品質及效率的同時，也可為客戶帶來附加價值。例如，在專案進行時之數位化工程資訊，除可讓客戶於專案規劃階段，透過虛擬工廠檢視工程細部設計，減少日後營運維修成本，也可提供客戶更佳的工程服務體驗。再者，將這些資料與 3D 模型做連結，還可建立 EPC 執行階段的數位雙生 (Digital Twin)；也就是建廠完成後，除了交付客戶實體工廠 (Physical Plant)，還可以數位交付 (Digital Handover) 方式移交虛擬工廠 (Virtual Plant)，並連結到客戶的維修保養及操作系統，打造工廠的數位雙生。此外，若客戶將後續維修保養工作交給我們，還可以利用 AR 及行動裝置等技術及工具，輔助工作進行，為客戶節省成本。

數位化創新工程應用與願景



游中榮

亞新工程顧問公司數位工程發展部經理
資訊委員會委員



簡報公開

摘要

近年來，營建產業競爭相當激烈，不符預期的預算與節高漲的原物料與缺工現象，如何提升效率一直是一個重要課題。數位創新、數位轉型是近年來各個產業積極推動的解決方案，大多數的產業都已經朝向數位轉型的方向前進，但營建產業的腳步卻遠遠落後於數位科技展業的發展。本次演講除了說明營建產業未來數年發展的可能趨勢、思考數位創新的主要關鍵之外，另外以顧問公司角度闡述營建工程數位創新的可能的應用，並以實際的應用成果與與會先進分享。

感謝 110 年年會 贊助、籌備及執行單位

感謝 贊助單位 (依筆劃排序)

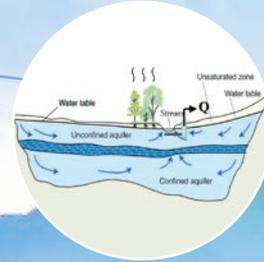
工信工程股份有限公司	行政院農業委員會水土保持局	財團法人中興工程科技研究發展基金會
中華民國土木技師公會全國聯合會	行政院農業委員會農田水利署石門管理處	財團法人中興工程顧問社
中華民國結構工程技師公會全國聯合會	行政院農業委員會農田水利署屏東管理處	財團法人臺灣營建研究院
中興工程顧問股份有限公司	行政院農業委員會農田水利署瑠公管理處	高雄市結構工程工業技師公會
內政部建築研究所	利德工程股份有限公司	華光工程顧問股份有限公司
日勝生活科技股份有限公司	邑菴工程顧問有限公司	新北市政府工務局
世鼎工程設計有限公司	亞新工程顧問股份有限公司	新北市政府新建工程處
台北市土木技師公會	和建工程顧問股份有限公司	新北市政府養護工程處
台北市結構工程工業技師公會	東和鋼鐵企業股份有限公司	新亞建設開發股份有限公司
台南市土木技師公會	林同棧工程顧問股份有限公司	經濟部水利署
台南市結構工程技師公會	泛亞工程建設股份有限公司	經濟部水利署南區水資源局
台灣世曦工程顧問股份有限公司	社團法人台灣省結構工程技師公會	經濟部礦務局
交通部公路總局	社團法人新北市土木技師公會	福清營造股份有限公司
交通部高速公路局	社團法人臺灣省土木技師公會	臺北市政府捷運工程局
交通部鐵道局	品興營造股份有限公司	遠揚營造工程股份有限公司
交廣工程顧問有限公司	皇昌營造股份有限公司	築遠工程顧問有限公司
宇泰工程顧問有限公司	桃園市土木技師公會	聯合大地工程顧問股份有限公司
安固工程股份有限公司	財團法人中華顧問工程司	駿宏工程顧問有限公司

感謝 現場花藝布置贊助 (依筆劃排序)

大彥工程顧問股份有限公司	安固工程股份有限公司	皇昌營造股份有限公司
中華民國土木技師公會全國聯合會	行政院農業委員會農田水利署桃園管理處	桃園市土木技師公會
中華民國工程技術顧問商業同業公會	行政院農業委員會農田水利署彰化管理處	桃園市結構工程技師公會
中華民國結構工程技師公會全國聯合會	邑菴工程顧問有限公司	泰興工程顧問股份有限公司
中華民國結構工程學會	亞新工程顧問股份有限公司	財團法人中興工程顧問社
中興工程顧問股份有限公司	和建工程顧問股份有限公司	財團法人臺灣營建研究院
世鼎工程設計有限公司	林同棧工程顧問股份有限公司	高雄市土木技師公會
台北市土木技師公會	泛亞工程建設股份有限公司	高雄市結構工程工業技師公會
台北市結構工程工業技師公會	社團法人中華民國大地工程技師公會	凱巨工程顧問有限公司
台南市土木技師公會	社團法人台灣工程技術顧問企業協會	揚盛工程顧問股份有限公司
台南市結構工程技師公會	社團法人台灣省結構工程技師公會	新北市結構技師公會
台聯工程顧問股份有限公司	社團法人新北市土木技師公會	臺中市結構工程技師公會
台灣世曦工程顧問股份有限公司	社團法人臺中市土木技師公會	臺灣區綜合營造業同業公會
巨廷工程顧問股份有限公司	社團法人臺灣省土木技師公會	遠揚營造工程股份有限公司
合肇工程設計有限公司	社團法人臺灣省水土保持技師公會	築遠工程顧問有限公司
宇泰工程顧問有限公司	金粟科技工程顧問有限公司	麗明營造股份有限公司
	柱中柱科技股份有限公司	

感謝 年會籌備及執行

新北市政府	新北市政府 水利局 宋局長德仁 及 同仁
陳副市長純敬	新北市政府 秘書處 饒處長慶鈺 及 同仁
朱副秘書長惕之	臺北科技大學 SYC 宋裕祺研究室
新北市政府 工務局 詹局長榮鋒 及 同仁	臺北科技大學 羅元隆教授研究室



地下水資源 專輯序言

專輯客座主編 徐國錦／國立成功大學資源工程學系 教授
李振誥／國立成功大學資源工程學系 教授

2020 ~ 2021 年台灣遭遇百年大旱，台灣的降雨量僅為常年平均降雨的 34.6%，北中南多個水庫蓄水量直降至百分比的個位數，地表水供水能力捉襟見肘。靠著限水、配水、移水，與開發新水源，苦撐到五月雨季來到，水庫水位回升，乾旱缺水危機才得舒緩。其中新水源主要是伏流水、建築工地地下水與抗旱井抽取的地下水，都是儲存於地下的水。地下水不僅是救命水，在世界各地均為重要淡水資源，在台灣也不例外。地下水不僅提供部分民生與工業用水，更是農業用水的主要支撐。近來氣候變遷旱澇加劇，加以新冠病毒盛行，防疫清潔均依賴潔淨水源，地下水肩負救急維生的關鍵角色也就更為吃重。地下水真的是鑽井即唾手可得，救急與日用永不耗竭的水源嗎？產官

界與民眾對地下水資源抱有聚寶盆的期待，同時也對地下水資源的永續及衍生災害持有疑慮。地下水資源若是使用正確與管理得當，水文循環可讓地下水資源源源不絕；反之，為近利圖便，以致山窮水盡，徒增環境破壞與自取滅亡的惡果。有鑑於此，「土木水利」會刊希望能編撰專輯，就地下水資源課題，以科普文字，宣導地下水資源的知識與專業觀點，提供工程師與專業人員正確觀念，期能永續地水資源，並啟發讀者對地下水的興趣，發揮資源利用的最大效益。非常感謝地下水界先進慷慨接受邀稿，撥冗撰寫文章，對地下水相關課題，提出科學、工程與實務的精闢看法，在此萬分致謝。🇯🇵



臺灣地區地下水庫之永續經營

張良正／國立陽明交通大學土木工程學系 教授

江崇榮／經濟部中央地質調查所 前所長

林燕初／經濟部中央地質調查所 技士

陳祐誠／國立陽明交通大學土木工程學系 博士後研究員

活躍的地質與沖積活動，給予臺灣地區多處透水性佳且豐厚的含水層，而這些含水層之地下水也供應臺灣地區全部需水量之 1/3，為相當重要之水資源，惟在整體營運管理上仍有很大的改進空間。因此，本文先從系統層面出發，即以地質的角度及較大的尺度，對臺灣各地區含水層之供水潛力進行論述，並對礫石層最豐厚之中部地區加強說明其成因。具有河川補注之含水層適合做為地下水庫進行水源調配，又稱為在槽地下水庫，本文並以名竹盆地為在槽地下水庫營運案例，進行數值模擬其供水潛能，結果顯示在 3 至 5 月平均每天抽水約 22 萬 CMD，其他月份不抽的情形下，年末地下水位皆能回升至原來之水位高，符合永續營運之精神，這些抽水量在枯水期是珍貴的水資源，且抽水期間河川流量之降低量亦小於原流量之 10%，此案例說明在槽地下水庫之可行性。系統層面論述完後，本文接著從管理層面提出地下水庫之定義，及包括滾動式管理等永續營運基本原則，以為地下水庫永續營運之依循。

前言

根據經濟部水利署對臺灣地區水資源供需之整體統計，地下水供應了臺灣全部需水量之 1/3，比所有水庫供水總合略多，雖然此項數據仍有一定之不確定性，尤其是在地下水供水量部分，惟仍足以看出地下水在整體水資源之重要性，在地面水不足的枯旱年更是最經濟可靠的抗旱水源，值得我們更多的關注與投入。另外，臺灣先天之水文與地質條件，地質脆弱、降雨集中與坡陡水急等因素，使得臺灣地區之沖刷與淤積活動劇烈，這使得地面河川構造物，容易破壞且維護成本高，以最重要之水庫為例，根據水利署對全台重要水庫淤積情形之統計，除翡翠水庫外，全台重要水庫之淤積量皆已達設計容量 1/3 以上^[1]，鑒於臺灣本島適合之壩址已相當難尋，加上其他環境與社會因素之影響，臺灣地區要再新建水庫已相當不易，因此高水庫淤積量乃是相當急迫的問題，雖然主管單位

已有相對的因應措施如石門水庫、曾文水庫及其他水庫之清淤及排淤等^[2,3]。惟臺灣地區地形地貌之變遷，雖是地質發展上之必然，但變遷的過程並不是細水長流型慢慢形成，而是一連串大型水文事件與造山運動的結果，相對於漫長的地質時間尺度，我們的歷史很短，未來仍有機會遭遇超過歷史紀錄之水文事件，因此目前規劃執行之清排淤工程，未來仍要經歷相當的考驗，而這種挑戰是臺灣地面水利工程的宿命。

活躍的地質與沖積活動，在挑戰地面水工構造物之餘，也給予臺灣地區多處透水性佳、儲水性能高且豐厚的沖積層。然而相對快速的沖積過程，亦使含水層之水文地質構造，相對於大陸型的含水層複雜甚多，含水層中土壤之異質性高且粒徑變化大，這使得在臺灣地區進行地下水營運，需有更多調查評估。

因此，本文先從系統層面出發，即以地質的角度及較大的尺度，對臺灣各地區含水層之供水潛力進行論

述，並對礫石層最豐厚之中部地區加強說明，再提出適合做為在槽地下水庫之含水層型態，並以數值模擬案例，說明將名竹盆地作為在槽地下水庫營運下之供水潛能，以驗證在槽地下水庫之可行性及效益。接著再從管理層面提出地下水庫之定義，及包括滾動式管理等永續營運基本原則，以為地下水庫永續營運之依循。

臺灣地區含水層供水潛力概述

含水層為地下水庫之基礎，因此本節將先以影響含水層蓄水及供水潛力的因子，包括面積、飽和厚度、補注、透水性及可出水率等為出發，對全台地區之含水層依各因子進行全面性之概述。

1. 含水層容積：含水層面積廣厚度大則容積較大，臺中盆地及屏東平原飽和含水容積大，供水量豐富穩定，反觀新竹苗栗地區因沖積礫石層面積及厚度小，供水能力有限。
2. 補注源：降雨量豐富且全年分配平均，則補注水源量大而且穩定，研究顯示河水從山區流入沖積扇入滲水約佔補注水量之四成，而含水層地表雨水入滲水約佔補注水量之六成^[4,5]。桃園中壢台地因古大漢溪被台北盆地三峽溪襲奪，失去原沖積河流補注，含水層只靠降雨入滲補注，嚴重影響其供水潛力。
3. 透水係數（流通性）：含水層透水係數影響地下水補注及流動速度，因此其反應含水層整體的流通性。未固結孔隙性含水層透水系數在 10^{-3} 到 $10^{-5}m/s$ 之間。地表及含水層透水係數高，則地下水補注和流動較佳。含水層透水係數 K 乘上飽和厚度 D 等於導水係數 T ，代表單位寬度含水層在單位水力梯度下的流通量，一口貫穿全含水層井的出水量與含水層導水係數成正比。沖積礫石層間隙填充砂，但常保有一些較大孔徑通路，因此其孔隙率和比出水率雖然比砂層的低，但是透水率卻常比砂層的高。嘉南平原主要沖積河川曾文溪、八掌溪等之集水區止於西部麓山帶砂頁岩分布區，沖積層以砂泥互層為主，甚少含礫石層，因此流通性不佳。反觀台北盆地、臺中盆地，濁水溪沖積扇，屏東平原、花東縱谷、宜蘭平原沖積之河川深入中央山脈亞變質或變質岩分布區，沖積層中礫石層分布廣，因此含水層流通性較佳（圖 1）^[6]。



圖 1 地質分區、地下水區及主要河川分布示意圖
(修改自何春蓀^[6])

4. 比出水率與蓄水係數：比出水率 (S_y) 為含水層非受壓 (unconfined) 區地下水位單位升可存入、降可排出的水量，未固結孔隙性含水層比出水率約 0.15 到 0.30 之間，比出水率大則含水層可排出水量較大，出水性能佳。在沖積扇頂附近巨厚礫石層組成非受壓含水層，至扇央漸相變為砂和泥之互層而呈現受壓 (confined) 狀態，受壓含水層蓄水係數 (S) 在 10^{-3} 到 10^{-4} 之間，不到 S_y 值的百分之一，因此在受壓含水層抽水易造成大幅度的洩降，出水性能差，然而所抽出的水大部分來自於其上游的非受壓區，非受壓區地下水位面 (groundwater table) 每年持續下降可為地下水超抽之指標；水位大幅度洩降可引起臨近泥層的永久性排水壓縮造成地陷，濁水溪沖積扇扇尾及扇央的地層下陷現象為典型例子。

彙整前述含水層容積、補注源及流通性等因子可得各地下水區之供水潛能概況（表 1）。

含水層的水量收支平衡可用表示為： $Q_r = Q_p + Q_l + \Delta Q_s$

Q_r ：補注量

Q_p ：抽水量

Q_l ：流失量，流入河、海以及蒸發散

ΔQ_s ：蓄水變化量

表 1 臺灣各地下水區供水潛能概況表

地下水區	容積	流通性	補注源	供水潛能
臺北盆地	中	中	低	中
桃園中壢台地	低	低	低	低
新苗臨海地區	低	低	中	低
臺中盆地	高	中	中	高
濁水溪沖積扇	高	高	高	高
嘉南平原	中	低	低	低
屏東平原	高	高	高	高
花東縱谷	高	高	高	高
蘭陽平原	中	中	高	中

地下水歷線法將乾季歷線退降線代表抽水量 (Q_p)，降雨事件所造成之歷線上升量代表補注量 (Q_r)，年底與年初之歷線差值代表蓄水變化量 (ΔQ_s)，殘餘值代表非線性變化的流失量 (Q_l)，其分析成果可提供數值模式水平衡總量之控制，縮小數值模式水量的不確定性。地下水歷線法分析中，水量的多寡取決於非受壓區的面積與比出水率，面積和比出水率越大，反應水位升降之收支量越大 [7,8]。

中部地區礫石層之分布與成因

臺灣在晚更新世以來有頗發達的礫石沖積層，尤其在中部地區分布最廣厚度最大，此區礫石層具高透水性而且臨近河川分布，易接受河水補注，此外壓縮性低，不會發生抽水而大幅度壓縮現象，成為地下水資源最豐富之含水層，因此本節乃對中部地區礫石層之分布與成因進行進一步論述。

本文中中部地區指北自大安溪起，南達北港溪，東西各以雙冬斷層和海岸為界之範圍，本區礫石層廣布於丘陵地、台地、盆地及沿海沖積平原（圖 2）。在頭嵙山層、台地堆積層、盆地沖積層、沿海沖積層中均有厚礫石層分布，為大安溪、大甲溪、烏溪和濁水溪將山區剝蝕地層材料向下游搬移，至平原起因流速減緩，礫石大量堆積於瓣狀河道中，造成河川反覆改道，終形成扇狀礫石層分布，復因相臨沖積扇疊合或是海浪作用，形成南北延展帶狀分布之礫石層。

中部地區礫石層的成因與造山運動有密切關係，約 600 萬年前菲律賓海板塊西北端撞上歐亞板塊，啟動了蓬萊造山運動，臺灣島漸漸冒出海面，已出露地層經剝蝕產生大量碎屑經河水搬運沉積於前陸盆地，沉積物向上漸漸變粗，至頭嵙山層底部起開始有礫石層分布，礫石量向上漸增厚，礫石材料主要源自雪山山脈之變質砂岩層，少部分來自麓山帶之砂岩層（圖 1）。中部地區更

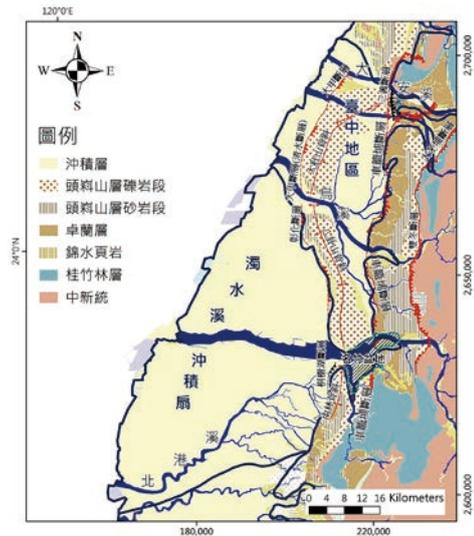


圖 2 中部地區地層、河川、地下水分區示意圖

新世約 100 萬到 1.2 萬年前年沉積之礫石層為頭嵙山層礫岩，與全新世 1.2 萬年前以來地表沖積礫石層岩性相似，交界面常不易分辨，本文統稱二者為礫石層，並依沖積年代和位置之差異將礫石層分成三期（圖 2 和圖 3）：

第一期礫石層：分布於雙冬斷層以西，頭嵙山至雙冬九九峰之間；本期礫石層於臺中草湖溪剖面出露厚度約 800 公尺，其岩層緻密略有膠結性因此透水係數和比出水率應為三期中最低者。

第二期礫石層：分布於車籠埔斷層以西，火炎山、大肚山、八卦山、斗六丘陵以及后里台地、臺中盆地和名竹盆地中；中油公司后里一、二號探井顯示本期礫石層厚達 800 公尺，其岩性緻密，透水係數和比出水率在一和三期之間。

第三期礫石層：分布於后里台地－大肚山－八卦山－斗六丘陵以西之沖積層，其岩性疏鬆，透水係數和比出水率為三期中最高的。

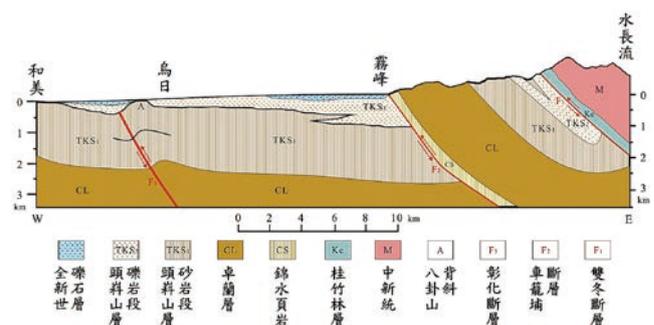


圖 3 沿烏溪附近之東西向地層（剝除地表全新世砂、泥層）剖面

本區晚更新世第一期造山帶以雙冬斷層為前緣，其西側前陸盆地沉積巨厚的陸相之第一期礫石層和淺海相砂泥岩層。之後隨著造山帶向西推進，車籠埔斷層以西成為二期前陸盆地，沉積第二期礫石層。在彰化斷層和大肚山－八卦山背斜形成後，前陸盆地再度向西遷移到現今的沖積扇及海岸平原，沉積第三期礫石。磁生物地層研究結果顯示第一期礫石層沉積年代介於 100 萬到 78 萬年前之間，而第二期礫石層沉積年代為 78 萬到 12 萬年前之間^[9]。熱螢光定年顯示八卦台地頂部沉積年代約 11 萬到 12 萬年前^[10]，與第二期礫石層頂部磁生物地層定年結果相當一致。因彰化斷層僅局部逆衝至地表，故第二期礫石層向西分布下伏於第三期礫石層下方。第三期礫石層相當於濁水溪沖積扇晚更新世 12 萬年以後沉積之第二含水層（F2）和全新世 1.2 萬年來沉積之第一含水層（F1），在扇頂第一二含水層礫石層合計厚度約 150 公尺，向西逐漸變薄，至海岸線已無第三及第二期礫石層之分布。

在槽地下水庫

臺灣地區缺乏大型水庫，在 109 年無颱風帶來降雨，接著 110 年 5 月底以前春雨和梅雨降雨不豐，水庫蓄水不足，河川流量幾近枯竭，造成西臺灣用水嚴重短缺，其中以中部地區苗栗縣、臺中市及彰化縣北部缺水最為嚴重。政府於是在尚無地陷問題的臺中盆地開鑿抗旱井，引用建築基地抽排之地下水，並在大安溪和烏溪開發伏流水渡過百年一見的大旱，蘊藏地下水之臺中盆地礫石層成為抗旱水庫。

地下水蓄水量雖然龐大，地下水抽用量卻受到含水層自然補注量、地層下陷或海水入侵等之限制，以中部

地區最主要含水層濁水溪沖積扇為例，因超抽導致地下水位自民國 64 年起到 78 年間累積下降 15 公尺以上，造成雲林和彰化局部地區發生嚴重地層下陷^[11]，雖然進行乾季河床築土堤蓄水補注以及地下水管制以減緩水位之洩降，迄今尚未能全面提升地下水位及抑制地層下陷。至於臺中盆地雖無地陷問題，然而其地下水位亦即蓄水量逐年降低（圖 4），顯示其地下水補注量低於抽水量，有違永續利用之原則。

名竹盆地為八卦山－內林背斜與車籠埔斷層間之構造盆地，總面積約 53 平方公里，盆地中新民及竹山地質鑽探深 210 公尺主要為礫石層^[12]，地物測勘結果顯示礫石層最大厚度約 400 公尺^[13]，主要為第二期礫石層上覆第三期礫石層，蓄水容積龐大。此外，名竹盆地位處濁水溪與清水溪會流區，地表下巨厚的礫石層極易得到補注；由於隘口濁水溪河床下背斜軸砂岩泥岩互層分布如同大壩阻擋低於壩頂之地下水向下游流失，因此盆地全年地下水深維持在地表附近，並且與濁水溪沖積扇等水位形成巨大落差^[14]，此類河床下含水層可做為「在槽地下水庫」進行供水調配。名竹在槽地下水庫長期處於近似滿庫狀態，其蓄水容積尚未被靈活運用。如果能規劃抽用名竹盆地地下水，補充彰化雲林地區之用水，抽水造成之水位洩降開創出的蓄水容積可獲得濁水溪和清水溪洪峰的補注，在水資源開發及減洪上發揮功效，並可減少濁水溪沖積扇抽水量，有助地下水位回升以及地陷控制。

名竹盆地地下水庫供水潛能模擬

為進一步說明前述在槽水庫之概念，本研究進一步以名竹盆地為例，以數值模擬方式評估在給定之

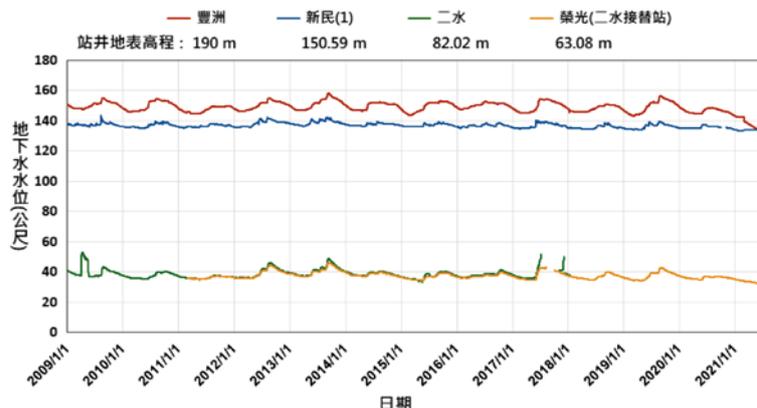


圖 4 臺中盆地豐洲站、名竹盆地新民站及濁水溪沖積扇二水、榮光站地表高程及 2009 年 1 月至 2021 年 7 月地下水位歷線

操作原則下之供水潛能。筆者曾於 2017 年協助中央地質調查所評估濁水溪沖積扇及名竹盆地之地下水庫活化方案與效益^[15]，本研究以當年度率定完成之 MODFLOW 地下水數值模式為基礎，將名竹盆地淺層河川沖積層下方之頭嵙山地層納入地下水庫營運範圍，數值模式於名竹盆地原第一分層下方增加第二分層，而分層厚度則參考中央地質調查所「臺灣中段山區地下水資源調查與評估」報告^[16]之地電阻探勘結果，假設厚度約介於 120 公尺至 160 公尺，因此，第二分層主要為頭嵙山礫岩組成，透水係數較淺層沖積層差，故水文地質參數設定上，假設水平向透水係數為 0.8 m/day，垂直向透水係數為 0.08 m/day，而比儲水係數設定為 9.18×10^{-6} ^[15]。

根據中央地質調查所「臺灣中段山區地下水資源調查與評估」模擬結果顯示，名竹盆地淺層井群全年抽水對地表水影響較大，故本研為減少抽水對枯水期河川流量之影響，抽水深度設定於第二分層，另為考量地表水系統常於枯水期發生缺水，故皆於枯水期 3 至 5 月進行抽水。抽水井空間分布則考量兩種方案，方案 1 為盆地隘口鄰近區域設立抽水井群，方案 2 則沿濁水溪主流河岸設立抽水井群，相關空間分布如圖 5 所示，抽水井群數量為 30 個格網，格網大小為 250 m × 250 m 至 500 m × 500 m 不等，每個格網抽水量則為 7,400CMD，井群總抽水量約 22.2 萬 CMD，枯水期供水效益大。為了解

兩方案抽水對於地下水環境之影響，第一分層隘口至集集攔河堰沿岸設置地下水位監測井，監測井空間分布如圖 5 所示。

兩方案監測井及觀測井之模擬水位變化如圖 6 所示，由模擬水位變化可看出，隘口西側的二水(1)及烏塗(2)觀測井，皆不受抽水影響，而監測井 01 至監測井 04 受方案 1 之抽水影響較大，而監測井 05 至監測井 08 受方案 2 之抽水影響較大，其中 5 月份皆為地下水洩降影響最大月份，然而停止抽水後地下水位即逐漸上升，12 月份時已相當接近抽水前之水位，顯示此種營運方式之永續性。

另外，本研究亦進一步評估抽水後對濁水溪及清水溪匯流口之河川流量進行影響評估，河川交換量統計結果如表 2 所示，結果顯示兩方案對於河川流量減少比例皆小於 10%，其中各月份減少比例，方案 1 皆比方案 2 小。

綜合以上分析結果，名竹盆地在枯水期於較深層抽水，除了可提供豐沛之供應水量外，對河川流量影響程度小，且停止抽水後，地下水位亦皆可於當年回復至抽水前水位，顯示此種操作情境確可滿足永續營運原則，名竹盆地之可能操作方式應不只前述兩種，本文在此無意探討名竹盆地之最佳營運方式為何，僅以永續可行的操作方式為例，說明名竹盆地在槽水庫之供水潛能。

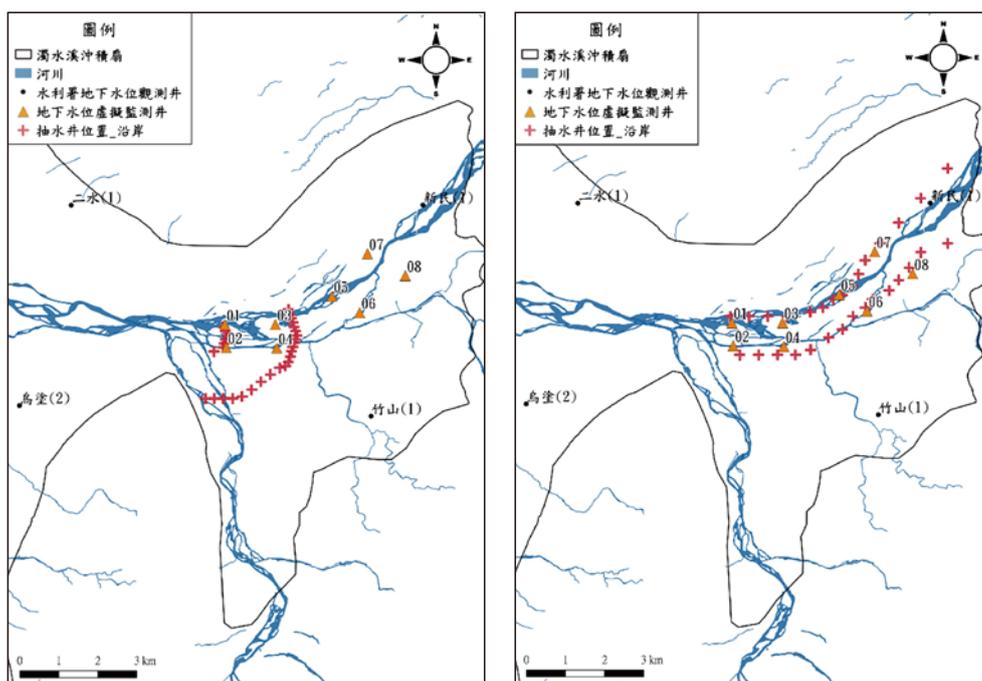


圖 5 方案 1 及方案 2 之抽水井群及監測井群分布圖

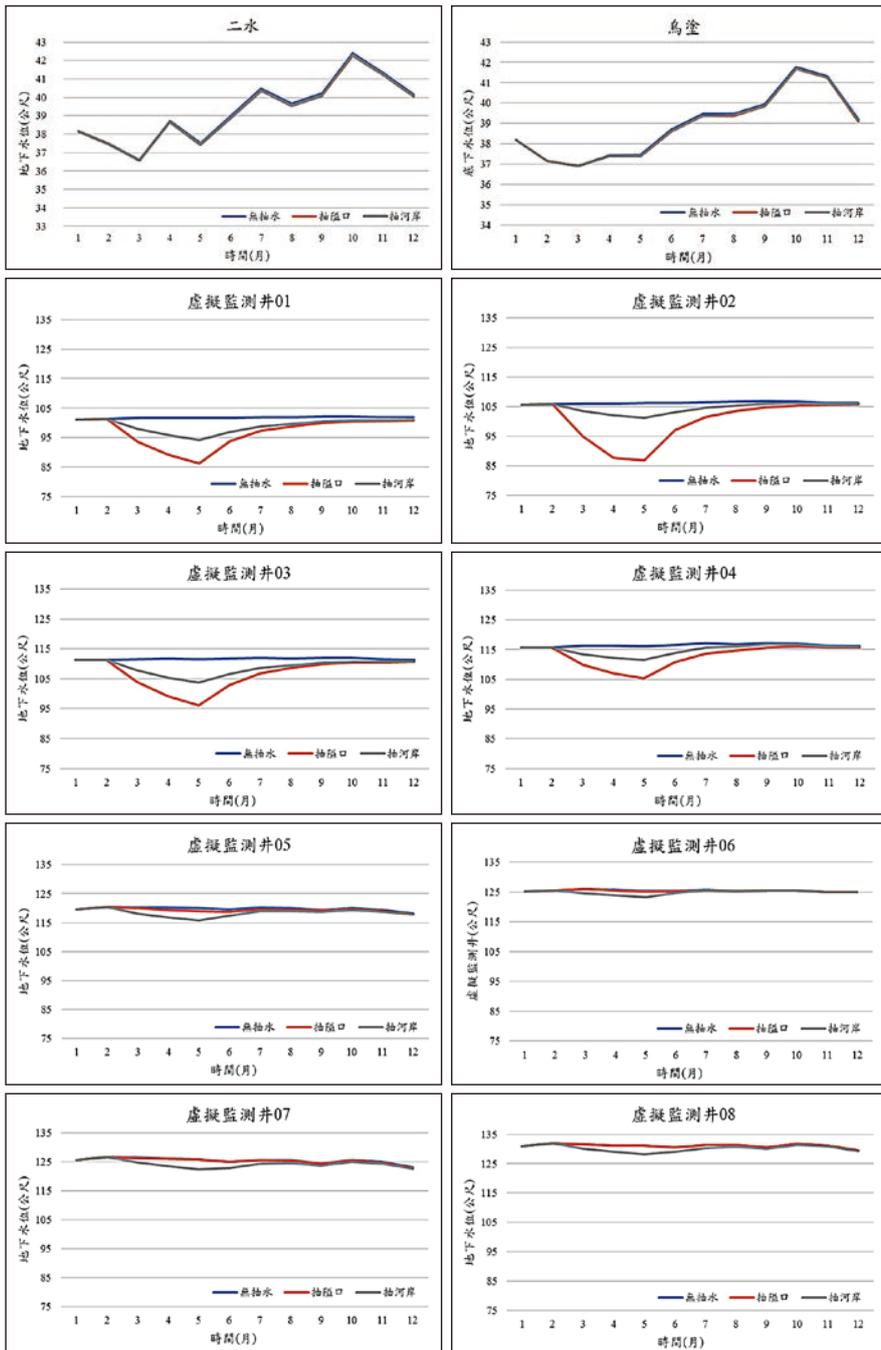


圖 6 各監測井及觀測井抽水後之模擬水位變化

表 2 不同方案之河川流量變化

	三月	四月	五月
零方案	9,360,000	5,330,000	1,290,000
方案 1	9,300,000	5,250,000	1,200,000
方案 2	9,280,000	5,220,000	1,180,000
方案 1 河川流量減少量	63,200	83,500	93,300
方案 2 河川流量減少量	80,900	110,000	115,000
方案 1 河川流量減少比例	0.7%	1.6%	7.2%
方案 2 河川流量減少比例	0.9%	2.1%	8.9%

(流量單位：CMD)

地下水庫永續營運原則

前述各節多少已提及地下水庫之概念，在此將對地下水庫進行更明確之定義，並論述地下水庫管理之基本原則。

地下水庫定義

本文對地下水庫定義為「具有天然或人工補注之含水層，在永續供水營運下不造成環境衝擊」。

由此定義可見含水層為地下水庫之基礎，惟含水層並不一定等於地下水庫，含水層為地下水系統本身客觀的描述，地下水庫則隱含了水源調配的意涵。適合進行地下水庫營運的含水層，必需有充分的補注來源，就有如地表水庫一般，需有入流水源，如此水量的取用才可獲得補充，配合庫容才能因應需求進行永續供水調配，含水層未必有良好之天然補注，如前述因河川被襲奪而失去河川補注之桃園中壢台地，則無穩定之天然補注來源。地下水庫之補注來源不僅是自然補注，亦可是人工補注或是兩者皆有，前述在槽地下水庫則是有良好之天然補注。另外，若能進行人工補注，則亦可對特定含水層進行地下水庫經營，這也意味著進行地下水永續營運之含水層

即為地下水庫。地下水庫雖然與地表水庫，都是在進行供水調配，惟地下水庫與地表水庫仍有本質上的不同，說明如下。

地下水庫邊界

地表水庫邊界及庫容定義清楚，水庫水位與蓄水量關係明確，因此可直接以蓄水量為狀態變數進行放水調配管理。地下水庫則邊界定義較彈性，其可為地質邊界，亦可在營運影響範圍外之水力條件邊界，其中之取捨則視分析或管理之需要而定。前述在槽地下

水庫之論述，皆以地質單元為對象進行說明，因此皆以各自對應之地質單元為範圍與邊界。

管理水位

地表水庫水位單一且水庫水位與蓄水量關係明確，因此以蓄水量或水位進行營運管理都是相同，地下水庫則因含水層之地質異質性，導致地下水流動之能量損失各處不同，因此不同位置之地下水頭（拘限含水層）或地下水位（非拘限含水層）並不相同，且抽取一單位水量所引起的水位（或水頭）洩降，拘限含水層之水頭變化亦遠大於非拘限含水層之水位變化。因此，地下水庫在地下水位與儲水能力各地不同及邊界視問題而異等因素下，不易於以儲水量做為系統之狀態做為管理的基礎。反之，地下水位可直接觀測，且抽水直接影響地下水位。另外，地層是否因過度抽水而下陷，是制約地下水供水量的主要因素，而這亦可由限制地下水位的洩降來控制。因此，地下水位適合做為地下水庫管理之基礎，在進行地下水庫營運管理之前需先定義管理水位，以規範地下水之運用，其作用類似於地表水庫之操作規線，以下為管理水位之定義及應考量因素。

管理水位定義

界定不同地下水位區間之水位標準，以規範地下水庫營運，不同水位區間可有不同操作原則，管理水位應至少包括可允許之最低與最高水位。

管理水位考量因素

- (1) 管理目的：地下水庫營運之目的，將影響訂定管理水位之考量機制。例如以供水為目的之地下水位變動範圍，或是以減緩地層下陷為目的之水位抬升範圍等，前者可以地下水位觀測資料之統計量為基礎定義之，例如最低水位可為超越機率90%之水位值等^[17]，後者則無法以過去之水位觀測資料統計分析而得，而需進行地層下陷分析^[18]。
- (2) 點和面之管理：地下水庫之營運需藉由抽補井、補注池或取水隧道等構造物達到，其對地下水位之影響，愈接近構造物愈顯著，並隨距離快速遞減。然而長期而言，亦將降低區域之地下水位，因此，嚴格而言應有鄰近營運區之監控井及其管理水位，與掌控全區之區域性管理水位，而此區域管理水位可為多口井之統計量，並視需要進行分區訂定管理。

滾動式管理

地下水系統由於地質異質性，因此其相關調查與分析，無可避免的會有較高的不確定性，尤其是相對於地表水系統，在同樣的投資與觀測密度下，一般而言不確定性會較高，而這較高的不確定性，常阻礙對地下水的進一步管理或開發，而停留在無止盡的調查分析中。事實上，地下水系統即使有水位觀測系統以觀測系統的狀態變化，但引起此變化的外部自然影響如地表補注及河川補注，甚至既有的抽水量等皆不易觀測，因此地下水系統之刺激與反應間之關係不易確認，然而，若是有人為營運加入，則營運後對系統新增之抽水量，及其引起之地下水位變化量皆可觀測，因此，我們可掌握新增之系統刺激及反應，逐步更新及增加對系統本身的認知，進而逐步降低不確定性。這也是地下水滾動式管理的基本原理。圖7為滾動式管理的流程圖，如圖中所示先進行第一階段觀測及調查，使我們對系統有一定程度之掌握後，再進行第一階段開發營運，接著再進行第二階段的資料或調查，然後進行第二階段營運規則或系統之修正更新，如此不斷逐步修正或更新，即為滾動式管理。由滾動式管理步驟可知，隨著不斷的更新修正，可掌握的系統刺激及反應也愈多，對系統特性的了解也可逐步提高，不確定性降低的同時系統管理也愈有效率，前述之管理水位也應在此流程下逐步檢討更新。

地面與地下水聯合營運

臺灣地區地面水系統已相當發達，因此實務上地下水系統勢必需與現有地面水系統聯合營運，圖8為地面地下聯合營運示意圖，由圖8中又可依地面水是否引水補注地下水系統而可分成以下兩大類。

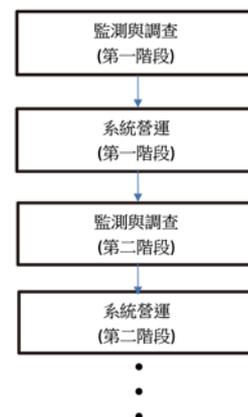


圖7 滾動式管理流程圖

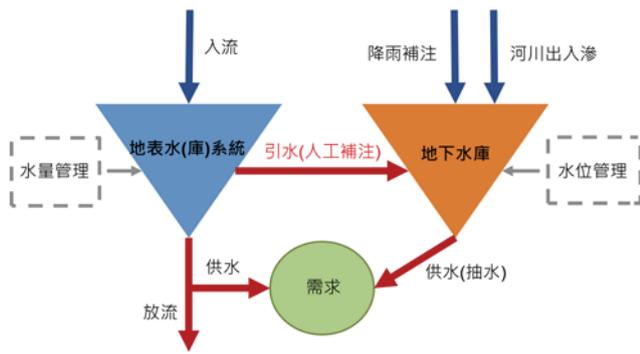


圖 8 地面地下水聯合營運示意圖

需求端聯合營運

地面與地下水系統在水源端不互動，即如圖 8 中，無地面引水至地下水，兩個系統僅依共同之需求端進行聯合營運，此為較簡單之情況，若再給定供水之優先順序，則整體系統供水能力為各自系統供水能力之合。前述名竹地下水庫供水能力分析之結果可為濁水溪流域地面地下水聯合營運在需求端聯合營運下之參考。

供需端聯合營運

若地面與地下水在水源及需求端皆有連結如圖 8 所示，則地面與地下水有緊密互動，例如地下水系統若除了抽水外還有人工補注，則此人工補注勢必來自地面水，此時在水源端兩個系統將產生互動，供需端聯合營運下整體系統可有較大效益，產生一加一大於二之效能，惟此時地面地下水系統將無法切割，必須整體考量。

結論

綜合含水層之含水層容量、補注源、流通性等因素，各地下水區含水層供水潛能以屏東平原、蘭陽平原、濁水溪沖積扇、臺中盆地及花東縱谷等較佳。臺北盆地雖然含水層供水潛能中等，但淺層有區域性泥層分布，形成大面積之受壓含水層，濁水溪沖積扇自扇央以下亦有相當厚度之泥層出現，因此這兩區抽水都將引起地下水顯著下降，需謹慎營運。以較大之區域而言，中部地區礫石層厚、透水性高且河川補注容易，土層壓縮性亦低，為地下水資源最豐富之區域。有河川補注之含水層非常適合作為在槽地下水庫進行供水調配，經初步模擬分析顯示名竹盆地在槽地下水庫，確可在永續經營的原則下，在枯水期提供至少每天約 22 萬 CMD 的水量，效益顯著，名竹盆地之可能操作方式應不只本文所述兩種，本文在此僅以永續可行的操作方式為例，說明名竹盆地在槽水庫之供水潛能。地下水管理應以地下水

位為基礎，並應採滾動式管理策略，逐步降低不確定性並同時推動地下水管理實務，僅依靠調查監測本身去降低不確定性，至一般地表水系統之水準，實務上並不切實際。

參考文獻

1. 簡俊彥 (2015)，環境變遷對永續水資源之挑戰，土木水利，第四十二卷，第三期，第 20-23 頁。
2. 巨廷工程顧問股份有限公司 (2018)，石門水庫既有設施防淤功能改善工程計畫綜合報告，經濟部水利署北區水資源局。
3. 聯合大地工程顧問股份有限公司 (2012)，曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫曾文水庫防淤隧道工程基本設計報告，經濟部水利署南區水資源局。
4. 江崇榮、汪中和 (2002)，以氫氧同位素組成探討屏東平原之地下水補注源。經濟部中央地質調查所彙刊第十五號，第 49-67 頁。
5. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭 (2005)，濁水溪沖積扇地下水區之補注區與補注源探討。經濟部中央地質調查所彙刊第十八號，第 1-28 頁。
6. 何春蓀 (1986)，臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所出版，第 17-19 頁，第 110-117 頁。
7. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥、費立沅 (2004)，屏東平原地下水補注量及抽水量之評估。經濟部中央地質調查所彙刊第十七號，第 21-51 頁。
8. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥 (2006)，以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支。經濟部中央地質調查所彙刊第十九號，第 61-89 頁。
9. 洪崇勝 (2009)，臺灣中部頭料山層之磁生物地層研究。行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告，共 17 頁。
10. 邵屏華、陳華玟 (2001)，南投地區第四紀地層之熱螢光對比及定年學研究報告。經濟部中央地質調查所，共 40 頁。
11. 江崇榮、林燕初、陳建良 (2011)，地下水位與地表高程互動模式之研究。經濟部中央地質調查所特刊第二十四號，第 1-35 頁。
12. 經濟部中央地質調查所 (1999)，臺灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告附錄，第 2-117 頁，第 2-120 頁。
13. 董倫道、蔣立為、陸挽中、黃智昭、王詠綸 (2017)，地電法應用在名竹盆地之地下水潛能評估，經濟部中央地質調查所特刊第二十九號，第 97-120 頁。
14. 江崇榮、陸挽中、林燕初、張閔翔、陳瑞娥 (2017)，八卦山-內林背斜之水文地質特性，經濟部中央地質調查所特刊第二十九號，第 1-18 頁。
15. 國立交通大學、嘉南藥理大學、中華民國地質學會 (2017)，地下水水文地質與水資源調查-地下水庫活化與效益評估 (1/4)，經濟部中央地質調查所。
16. 財團法人成大研究發展基金會 (2012)，臺灣山區地下水資源調查研究整體計畫-臺灣中段山區地下水資源調查與評估 (3/4)。
17. 國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心 (2015)，臺灣地下水區可用水量調查分析及伏流水調查規劃前期作業成果報告，經濟部水利署水利規劃試驗所。
18. 美商傑明工程顧問臺灣分公司 (2017)，用水調查統計暨地下水可用水量調查分析試辦計畫，經濟部水利署水利規劃試驗所。



地下水 管理水位 之演進與運用

吳益裕／經濟部水利署水文技術組 組長

林啓峰／國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心 副組長

劉瓊玲／國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心 組長

溫志超／國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系 特聘教授

林建利／國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心 副組長

目前臺灣雖已透過水井處置與納管、監測、地下水保育及法規研修等策略落實地下水保育管理，然在地下水於整體水資源所扮演角色越趨重要而無法立即減抽之情況下，地下水水位觀測的加值運用或可作為掌握水情，以及作為決策依據或提出因應配套措施參考之用，故本文彙整美國賓州、德州及澳洲等國外利用地下水水位管理之案例，以及臺灣目前地下水觀測網絡建置的成果、發展地下水管理水位與運用之情形，期能協助讀者了解其管理方式及所可能面臨的挑戰。

前言

地下水資源、水質及水文地質相關領域對於人民生活與產業發展皆有十分密切的關聯，若供需失衡，將帶來生活上、工業與農業發展的限制，以及地層下陷、國土安全、洪災的威脅與損失^[1]；加上受到全球氣候變遷與極端氣候之影響，未來臺灣將面對複雜且異常的災害威脅，預期地下水資源所扮演的角色也更顯重要。而長期以來臺灣部分地區因產業發展、土地利用密集及區域水資源供需失衡等因素，衍生出水源匱乏、超抽地下水及國土流失等問題^[2]，更甚者於彰化、雲林、嘉義、台南及屏東等縣市已有部分列為地下水一級管制區，且伴隨著地層下陷以及豪大雨發生，上述地區亦時常傳出淹水災情，足見地下水超限利用所造成影響已非單純的國土流失問題，更可能威脅民眾之生命安全以及地區產業經濟之發展。

目前臺灣雖已透過水井處置與納管、監測、地下水保育及法規研修等策略落實地下水保育管理，然在地下水於整體水資源所扮演角色越趨重要而無法立即減抽之情況下，本文彙整國外利用地下水水位管理之案例，以及臺灣發展地下水管理水位與運用之情形，期能協助讀者了解其管理方式及所可能面臨的挑戰。

地下水管理之必要性

地下水為何如此重要，首先我們必須了解臺灣的地文、水文等環境特性，以及我們目前所面臨的重要課題，方能為此落下一正確的註解並據以解決問題。多數讀者或許不知道，依據民國 103 年國家發展委員會提出之研究報告^[3]，文中提及臺灣是世界排名第十八位的缺水國家，這或許與多數人的印象或認知有所不同，因為臺灣地區平均每年有二千五百公釐的降雨量，約是世界平均值的 2.5 ~ 2.6 倍，理應是屬於降雨量豐沛且水資源不虞匱乏的國家，但歸咎其原因卻是臺灣地區山坡陡峭、河川短促、再加上降雨有著顯著豐枯不均之情形，所以大部分的雨水在無法有效全數蓄存情況下即流入海洋，因此，臺灣地區每人每年平均可以分配到的水量，約只有全世界平均雨量的七分之一而已，換算成每人每年可用水量大約只有 1,000 立方公尺，若以目前聯合國對於世界可用水量的標準來說，臺灣地區是屬於偏低及缺水國家。

然而在地面水不足因應枯水期甚至是嚴重枯旱的情況下，我們究竟如何度過這每一次的困境呢？！依據水利署所公布的民國 99 年至 108 臺灣地區長期平均水資源整體運用資料而言（如圖 1）^[4]，明確顯示地下水

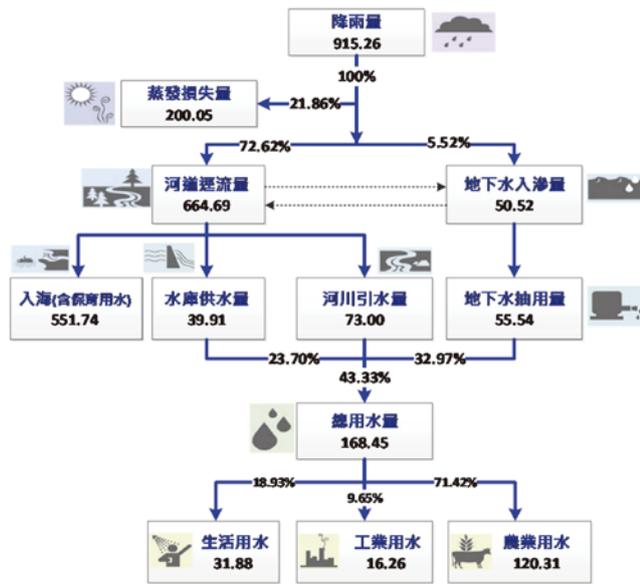


圖 1 民國 99~108 年水資源整體運用情形
(資料來源：經濟部水利署^[4])

的用量約佔了整體水資源供應量的 33%，這也突顯了地下水之於臺灣的重要性，若沒有了地下水或失衡之結果可真的會造成嚴重的影響。而過去一年以來，臺灣即遭逢嚴重的乾旱問題，年初當我們各水庫逐日探底的同時，危急時刻，地下水於抗早期間扮演著救火的重要角色，累計抗早期間地下水支援水量達 6,340 萬噸，超過 1 座湖山水庫蓄水量，充分發揮地下水救命的功用，透過觀測井觀測也顯示抗旱後地下水位亦已回復常態水位，足可顯見地下水資源的支持性，所以，地下水不是不能用，而是要妥善管理與使用。

國外運用地下水位管理實例

地下水的管理於國際間已是甚為重要的課題，世界銀行 – 水資源合作計畫 (World Bank – Water Partnership Program) 有關地下水管理之研究與經驗中^[5]，即提出面對地下水開發或地下水污染壓力下管理、管制條款之行動計畫架構為藍圖，內容大致可分為三個層面，包含技術能力及知識基礎、制度法律與組織架構及制度能力與志願者行動等層面。除世界銀行所提出之架構外，國際間對於地下水管理之策略及案例也相當多，亦有不少是利用地下水水位進行相關管理作為，諸如：

美國賓州

美國地質調查所針對美國賓州地下水水位變動趨勢進行乾旱警戒地下水水位訂定^[6]，其中，觀測井有

兩種不同的分析方法，第一種方法應用於有超過 20 年地下水水位觀測紀錄之觀測井，將各觀測井之所有月平均水位資料由高排至低，取 75% 超越機率值之水位做為乾旱警戒水位 (drought-warning water level)，另取 90% 超越機率值之水位做為乾旱緊急水位 (drought-emergency water level)；第二種方法則針對水位觀測紀錄低於 20 年之觀測井，透過選取一具長期水位紀錄之指標井，其觀測期間需包括不同氣候條件 (豐及枯水年)，並計算歷年月平均水位之 75% 及 90% 超越機率水位值，再由計算各水位紀錄低於 20 年之觀測井與指標井之相關性及相關式 (如圖 2)，將指標井已知之 75% 及 90% 水位超越機率值 ($X_{指}$) 代入相關式即可得各觀測井之水位超越機率值 ($Y_{觀}$)。

若連續兩個月的水位都低於 75% 水位超越機率值，發佈乾旱警戒 (drought-warning) 消息，若大部分觀測井都低於 90% 水位超越機率值，則發布乾旱緊急 (drought-emergency) 消息；並將此資訊提供做為採取地下水資源管理或保育措施之參考，例如達到乾旱警戒水位時採取限水措施 (如洗車) 以提供其他基本用水之需求。

美國德州

美國德州 Barton 溫泉及 Edwards 含水層保護區最初於 2006 年時即利用溫泉產量及地下水觀測井水位變化判斷乾旱程度^[7]，當境內之溫泉產量高於 38cfs 或地下水位深度 (地表至地下水位之距離) 小於 181 呎時，視為無乾旱；當溫泉產量介於 20 ~ 38cfs 或地下水位深度介於 181 ~ 192.1 呎時，乾旱程度為警示階段 (alarm stage)；當溫泉產量低於 20cfs 或地下水位深度大於 192.1 呎時，乾旱程度為危急階段 (critical stage)，如圖 3 所示。

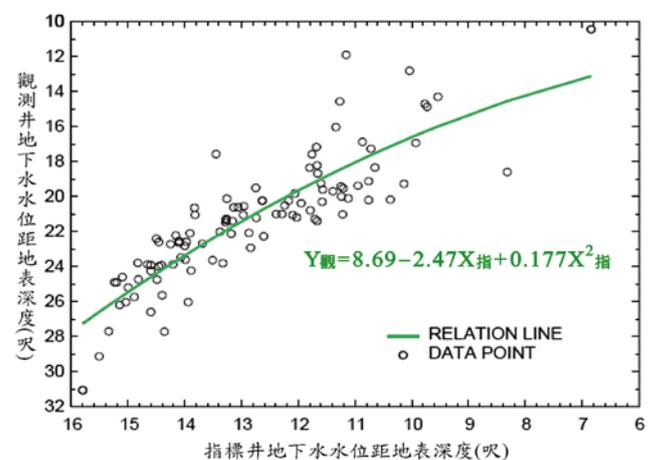


圖 2 指標井與觀測井之水位關係圖 (美國賓州 Chester County)
(資料來源：Schreffler^[6])



圖 3 溫泉產量及不同地下水水位深度對應之乾旱狀態
(資料來源：本文自行整理)

其中，亦根據不同乾旱程度採取不同抽水限制的措施，如當乾旱程度達到警示階段(alarm stage)時，申請使用地下水者必須減抽 20% 之水量，且需每週兩次回報乾旱狀況；而當乾旱程度達危急階段(critical stage)時，必須減抽 30% 的水量，且應持續至少每週兩次監測溫泉水量及地下水水位。因此，管理方式主要為訂定不同程度限抽水量；而此操作方式也在經歷 2009 年與 2011 年的兩次重大乾旱事件後，於 2013 年才進行些微幅的調整。

澳洲 Katunga 水源保護區

當地農田水務局針對 Katunga 水源保護區(Katunga Water Supply Protection Area)分析了地下水水位與抽水量之關係^[8]，發現當抽水量小於 $10,000 \times 10^6$ 公升/年，水位僅受季節波動而有小幅跳動；當抽水量約 $25,000 \times 10^6$ ~ $30,000 \times 10^6$ 公升/年時，水位跳動幅度增加且年平均水位降至地面下 20 公尺；而當抽水量超過 $30,000 \times 10^6$ 公升/年時，年平均水位降至地面下 20 公尺以下，甚至

當年抽水量達 $38,000 \times 10^6$ 公升/年時，年平均水位會降至地面下 23 公尺，分析結果如圖 4 所示。

為管理地下水資源，政府設定了「回復水位」(recovery level)，定義為停止抽水後的水位，此回復水位為地面下 20 公尺，但允許 2 公尺的變動，另每年會先宣布可發放的水權量，避免抽太多水使水位降低至不可回復。水務局計算每年最多可發放的水權為 $59,780 \times 10^6$ 公升/年，但實際發放水權量將依據前五年之年平均用水量而定。一般而言，每年發放水權量約 $42,000 \times 10^6$ 公升/年，相當約可發放總量之 70%；但若前五年之平均抽水量超過 $30,000 \times 10^6$ 公升/年，則可能使回復水位低於地面下 20 公尺，此時隔年之水權量僅能發放 $30,000 \times 10^6$ 公升/年，相當約可發放總量之 50%。而個人水權量亦隨著宣告的可發放量調整，若宣告僅能抽用 70%，則個人當年度可抽用量亦僅為最初所得水權之 70%。

臺灣的優勢 — 地下水觀測網

從前述國外的案例中，我們可發現地下水水位是反應區域抽用、補注等行為後之實際表徵現象，因此，利用監測數值的確是可以作為評析地下水並進行管理或推動相關工作的重要參考項目之一。而臺灣自民國 81 年起即由經濟部水利署與中央地質調查所共同推動「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」，分 3 期 17 年(民國 81 ~ 97 年)之期程，辦理全臺主要地下水區之地下水觀測

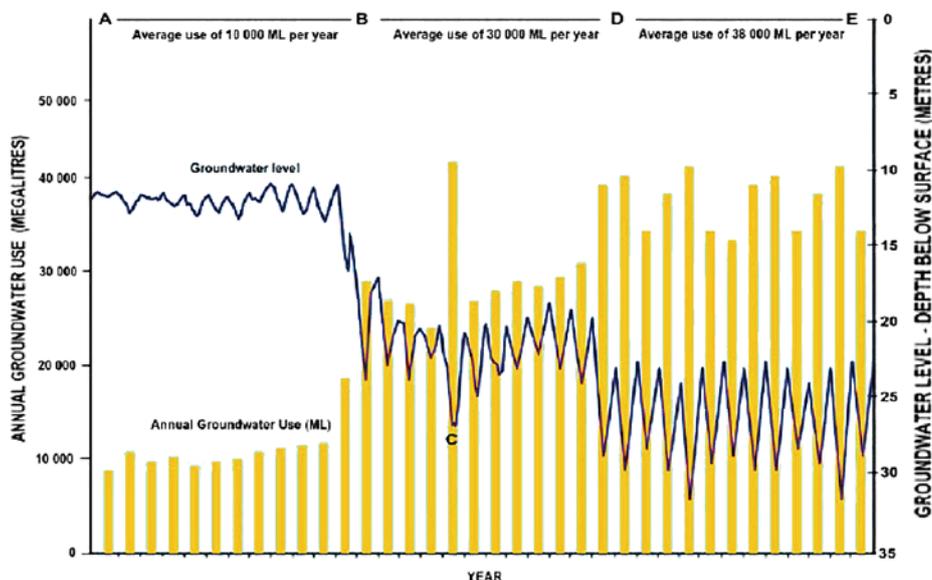


圖 4 澳洲 Katunga 水源保護區地下水使用量與水位之關係
(資料來源：Goulburn-Murray Water^[8])

網建置與維護、水文地質調查、地下水水位觀測、地下水質監測及相關研究等工作，截至目前為止，配合各相關計畫與維護更新工作之推動，已於全臺建置 825 口觀測井，構建完整的地下水觀測系統與並進行長期觀測，其建置成果及分布情形，如圖 5 所示；而長達 20 年以上的資料，已可用以掌握並評析全臺主要地下水區的水文變化，作為訂定地下水資源管理的依據。

另自 107 年起即辦理全臺及離島地下水觀測井無線傳輸設備規劃設計建置工作，而截至目前為止總計已完成 770 餘口，除已大幅降低投入資料收錄的人力與時間外，更可提供每 10 鐘 1 筆水位、電導度、pH 等即時資料，提高地下水狀態之掌握，並藉以提升相關地下水相關管理工作推動的時效性。

臺灣地下水管理水位之演進與運用

臺灣於地下水管理水位的訂定上，最早始於民國 93 年^[9]，當時單井警示指標訂定之原則乃以地下水觀測站網之各觀測井為基準，根據地下水水位變動趨勢將各地下水區分為水位呈現下降趨勢、持平趨勢（些

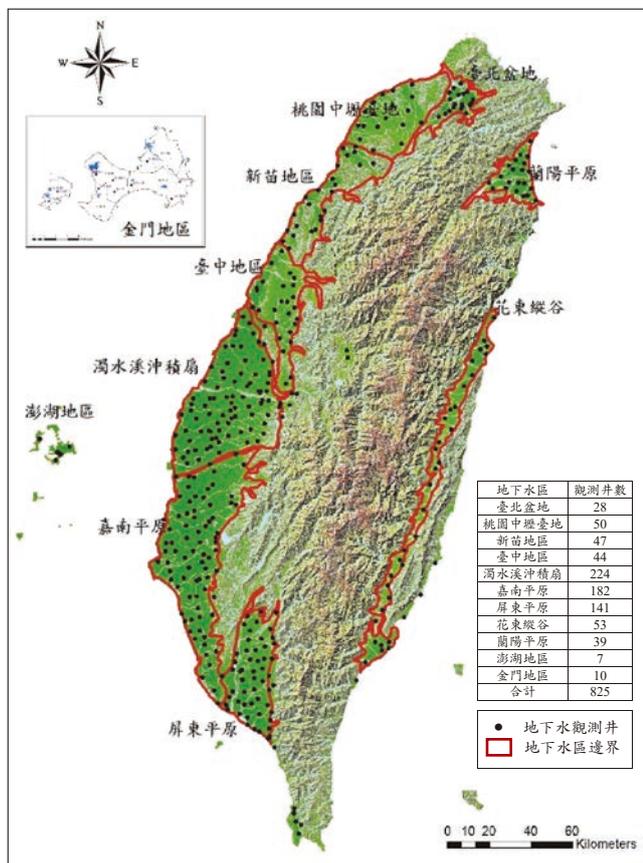


圖 5 各地下水區觀測井建置成果及分布圖
(資料來源：本文自行繪製)

微上升、些微下降、持平)、上升趨勢等，再配合地層下陷情勢與海水入侵潛勢整體條件(如表 1)，設定水位嚴格程度與計算基準(如表 2)。

表 1 各地下水區地下水水位、地層下陷與海水入侵潛勢整體條件評估表

地下水區	地下水水位變動情勢	地層下陷潛勢	海水入侵潛勢
臺北盆地	持續上升	高	高
桃園中壢臺地	持平	低	高
新苗地區	持平(些微下降)	低	低
臺中地區	持平(些微下降)	低	低
濁水溪沖積扇	持續下降	高	高
嘉南平原	持續下降	高	高
屏東平原	持平(些微下降)	高	高
蘭陽平原	持平	高	高
花東縱谷	持平	低	低

(資料來源：中興工程顧問公司^[9])

表 2 地下水警戒水位嚴格程度與計算基準表

地下水分區	安全水位	下限水位	嚴重下限水位
臺北盆地	Mean	Mean-2·Std	Mean-4·Std
桃園中壢臺地	Mean	Mean-2·Std	Mean-4·Std
新苗地區	Mean	Mean-2·Std	Mean-4·Std
臺中地區	Mean	Mean-2·Std	Mean-4·Std
濁水溪沖積扇	無	Mean-Std	Mean-2·Std
嘉南平原	無	Mean-Std	Mean-2·Std
屏東平原	Mean+Std	Mean-Std	Mean-2·Std
蘭陽平原	Mean	Mean-Std	Mean-2·Std
花東縱谷	Mean	Mean-2·Std	Mean-4·Std
備註	Mean：平均水位 Std：水位標準偏差		

(資料來源：中興工程顧問公司^[9])

依據前述基準，再以歷年之中每年最豐及最枯的水位資料進行月平均值與標準偏差計算，以下限水位作為警戒水位，並將豐水期計算結果視為高水位月份(訂於每年之 9/30)警戒水位，另將枯水期計算結果視為低水位月份(訂於每年之 4/30)警戒水位，另以直線連接高、低水位月份警戒值，作為其間各月份之警戒水位；其計算與訂定流程，如圖 6 所示。

民國 100 年警戒水位經再次檢討^[10]，為凸顯為管理所用，除將原本「警戒水位」一詞調整為「管理水位」以外，為求管理水位能適用於不同水位變化特性之地區，於管理水位的計算與訂定上參考前述美國賓州對緊急乾旱水位之定義與作法，利用水文頻率分析方式並配合水位變化趨勢重新擬定觀測井之管理水位訂定原則。其中，考量各月份地下水水位變化特性的不同，將各觀測井歷年水位資料整理為各月份水位紀錄，再以各月份歷史日水位資料進行頻率分析(由小至大排列)，藉以計算各月份之水位限值；而各觀測井

依照長期水位變化趨勢設有不同計算原則，其中水位變動趨勢上升者採用 H_{25} 、水位變動趨勢下降者採用 H_{35} 作為管理的限值，其詳細設定原則如下所列，分析流程則如圖 7 所示：

1. 當水位變化趨勢為上升者：

- (1) 安全水位：以地下水位超越機率 75% 計算，以 H_{75} 代表。
- (2) 下限水位：以地下水位超越機率 25% 計算，以 H_{25} 代表。
- (3) 嚴重下限水位：以地下水位超越機率 10% 計算，以 H_{10} 代表。

2. 當水位變化趨勢為下降或持平者：

- (1) 安全水位：以地下水位超越機率 85% 計算，以 H_{85} 代表。
- (2) 下限水位：以地下水位超越機率 35% 計算，以 H_{35} 代表。
- (3) 嚴重下限水位：以地下水位超越機率 20% 計算，以 H_{20} 代表。

民國 106 年^[11]，因應地下水管制區劃定作業相關工作，過程將地下水水情納入作為管制區網格評分之依據，因此，決議統一採用水位變化趨勢為上升者之管理水位作為評估整體水情之依據，目前管理水位之計算與更新亦皆沿用此一決議辦理^[12-14]。其近 10 年演進歷程如圖 8 所示。

而運用上，管理水位主要是作為地下水水文情勢分析使用，期能提供全臺各地區地下水水位狀況，作為提出因應管理作為的重要資訊。分析方式是由各月份之各層觀測井水位與管理水位進行比較，並以觀測井水位低於管理水位者，視為低水位，詳細流程如圖 9 所示；另參考國外經驗訂定水位情勢與乾旱嚴重程度之方式，配合燈號顯示以呈現水情狀態，其中，目前燈號顯示上，藍燈表示近期水位已至少連續 1 個月高於管理水位、綠燈表示水位值連續低於管理水位 1 ~ 3 個月、黃燈表示水位值連續低於管理水位 4 ~ 6 個月、橙燈表示水位值連續低於管理水位 7 ~ 9 個月，而紅燈表示水位值連續低於管理水位超過 10 個月，而燈號與管理水位對照示意如圖 10 所示。

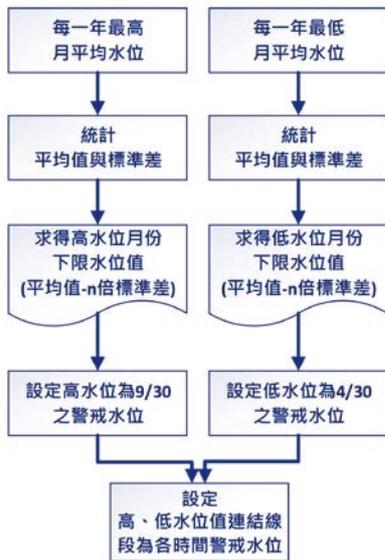


圖 6 民國 93 年警戒水位計算與訂定流程
(資料來源：本文自行整理)

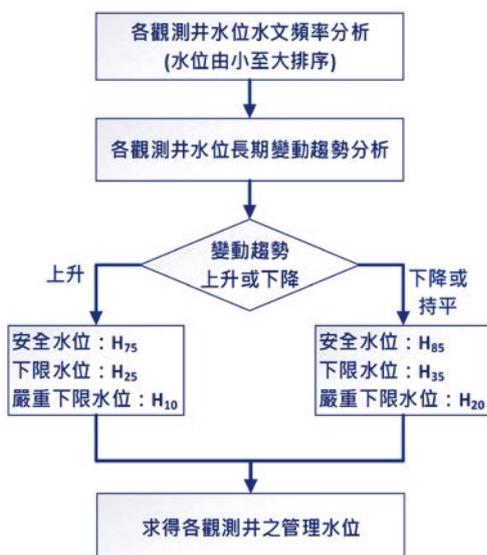


圖 7 民國 100 年管理水位計算與訂定流程
(資料來源：國立雲林科技大學^[10])

未來展望

由於地下水保育意識逐漸成熟，有關地下水水文情勢預期將成為例行性對外公開的重要資訊之一，而



圖 8 近 10 年臺灣地下水管理水位之演進歷程
(資料來源：本文自行整理)

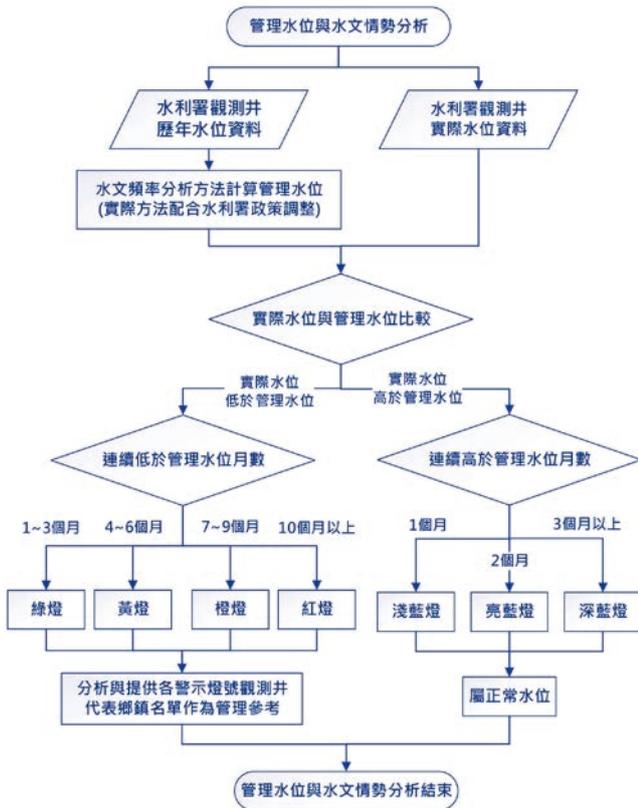


圖 9 管理水位與水文情勢分析流程
(資料來源：國立雲林科技大學^[14])

未來包含各地水井管理及地下水水權核發亦可能均將依賴地下水觀測網或地下水文情勢分析所提供之資訊作為決策依據；是以，地下水觀測已是我國於水資源管理工作中不可或缺之一環。

由本文所提相關內容可知諸多先進國家多已採用設定地下水水位門檻值並採取不同地下水管理策略之作法，此點與臺灣目前規劃之方向雷同。整體而言，臺灣於地下水管理相關法規與其他國家相較應屬完備，只需予以落實應可滿足地下水管理之目的，但於管理技術層面相關方法則較顯不足，目前雖依據地下水觀測網所獲地下水水位建立管理水位及水文情勢判別之機制，但對於如何應用水文觀測成果於實務管理部分，尚未訂定明確且可行之方法，瓶頸在於臺灣對於違法水井的數量及抽水量的掌握仍屬不足，加上各縣市政府面對民眾所賴以維生的問題多有所顧忌，以致無法針對特定區域及特定水井實施嚴格管制。因此，唯有加強公私部門協力、跨領域合作，創造理性對話平台並提升公民參與討論，才有可能突破瓶頸，以企求未來臺灣地下水環境真正落實管理與永續發展的新境界。

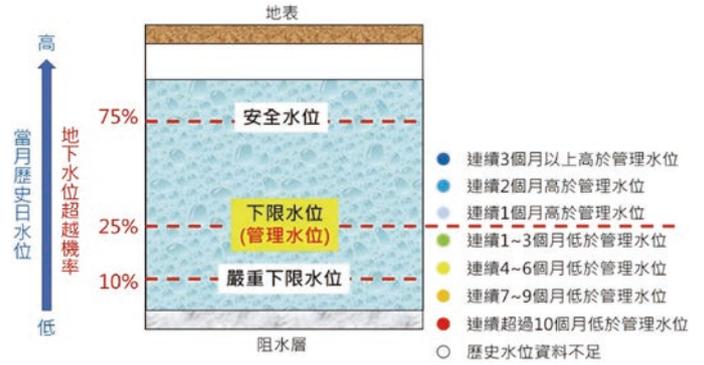


圖 10 管理水位與水文情勢燈號對照示意圖
(資料來源：本文自行整理)

參考文獻

1. 國立雲林科技大學 (2017), 台灣地區地下水觀測網整體計畫成果彙編 (81 ~ 105 年) (編號: 1010602578), 臺北市: 經濟部水利署。
2. 經濟部水利署 (2012), 地下水保育管理暨地層下陷防治計畫 (第一次修正) (98 ~ 103 年)。
3. 中華經濟研究院 (2014), 我國地下水資源政策之研究, 國家發展委員會專題研究成果報告 (編號: NDC-DSD-102-007), 臺北市: 國家發展委員會。
4. 經濟部水利署 (2020), 108 水利年報, 臺北市: 經濟部水利署。
5. Stephen Foster, Héctor Garduño, Albert Tuinhof, and Catherine Tovey, (2010), Groundwater governance: conceptual framework for assessment of provisions and needs, Washington D.C.: World Bank.
6. Schreffler, C.L. (1997), Drought-trigger ground-water levels and analysis of historical water-level trends in Chester County, Pennsylvania: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4113, 6 p.
7. Smith, Brian A., Hunt, Brian B., and Holland, W.F. (2013), Drought Trigger Methodology for the Barton Springs Aquifer, Travis and Hays Counties, Texas: Report of Investigations 2013-1201, published by the BSEACD, December 2013.
8. Goulburn-Murray Water (2006). Groundwater Management Plan for the Katunga Water Supply Protection Area 2006. Department of Environment, Land, Water and Planning.
9. 中興工程顧問公司 (2004), 台灣地區地下水資源管理決策支援系統建置 (4/4) (編號: MOEAWRA0930017), 臺北市: 經濟部水利署。
10. 國立雲林科技大學 (2011), 國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心 100 年度工作推動計畫補助計畫, 臺中市: 經濟部水利署。
11. 國立雲林科技大學 (2017), 雲彰地區水利工程之地下水補注功能調查及研析 (編號: MOEAWRA1060170), 臺北市: 經濟部水利署。
12. 國立雲林科技大學 (2018), 107 年度地下水觀測網及地下水保育專案服務計畫 (編號: MOEAWRA1070288), 臺北市: 經濟部水利署。
13. 國立雲林科技大學 (2019), 108 年度地下水觀測網營運及保育專案服務計畫 (編號: MOEAWRA1080339), 臺北市: 經濟部水利署。
14. 國立雲林科技大學 (2020), 109 年度地下水觀測網營運及保育專案服務計畫 (編號: MOEAWRA1090337), 臺北市: 經濟部水利署。





臺灣山區水文地質特性以及 地下水資源分布概況

李振誥／國立成功大學資源工程學系 特聘教授

林宏奕、龔文瑞／國立成功大學大地資源研究中心 研究員

台灣地處亞熱帶季風區，加上地形陡峭多山，造就豐枯期鮮明之氣候，受迎風面與地形之影響，由北到南豐枯條件差異甚大，豐枯季降雨比例由北部 3：1 至中部 7：3 至南部 9：1，如此懸殊的降雨分配造成全台水資源分配的差異，也提升水資源供給的難度。地下水與地面水過去即扮演台灣地區主要水資源供應之角色，水庫供水、地面引水與地下水抽用供應台灣主要水資源需求。以 2021 年度上半年大旱為例，地面水供應受氣候影響急遽下降，地下水遂成無水可用時唯一緊急救援水源（海淡、再生水還待長期規劃），枯水季時期地面水量銳減，則是近年水資源窘迫之主要原因。而台灣豐枯期降雨差異顯著，枯水季降雨稀少，而枯水季地面水量之來源則為上游山區蓄存地下水流出，顯示地面水量與山區地下水息息相關，加上平原地下水在供水系統原本就佔有相當比例，山區地下水同樣為平原區補注來源之一，如此顯見山區地下水資源對台灣之重要性。

前言

因應平原區地下水資源之保育及開發，經濟部水利署與經濟部中央地質調查所共同推動「臺灣地區地下水觀測網整體計畫（81～97年）」以臺灣九大地下水分區為主要標的進行水文地質測勘與地下水位觀測資料庫建置，成為臺灣地區地下水管理以及研究之重要依據。而台灣山區佔全島面積的三分之二，遠大於平原區之面積，過去研究亦顯示其為台灣平原地區地下水資源的重要補注來源區域，為了解本島地區山區地下水賦存量、滲流通道以及監測其變動，經濟部中央地質調查所遂推動「臺灣山區地下水資源調查研究整體計畫」，用以瞭解台灣山區地下水概況並設立觀測網以掌握山區地下水動態，該工作進程包括三期，分別為臺灣中段山區（99～102年）、臺灣南段山區（103～106年）以及臺灣北段山區（107～110年）（圖1）。工作中針對山區地下水資源進行基本調查、匯整分析，建構水文地質架構及概念模式等重要工作，顯示對整體水資源之評估概念，已由傳統地下水分區延伸至集水區範圍，藉由整體計畫的

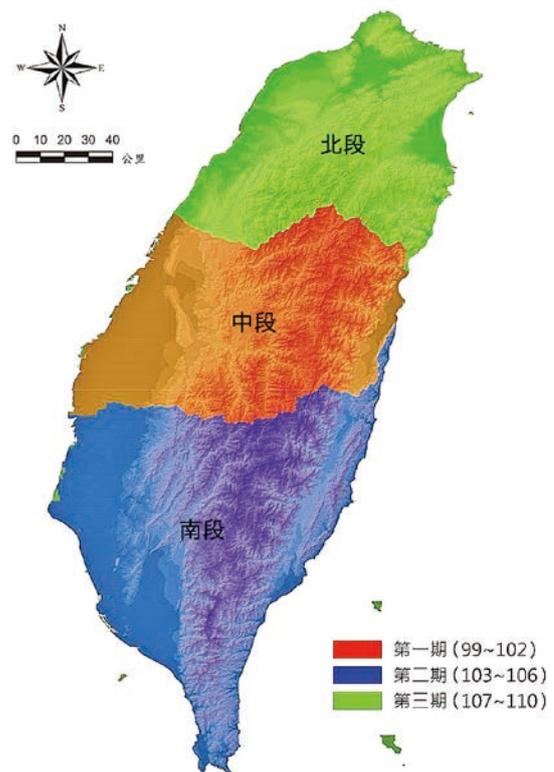


圖 1 台灣山區地下水資源整體計畫調查分區圖

推動，可釐定台灣山區之水文地質架構，據以評估地下水資源的蘊藏量，進一步掌握其與平原區的地下水系統的交互關係，並將完成之相關成果彙整於山區水文地質資料庫，分析山區地下水資源取用潛勢、區位及方式，研擬永續經營策略。

台灣山區水文地質架構

藉由前述「台灣山區地下水資源調查與評估」整體計畫，前後為期十二年至今，針對台灣山區水文地質進行鑽探、觀測、地球物理、地球化學以及應用各項分析技術，已對於架構台灣山區地下水文地質架構進行探查與分析，瞭解山區地下涵水層特性以及降雨、補注、流出概況。

過去文獻指出，山區地層構造相對簡單，覆蓋在山區新鮮基岩之上的岩石碎屑層，即所謂的岩屑層 (Regolith)，主要由地底下的基岩經過風化、侵蝕作用而形成，以及經由重力、流水、風、冰河等介質搬運及堆積而來。由於岩屑層與基岩 (Bedrock) 的邊界乃許多地下水文現象與生物作用的重要自然界限，根據圖 2 所示，山區水文地質分層可視為岩屑層與基岩之劃分。岩屑層厚度即為地表至新鮮岩盤 (Bedrock) 頂部的厚度，包括有：土壤、回填物、沖積層、崩積層、殘餘土 (Saprolite) 與破碎底岩 (Saprock) 等。

最直接獲得岩屑層厚度之方法為現場鑽探，然山區鑽探工作不易且成本甚高，資料點甚為有限，故「台灣山區地下水資源調查與評估」利用岩心資料與地電

阻探測結果推估岩屑層厚度，可於山區範圍內獲得較多岩屑層後度資料，然此法同樣受限於鑽探點位數量與地電阻探測位置，欲獲得廣域之岩屑層厚度，則需進一步之推估方法。岩屑層空間分布推估之方法，一般而言有 3 種方法：(1) 物理模式：利用物理性質如風化、侵蝕與堆積速率以及基岩的性質推估；(2) 經驗統計模式：應用統計方法利用關聯變數來推估；(3) 資料點內插。而經由多年資料分析與驗證，「經驗統計模式」於台灣山區可獲得較佳成果。利用資料點位岩屑層厚度與地表地形相關因子 (坡度、曲率、地形濕度指數、距水系距離等) 及土地利用建立關聯模型，並利用經驗統計方法建立廣域岩屑層等厚度線。

過去文獻指出影響岩屑層厚度之因素包括坡度、土地利用、地形曲率、母岩性質、風化速率、氣候、植被、上坡面集水面積及岩性等因素 [2]。而推估岩屑層厚度之方法大致可分為物理模式 (physically-based)、經驗統計模式 (empirico-statistical from environmental correlates) 及觀測點內插 (interpolation from point samples) 等 3 種方法。多元迴歸分析之「逐步迴歸法」是目前運用甚廣之複迴歸分析法之一，此法結合順向選擇法以及反向淘汰法兩種程序之優點，同時也是多元迴歸分析中使用最頻繁的一項預測變項方法，使用多元迴歸法搭配台灣山區資料，可建立適用之迴歸模式。台灣山區分析成果指出，影響岩屑層最主要因素為岩性以及坡度二項因子，控制岩屑層厚度主要因素為基岩的性質以及地體構造，不同的岩性其岩屑

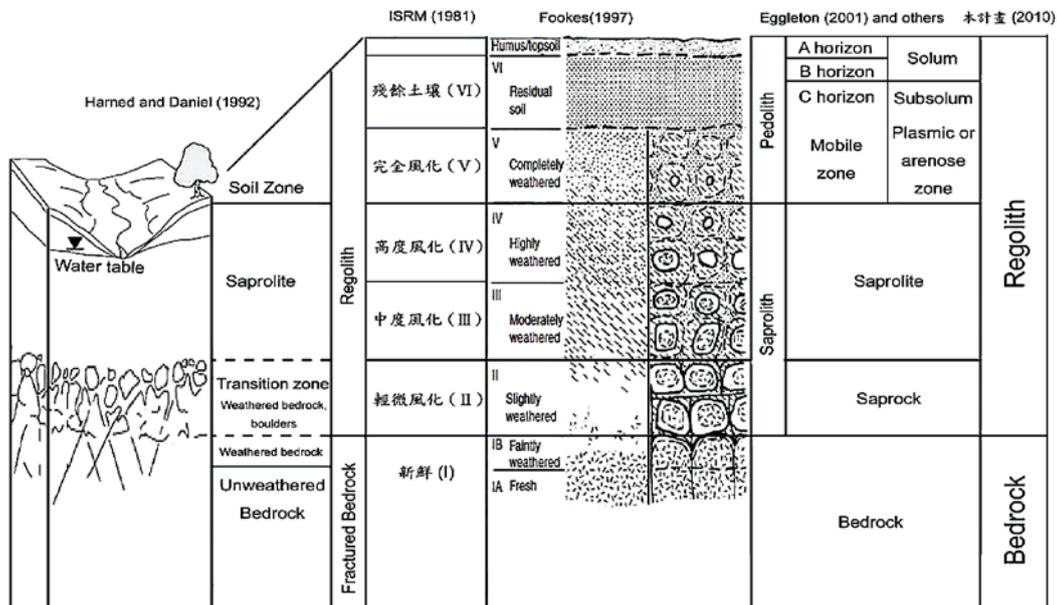


圖 2 岩屑層示意圖 (修改自 Roach [1])

層厚度即有很大的變異性。而在相同岩性中，岩屑層之空間變異則主要受地形因素及地表覆蓋影響。

分析成果顯示除大型山間盆地、主要河川河谷堆積範圍外，山區岩屑層厚度約為 60 公尺以下，地形越陡則岩屑層越薄，最低僅約 3 公尺厚度。配合山區鑽探與地下水觀測成果，以及前述山區分層概念，顯示山區地下水系統單純，主要為單層非承壓含水層結構，第一含水層厚度直接影響山區地下水之利用與蓄存。

山區地下水流動特性

由前述山區調查與評估成果，顯示山區水文地質架構相對平原區單純，山區岩盤深度淺且透水性不佳，岩盤以上僅有厚度數公尺至數十公尺岩屑層形成單一非侷限含水層，地下水受重力影響匯於河谷低地，上游地下水流動匯集蓄存於河床沖積層中，受陡峭地形影響出滲為河川水向下游流動，直至地形趨緩河段河川沖積物堆積，沖積層範圍增加、增厚，河川水因豐枯水期水量變化以及沖積物顆粒漸細下，於河段中發生河川水與河床地下水出入滲之混合情況，最終穿越麓山帶形成沖積平原。

由前述架構顯示，由於山區含水層蓄存有限且地形變化甚大，山區地下水與地面水系統關聯性甚高且交換頻繁，不同區域之地下水流動特性不同，依坡度、岩屑層厚度以及地下水－河川水關係，可沿河川剖面由上游往下將其分為三段如圖 3 概念圖所示，其地下水流動特性以及概念整理如下：

1. 山區地下水流出段：本段位於最上游河段，地形陡峭而岩屑層厚度甚薄，受地形影響地下水位年變動幅度相對較大，地下水於濕季降雨補注後於枯水季持續釋出，河谷沖積層由於搬運作用顯著，同樣較薄且沉積顆粒以礫石為主，粒徑大透水性佳，河床地下水穩定向下游流動，僅於河道坡度變化處有局部地面水－地下水交換發生，然而其規模甚小。
2. 山區河川水與地下水交換帶：受地形趨緩影響，本段河谷坡度較為平緩，沉積物顆粒漸細且沖積範圍較廣，河床沉積物仍以礫石與砂為主，然因枯水季河川流量降低，河床質中偶有薄層細沙或泥，造成垂向透係數低於水平透水性之異向性情況，在河川水量開始消退之枯水季初期，由於河床水平透係數佳故地下水持續向下游流動，然河川水量水位

下降以致於河川入滲地下水量減少導致河床地下水位下降，河川補注量雖可能小於地下水流失量，然仍為河川水補注地下水狀態，持續至枯水季末時可能形成河床地下水位甚低於河川水位之懸浮河現象；而豐水季來臨時，降雨帶來之充沛河川水量除增加河川水位外，大量河川水造成河床冲刷故河川水迅速補注地下水，此時河川水量甚豐，然由於河床地下水位同樣甚高，多形成河床水流出補注河川水狀態如圖 4。

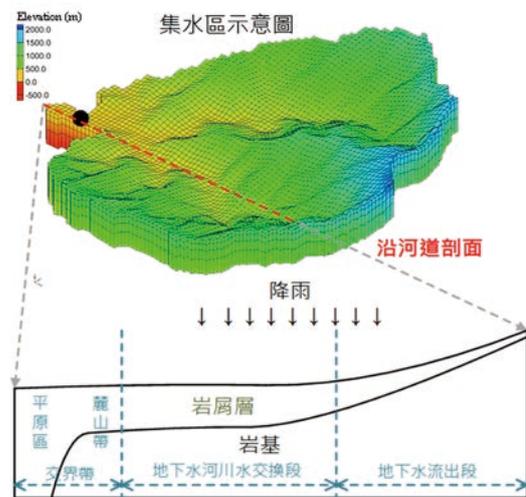


圖 3 山區水文地質概念分區圖

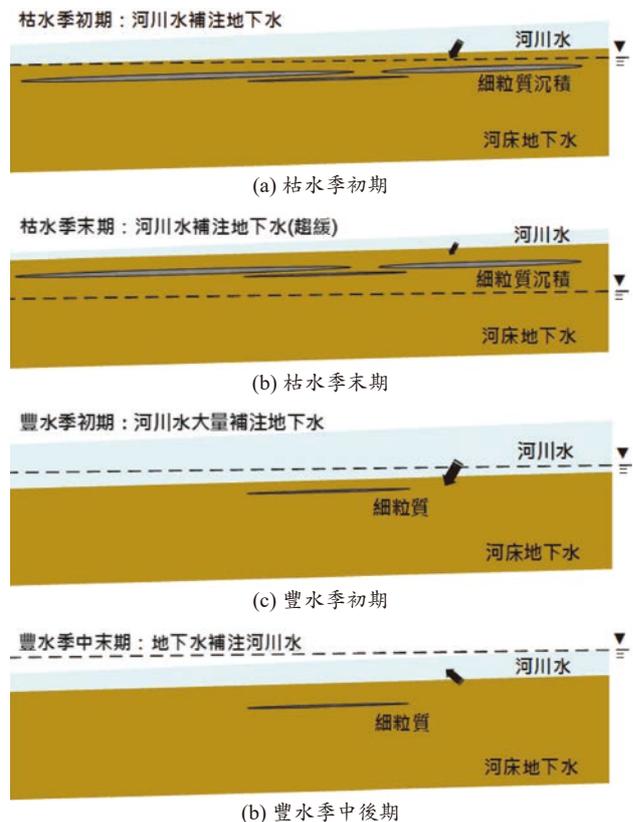


圖 4 豐枯季下河川交換段示意圖

3. 山區與平原區交界帶：山區河系穿越麓山帶後，由於坡度驟減形成沖積扇平原，在山區與平原區交界帶區域，最主要差異在於岩盤深度變化，麓山帶區域內岩盤深度多約數十公尺以內，麓山帶以下平原岩盤深度則為數百公尺以上，由於地形趨緩形成沖積扇，而沖積扇扇頂由於沉積顆粒較大，透水性佳以致於河川水於此區域內入滲於含水層中。此交界帶中，若麓山帶岩盤較淺，或是地質構造影響，以致於河床地下水通水斷面減少，則上游形成盆地地形，上游河段地下水位甚淺，地下水於麓山帶區域出滲至河川中，通過麓山帶後則入滲於沖積扇扇頂如名竹盆地、台中盆地；若岩盤深度與上述山區交換段相當，則自中段至麓山帶交界主要皆為河川水補注地下水狀態如荖濃溪、隘寮溪、林邊溪等。

由上述山區概念分區可知，主要水系位置即為地下水與地面水匯流區域，加以河川堆積層較厚，蓄存體積足夠，應為地下水取用之優良場址。

山區地下水資源潛能區

山區資料甚為有限，要完整進行地下水或伏流水場址調查評估工作往往費時且所需不貲，利用潛能指標系統可針對大區域快速篩選出相對高潛能區域，合理挑選可能場址並縮小調查評估區位，節省時間經費以提高水資源評估效率。

地下水是自然水循環中一部份，受自然補注將會再生而提供利用，故合適之地下水利用場址，並不決定於蓄存量多寡或是區域大小，而是開發利用後易受降雨、河川、其他地下水補注而恢復水位區域，即為適宜之地下水開發場址，建置山區地下水資源開發潛能評估系統，目的在比較山區各區域間地下含水層可供地下水開發之潛力。在資源永續利用考量下，地下水資源開發須對區域地下水環境降低衝擊，並可維持於預設之可容許改變限制下，考慮在自然條件下，經過人為開發後，含水層水位恢復之能力，視為其地下水開發潛能，當此項指標越高時，代表其含水層恢復之能力越高，即經過地下水開發造成之衝擊越低，且代表其補注效率較佳，可能成為較優良之地下水可開發區域。

山區地下水資源開發潛能評估系統參考 Foster^[3] 架構之地下水脆弱度指標 (groundwater vulnerability)，考慮補注源指標 (groundwater occurrence rating)、地表

入滲指標 (overlying infiltration rating) 以及地下水深度指標 (depth to water rating)，合稱 GOD 指標。其中區域地下水補注能力，將影響地下水開發後含水層之自我恢復能力，影響地表入滲包括氣象因子如降雨分布，以及地表提供入滲之能力 (地下水補注潛能)，而地下水位深度代表入滲水補注至含水層之難易程度。本潛能指標考量單一自由含水層架構，故地下水補注來源為降雨入滲，且補注潛能因子是以台灣山區條件進行篩選，依據 GOD 評估模型之概念，將其三項指標轉化為：

1. 補注源指標 (Groundwater Occurrence Rating)

年補注深度代表在降雨事件發生下，年度補注量之總和，包含考慮不同區域氣象條件差異以及地質、地形等因素，年補注深度代表在自然不同區域每年進入含水層之補注量，故選定為補注源指標。補注量之評估則基於水平衡分量之假設，利用河川基流分析法求得地下水補注率，並配合降雨量資料，計算山區地下水補注量分布，而由過去工作成果顯示，由於分析區域包含山區部份平原區，受地形影響導致降雨量常呈現數倍差距，為免單一因子成果之偏態分布影響整體開發潛能，故補注源指標之計算方式，是將各網格之入滲深度取對數後，除以分析區內最大補注深度之對數值。

2. 地表入滲潛能指標 (Overlying Infiltration Rating)

地下水補注潛能代表雨水穿過地表補注至含水層之能力，當補注潛能越高時，代表降雨越容易補注至含水層，當地下水開發後，越容易因為補注而恢復水位，故本分析架構採用山區地下水補注潛能 (Yeh *et al.*^[4]) 來代表地表入滲指標，依各網格之補注潛能成果，除以分析區內所有網格補注潛能之最大值，完成地表入滲指標。

3. 地下水深度指標 (Depth to Water Rating)

地下水位深度 (與地表之距離) 越小，代表補注水越容易進入地下含水層中，此外，地下水位資料顯示，離水系距離越近，通常其地下水位深度越小，故地下水位深度與含水層在開發地下水資源後之恢復能力有關，本項分析利用「台灣山區地下水資源調查與評估」計畫之山區地下水位資料以及既有地下水觀測水位，進行地下水深度指標設定。

依上述三項主要評估因子邏輯，可建立山區地下水開發潛能評估架構，並參考 GOD 指標評估方法，將三項因子轉化為 0 ~ 1 之數值，利用指標互乘之方法，以

評估區域可開發潛能（圖 5），此方法可避免採用因子權重評估方式所造成之主觀判斷因素，而正確依照其相互大小關係評定出計畫區可開發潛能分布。

上述整體工作「台灣山區地下水資源調查與評估」已完成全台灣山區地下水開發潛能評估成果整合如圖 6 所



圖 5 山區地下水資源開發潛能評估架構

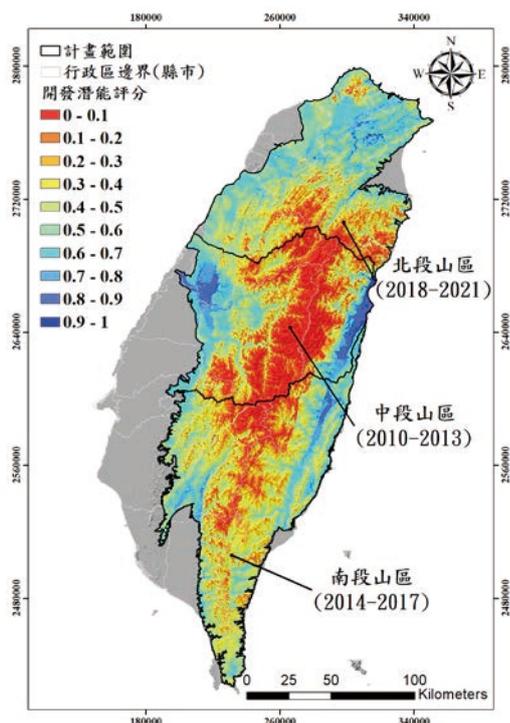


圖 6 全台灣山區範圍地下水開發潛能評分分布圖

示，圖中可見，自然河川系統本就為地面水與地下水匯集、交換區位，尤其主要河系河谷沖積範圍、山間盆地皆為地下水開發潛能相對較高位置，其中規最大且潛能最高為台中盆地與花東縱谷區段，其餘則分布於主要河系河谷範圍中。由於山區資料甚為有限，要完整進行地下水場址調查評估工作費時且成本甚高，利用潛能指標系統可針對分析區域快速完成潛能評估以篩選出相對高潛能區域，可供不同尺度下選址參考，合理挑選可能場址並縮小調查評估區位，整體而言可供大區域水資源規劃參考運用，局部區域則可篩選相對較高潛能區域，縮小範圍後投入調查以節省時間經費，提高水資源取用評估效率，是為本工作之重要貢獻。

結語

在整體計畫諸多團隊的努力下，台灣山區水文地質工作已留下了相當的背景資料以及調查、分析成果，對於山區地下水的特性、賦存以及動態，都有更深入的瞭解，然對於台灣整體地下水資源的運用以及保育，也留下了多項課題，相信未來山區地下水在整體水資源架構上將扮演更重要的角色，包括局部區域的供水利用、抗旱備援用水、水資源枯旱預警等，都是相當重要的延伸應用，在期待山區地下水工作開花結果的同時，也歡迎有興趣的人員加入，一同為台灣的水資源環境努力，以期台灣水資源永續與安全之未來。

參考文獻

1. Roach (2008), Explanatory notes for the canbelego 1:100,000 regolith-landform map new south wales, CRCleme open file report 238.
2. Minasny, B. and McBratney, A.B. (2001). A rudimentary mechanistic model for soil production and landscape development: II. A two-dimensional model. Geoderma 103, 161-179.
3. Foster, S. (1987), Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. In: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, H.G., Eds., Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, Committee on Hydrological Research, The Hague, 69-86.
4. Yeh, H.F., Lee, C.H., Hsu, K.C., and Chang, P.H. (2009), GIS for the assessment of groundwater recharge potential zone. Environmental Geology 58, 185-195.
5. 經濟部中央地質調查所 (2013)，臺灣中段山區地下水資源調查與評估 (總報告)。
6. 經濟部中央地質調查所 (2017)，臺灣南段山區地下水資源調查與評估 (總報告)。
7. 經濟部中央地質調查所 (2021)，臺灣北段山區地下水資源調查與評估 (總報告)。



地下水人工補注與 伏流水開發之回顧與前瞻

丁澈士／國立屏東科技大學土木工程系 教授兼水資源教育及研究中心 主任

台灣西部平原之沿海地區，為第四紀沖積平原地質結構，其組成為多層交錯之含水層與阻水層，因地下水源被大量且集中開發，未能妥善管理，導致該些平原沿海地區產生地層下陷、海水入侵及土壤鹽化等環境地質災害。實施地下水人工補注為國際推動及解決環境地質等災害最佳方法之一，透過本土可行性研究成果，乃推動台灣第一座地下水人工補注工程；因經第一期實施試營運後經由成效評估，可達緩和地層下陷目標並尚有多餘水源可供開發，乃遵循生態取水之舊工法，付以新材料與施工技術，推動輻射井工程，汲取高品質之伏流水，提供民生用水。屏東縣政府也參考國外提出「水銀行」運作的想法產生，期望透過水銀行的操作，能使大潮州人工補注湖的營運能自給自足，達到永續經營的目標；並能將「洪水資源化—利用洪水、蓄水地下、增源減洪」經驗，提供地層下陷之縣市之新思維。本文就地下水人工補注與伏流水開發二議題之案例作回顧與前瞻論述與報導。

前言

台灣四面環海，是一個海洋島嶼的國家，面積約 36,000 平方公里，位於菲律賓海板塊和歐亞板塊的聚合邊界，為一個造山作用活躍的活動構造區；在三百萬年前左右，碰撞山脈已上升成高山，規模和現在的中央山脈相當。隨著呂宋島弧持續地衝撞，山脈不斷地向西加寬、向南延伸，發展成今日的中央山脈；從而形成了東西兩側河流的自然分界線^[1]。屏東平原由三大主要河流的第四紀沖積扇地質形成。含水層包括平原北部由滲透性極佳的礫石及粗砂構成之自由含水層及滲透性較差屏東平原南部之拘限含水層；地下水源主要來自扇頂直接降雨入滲補注及三大河系間接補注。由於沿海地區地下水源超限及不當開發，導致該平原沿海地區地層下陷、土壤鹽化及海水入侵等環境地質災害^[2]。循依黃河水利委員會委員長李儀祉先生提出以溝洫洪水（即所謂地下水人工補注）為大潮州地下水人工湖補注計畫可行性規劃階段之重要參考依據^[3]。1995 年，遂由行政院核定之地層下陷防治執行方案計畫項目經費及屏東縣

政府自籌款之下，啟動屏東縣大潮州地下水人工湖補注計畫。期間經可行性研究、規劃、環境影響評估、經濟部水資源審議委員會及行政院等審議通過；隨後於 2018 年 5 月核定實施「大潮州地下水補注湖第 1 期工程實施計畫」，第 1 期計畫先開發 50 公頃並作為先驅試驗計畫，進行補注效益評估後，俾作為第 2 期 250 公頃之依據。核定經費為 14.13 億元。並經 2021 年 9 月屏東縣政府辦理大潮州地下水補注湖第 1 期計畫效益評估，成效達預定目標，目前呈報中央審議爭取預算中^[4]。茲因本計畫成效良好，除可挹注地下水源提升沿海地層下陷區地下水位外，尚有多餘水源可供開發與利用，屏東縣政府乃啟動伏流水工程規劃，藉昔日，日本水利技師利用當地地形地貌與氣候及河川水力的特性，對河床變動不定、激流河川或水流轉變極大的河川是很好的取水工法，進行二峰圳的設計，成功地引水灌溉並且提高了蔗田的產量^[4]。以今日永續及生態工程的角度來看，圳體構造雖不是雕工精細的藝術品，但卓越的土木設計技術，見證了文化資產的

科學價值^[5-10]；因此，參考二峰圳灌溉工程之百年技術，除在高屏溪右岸沿線依序開發共 6 座輻射井，穩定地汲取伏流水供應給民生及高科技工業用水；屏東縣政府也經評估後沿用此技術在林邊溪下游處，規劃以輻射井工程方式取用多餘可供開發之伏流水予以利用，目前工程正實施中。屏東縣政府更參考了國外提出「水銀行」運作的想法，期望透過水銀行的操作，能使大潮州人工補注湖的營運能自給自足，達到永續經營的目標^[11,12]。本文就地下水人工補注與伏流水開發二議題，就近年來由經濟部水利署、台灣自來水公司、屏東縣政府之研究、規劃設計，筆者參與或收集之計畫報告作介紹報導^[11,12]。

地下水人工補注

地下水人工補注概述

昔黃河水利委員會委員長李儀祉先生（1882～1938 年），年在 27 歲時（1909 年）到德國研讀水利工程，回國後即主張溝洫洪水（即所謂蓄水地下）。在中華叢書委員會 1956 年選輯「李儀祉全輯」第 124-125 頁寫到^[3]：

利用洪水蓄水地下，洪水之由於雨，或由於山上積雪之溶，要皆能將地面上——山上或田塍——所有對於生長植物沃美之料滌盪而去，以之入於河而納於海，噫！是誠天下之至可惜者也。

洪水之時或即多雨之期，故水在此時不為人恩，而或反為人害。然天時稍旱，雖欲得此水不可有，於是河枯井竭，苗槁舟擱，國家經濟及人民生計大受損害矣，西北黃河流域，尤感其困。洪水在綏諸省，亦有為農民引起灌溉者，然面積極小，以百分計殊等於零。余於二十年前即主張以溝洫蓄洪水，惜此事今尚未能引起國人注意。最近數年則歐人亦頗注意於此問題，尤以在德國為盛，所謂蓄水於地下。

地下本為蓄水之大庫……地下蓄水之量，既亦受天時之變異，有豐有枯，救濟其失，在如何以人力增裕地下水藏之量，溝洫之制，其一端也。

吾民宜於洪水至時，未入於海之先，竭其智能以利用之，導引以灌溉西北黃土及砂土地面，用之最大也。不能立時利用者，則導而蓄之容儲地下，其在地下並非損失，而仍能繼續全部為吾民所用：(1) 地下水面高，則禾苗可以得其滋潤，

其益較之地面上灌溉尤大；(2) 地下水可以鑿井汲引以為灌溉及飲水等用；(3) 地下水滲出地面，泌而為泉，仍為人用；(4) 地下水之流入溪流者亦增加河水流量、利航、利工、利農，其利仍在。

增裕地下水藏之法，有：(1) 在泉源之處掘深槽及滲漏地層已收泉水入地，使不至隨河水流去。(2) 在山坡容易透水之處掘深槽。(3) 地面上有苔蘚，母壤及他種不透水之覆掩足以阻水之滲入地下者，除去其層。(4) 增加及擴大已有之滲水區域。五、堰堵溪流，開鑿槽向水溝以引洪水至可以容水之處。西北之黃壤，層積至厚，容水量至大，西人有以海綿比之者，固天然滲蓄水之一物也。應極人之所能以之蓄水。

因循李儀祉先生提出之地下水人工補注概念與方法之論述及考慮林邊沖積扇頂地區地質環境及水文地質分佈之特性，經科技部及經濟部水利署補助研究經費，實施可行性研究^[13-15]。經多年之現場試驗成果發表國際期刊，顯示以林邊溪河川流量之特性，汛期或洪水期之溪水導引進入高滲透性地表滯洪補注池滲漏入地層地下含水層去增裕地下水量，可達成聯合國教科文組織提倡「善用我們的地下水庫」之主張與推薦如（圖 1 和圖 2）^[16,17]。

屏東平原概述

屏東平原位於臺灣之西南端，北與阿里山山脈的南端相隔，西接嶺口丘陵地，南接臺灣海峽，東以潮州斷層與中央山脈南端大武山山脈相隔，海拔 100 公尺以下之平原地帶面積約 1,130 平方公里。本區域南北長約 60 公里，東西寬約 20 公里，地勢由東北向西南緩斜，內有高屏溪、東港溪及林邊溪流域等三大主要河川貫穿本區，最後注入臺灣海峽。

屏東平原主要在海拔 100 公尺以下之平原地帶，此區域之地面水域位於林邊溪流域，由西擴展至東港溪，南邊延伸至士文溪。林邊溪發源於東側之南大武山，西流至來義鄉大後村（此段稱為大後溪）後，約往南流動，並於來義大橋附近與由東流入之來社溪匯流而轉成西南流（此段稱為瓦魯斯溪），並於丹林大橋附近出山谷往西南流，於新埤鄉萬興附近，與東南側之力力溪匯流後，向西南流入臺灣海峽，夏季降雨量大，加上坡陡流急，河水之沖刷力大，故強勢河水夾帶大量的砂石流往平地。河流於切穿潮州斷層出谷口後，因坡度減緩、

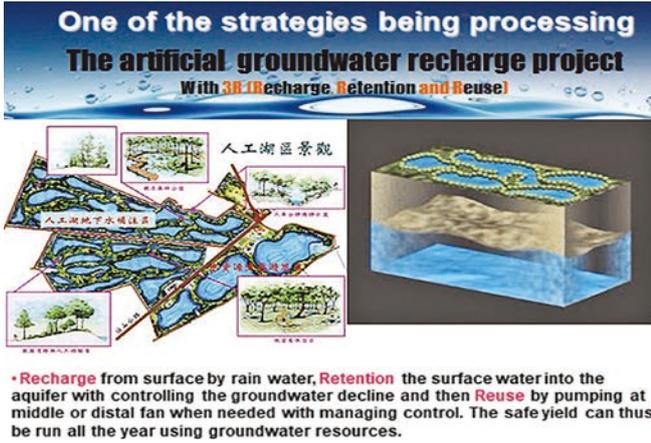


圖 1 屏東平原地下水補注與地下水庫示意圖
(資料來源：屏東縣政府，2021 [1])

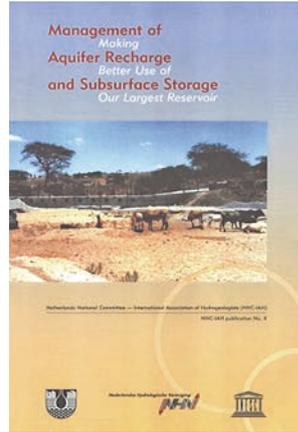


圖 2 善用我們的地下水庫
(資料來源：<http://documents.worldbank.org>)

流量分散，河水漸無攜帶負荷物，於潮州斷層崖下往沖積扇扇端或兩側依粒徑大小而漸次堆積，越靠近谷口堆積的粒徑越大。河川出谷後流路不穩，常有改道、分歧的情況；而多次的河道擺動後，孕育出林邊溪沖積扇地形。林邊溪沖積扇扇頂高度約 100 公尺，扇端高度約 20 公尺，扇徑約 9 公里，扇面則有台糖公司之萬隆農場、林後農場、南岸農場及泗林等農場 (圖 3) [2]。

地下水人工補注原理及案例

地下水人工補注定義：在有規劃之條件下將地面水導入在地表之入滲補注設施，藉由天然重力或加壓，進入地下含水層 (即地下水庫)，在天然補注時不足，足夠提供超過平常之安全出水量。地下水人工補注必要條件：(1) 合適的水文地質：考量含水層組成結構、沈積環境、地層水文地質特性、大氣降水、地面水與地下水三者之關聯性。地下水人工補注含水層的厚度，一般以 30 至 60 公尺為補注效果較佳，含水層產狀最好平緩且分佈廣泛，且以透水性中等之各類砂質地層或具裂隙岩層高透水性岩層最好；(2) 補注地區充裕之補注水源：在多數情況下可利用天然狀態或經過人工調節處理過的地面水以獲得補注地區較佳之補注水源，也可以利用匯集的雨水或臨時性的地面水或經過處理之回收水 (符合補注水質標準) 以獲得補注水源 [18]。

大潮州地下水人工補注湖計畫簡介

大潮州地下水補注湖計畫，緣起於林邊溪下游地區地下水超抽及上游土地利用開發，導致地下水補注不足，造成地層下陷及海水入侵地下水含水層；下陷

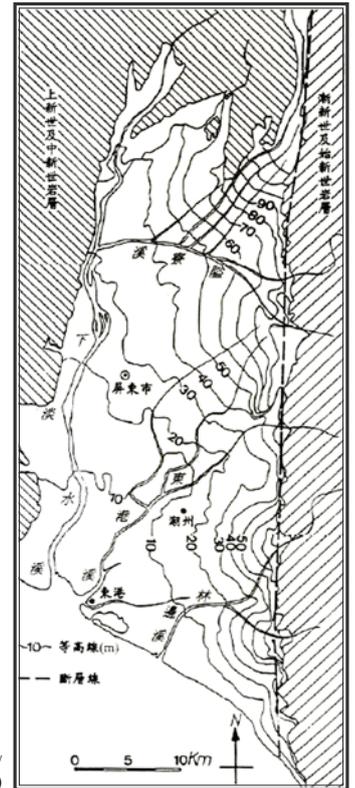


圖 3 屏東平原沖積扇
(資料來源：<http://pc183.hy.ntu.edu.tw/gwater/d1.php> [2])

區雨季排水不良，海水倒灌，影響生活品質及生命財產安全，耗費大量資源投注於各種排水防洪設施；地下水質由於補注量不足及其他因素，淺層地下水水質有惡化傾向。緣此，屏東縣政府於 1999 年間在經濟部水利署前身之經濟部水資源局補助經費支援下，委託國立屏東科技大學執行「推動屏東縣地層下陷防治工作執行計畫」及「屏東平原設置人工湖可行性評估計畫」。在委託計畫結論建議行動方案中，以人工湖規劃設置列為第一優先，建議利用林邊溪上游之台糖公司現有名為萬隆農場，於 300 公頃農場設置人工湖區補注地下水。依據該行動方案建議，屏東縣政府再於 2003 年 5 月委託中鼎工程股份有限公司規劃「林邊溪上游人工湖設置工程計畫」，業已由完成之相關可行性規劃及環評作業，藉此地下水補注工程計畫達到國土復育、分洪、疏洪及滯洪之功能 [14]。以執行近十年試驗，並取得諸多具體成果，成為推動本計畫之基礎。

行政院於 2005 年 1 月通過「國土復育策略方案暨行動計畫」及 5 月通過「國土復育條例 (草案)」。2008 年 5 月行政院核定同意屏東縣政府為開發執行單位，在「國土復育策略方案暨行動計畫」上位計畫之指導原則之下，以目前所知全台灣最佳地下水補注區域之一，積極推動規劃建置地下水人工補注湖，並

結合地層下陷地區復育計畫，以尊重及順應自然之生態新思維，推動此一以攔截暴雨期之洪水，經沉澱後以人工湖補注地下水之國土復育與保育計畫，以減緩地層下陷速率與水患頻率，並有效增加地面水之蓄存率，利用自然的涵容力量轉而成為地下水庫進行復育與有計畫開發水資源。本計畫原規劃為一次完成，為顧及台灣未曾有過地下水人工補注工程之經驗和成效與安全等因素考量，乃分二期實施。第 1 期計畫先開發 50 公頃並作為先驅試驗計畫，進行補注效益評估後，俾作為第 2 期 250 公頃之依據。原核定總經費新台幣為 18.93 億元。2009 年莫拉克颱風後修正為 14.13 億元。計畫效益分別為：(1) 地下水補注及水資源涵養效益（預估年補注 1.5 億立方公尺，補注 10 年後，可提供 6,000 萬立方公尺的水源）；(2) 地層下陷防治效益（預估持續補注 10 年後與地下水開發利用管理下，地下水位可提升 5 公尺）；(3) 林邊溪分洪、滯洪減災效益（分洪 116CMS，350 萬立方公尺）；(4) 改善沿海地區地下水鹽化現象；(5) 景觀美質與週邊土地價值提升。

屏東縣政府為因應環境氣候變遷，以攔截林邊溪暴雨期的地面水蓄存於其沖積扇頂區的地下含水層，並透過地下水的流動機制，補注涵養屏東地區的地下水，俾使沿海低窪地區減少水患襲擊，進而達到防洪減災、復育地層下陷區甚至屏退海水入侵的功能。為達上

述之目標，乃設置國內第一座多功能人工補注湖——大潮州地下水人工補注湖，在豐水期時攔截多餘的地面水，挹注入地下含水層，延長其在陸地停留的時間，其補注水或長期瀦蓄在下游含水層中、改善地層下陷區的地下水位，或者於下游出滲林邊溪或東港溪地面水體，成為穩定河川基流量和改善河川水質水源；如若水量充沛，亦可評估開發多餘水資源，作為公共給水用途。「大潮州地下水補注湖第 1 期工程實施計畫」於 2013 年 3 月日動工，第 1 期工程已全部完成並持續營運。

大潮州補注湖以防洪減災、地面水 / 地下水資源聯合運用為目標，規劃完成補注湖第 1、2 期計畫工程後的補注量為每年 1.5 億立方公尺，係基於取水工最大引水量 116 m³/sec、補注湖區入滲率 10 m/day 作為設計依準。為確保計畫能達到預期補注效益，已 2018 年底全部完成之第 1 期工程計畫並進行營運項目，包含：取水工程、輸水工程、調節池、第 1 沉澱池、第 2 沉澱池，監控中心、以及相關之監測系統等，希冀達成預期之補注量體（圖 4）。

第 1 期工程計畫由 2018 年至 2021 年 6 月之補注操作推估顯示，3.5 年之引水工引水量約 3.43 億立方公尺；湖區 2 座沉澱池補注水量每年平均約 4,657 萬立方公尺，3.5 年累積補注量達 1.6659 億立方公尺。另屏東地區豐水期補注期間比同期補注前之地下水位抬升顯



圖 4 大潮州人工湖第一期計畫執行成果

（資料來源：屏東縣政府，2021^[1]）

著。本計畫以美國 USGS 所發展之三維地下水流模擬 MODFLOW 模式結合二維河流演算套件 SFR 模組建構大潮州補注水量模擬模式；並採用地下水歷線分析法進行屏東平原地下水區之水平衡分析。同時導入頻譜分析法，將原時間域的地下水位觀測資料進一步轉換至頻率域進行訊號分析，以辨識所造成的補注效益。大潮州補注湖區近年之平均年補注量為 4,657 萬立方公尺，持續補注 5 年後含水層系統逐漸趨於穩定；有效地在林邊溪沖積扇扇頂區域形成一個補注水丘，扇頂區域的地下水全面抬升至少 3 公尺，扇央的地下水位抬升約 0.1 ~ 2 公尺左右，扇尾則水位變化較不明顯，10 公分的水位抬升範圍擴大了一些，約距離補注湖區有 22 公里，扇尾部分區域有 10 公分左右的抬升，但影響較小，依此推斷在固定的補注條件下，水資源系統漸趨於穩定，整體含水層涵養增加，水力梯度增大。在持續 5 年補注的成效方面，年補注量約有 2,780 萬立方公尺（比例 59.7%）進入了第 1 含水層中，涵養了地下水資源，亦有 112 萬立方公尺、42 萬立方公尺、19 萬立方公尺的補注量分別進入到第 2、第 3-1、第 3-2 含水層，深層補注量隨時間增長而增加，年補注量共有 63.4% 進入含水層中，同時有 33 萬立方公尺的量體變成邊界出流量，一樣對於減緩海水入侵起了部份成效。最後剩下的 1,671 萬立方公尺（比例 35.9%）的補注量是經由河川出滲，又再度回到了河川當中；此河川出滲量中，林邊溪與東港溪所佔的比例約為 84% 與 16%。

水位站的水位頻譜分析的結果與模式模擬結果及

水位觀測亦相吻合，扇頂扇央及扇尾區的水位升高趨勢一致，並且發現補注前後頻譜圖上出現一個明顯的 0.17 (1/day) 的水位震盪訊號，此可視為大潮州補注湖特定的補注頻率。最後，利用模式模擬計算補注事件所造成的補注效益結果，同樣吻合了實際水位的觀測結果，亦即除了自然補注造成豐枯水期的水位消長外，大潮州補注湖確實透過人為的補注操作有效抬高扇頂區的水位超過 3 公尺以上。

此外在抽補操作的模擬上，以「屏東縣轄內伏流水調查計畫」所規劃之林邊溪昌隆及建功伏流水取水方案做為取水地點之模擬，取水量分別為 4.2 萬及 5.8 萬 CMD（立方公尺/日），此抽補操作模擬取 10 萬 CMD 伏流水後，其水文量差異為含水層蓄存比例由總補注量之 63.4 % 增加到 66.8%，出滲河川比例由 35.9% 降為 32.7%；顯現取水後效益比單純補注更加提升；且可供應 10 萬 CMD 水源作為公共用水。

第 2 期先期計畫先行配置 1 池沉澱池以及補注湖 2 座。主要考量：沿山公路以北區域均設置補注湖，以南區域因目前僅設第 1 沉澱池，故再設 1 座沉澱池，以利該下游區補注湖確保水質濁度之降低，且輸水路可不再穿越沿山公路（圖 5）^[1]。

伏流水工程

根據既有文獻記載，最早有「伏流水」之名詞為中國北魏晚期酈道元的經典名著「水經注」，在該書「卷四河水」裡有這樣的記載「… 其水重源又發，南

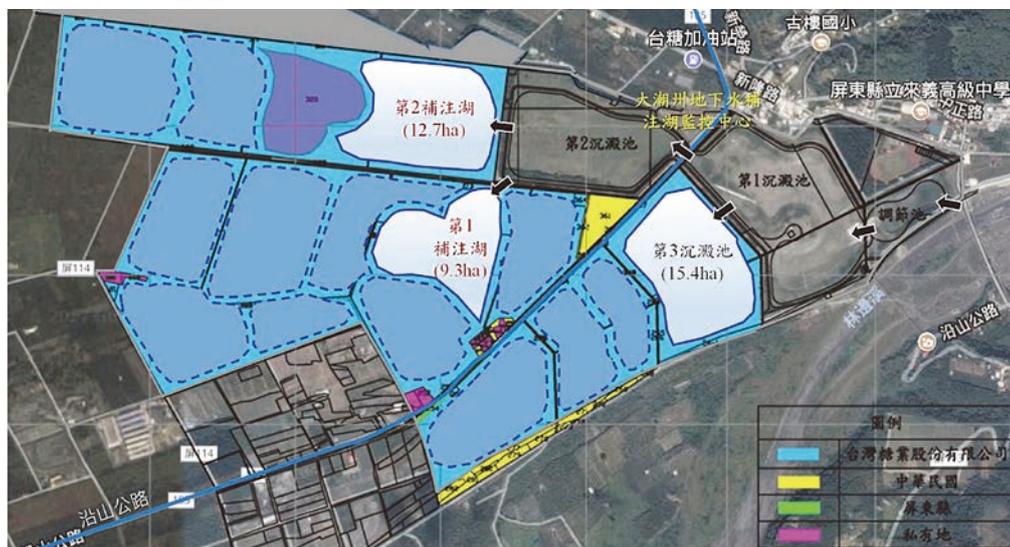


圖 5 屏東縣大潮州地下水人工補注湖第二期規劃內容

（資料來源：屏東縣政府，2021^[1]）

至西馬頭山，東截坡下，又伏流南十餘里復出，又謂之伏流水，南入於河。…」，可見該伏流水之定義較為廣泛，即不只為河床甚或河岸旁之逕流水源，若水源潛入地表下復伏流出形成逕流者，均可謂之伏流水。

開發伏流水之法源，根據 2017 年 9 月 8 日修正之《水利法施行細則》第二條定義：「水利法所稱地面水，指流動或停滯於地面上之水；地下水，指流動或停滯於地面以下之水。但水道內河床下非飽和層內之伏流水屬地面水」。

爰上述《水利法施行細則》第二條並無「伏流水」之定義，水利法對水源之定義僅有地面水及地下水 2 種，並提及水道內河床下非飽和層內之伏流水屬地面水。而經濟部乃於 2017 年 9 月 8 日以經授水字第 10620210890 號令頒布『設置寬口井、輻射井、水平式集水管或集水廊道等集水設施所取用水道內之水體，視為取用「水利法施行細則」第二條所稱之伏流水』，故可知伏流水水權登記屬於地面水為之，若於該地面水屬中央管河川，則開發伏流水源時需依規定向涉及中央管之河川區域申請水權及水利事業之興辦。

此外，《環境影響評估法》之「開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準」第 13 條規定：抽、引取伏流水（及地面水），其抽、引取水量 2 cms（17.28 萬 CMD）以上需實施環境影響評估^[1]。

由於臺灣的河川特性大多屬於山高流短，水源儲存不易，而河床下的伏流水則因於地面下砂礫地層內流動較為緩慢，因此極具有開發的潛能。截取伏流水，不但可獲取可觀的水源量外，因所取用之水源位於河床下經砂礫石的過濾，故為名符其實的礦泉水。昔有早在日治時期 1923 年（大正 12 年）於屏東林邊溪上游，完成二峰圳地下堰堤構築，截取河床下伏流水開發技術，並已歷經近百餘年，直至今日尚流水潺潺，供應各標的用水源之所需，此水源之開發，可謂獨具匠心。當年日本水利技師利用設置地下堰堤來汲取伏流水，不僅解決了屏東旱季缺水導致農作物乾枯的問題，利用自然環境與水的性質所使用的地下堰堤永續工法，至今二峰圳的水流仍源源不絕。卓越的灌溉技術深具工程之科學意義。因此，伏流水的開發技術不啻為水資源開發及利用之舊技術亦是現今之新思維。二峰圳是座非常特別的灌溉水圳，由於特殊的構造形式及取水的方式，因此能夠汲取河床下的伏流水，用來灌溉水圳下游的農場作物。二峰圳是由日本水利技師鳥居信平所設計，並以臺灣製糖株

式會社社長山本悌二郎的雅號山本二峰，命名為二峰圳。這座水圳是日治時期臺灣製糖株式會社為了灌溉設於屏東的萬隆農場用以輪作種植甘蔗與稻田。當時萬隆農場尚未開墾前，均為粗礫石遍布的不毛之地，為了讓土地能夠有充足的水源以種植甘蔗，因此在林邊溪上游河床之下構築了一座地下堰堤。這地下堰堤能汲取河床下的伏流水，供應當時蔗田與稻田灌溉之所需。所謂伏流水，是指河川及湖泊底部或側部砂礫層中所含的地下水稱之為伏流水（interflow water）。當時日本水利技師利用地下堰堤的工程，截取滲透至溪床底層的伏流水源，透過當地的地形及地貌佈設水利設施的導出輸送，灌溉數千甲的荒蕪石礫地種植甘蔗園。其中二峰圳的灌溉，讓甘蔗產量成長了 2.2 倍。在 1936 年（昭和 11 年）日本農學會為獎勵利用伏流水開拓荒蕪地的貢獻，頒發日本農學獎給鳥居信平^[19]。

因為卓越的科學價值，經筆者提報屏東縣政府於 2008 年依據《文化資產保存法》將二峰圳登錄為文化資產中「文化景觀」這個項目保存。爾後臺糖公司將登錄文化資產的圳體範圍移交屏東縣政府。所謂「文化資產」，是指經由臺灣所制定的《文化資產保存法》指定或登錄，具有歷史、藝術、科學等文化價值之資產。水圳是一種土木類型的文化遺產，就文化遺產的價值而言，土木類型的文化遺產在藝術方面的價值不高，但卻展現了高度的科學價值。所謂文化資產的藝術價值，是指文化資產本身即是傑出的藝術成就，或是包含有經典的藝術作品。而具有科學價值的文化資產，是人類過去長期累積之研究與技術的見證，具有社群學術與技術發展的證據。日本人利用當地地形地貌與氣候及河川水力的特色進行二峰圳的設計，成功地引水灌溉並且提高了蔗田的產量。以今日永續及生態工程的角度來看，圳體構造雖不是雕工精細的藝術品，但卓越的土木設計技術，見證了文化資產的科學價值，水圳設計的知識更值得後世學習。前人所累積的智慧與文化，成為了今日解決水資源問題的珍貴技術。這些前人的技術，是現代科學再度向前邁進的重要資產。

目前台灣伏流水工程今昔介紹

1. 伏流水一般較常用之開發技術為水平式集水管、集水廊道、輻射井以及寬口井等工法，表 1 為國內主要伏流水取水技術設施及案例^[1,19]。由表中可知，以集水廊道 / 水平式集水管及輻射井工法之

表 1 國內主要伏流水取水設施案例表 (資料來源：屏東縣政府，2021^[1])

型式	取水站名稱	位置	集水斷面與尺寸	設計出水量 (CMD)	出水現況 (CMD)	完工日期
集水廊道	二峰圳	林邊溪上游 (屏東縣)	梯形堰堤總長 328 m、半圓形集水暗渠長 450 m、導水隧道 582 m、壓力暗渠 273 m、明渠 2,434 m	25 萬 (豐) 7.5 萬 (枯)	豐枯水期約 15 萬及 6 萬 CMD	1923 年
	力里溪水圳 (又稱南和圳)	力力溪上游 (屏東縣)	梯形地下堰堤總長 145 m、集水暗渠長 1,517 m、上游 U 形段長 454 m、上游 PVC 管 ϕ 600 mm	14 萬 (豐) 4.8 萬 (枯)	10 萬 (豐) 4.8 萬 (枯)	1925 年
	茨頭厝圳	大湖口溪 (雲林縣)	立式集水井 3 座，水平輸水管 70 m	3.5 萬 CMD	1.5 萬 CMD	1937 年
	金同春圳	大礁溪 (宜蘭縣)	梯形堰堤 257 m、馬蹄形堰堤 100 m	6.5 萬 CMD	已廢棄	1932 年
集水暗管	興田伏流水	高屏溪 (高雄市)	鋼骨繞線式集水管， ϕ 1,000 mm，長 40 m (試驗模場)	1 萬 CMD	0.7 萬 (豐) 0.6 萬 (枯)	2014 年
	高屏堰上游	高屏溪 (高雄市)	鋼骨繞線式集水管， ϕ 1,200 mm，長 500 m	5 萬 CMD	5 萬 CMD (備援時啟動)	2018 年
	溪浦伏流水	高屏溪 (高雄市)	鋼骨繞線式集水管， ϕ 1,200 mm，長 1,600 m	15 萬 CMD	運轉中	2019 年
	大泉伏流水	高屏溪 (高雄市)	鋼骨繞線式集水管， ϕ 1,200 mm，長 1,600 m	15 萬 CMD	尚未運轉	尚未完工
	竹寮取水站	高屏溪 (高雄市)	鋼骨繞線式集水管， ϕ 1,200 mm，長約 1,262 m	10 萬 CMD	10 萬 CMD	2015 年
	翁公園取水站	高屏溪 (高雄市)	鋼骨繞線式集水管， ϕ 1,200 mm，長約 1,010 m	10 萬 CMD	5 萬 CMD (備援時啟動)	2015 年
	利嘉溪伏流水	利嘉溪 (台東縣)	鋼骨繞線式集水管長約 324 m， ϕ 1,200 mm	3-4 萬 CMD	尚未實施	已設計
	九曲堂取水站	高屏溪 (高雄市)	ϕ 1,650 mm \times 1,506 m、 ϕ 1,650 mm \times 1,671 m、集水暗渠 \times 1,872 m (共 3 條集水管)	35 萬 CMD	8 萬 (豐)、 2~6 萬 (枯) (備援時啟動)	1984 年
	會結取水站	高屏溪 (高雄市)	ϕ 1,500 mm \times 1,000 m \times 2 條	13.5 萬 CMD	10 萬 (豐)、 5 萬 (枯) (備援時啟動)	1984 年
	昭明取水站	高屏溪 (高雄市)	ϕ 1,650 mm \times 1,136 m； ϕ 1,650 mm \times 1,045 m	15 萬 CMD	已停止運轉	1985 年
	林園取水站	高屏溪 (高雄市)	ϕ 1,500 mm \times 670 m； ϕ 1,650 mm \times 845 m	8.5 萬 CMD	鹽化，無取水	1985 年
	羅東堰	羅東溪 (宜蘭縣)	HDPE 管直徑 1 m，長約 110 m，共 8 支繞線式不銹鋼管直徑 0.4 m、長度 45 m，共 14 支	20 萬 CMD	現況伏流水出水功能不如預期	2004 年
輻射井	興田伏流水	高屏溪 (高雄市)	輻射管 8 支 (兩層)、 ϕ 200~300 mm；管長共 180 m (模場)	1 萬 CMD	1 萬 CMD (備援時啟動)	2014 年
	高屏堰上游	高屏溪 (高雄市)	2 座；每座輻射井 2 層 5 支 @50 m， ϕ 300 mm (輻射集水管總計長 1,000 m)	5 萬 CMD	5 萬 CMD (備援時啟動)	2018 年
	大泉營區	高屏溪 (高雄市)	輻射管 ϕ 800 mm \times 80 m \times 2 支，井深 24 m	0.3 萬 CMD	0.3 萬 CMD	
	六龜	荖濃溪 (高雄市)	不銹鋼繞線式集水管 ϕ 800 mm \times 36 m；400 mm \times 24 m HDPE 管 \times ϕ 200 mm \times 36 m 及 24 m	0.3 萬 CMD	0.17 萬 CMD	2010 年
	萬年溪	番仔寮溪	輻射管 ϕ 50 mm \times 18 m \times 32 支	1 萬 CMD	民眾抗爭，未營運	
寬口井	觸口淨水場	濁水溪 (雲林縣)	直徑 3 m 寬口井 (豎井) 3 座 (井深 10 m) \times 1 口	3 萬 CMD		
	甲仙淨水場	旗山溪 (高雄市)	直徑 2 m 寬口井 (豎井) 1 座 (井深 7.5) \times 1 口		0.15 萬 CMD	
	寶來溪淨水場	寶來溪 (高雄市)	直徑 1.6 m 寬口井 (豎井) 2 座 (井深 10 m)	0.12 萬 CMD	0.087 萬 CMD	2010 年
	濁水溪伏流水	濁水溪 (雲林縣林內鄉)	寬口井 (直徑 12 m 及深度約 15 m) 3 座、 ϕ 1,000 mm U2 推進管管長度約 800 m、大型集水井 (直徑 12 m 及深度約 15 m) 1 座	1 至 3 萬 CMD	興建中	

案例較多，且能集取較大之伏流量。國內所建置之伏流水集水工程歷史已久遠，如早期所開發之伏流水工程，如：二峰圳（1923年）、力里溪圳（或稱南和圳；1925年）、金同春圳（1932年）、崁頭厝圳（1937年），以及高屏溪沿岸於1970～1980年代設置之九曲堂、會結、昭明及林園等取水站。圖6為國內早期所設置伏流水集水設施之現勘照片。依據伏流水集水特色與相關既有設施，其取水之特性茲摘述如下：

- (1) 以梯型集水廊道與圓形集水管為主要取水型式。
- (2) 集水管斷面一般介於 $\phi 500 \text{ mm} \sim \phi 1650 \text{ mm}$ 管渠或其相當之等效斷面。
- (3) 材質為混凝土濾水管渠或不銹鋼鋼骨繞線式集水管。

- (4) 集水長度視需水量而定，一般介於 $350 \text{ m} \sim 2,000 \text{ m}$ 。
- (5) 埋設深度一般介於河床下 $5 \sim 12 \text{ m}$ ，施工方式以明挖進行。
- (6) 豐枯水期出水量明顯有差異，集水量因設施之不同，約介於 $3.5 \text{ 萬} \sim 25 \text{ 萬 CMD}$ 之間。

2. 以下即針對水平式集水管、集水廊道及輻射井等工法說明之。

(1) 水平式集水管

台灣自來水公司於2015年、2016年與2019年各分別於高屏溪主流之竹寮、翁公園以及大泉、溪埔等取水站各設置1座伏流水集水管工程，取水量竹寮站與翁公園站各為10萬CMD（1.15



圖6 國內早期所設置之伏流水集水設施現勘照片
（資料來源：屏東縣政府，2021^[1]）

cms)，完工後試水性能極佳，大泉及溪埔站則各為 15 萬 CMD (1.74 cms)，而台水公司已設計之台東縣利嘉溪伏流水工程亦屬於集水管工程（預估取水量為 3 ~ 4 萬 CMD；惟該計畫目前尚未實施）。以下即針對竹寮取水站計畫與利嘉溪伏流水之設計簡介之。

(2) 竹寮取水站伏流水工程

竹寮集水管工程主要係埋設 ϕ 1,200 mm 鋼骨繞線式集水管、集水管長度 1,262 m、埋設深度平均 9.5 m。該計畫已於 2015 年 1 月 12 日取用迄今，集水水質排除初期抽水幫浦試車及水量調整擾動外，其濁度均小於 10NTU。續對照同年 5 月 25 日梅雨鋒面來襲，高屏溪水質濁度飆高 25,000NTU 期間，當日竹寮集水管集水量達 14 萬 CMD，其水質濁度僅約為 25NTU，顯見本設施工程於降低原水濁度極具成效。竹寮集水管施工照片詳見圖 7。

此外，根據 2015 年 1 月 ~ 2019 年 5 月期間竹寮取水站之伏流水取水紀錄資料彙整（詳見表 2）。由表中可知，2015 年及 2017 年豐水期平均取水量比枯水期高，惟 2016 年及 2018 年並未有此情況（2016 年豐水期略高於枯水期、2018 年豐水

期略低於枯水期）；另以單日最大出水量而言，除 2018 年豐水期（2018/06 ~ 2018/11）及 2019 年枯水期（2018/12 ~ 2019/05）較低外，其他年份不管是豐、枯水期單日最大出水均能於 10 萬 CMD 以上；另由此歷年（4 ~ 5 年）來看，集水管取水工程單日最大出水量有略微降低之趨勢，惟出水性能尚能於 7.5 萬 ~ 8.4 萬 CMD 以上。上述之取水量經對照氣象局高雄測候站之雨量紀錄分析，並無對應之關係（亦即豐枯水期與取水量並無對應關係）。

表 2 竹寮取水站每半年期伏流水之取水概況表

取水運轉期間	伏流水取水量 (CMD)			降雨量 (mm)	備註
	平均	單日最大	單日最小		
2015/01 ~ 2015/05	53,449	137,000	10,584	352	枯水期
2015/06 ~ 2015/11	80,531	123,000	26,000	965	豐水期
2015/12 ~ 2016/05	63,745	125,664	25,000	591	枯水期
2016/06 ~ 2016/11	64,849	124,440	26,928	2,540	豐水期
2016/12 ~ 2017/05	49,292	119,496	21,300	247	枯水期
2017/06 ~ 2017/11	97,371	128,736	27,552	878	豐水期
2017/12 ~ 2018/05	56,824	102,192	25,368	154	枯水期
2018/06 ~ 2018/11	49,712	74,904	24,096	2,915	豐水期
2018/12 ~ 2019/05	48,835	84,288	22,392	319	枯水期

註：降雨量係氣象局高雄測候站。
原始數據來源：台灣自來水公司南區工程處，2020 [20]。



圖 7 竹寮取水站伏流水開發之集水管施工照片圖
(資料來源：台灣自來水公司南區工程處，2020 [20])

由於上述竹寮取水站伏流水取水係為高雄地區備援系統，故以上數據分析亦應考量該取水站之豐枯水期與豐枯水年之備援取水目標。故上述之分析仍難以研判集水管是否受淤塞使導致出水效能降低之結論，並仍應持續觀測後續之出水紀錄正常與否及定期檢視集水管狀況。

3. 利嘉溪伏流水工程

根據台水公司「台東利嘉溪取用伏流水工程—初步設計報告，(2017年4月)」資料顯示，該伏流水開發場址河床高程約為 El.178 m ~ El.184 m 之間，擬於河床下埋設平行溪流之一條外徑 ϕ 1,200 mm 骨架繞線式集水管（不銹鋼材質）、長度 324 m 集水，並設置一條長內徑 ϕ 706 mm（外徑 ϕ 800 mm）HDPE 導水管（長約 540 m），銜接既設之 ϕ 600 mm 導水管，再以重力式流入利嘉淨水場；主要係為因應汛期利嘉溪原水濁度暴增，導致淨水場無法出水之困境，預計集取經河床砂礫初步過濾之潔淨低濁度伏流水，取水量為 3 ~ 4 萬 CMD，以維持台東市之供水穩定；惟本計畫因民眾反對，目前並未實施。

集水廊道

國內最著名、也最具歷史、目前亦尚在運轉中之集水廊道伏流水工程非屏東縣來義鄉林邊溪二峰圳集水工程莫屬；該工程設計係以呈 1.82 m \times 1.82 m 直角

三角形之集水斷面堰堤型式（以廊道匯集輸送水源），滲水面外鋪設濾層後再以原地礫石地層回填，堤頂開設直徑 0.42 m 之進水孔多處，估算其迎水面之開孔面積比率約為 19%，總進水廊道長約 328 m（現在河床寬僅約 180 m），由左岸至右岸以 1/100 坡度配置，堰堤底部埋設於河床下約 2.7 m ~ 9.1 m 不等。該工程係以明挖方式施工。1923 年完工 4 年後再沿河床上游縱向增設一條長 455 m、縱坡 1/100 的半圓形集水暗渠，二峰圳集水廊道平面佈置詳見圖 8、設計堰體結構則詳見圖 9。

根據蒐集台糖公司所記錄之二峰圳歷年（1942 ~ 2000 年）出水量平均約為 3,000 萬立方公尺 / 年，出水量最少為 1,000 萬立方公尺 / 年，最大 5,200 萬立方公尺 / 年。出水量多寡除受豐枯水季、豐枯水年氣象條件影響外，河床變動、取水設施維修程度等亦為重要的影響因素。該取水圳建造完成後之豐水期出水量約為 25 萬 CMD，枯水期約為 7.5 萬 CMD。

輻射井

輻射井（collector wells；或稱 Ranney wells）早在 1930 年代即於英國與美國應用於伏流水開發，最著名者為美國 Ranney 公司所負責於美國肯塔基州路易斯威爾（Louisville）水廠的伏流水第二期工程計畫，該計畫預計分 3 期（Phases）建設輻射井，以伏流水源取代取



圖 8 二峰圳集水廊道平面佈置圖

（資料來源：屏東縣政府，2021^[1]）

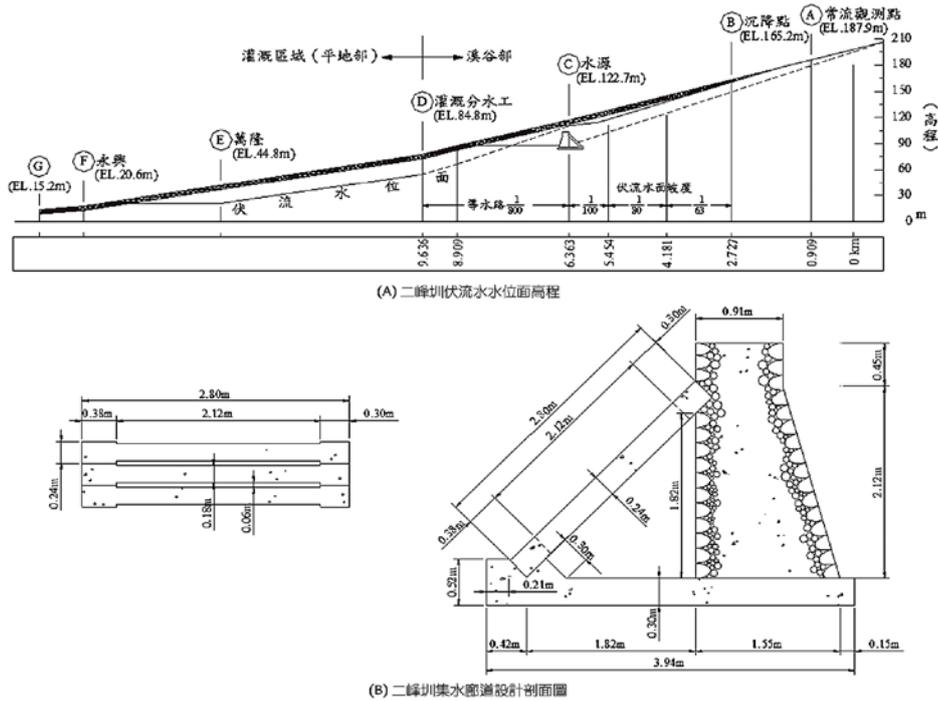


圖 9 二峰圳取水堰體結構圖
(資料來源：屏東縣政府，2021^[11])

自 Ohio 河的地面水，以滿足總取水量約 90 萬 CMD，並改善水質。其中第 2 期工程（出水 25 萬 CMD）係於砂礫含水層內設置 4 口輻射井集水；每口 8 支濾水管（繞線式不銹鋼材質），長 70 m、直徑 ϕ 300 mm，並於含水層下方岩盤設置直徑 3 m（10ft）之大型隧道式輸水管，該工程已於 2010 年完工，並榮獲美國土木工程協會「2011 年度傑出土木工程成就獎」。

國內於高屏溪上游（水利署南區水資源局，2018 年）亦設置 2 座輻射井工程；每座輻射井 2 層 5 支 @50 m， ϕ 300 mm（輻射集水管總計長 1,000 m），總出水量 5 萬 CMD，亦於營運中。

伏流水適合開發類型分析

一般而言，伏流適合取水地點為河川集水域面積廣大、溪流河床下水文地質條件佳之區域；而就水源集取類型而言，一般概分為平原區及山區二類型，此二種適合開發類型情況（圖 10），茲就其類型特性說明如下：

平原地區伏流水開發

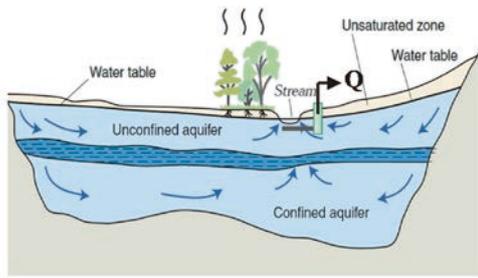
適合平原區伏流水開發類型包括河川流域面積廣大之沖積平原區，其集水水源主要為於河床下河川之滲漏水及部分之淺層含水層地下水。此伏流水開發方式如前述美國 Louisville 水廠伏流水第二期計畫工程，

係以 4 口輻射井工法開發 25 萬 CMD 出水量。而目前國內較具規模之平原區伏流水如前述之台水公司於高屏溪所開發之竹寮、翁公園、大泉、溪埔等取水站伏流水工程，皆係以集水管工法開發水源；基於已運轉之竹寮站成功經驗，目前國內亦正陸續評估規劃其他可行地點之伏流水開發。目前國內外所見山區及平原區二種型式之伏流水開發方式有寬口井、水平式集水管及輻射井等工法。

山區伏流水開發

山區伏流水開發方式係於山區溪流之河床下、岩盤上之未固結堆積物地層取水。由於山區伏流取水無顯著的沖積平原含水層，主要係集取固結岩層上方砂礫石堆積層之伏流水帶（Hyporheic zone）內水平流動與地面水向下滲漏之水源；屬於山區伏流水開發類型如前述屏東縣林邊溪二峰圳及其支流利里溪圳，以及台水公司已規劃之台東縣利嘉溪取用伏流水工程（目前尚未實施）等，前二者為建造於日據時期（分別於 1923 年及 1925 年完成），士文溪、楓港溪伏流水開發場址屬於山區伏流水開發類型，與林邊溪二峰圳伏流水類型條件相近，值得做為參考依據^[20]。

行政院目前推動之前瞻基礎建設計畫中有一重要「水環境建設加強平地人工湖及伏流水推動計畫」（第



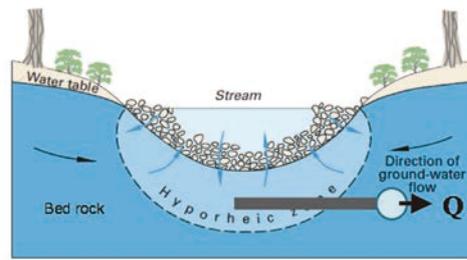
平原區伏流水

因地面水與地下水有良好水力連通性，主要集取河川滲透水與部分的地下水

案例



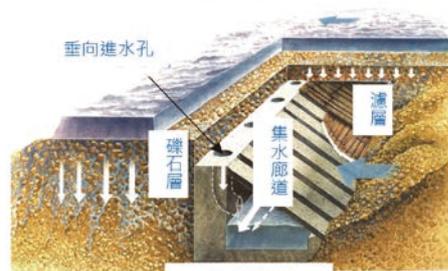
高屏溪竹寮取水站伏流水計畫



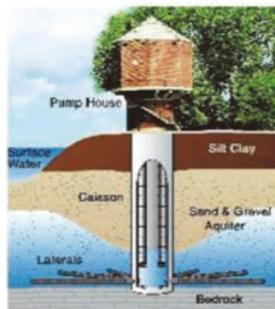
山區伏流水

集取河床下、岩盤上之間未固結堆積物砂礫石地層的孔隙伏流水源

案例



三角堰堤
二峰圳集水廊道



美國Louisville水廠輻射井



力里溪圳集水廊道

圖 10 伏流水開發類型

(資料來源：台灣自來水公司南區工程處(2020年11月)士文溪、楓港溪及隘寮溪伏流水工程可行性規劃報告^[20])

1次修正)(草案)，2021年8月，主辦機關為經濟部水利署；執行單位為經濟部水利署與台灣自來水公司。該計畫部分內容如下：

因應氣候變遷，多元水源強化水資源供水韌性，愈顯重要。伏流水因存在於河床下透水層，經砂礫層過濾可取得較潔淨之原水，除作為原水高濁度問題之有效對策，亦於枯水期可發揮備援水源功能。本計畫於去(2020)年9月奉行政院核定，鑒於去年豐水期無颱風侵臺帶來足夠降雨，加上今(2021)年春雨亦不如預期，導致水庫集水區蓄水量為歷年同期最低，造成56年來最嚴重旱象。在本次旱災應變過程，因伏流水水質潔淨且水源穩定，適時提供救旱水源。也因高雄地區有川流水、伏流水、再生水、地下水及區域

調度等多元水源，供水相對穩定，以高屏溪為例，在前瞻計畫推動完成的興田、大泉及溪埔伏流水等，總計提供每日40萬立方公尺水源，即便高屏溪水量低於3.8 cms，仍可提供穩定水源，避免進入分區供水。本次抗旱緊急水源2.0計畫(以下簡稱抗旱2.0)，於苗栗、台中、彰化各設置後龍溪、大安溪及烏溪緊急伏流水，共增加每日7萬立方公尺水源，雖為臨時設施，但也發揮良好抗旱功能，為利此設施能在旱災後繼續留作最大利用，須辦理設施安全強化及改善設備提升產水穩定及延長使用期限，以發揮最大效益；另為因應極端氣候變遷與中長期供水穩定需求，廢續於具有開發伏流水潛能河段辦理伏流水開發利用，包括油羅溪、大安溪、烏溪三期、濁水溪二期及荖濃溪等。

考量氣候遷威脅仍存在，加速推動開發伏流水作為未來緊急備援水源有其必要，以提昇區域供水系統之備援能力。而目前「水環境建設加強平地人工湖及伏流水推動計畫」修正內容採錄如下。

本次計畫書修正除新增辦理「抗旱 2.0 計畫緊急伏流水安強化及改善」外，並增辦「油羅溪伏流水工程」、「大安溪伏流水新建工程」、「烏溪伏流水三期工程」、「濁水溪伏流水二期工程」及「荖濃溪伏流水工程」等 6 項工作，計畫目標包含原核定計畫工作，除可延長抗旱緊急伏流水使用期限，發揮最大效果外，共可提供備援供水能力每日 32 萬立方公尺、總經費需求由原核定 13.3 億元，增加至 41.2 億元（增加 27.9 億元），計畫期程仍維持原核定 110 年至 114 年。

由上述揭露之伏流水推動計畫，現今水政單位對新興水資源開發伏流水，對於汛期或河川地面水高濁度時，淨水廠無法負擔處理高濃度地面水時，伏流水並可提供穩定的水源，是目前現今的救命水。在今年（2021 年）五月份早期展現其對護國神山之高科技用水，提供了穩定的水源，發揮最大的利用。政府也積極正視伏流水開發擴大實施計畫，盼伏流水能成為穩定且高品質低成本之常態用水。

結論

台灣既有的水利水資源治理模式，面臨了兩大挑戰。第一是因應極端氣候變遷下的暴雨及乾旱成災，造成水濁度高無水可用及沿海地層下陷區或低窪區淹水，乾旱時期地面水及地下水資源皆無水可供各標的用水用等困窘；第二是去彌補過去台灣天然環境的宿命及人為開發帶來的破壞，尤其是西南沿海之沖洪積平原的都會區之建設及山坡地之開發。以往水利設施的興建（地面蓄水如水庫或引水設施如攔河堰和淨水場），常常忽略了要充分運用自然環境中的潛在優勢，如地下水含水層（地下蓄水大庫）特性，將「洪水資源化」，利用洪水、蓄水地下、增源減洪，如屏東縣政府正執行的「大潮州地下水人工補注湖計畫」；另結合環境特性的生態水利工法，減少對環境的負面衝擊，在有效應用「河川滲濾」取用伏流水及積極管理地下水源之開發方式，如眾所週知的二峰圳伏流水取水工程及高屏溪輻射井取用伏流水工程。如此，才能接受兩大挑戰，調適水資源供需無虞、減緩洪水災害；這不只是工程技術的改變，這更是觀念的改變，台灣水的「枯島」才能變成為水

的「寶島」。水是我們長期的朋友，是要用心相處與經營。因此，建議在補注湖區或中下游適當地點設置取水設施，在適當的控制及管理含水層水位使不致影響環境地質災害，並善加利用得來不易的補注水資源；因而參考國外「水銀行」運作的想法產生，期望透過水銀行的操作，能使大潮州人工補注湖的營運能自給自足，達到永續經營的目標。

參考文獻

- 屏東縣政府（2021），大潮州地下水補注湖第 1 期實施計畫之效益評估。
- 屏東平原概述：<http://pc183.hy.ntu.edu.tw/gwater/d1.php>。
- 中華叢書委員會（1956），李儀祉全集。
- 鳥居信平（1936），〈伏流水利用に依る荒蕪地開拓：臺灣製糖株式會社萬隆農場創設並に其經過〉，《臺灣の水利》，第 6 卷第 6 期，第 3-27 頁。（日文）
- 林思玲、丁澈士（2014），〈潺潺流水中的永續智慧：日治時期屏東伏流水灌溉工程與文化資產保存〉，《臺灣水利》，第 62 卷，第 3 期，第 1-21 頁。
- 國立屏東科技大學（2013），〈屏東縣來義鄉二峰圳文化景觀保存維護計畫〉，屏東縣政府文化處。
- 丁澈士、王國祥（2008），〈林邊溪上游二峰圳集水廊道工程技術與應用之研究〉，《屏東文獻》，第 12 期，屏東縣政府文化處，屏東。
- 丁澈士、林思玲、賴福林、盧惠敏（2019），《向文化資產學習—屏東二峰圳與力里溪水圳伏流水取水技術與文化資產保存》，ISBN：978-986-05-9667-0，屏東：屏東縣政府水利處。
- 丁澈士、林思玲（2019），淺談二峰圳伏流水灌溉工程在水文化保存的科學價值，《大地技師期刊》，第 19 期，第 50-57 頁。
- 國立屏東科技大學（2017），〈屏東縣文化景觀二峰圳修復工程（大潮州人工湖周邊取水設施改善工程）工作報告書〉。
- 丁澈士、杜永昌（2010），治水新思維—地下水人工補注，地質，第 29 卷，第 2 期，第 44-45 頁。
- 丁澈士（2016），氣候變遷下台灣水利資源之調適與減緩，台大風險社會與政策研究中心。
- Ting, C.-S., Groundwater Resources Evaluation and Management for Pingtung Plain, Taiwan, PhD thesis, Free University Amsterdam, the Netherlands, 1997.
- 中鼎工程股份有限公司（2003），屏東縣水資源開發與保育整體規劃及林邊溪上游人工湖設置工程計畫，屏東縣政府。
- Tu, Y.-C., Ting, C.-S., Tsai, H.-T., Chen, J. W., and Lee, C.-H., Dynamic analysis of the infiltration rate of artificial recharge of groundwater—a case study of Wanglong Lake, Taiwan, Environ. Earth Sci., 63, 77-85, <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0670-8>, 2010.
- 聯合國教科文組織（2009），<http://www.unesco.org/water/>
- 吳立萍等（2004），《探家園借大地悠遊河流》，秋雨文化事業股份有限公司，臺北。
- Bouwer, H., Artificial recharge of groundwater: system, design, and management, in: Handbook of Hydraulic design, edited by: Mays, L. W., McGraw-Hill, New York, US, 1999.
- 平野久美子（2009），《臺日水的牽絆—識水柔情：鳥居信平的故鄉》，屏東縣政府文化處，屏東。
- 台灣自來水公司南區工程處（2020），士文溪、楓港溪及隘寮溪伏流水工程可行性規劃報告。





海水入侵 回顧與調查分析

羅偉誠／國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

李哲瑋／國立成功大學水利及海洋工程學系 博士後研究

海水入侵是一個常見的水文及地質災害，因造成了沿海地區的土地鹽化，所以對國土的永續發展與水資源的利用規劃產生相當的影響。海水入侵常常也伴隨著地層下陷及沿海低地洪氾等災害而複合存在。本文簡介了有關影響海水入侵的可能因素及目前常應用來檢測海水入侵測的量測方法。我們也說明海水入侵在理論與數值預測的學理依據和待突破的地方。在文中我們也整理了目前最常被使用來模擬相關海水入侵的鹽分及水位時空分佈的數值軟體，簡述了這些軟體種類的背景、適用維度及演算法。最後以本島（濁水溪平原）及離島（澎湖群島）目前海水鹽化的現地調查及檢測結果，說明目前國內可能的海水鹽化分佈狀況。面對未來極端氣候的影響，將引起海平面的可能上升，更會加劇海水入侵對我們在經濟與社會發展上的威脅。因此有效的落實沿海地下水資源的管理及平衡土地開發的策略，將是我們重要國土永續經營的議題。

前言

海水入侵 (seawater intrusion) 是海水向陸地遷移流入海岸區域地下淡水含水層的現象，最常見引起的原因是由於從含水層系統中抽取了過多的淡水的地下水。由於海水俱有高濃度的總溶解固體和某些無機成分，因此會造成地下水鹽化，減少淡水的地下水儲存量，進而影響區域水資源的穩定供給。近世紀因為人為的過度開發，海水入侵已經成為一個常見的災害，對國土環境產生一定程度的影響。受到海平面上升、極端天氣事件、海岸侵蝕、降水模式改變以及淡水資源需求的增加都可能增加海水入侵的災害風險^[1]。

影響海水入侵的因素

影響海水入侵過程的變化主要決定在沿海含水層地質的封閉程度和含水層的水文 (hydraulic) 參數和動力 (dynamic) 特性，包括潮汐效應 (tidal effect)、分散混合 (dispersive mixing)、不穩定對流造成之密度效應 (density effect due to unstable convection)、古水文地質條件 (paleo-hydrogeological condition)、人為影響

(anthropogenic impact, e.g., groundwater pumping) 和地質特徵 (geological attributes) 等^[2]。

海水入侵測的量測

海水入侵的測量，通常需要一定時間的觀察淡海水間移動介面間的鹽度變化。其他海水入侵的指標包括水力水頭趨勢和推斷歷史鹽分傳輸的相關水化學特徵。準確劃定地下水鹽化範圍在沿海含水層是非常不容易的工作，主要是由於缺乏在須要及特定尺度的鹽度測量。暫態海水入侵的測量更是困難，因為其過程在速度上通常非常緩慢，而且歷史測量數據很少甚至並不存在。目前主要以 (1) 地球物理方法 (2) 環境示踪劑，兩種方法的應用作為沿海含水層海水入侵測量的基礎。

地球物理方法 (geophysical method) 主要利用海水電阻率 (0.2Xm) 和淡水電阻率 (> 5Xm) 之間的反差，可以繪製出地下水鹽度分佈。其中直流 (DC) – 電阻率 (direct current resistivity) 和電磁 (EM) (electromagnetics) 方法已廣泛應用於沿海地區的海

水入侵測量。電阻率方法應用於沿海含水層海水入侵的量測已有八十多年的歷史，Swartz [3] 是第一位最早使用該方法的人之一來檢測海水入侵的界面深度。電阻率斷層掃描 (ERT) (electrical resistivity tomography) 可提供可視化的二維或三維中的地下電阻率分佈。電磁法已經用於繪製地下水鹽度圖並能成功地描述出沿海地區鹽份的變化。頻率域 (frequency domain) 的方法使用了幾十年 [4]，而最近的時間域 (time domain) 的方法變得更受學界及工程上的廣泛使用 [5]。

環境示踪劑 (environmental tracer) 的應用是透過量測沿海地下水的組成作為一種探測溶解鹽起源的方法。包括 Br/Cl 比率、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 ^3H 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率， $\delta^{11}\text{B}$ 和 ^{14}C 已經被利用來區分沿海含水層不同鹽度的來源 [6]。另外，量測氯化物與電導率的關係圖可以顯示正常地下水、鹽水入侵和介於兩者之間的混合的情況。利用派博水質 (piper) 菱形圖包含 (1) $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ，(2) Ca-Cl ，(3) mixed $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}$ ，(4) mixed $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ，(5) $\text{Na}^+\text{-Cl-SO}_4^{2-}$ ，(6) $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 形態，可以比對地下水水質分類來探討地下水鹽化之成因。

海水入侵測的理論預測

由於鹽度的變化造成海水的密度變化，雖然海水密度 (~ 1,020 to 1,029 kg/m^3) 大約只比淡水 (~ 1,000 kg/m^3) 高大約 2.5%，但是這個密度差異卻增加了海水入侵理論模擬與預測的複雜性。在研究海水入侵的解析方法，基本上假設淡水和鹽水為兩種不可混合 (immiscible) 的流體，其間存在一個界面，而這兩個流體間沿著這個界面上須要滿足壓力連續性。因此在數學學理上，這個物理條件暗示在淡水區流動和在鹽水中流動的區域，需要同時耦合 (coupled) 求解，使得壓力和法向流通量在界面上是連續的。為了獲得解析解，常常會做簡化的假設，假設水流的流動僅存在淡水區，水流在鹽水區處於靜止狀態。而另一個常引用的假設是杜普特近似 (Dupuit approximation) 成立，也就是在垂直方向上的流動阻力可以忽略，使得壓力垂直分佈可視為靜水壓 [7,8]。不少學者根據以上之假設推求出不同邊條件下的解析解 [9]，例如 Bakker [10] 考慮了允許水流在淡水區和鹽水區同時流動的情況，推求出解析解描述該問題的流場。

海水入侵測的數值預測

然而因為解析解並無法正確描述出在淡水和鹽水之間俱有有限厚度及密度和水量不斷變化之過渡區實際的流場和壓水分佈。因此數值模式變成相當重要的工具。表 1 列出目前常被使用在海水入侵測的數值模式，其中有政府或商業發展的模式。表 1 說明各模式可以適用的流況 (飽和流或非飽和流)，其使用的數值演算法 (有限元素或有限差分)，及是否有圖形用戶界面。這十種目前已發展之海水入侵測的數值模式，以 SEAWAT 和 SUTRA 最被廣泛使用。

表 1 目前已發展海水入侵測的數值模式 [11]

軟體名稱	流況	數值演算法	圖形用戶界面
3DFEMFAT	飽和流 / 非飽和流	有限元素	
FEFLOW	飽和流 / 非飽和流	有限元素	有
FEMWATER	飽和流 / 非飽和流	有限元素	有
HYDROGEOSPHERE	飽和流 / 非飽和流	有限元素	
MARUN	飽和流 / 非飽和流	有限元素	
MOCSENS3D	飽和流	有限差分	有
MODHMS	飽和流 / 非飽和流	有限差分	有
SEAWAT	飽和流	有限差分	有
SUTRA	飽和流 / 非飽和流	有限元素 / 有限差分	有
SWI2	飽和流	有限差分	

台灣海水入侵案例的介紹

濁水溪平原 (本島)

根據經濟部水利署「109 年度地下水水質檢測分析與評估」報告指出，濁水溪沖積扇西南側過去即為地下水鹽化相對較顯著區域，過去水質資料顯示海圍區域具顯著之鹽化狀況，然而本區同時也為深濃度較高區域，Liu *et al.* [12] 研究指出濁水溪沖積扇高砷含量之淺層地下水井，經由海相化石研究發現各井位 (箔子、金湖、瓊埔等) 之海相微體化石含量很高，即代表其海水入侵程度大，由於第四紀末期以來全球氣候變化及海水水準面變化，海岸地區會有明顯的區域性海侵和海退現象所造成，而本區之沈積物主要為晚更新世以來所堆積而成，且由海相沈積向上轉變成陸相沈積。濱岸至淺海環境沈積物，則分布於較靠海側之

監測井，直接覆蓋於沿岸沼澤環境沈積物之上，厚度以最靠海側之箔子監測井最厚達 60 公尺。其中於箔子、飛沙、瓊埔及大溝之監測井沼澤環境沈積物可延伸至地表，原本應為潟湖環境，但頂部現已被人工填土所覆蓋多已闢為魚塢。對於上部海相層之沿岸沼澤沈積物，經定年結果約在 8,500 ~ 9,500 年之間，推測其沈積年代為海水面快速上升時期。

根據貝殼碎片定年資料顯示，濁水溪流域鑽井岩心之上部海相層約位於井下 10 ~ 50 公尺左右，沈積時間約在 3,000 ~ 9,000 年前^[13]。扇尾泥砂層漸厚，含水層分層明顯，細顆粒之泥沙沉積物中鐵與錳氧化物含量高，且沉積環境受最近一次冰河時期（約一萬年前）以來之海進海退作用較為明顯。上述文獻皆指出濁水溪沖積扇地下水之鹽化恐與地層沉積時期古海水有關。

地下水鹽化成因甚多，另外若鹽化成因為海水入侵，則可能與當地用水和地下水位變動有關。水質報告除了以水質資料分析鹽化區域外，並針對地下水鹽化變動趨勢加以分析。參考 Kelly^[14] 分析方法，利用派博 (Piper) 水質菱形圖繪製地下水鹽化的變化趨勢如圖 1 所示，一般新鮮的地下水樣本點繪之位置會落在菱形圖左方標記為「Fresh (淡水)」的區域附近，即派博菱形圖第 I 區；而純海水將積聚在「Sea (海水)」標記附近，即派博菱形圖第 IV 區；若淡水和海水之間發生保守混合（沒有離子交換反應的混合），所點繪出之位置將沿著標有「Mixing (混合)」的虛線積聚。當在含水層組成分子中存在發生混合時，離子交換反應經常在地下水和含水層組成分子之間發生，從而改變水的化學組成。這種化學成分的變化會導致派博水質菱形圖中保守的混合線偏離，偏離有兩種情況：(1) 在入侵 (Intrusion) 過程，觀測點向上移動到菱形圖形的頂部、(2) 在淡化 (Freshening) 過程，觀測點向下移動到菱形圖形的底部。

此種方法不僅可以推斷出地下水樣本是否受到海水入侵的影響，而且還可以推斷出隨著不同時間取樣時，海水入侵情況程度是否變得越來越高（入侵交換，Intrusion exchange），或更好（淡化交換，Freshening exchange）。

Kelly^[14] 亦依地下水鹽化的過程，可以藉由淡水到保守混合水的 7 種不同的分級標準來識別海水入侵之程度分別為：(1) 淡水 (Fresh)、(2) 微入侵 (slight

intrusion)、(3) 入侵 (intrusion)、(4) 微保守混合 (slight conservative mixing)、(5) 保守混合 (conservative mixing)、(6) 微淡化 (slight freshening) 與 (7) 淡化 (freshening)。成果顯示具有較明顯變化趨勢者僅有沿海地區 5 口站井，分別為沿海區域的觀測站包括：後安 (一)、海園 (二)、箔子 (二)、金湖 (二) 與宜梧 (三)，其中後安 (一) 與海園 (二) 之水質隨時間變化趨勢均為由淡化轉變為 (微) 保守混合，似有正在進行中的趨勢；而箔子 (二)、金湖 (二) 與宜梧 (三) 之地下水似乎曾受到少量海水之影響，但並未造成嚴重的入侵，如表 2 所示。

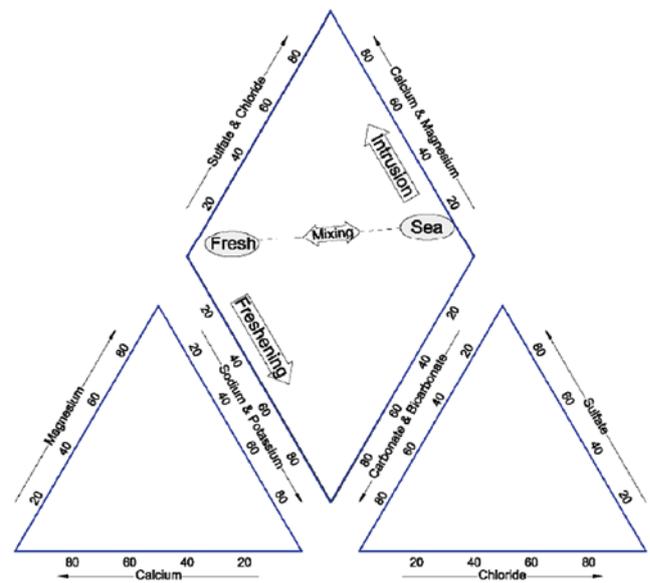


圖 1 派博圖 (Piper) 之特性分區說明

(資料來源：Kelly F.^[14])

表 2 既有鹽化地下水觀測井派博圖分析成果

站名	分層	資料期間	資料點數	水質圖變化趨勢
後安 (一)	1	96 ~ 108	3	淡化 → 微保守混合
海園 (二)	2	96 ~ 108	10	淡化 → 保守混合
箔子 (二)	2	96 ~ 108	9	微淡化 → 微保守混合 → 入侵 → 微淡化
金湖 (二)	3	96 ~ 108	7	淡水 → 微淡化 → 淡化
宜梧 (三)	3	96 ~ 108	10	淡化 → 保守混合 → 淡化

(資料來源：經濟部水利署^[15])

由於上述分析資料是以各年單點資料繪製，地下水為具周期性變化，正常而言豐枯水季地下水補注 - 流出特性有所差異，上表中測量時間不一，僅能表達長

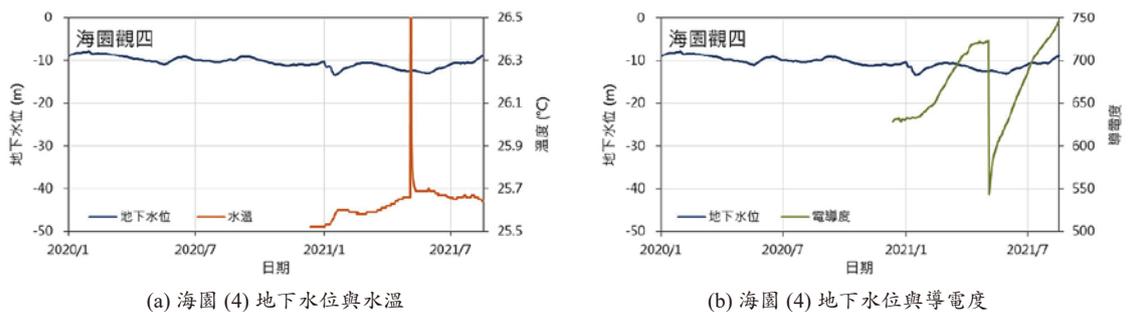
期可能趨勢，難以作為評估標準。故收集水利署即時地下水觀測網中地下水導電度即時觀測資料進行分析，將上述鹽化較嚴重之海園、宜梧、瓊埔三站地下水導電度與地下水位繪於圖 2 至圖 4 中。圖中可見海園站 EC 紀錄甚低，隨地下水位下降略有上升然仍處於合理地下水範圍中，而宜梧 (1) 觀測井 EC 紀錄高達 23,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上，若單以此數據推測本處應為海水入侵最可能發生區域，而宜梧 (2) EC 較於上層相對甚低；瓊埔 (1) 與瓊埔 (2) EC 紀錄相對於地下水較高，皆可達 5,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上，瓊埔 (1) 於七月更曾高達 11,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上，同樣可能具海水入侵風險。

上述紀錄為各站單點資料，為瞭解整體海岸區域之地下水位與導電度變化，若以 2021/1/1、2021/3/1 與 2021/05/1 期間導電度、地下水位變化進行比較，如圖 5 和圖 6 所示。圖中水位變化顯示由於時值枯水季，故地下

水呈現消退情況，濁水溪以南區域地下水位下降明顯，西南側瓊埔站下降最多，而宜梧、瓊埔二站地下水導電度相對甚高，為沖積扇中鹽化最明顯區域，二林站導電度雖上升明顯，然數值皆穩定於地下水水質範圍內且位於較內陸區域，海水入侵風險極低。

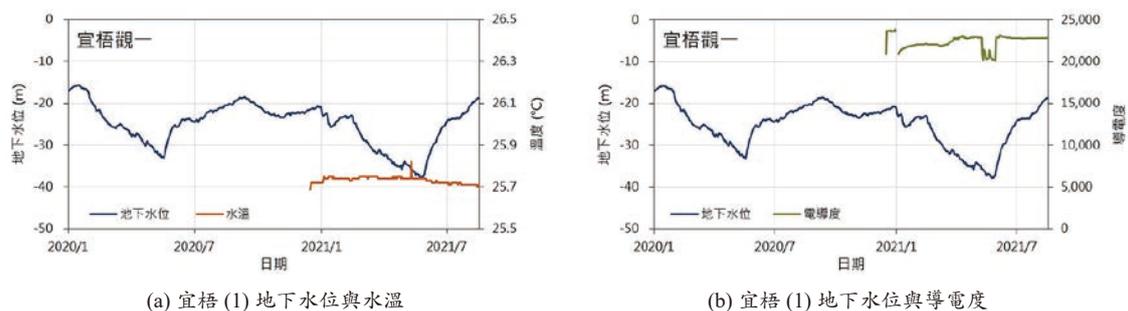
澎湖群島（離島）

由於澎湖地區年平均蒸發量大於年平均降雨量，可知其水文條件極不利地表水資源之利用。因此，地下水成為澎湖地區長期仰賴的水資源來源。然而地下水持續過度的開發，已造成澎湖地區海水入侵及地下水鹽化等問題。由以往相關研究成果顯示，澎湖本島海水入侵量約佔深層地下水儲存量之 2.8%，倘每一單位之入侵海水可鹽化 36 倍的地下水儲藏量，將嚴重影響澎湖地區水資源調配利用。

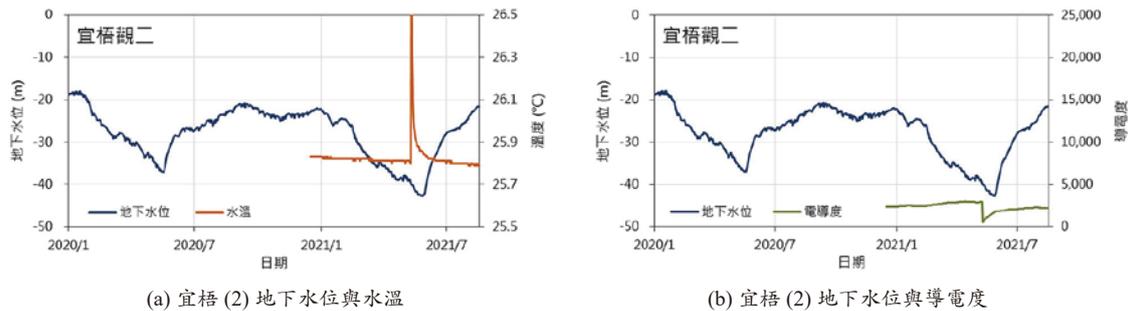


(a) 海園 (4) 地下水位與水溫 (b) 海園 (4) 地下水位與導電度

圖 2 海園 (4) 地下水觀測紀錄
(資料來源：水利署^[16])



(a) 宜梧 (1) 地下水位與水溫 (b) 宜梧 (1) 地下水位與導電度



(a) 宜梧 (2) 地下水位與水溫 (b) 宜梧 (2) 地下水位與導電度

圖 3 宜梧 (1) 與宜梧 (2) 地下水觀測紀錄
(資料來源：水利署^[16])

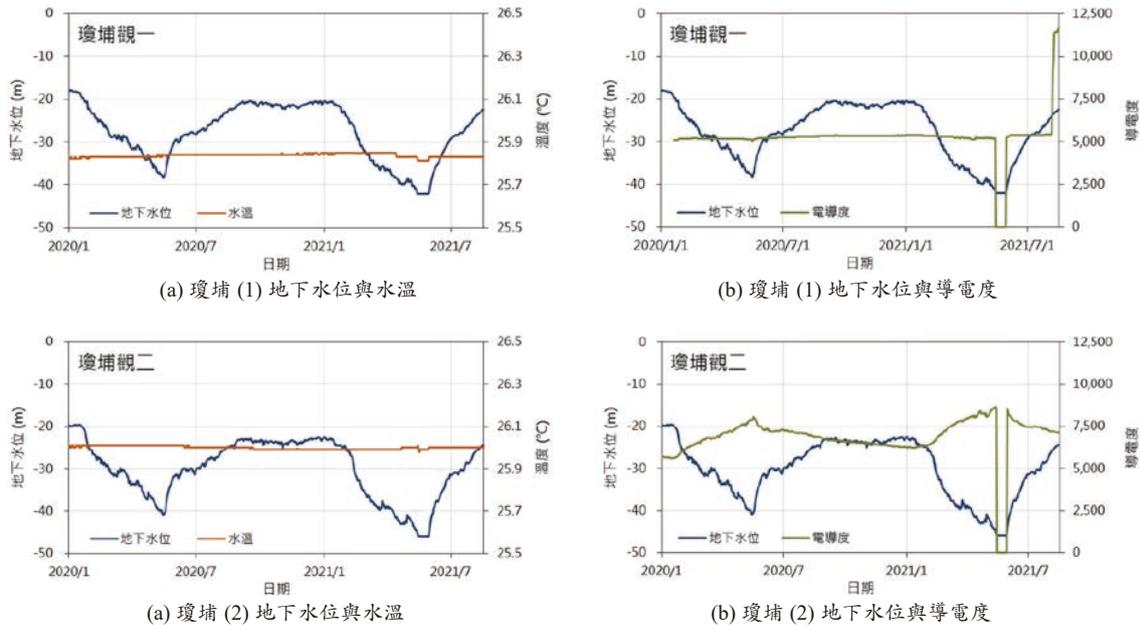


圖 4 瓊埔 (1) 與瓊埔 (2) 地下水觀測紀錄
(資料來源：水利署^[16])

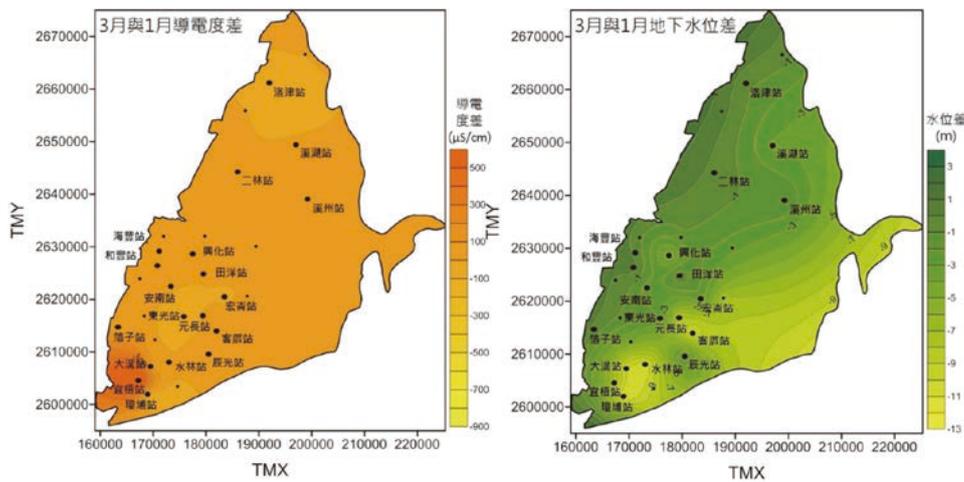


圖 5 2021/1/1~2021/3/1 導電度及地下水水位變化等值圖
(資料來源：水利署^[16])

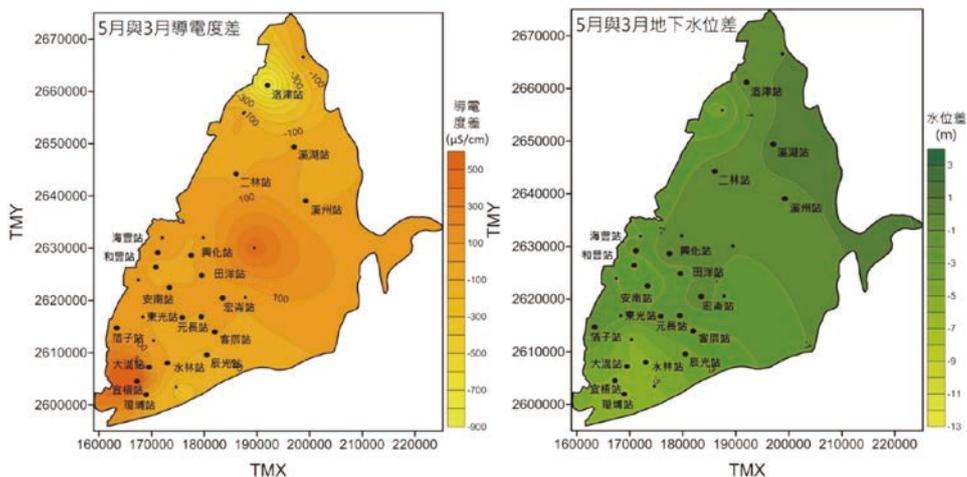


圖 6 2021/3/1~2021/5/1 導電度及地下水水位變化等值圖
(資料來源：水利署^[16])

澎湖地區深淺含水層地下水鹽化之原因與分佈情況不一，且深層含水層長期觀測資料較為缺乏，利用民國 95 年水井普查結果 [17]，將該年針對民井（1,784 口）、自來水公司取水井及公有井（95 口）之調查結果進行換算，分別將民井（淺層）所測得之鹽度轉換為氯鹽濃度；自來水公司及公井（深層）所測得之導電度透過導電度換算鹽度的轉換及鹽度換算氯鹽濃度，再透過空間內差的方法，即可得到澎湖地區淺層至深層的氯鹽濃度分布概況，詳圖 7 至圖 10。

圖 7 及圖 8 分別為淺層 (1) 及淺層 (2) 氯鹽濃度分布圖，深度分布由地表至地表下 8 公尺為淺層 (1)，地表下 8 公尺至地表下 75 公尺為淺層 (2)。可初步觀察淺層 (1) 由於馬公、湖西地區氯鹽濃度資料較充足，因此改區域氯鹽濃度內差的結果較為細緻。西嶼地區淺層 (1) 以赤馬濃度較高，淺層 (2) 內差的結果除了西嶼赤

馬的濃度較上層淡外，其餘濃度皆較淺層 (1) 高。圖 8 及圖 9 分別為深層 (1) 及深層 (2) 氯鹽濃度分布圖，深度分布由地表下 75 公尺至地表下 100 公尺為深層 (1)，地表下 100 公尺以下為深層 (2)，深層含水層以白沙地區濃度最高，其次為湖西及西嶼。

由過往水質分析結果，可知導電度、氯鹽及總溶解固體物三者間關係密切，因此先利用導電度、氯鹽及總溶解固體物作為地下水鹽化初步判定，再更進一步透過李梵藍氏圖及利用派博水質圖的落點逐一進行比對，歸納澎湖地區地下水鹽化原因與空間分布。最後透過鈉吸著率、殘餘碳酸鈉對澎湖地區地下水作為灌溉用水之可行性評估，並比對歷年水質檢驗結果判定地下水鹽化趨勢與範圍。

針對於澎湖地區水利署共 6 口地下水監測井進行採樣分析，編號依序分別為澎南、馬公 (1)、馬公 (2)、湖

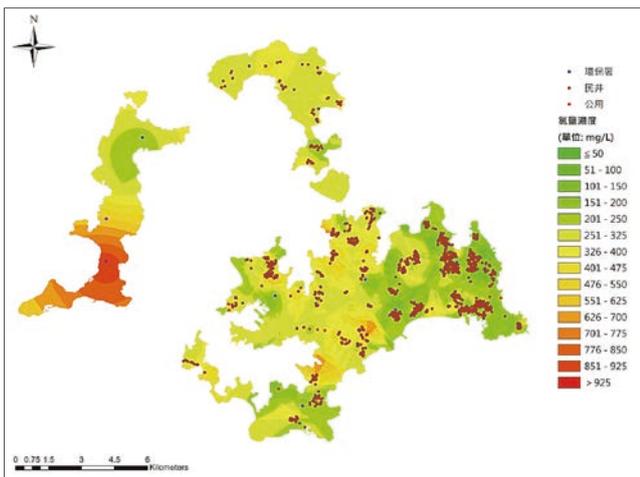


圖 7 澎湖地區淺層 (1) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

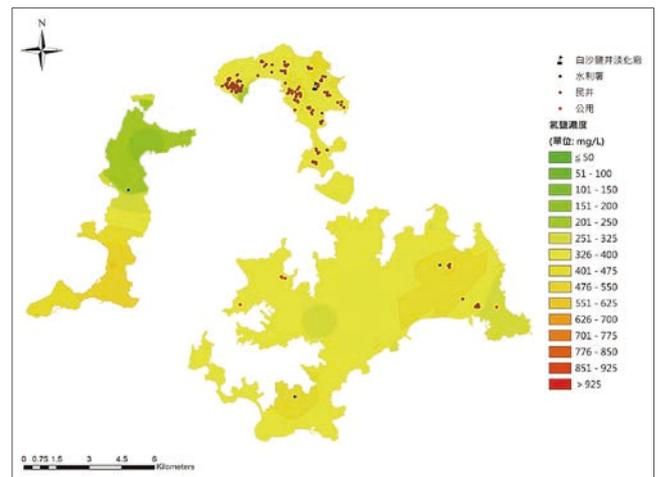


圖 8 澎湖地區淺層 (2) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

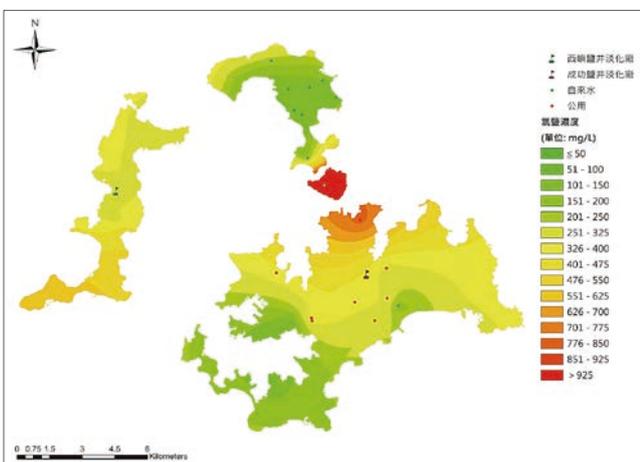


圖 9 澎湖地區深層 (1) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

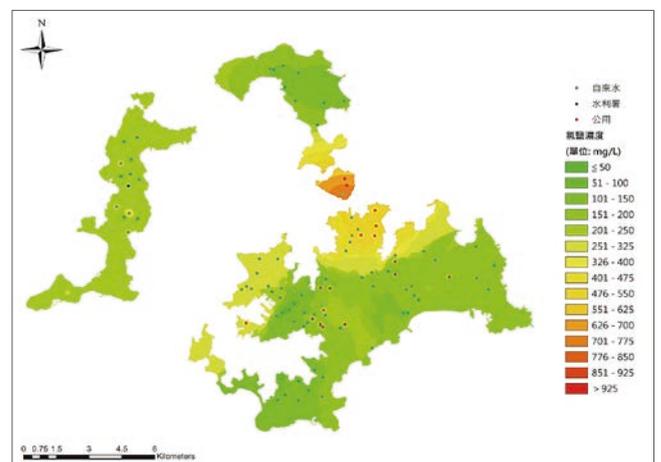


圖 10 澎湖地區深層 (2) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

西、大池(1)、大池(2)。水利署所屬6口抽水井井深介於43 m~141 m間，馬公(2)與大池(2)屬於深井；澎南、馬公(1)、湖西及大池(1)則以淺層井進行評估(詳圖11所示)。

(1) 導電度、氯鹽、總溶解固體物

水利署地下水監測井 pH 介於 6.98~8.40，導電度介於 1,011 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ~1,808 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，總溶解固體物介於 509 ppm~899 ppm，氯鹽介於 135 mg/L~555 mg/L。水利署 6 口地下水監測井，總溶解固體物濃度皆超過飲用水水質標準(500 mg/L)。水利署澎南地下水監測井氯鹽濃度超過飲用水水質標準(250 mg/L)。

(2) 李梵藍氏圖

由圖 12 顯示，6 口水利署地下水監測井發現共有 2 口(馬公(1)及馬公(2))落在 A 區，屬於未受海水污染，有 3 口落在 B 區(湖西、大池(1)、大池(2))，屬於受輕度海水污染，有 1 口(澎南)落在 D 區屬於高度海水污染。

(3) 派博水質圖

由圖 13 顯示，6 口水利署地下水監測井共有 2 口(馬公(1)及馬公(2))落在派博水質圖第 II 區中，有 2 口(澎南及湖西)落在派博水質圖第 III 區中，有 2 口(大池(1)及大池(2))落在派博水質圖第 IV 區。在第 IV 區中為大池(1)與大池(2)屬於鈉與氯鹽污染形式，為海水導致鹽化情形。澎南站於派博水質圖陰離子落點屬於高氯鹽、低硫酸鹽，初步判定為受殘留於封閉地層之古海水鹽化的形式。湖西站地下水氯鹽濃度雖未超過可飲用水標準值，但其總溶解固體量卻稍微超標，且其由派博水質圖中可發現其地下水鈣、鎂含量偏高，因此，初步判定為受全新世現代堆積物影響，地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為。

(4) 鈉吸著率與殘餘碳酸鈉

由地下水鈉吸著率與殘餘碳酸鈉顯示，水利署 6 口地下水監測井中，共有 1 口(大池(2))鈉吸著率與殘餘碳酸鈉高於灌溉水水質標準。該口井不適合灌溉用水與可由派博水質圖中可知其鈉、鉀含量過高所導致。

同時針對於澎湖地區自來水公司共 9 口地下水抽水井進行採樣分析，編號依序分別為馬公 22、澎南 04、湖西 01、湖西 11、白沙 04、白沙 09、白沙 17、西嶼 10、西嶼 13。自來水公司所屬 9 口地下水抽水井，井深介於 136 m~150 m 間，皆屬於深井。

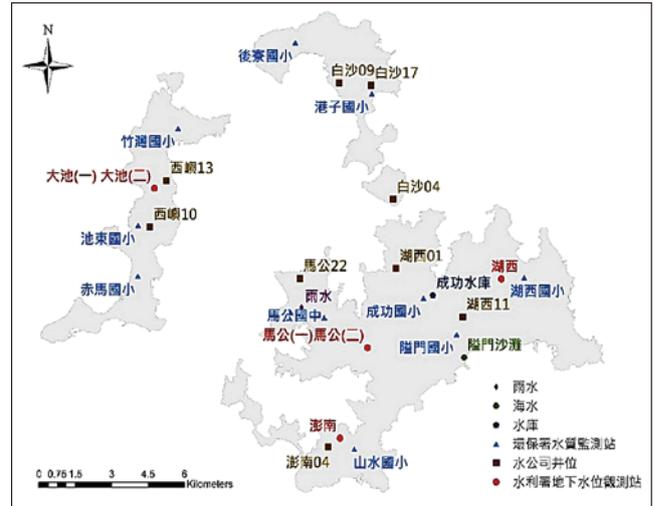


圖 11 地下水質補充調查點位分布圖

(資料來源：水利署^[18])

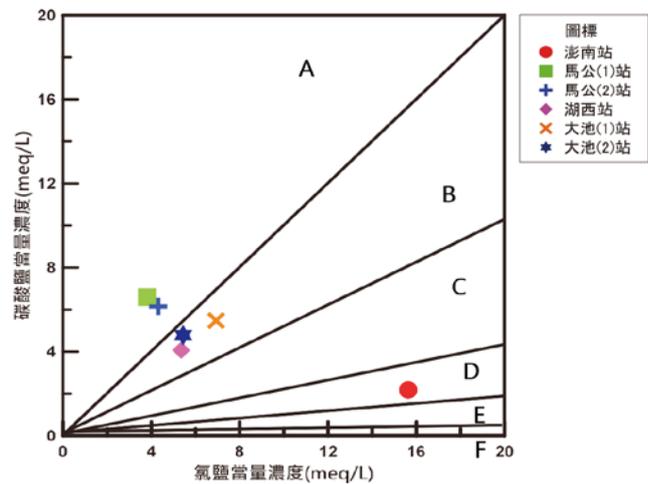


圖 12 水利署地下水監測井李梵藍氏圖

(資料來源：水利署^[18])

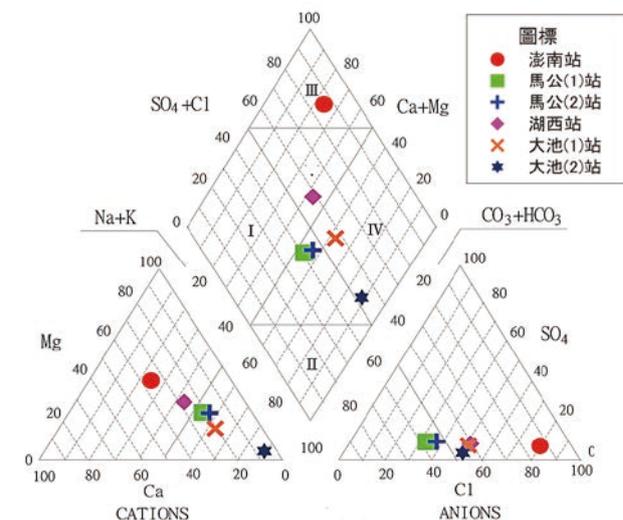


圖 13 水利署地下水監測井派博水質圖

(資料來源：水利署^[18])

(1) 導電度、氯鹽、總溶解固體物

自來水公司地下水抽水井中 pH 介於 7.53 ~ 8.65，導電度介於 498 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ~ 8,840 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，總溶解固體物介於 252 ppm ~ 8,810 ppm，其中白沙 04 總溶解固體物濃度超過手持儀器測定範圍，特將水樣送實驗室檢測，氯鹽介於 76.7 mg/L ~ 3,320 mg/L。自來水公司 9 口地下水抽水井，共有 6 口總溶解固體物濃度超過飲用水水質標準 (500 mg/L)，分別為馬公 22、湖西 01、白沙 04、白沙 09、白沙 17、西嶼 13。地下水抽水井中共有 4 口氯鹽濃度超過飲用水水質標準 (250 mg/L)，分別為馬公 22、湖西 01、白沙 04、西嶼 13。

(2) 李梵藍氏圖

由圖 14 顯示，9 口自來水公司抽水井有 3 口 (湖西 11、白沙 09 及白沙 17) 落在 A 區，有 2 口 (澎南 04 及西嶼 10) 落在 B 區，屬於輕度海水汙染，有 3 口 (馬公 22、湖西 01 及西嶼 13) 落在 C 區，屬於中度海水汙染，有 1 口 (白沙 04) 落於 F 區屬於海水汙染。

(3) 派博水質圖

圖 15 顯示，9 口自來水公司地下水抽水井共有 3 口 (湖西 11、白沙 09 及白沙 17) 落在派博水質圖第 II 區中，有 1 口 (湖西 01) 落在派博水質圖第 III 區中，有 5 口 (馬公 22、澎南 04、白沙 04、西嶼 10 及西嶼 13) 落在派博水質圖第 IV 區中，表示該地區地下水受到海水汙染，屬於鈉與氯鹽汙染形式，為海水導致鹽化情形。又澎南 04 同屬於高氯鹽、低硫酸鹽，初步判定為同時受殘留於封閉地層之古海水鹽化之形式。湖西

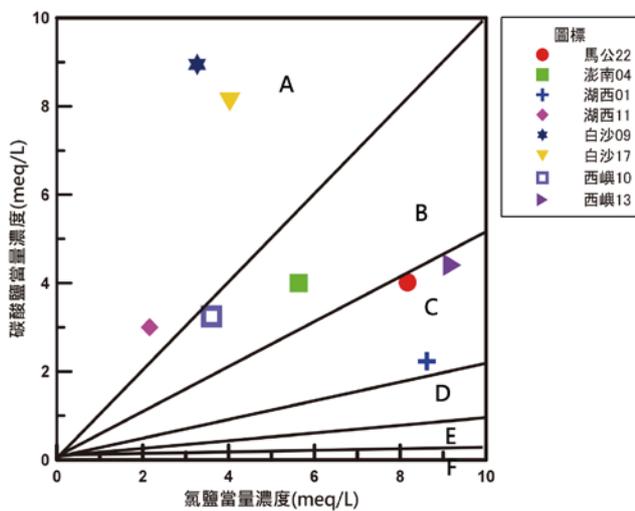


圖 14 自來水公司取水井李梵藍氏圖 (資料來源：水利署 [18])

01 及白沙 04 由派博水質圖中可發現其地下水鈣、鎂含量偏高，因此，初步判定為受全新世現代堆積物影響，地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為。

(4) 鈉吸著率與殘餘碳酸鈉

由澎湖地區地下水鈉吸著率與殘餘碳酸鈉顯示，自來水公司 9 口地下水抽水井，共有 6 口 (馬公 22、白沙 04、白沙 09、白沙 17、西嶼 10 及西嶼 13) 鈉吸著率高於灌溉用水水質標準 ($6\sqrt{\text{meq/L}}$)。其中 5 口 (馬公 22、白沙 09、白沙 17、西嶼 10、西嶼 13) 殘餘碳酸鈉高於灌溉用水水質標準 (2.5 meq/L)。

水質補充調查之目的除了增加澎湖地區地下水水質在時間及空間上的完整性及連續性外，並提供精確可靠之地下水水質環境資訊，可初步的得到澎湖地區地下水氯鹽濃度在時間上的分佈容易受到季節的枯豐水影響，產生枯水期濃度升高，豐水期濃度降低的變化趨勢。

透過導電度、氯鹽、總溶解固體物、李梵藍氏圖及派博水質圖分析判釋結果，將地下水鹽化的成因分為三個主要因素，分別為 (1) 海水入侵；(2) 受殘留於封閉地層之古海水鹽化之行為；(3) 地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為，其水井及鹽化成因對照表如表 3。

由表 3 水井及鹽化成因對照關係，將鹽化成因空間概念化 (詳圖 16)，可有助於三維地下水流溶質傳輸模式邊界之設定。

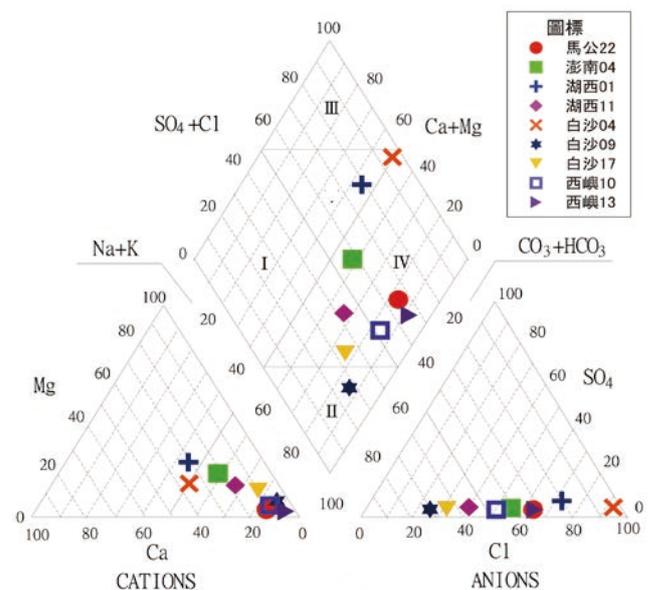


圖 15 自來水公司取水井派博水質圖 (資料來源：水利署 [18])

表 3 水井及鹽化成因對照表
(資料來源：水利署^[18])

鹽化成因分類	所屬單位		
	水利署	自來水公司	環保署
1 海水入侵	大池 (1) 大池 (2)	* 澎南 04 馬公 22 * 白沙 04 西嶼 10 西嶼 13	* 港子國小
2 受殘留於封閉地層之古海水鹽化之行為	澎南	* 澎南 04	* 赤馬國小
3 地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為	湖西	湖西 01 * 白沙 04	* 赤馬國小

* 底線表示複合型鹽化成因

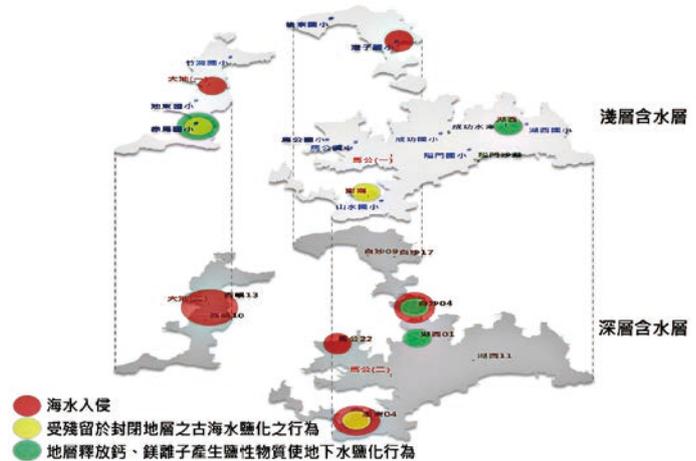


圖 16 地下水鹽化成因空間分布
(資料來源：水利署^[18])

結論

我們以本島濁水溪平原與離島澎湖群島為例，說明海水入侵在這兩個地區的量測分析與情況。然而，儘管過去幾十年的研究，但仍有許多海水入侵相關問題仍待更進一步的瞭解。這包含須要對海洋－含水層水力與物化相互作用，氣候變遷的影響，及人類對沿海含水層的作用等等，都要有更深入的掌握。除此之外，長期、高密度在淡水和鹽水之間過渡區的現地規模監測資料目前仍然不足。最重要的是須要將海水入侵相關水文地質物理與化學的科學上瞭解與現地調查結果整合，付諸於有效的管理策略與治理的實踐。這些都待我們更努力的落實，讓我們在海岸地區的國土資源的利用可以永續發展與經營。

參考文獻

1. Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B. and Simmons, C.T. (2016), Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology* 535, 235-255, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.083>.
2. Custodio, E. (1987), Salt–fresh water interrelationships under natural conditions, Chap 3. In: Custodio E, Bruggeman GA, editors. *Studies and reports in hydrology: groundwater problems in coastal areas*. Paris, France: UNESCO; pp. 14-96; Effects of human activities on salt–fresh water relationships in coastal aquifers. In: Custodio E, Bruggeman GA, editors. *Studies and reports in hydrology: groundwater problems in coastal areas*. Paris, France: UNESCO; pp. 97-117.
3. Swartz, J.H. (1937), Resistivity studies of some salt water boundaries in the Hawaiian Islands. *Trans Am Geophys Union* 189, 387-93.
4. Stewart, M.T. (1982), Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt-water interfaces in coastal aquifers. *Ground Water* 20, 538-45.
5. Goldman, M., Gilad, D., Ronen, A., and Melloul, A. (1991), Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time

domain electromagnetic method. *Ge exploration* 28, 153-74.

6. Bouchaou, L., Michelot, J.L., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., and Gaye, C.B. (2008), Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinisation, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest Morocco. *Journal of Hydrology* 352, 267-87.
7. Reilly, T.E. and Goodman, A.S. (1985), Quantitative-analysis of saltwater fresh-water relationships in groundwater systems – a historical perspective. *Journal of Hydrology* 80,125-60.
8. Bruggeman, G.A. (1999), Analytical solutions of geohydrological problems. *Developments in water science*, vol. 46. Amsterdam: Elsevier.
9. Dagan, G. and Zeitoun, D.G. (1998), Free-surface flow toward a well and interface upconing in stratified aquifers of random conductivity. *Water Resources Research* 34, 3191-3196
10. Bakker, M. (1998), Transient Dupuit interface flow with partially penetrating features. *Water Resources Research* 34, 2911-2918.
11. Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C.H., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., and Barry, D.A. (2013), Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources* 51 (1), 3-26.
12. Liu, C.-W., Wang, S.-W., Jang, C.-S., and Lin, K.-H. (2006), Occurrence of arsenic in ground water in the Choushui River alluvial fan, Taiwan, *Journal of Environmental Quality*, 35(1), 68-75.
13. 賴慈華 (1996)，濁水溪南岸平原之晚第四紀地質，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 79-100 頁。
14. Kelly F. (2005). *Seawater Intrusion Topic Paper: Island County Health Department*.
15. 經濟部水利署 (2020)，109 年度地下水水質檢測分析與評估。
16. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2021)，濁水溪沖積扇海水入侵及地下水區邊界地下水觀測站井補充建置 (1/2) 期中報告。
17. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2006)，澎湖地區地下水資源規畫調查。
18. 經濟部水利署 (2016)，澎湖地區地下水海水入侵與防治措施評析



地層下陷 成因 與 防治

徐國錦／國立成功大學資源工程學系 教授

林政偉／國立成功大學水工試驗所 助理研究員兼副組長

地層下陷發生於台灣以及世界多處，對社會安全與經濟發展造成重大影響。地下流體過度抽取加以區域水文地質特性，為許多沖積沉積環境地層下陷的主要原因。土壤的壓密與地表的沈陷，可源於地表荷重增加、阻水層或厚實含水層中夾帶豐富黏土薄層之孔隙水壓下降，或是水壓震盪重複變化之震陷效應。釐清複雜的土壤水力互制行為以及掌握水文地質性質空間變化，才能對地下水超抽導致地層下陷區域變化的機制提出科學解釋。據以調適產業發展，降低地下水資源需水量並控制用水量進行有效防治。本文介紹地層下陷的成因、台灣地層下陷的現況及力學可能機制與防治的建議。

前言

人類因生存的必要，提昇生活品質的需要以及擴展個人資財的想要，大量使用自然資源。當需求與慾望超出自然系統所能負荷時，地球母體產生系統內部調適改變，環境反撲，危及人類自身的生存。人類使用自然資源謀求生存是必然的，所面臨的挑戰不是該不該使用自然資源，而是如何節制地與智慧地使用自然資源。工程師雖有人定勝天的抱負，更應有從自然學習，創造與自然共存的適應方法，借用自然資源繁衍子孫，延續自然各類物種後代。台灣自然資源有限，可承載生命體有限，而水土資源為人民基本生存所必需，應要謹慎資源開發與保育，為自己與地球生物留下活路。台灣地區地層下陷已經大幅衝擊可用水土資源，其影響廣大。然而地層下陷行為是一種回逆困難的物理過程，土壤因孔隙壓力變化而壓密，即使土壤孔隙水壓回昇，也沒有辦法回復到原本的總體積狀態，因而造成地質資源的損失。人類常寄望特效藥治病、神奇發明或快速工程手段改變逆境，解決看似直接，卻實為複雜的問題。地層下陷發生後，專家與學者嘗試尋找兼顧經濟與有效防治的可能工程方法，抑止地層下陷的惡化，如使用注水的方式 (Miozzi^[1]; Castelletto *et al.*^[2]) 或是注入二氧化碳 (Comerlati *et al.*^[3]) 來抬升地層下

陷區域 (如：義大利威尼斯)，但是工程效果與後續環境影響仍需觀察。了解地層下陷的現況、力學可能機制及地陷區產業趨勢變化，將有助於有效地層下陷防治方法的提出與施行。

地層下陷定義與成因

地層下陷為地球表面相對於基準點產生向下的移動。地層下陷不只發生在台灣地區，世界多國如美國、英國、義大利、澳洲、德國、印度、瑞士、紐西蘭、墨西哥、日本、印尼、越南與中國大陸等地區，都有類似的地層下陷問題與挑戰，也都造成社會經濟的重大成本付出。

地層下陷可由自然因素或人為因素所產生^[4]。自然成因如在卡斯特地形中石灰岩的溶解、火山噴發造成地質構造的改變、地震、斷層活動、有機土壤的分解、永凍層的融化與海水潮汐掏刷海岸線等。地層下陷的人為成因則有廢棄地下礦坑形變引致的沉陷，超高建築、地表水庫、橋樑公路等營建工程的巨大負載施壓造成近地表土壤結構變形，水、天然氣以及石油等地下流體的抽取造成地層的壓密。其中以地下水資源開發導致的地層下陷最為普遍，面積也廣大，造成巨大的經濟損失與地質資源的流失。

長久以來地下水即為地表水之外的重要替代水源。工業革命後，人口快速成長、生活水準提昇、農業活動擴展與工業快速發展，造成需水量增加。地下水由於供水穩定性高且經由地質材料自然過濾而水質佳，使用量亦快速提昇。但是地下水過度抽取引致地層下陷，已經發生在包含台灣的世界多處沖積地形的堆積環境^[5,6]。

地層下陷引致環境改變的速率可能極為快速或緩慢，規模大或小。如地下隧道工程不當施工，可能造成局部地面的快速塌陷；海岸線侵蝕土層，造成沈陷差異，建築物瞬間毀損；而抽水或溶解等作用導致的損壞，則是漸次發生，需要等沉陷量累積達到一定程度，才會發現大面積地層下陷的嚴重性。因此，地層下陷的觀察與持續精準量測，為了解地層下陷發生的首要工作。由於地層下陷可能同時有自然與人為的成因，如何量化區隔不同成因所造成的地層下陷，作為人為改善措施的成效評估，亦為科學與工程的挑戰。

地層下陷的監測

台灣地區常見之地層下陷監測技術包含全球衛星導航系統（GNSS）、雷達干涉測量（InSAR）、地表水準樁、分層監測井及深層水準樁等（圖 1），可由空中、地面及地下等不同面向，具體掌握地層下陷時空變化趨勢。各監測技術之時空解析度與量測週期比較參見表 1，空間解析度以水準量測最佳，量測週期最短為 1 小時（深層水準樁），最長為 1 年（地表水準高程）。監測技術依時間、空間延展性與連續性，可概分為點狀及面狀監測兩種。面狀監測（以雷達干涉衛星影像量測為主）可觀測大區域地層下陷趨勢，藉由廣域觀測特性可完整獲致各地區下陷邊界及中心資訊。點狀監測技術則是針對單一點位進行地層下陷觀測，依量測位置概分為地表及地下量測。傳統地表量測方式以水準高程檢測及全球衛星導航系統（GNSS）兩種方法為主，而地下土層量測方法則有深層水準樁及分層監測井兩種。各地層下陷監測技術量測方法及流程說明如下：

雷達干涉測量技術是利用攝像雷達所獲取之複數資料（complex data），利用其相位（phase）值來粹取出地表三維資訊。其能夠偵測大面積地形變動之分布情勢，因此在大範圍地層下陷監測上有相當高的應用價值。廣域的地層下陷判釋能夠提供下陷成因之探討

和防治策略之擬定。

水準高程檢測係經由水準高程測量方法量測埋設於地面之水準樁點間之高程差，藉由已知點的高程推算未知點的高程，利用不同時間的測量結果，獲得該時間段內之地面變形情況。水準高程測量目前仍然是世界各國都最常使用的量測方式，若只需要了解單一垂直方向之地層形變時，此種方式之量測精度相當高但最耗時和成本，並容易受天候所影響，而獲得之點位資料也較為局部不夠廣泛。

全球衛星導航系統是由設置於地面之觀測站接收衛星所發射的電磁波訊號，量測地面與衛星之間的距離，至少須有 4 顆衛星所得之距離，再透過幾何原理求解地面接收儀之三維座標，精度可達公分級。其精度介於水準高程量測和雷達干涉測量（InSAR）之間，可 24 時連續觀測地表定點高程變化，掌握變化情形。由於量測速度快且經費較低，因此目前已被廣泛使用，惟其資料浮動性較大，僅以掌握地陷趨勢變化為主。

深層水準樁係鑽孔至地表下觀測深度後置入外管以隔離土層，再於外管中置入內管，並於其底部建構水泥砂漿基座，使該基座坐落於欲觀測深度之地層上，則內管管頂高程變化即為地表下觀測深度土層高程變化。透過自記式量測系統（包含電子式變位計、自動記錄器、防潮儀器箱及資料擷取器原版分析軟體等）可自動連續監測地表至觀測深度地層間壓縮量，即時掌握地層下陷變化趨勢。其監測機制及工法較單純，故障風險較低，能夠確保觀測資料品質及穩定度。惟深層水準樁僅能進行定點單一土層監測，若要達到分層監測功能，必須增加土地使用面積，建置各分層之深層水準樁，其效益性較低。

分層監測井乃根據地下水文地質條件，鑿設一口固定深度監測井，於井內不同深度配置磁環，藉由量測各磁環位置變化，可獲得各分層土層下陷資料。其量測精度和穩定性高且能夠監測各分層壓縮量變化，配合地下水位觀測，可進一步釐清各分層變形機制，具體研擬地層下陷相關防治措施。目前台灣地區已設置約 57 口分層監測井，各監測井可同時掌握約 20 餘層土層變化，透過定期至現地量測，可瞭解該分層監測井內各磁環位置變化，藉以推估地底下各土壤分層之壓縮變化趨勢。惟其初期投入經費較高且透過人工每個月量測，1 年僅可獲得 12 筆資料。

表 1 地層下陷量測技術時空解析度比較表

量測技術	空間解析度	量測週期
雷達干涉測量 (InSAR)	25 m	12 days
全球衛星導航系統 (GNSS)	10 ~ 15 km	1 week
地表水準高程量測	1.5 ~ 2 km	1 year
分層監測井	5 ~ 10 km	1 month
深層水準樁	-	1 hour



圖 1 台灣地層下陷多元化監測系統

台灣地層下陷情況

台灣地區的地層下陷問題嚴重，首先於 60 年代台北盆地被觀測到，隨後地下水禁抽與加強地表水源補給，有效改善台北市的地層下陷問題。伴隨著經濟發展與養殖漁業的興起，台灣沿海地區的地下水超抽造成了嚴重的地層下陷問題。依據水利署歷年於全台之水準點檢測成果顯示，臺灣地區曾發生地層下陷地區有宜蘭縣、臺北市、桃園市、彰化縣、雲林縣、嘉義縣、臺南市、高雄市及屏東縣等九個縣市（如圖 2 淺

藍色範圍），地層下陷範圍約 2,500 平方公里，最大累積下陷量約 3.56 公尺。在歷經多年的地層下陷防治工作後，全台下陷呈逐年改善趨勢，近年地層下陷顯著地區則集中在彰化縣、雲林縣、嘉義縣及屏東縣，但隨水文氣象狀況變異，用水量改變，地層下陷狀況亦隨之變化。顯著地層下陷面積（年下陷速率大於 3 公分）已由 1,529 平方公里（民國 90 年）減至 106 平方公里（民國 106 年），最大下陷速率位為雲林縣元長鄉的 5.5 公分 / 年（參見圖 3）。

地層下陷對資源使用的衝擊

人類賴以維生的自然資源包含地質資源（固體、流體、能源與空間）、生物資源（植物與動物）與再生資源（陽光、潮汐、風能）。在人類歷史上，自然資源的多寡直接影響社會的成長與發展，當區域資源耗盡時，人群移往資源豐裕的場域求生存，而廢棄原有的

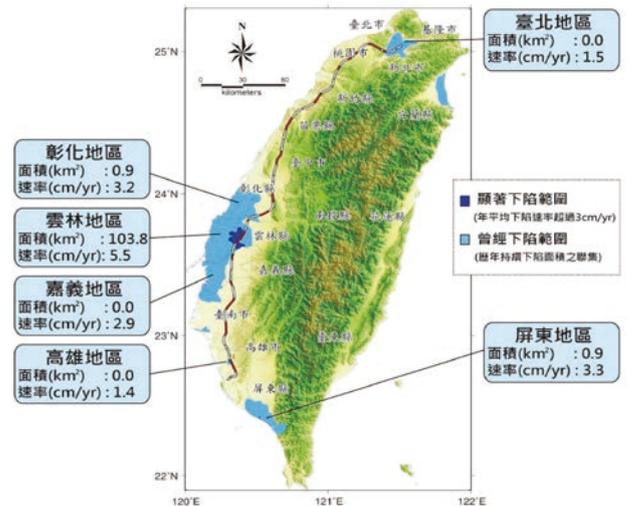


圖 2 109 年度臺灣地層下陷檢測成果圖

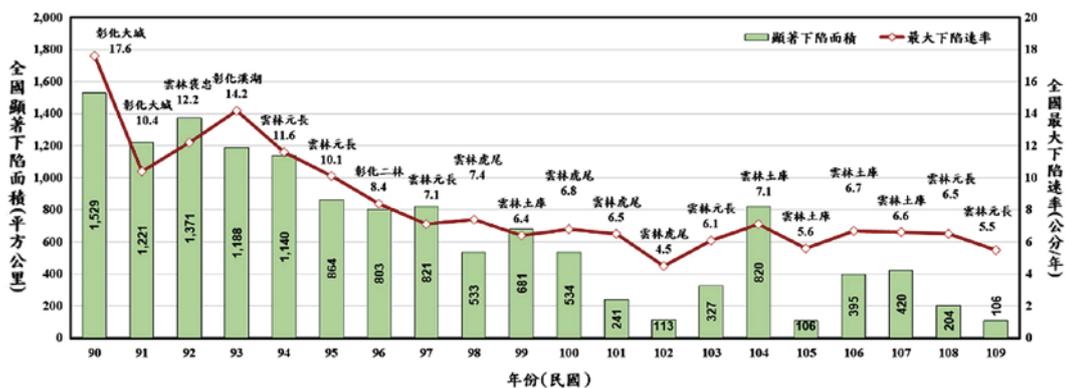


圖 3 臺灣歷年最大下陷速率及顯著下陷面積變化圖

生活場域。由於固體、流體與能源的過度抽取導致區域地層下陷，直接影響地表與地下資源的可用量，包含可耕種農產面積減少，地下水體儲存空間損失，資源流體傳輸能力的下降與地質可儲存空間（如氫、天然氣）的降低。

地層下陷產生的地表變形直接影響人類生活，積水不退、土壤鹽化導致可耕地減少，減少生物資源的生產力與多樣性，以及土地資源的可利用性。地層下陷導致的差異沈陷，可能直接危及公共工程安全如高鐵、交通道路，以及排水設施的失效，也會造成建築斷裂或傾斜，危及生命財產，並降低土地與不動產的市值，弱化社區功能，加速人口流失。因此地層下陷損壞自然資源的可用性，不利於人類與生態的永續發展。

地層下陷產生的地下空間損失，衝擊資源的聯合運用，降低地下水與能源儲存空間。以濁水溪沖積扇為例，從 1960 年代沿海養殖漁業大量使用地下水，造成地層下陷，從海水養殖改為海淡水混合供水。地層下陷中心由沿海轉為內陸至雲林虎尾、元長附近。自 2010 ~ 2020 期間，彰化雲林土體孔隙壓縮體積為 27,588 萬立方米，相當於 0.54 座曾文水庫 2021 年的有效容量，或為 5.41 座湖山水庫 2021 年的有效容量^[7]。當地表水庫不易覓地獲得社會共識籌建時，無聲的地下資源損失，損及地下水資源與地質儲能空間資源，應及早防治。

孔隙水壓變化引致地層下陷之物理機制

台灣沖積沉積環境在地史時期內，由於海面上升或陸地下降，造成海進海退而形成非固結或半固結的含水層與阻水層。含水層通常由粗顆粒如砂、礫組成，有時夾帶細顆粒的薄不易透水層。而阻水層由細顆粒土壤如粉與黏土組成，隔離上下水層的連通。因為重力作用，在泥沙運移過程，重的顆粒會先沈降堆積，所以含水層在沖積扇頂顆粒的顆粒，會粗於扇央，又更粗於扇尾。土壤是一個三相系統，由固體顆粒、水與空氣組成。固體顆粒係由岩石經過風化、侵蝕、搬運及堆積作用所形成，依據固體顆粒主要尺寸之大小可分成礫石 (gravel)、砂 (sand)、粉土 (silt) 及黏土 (clay)。土壤係屬獨特之天然材料，其性質與顆粒之尺寸分布、形狀、排列方式及緊密度有關，亦受控於孔隙間水與空氣含量。引起土壤體積變化之因

素主要有 (1) 土壤顆粒的重新排列，(2) 土壤團粒的變形，及 (3) 孔隙水及空氣的排出。

在自然季節氣候變化中，濕季雨水多，補注地下水，地層中孔隙水壓增高；而乾季雨水多，補注地下水少，因勢能原理，地層中孔隙水壓逐漸消散。地下水位呈現季節性但具有延遲的變化。地下水資源蓄存於地下孔隙間，需藉水井開鑿汲取而利用。當水井抽水時，含水層壓力水頭將以抽水井為中心，形成一錐形洩降面，以產生水力坡降，造成四週地下水向井流動。當停止抽水後，此錐形洩降面將回復。當區域總抽水量超過補注量時，則區域地下水水位將會發生下降現象。

無論是由於水位下降，或是水位震盪均有可能造成土體的變形壓縮。壓密理論多用於細顆粒土壤因孔隙水壓下降使用的變形。而震陷理論用於描述水壓震盪導致顆粒狀土壤的變形，二者均可用於解釋地下水位變化引致地層下陷之解釋^[8,9]。

壓密理論

土壤受到增額壓應力所發生之變形，可以分為瞬時壓縮變形及壓密作用發生之變形。瞬時壓縮變形可由於土顆粒架構為了有效傳遞外加載重而發生顆粒排列方向之轉變，或土壤團粒 (cluster) 本身之彈性變形所致。此種變形由可回復之彈性變形 (elastic deformation)，與不可回復之塑性變形 (plastic deformation) 所構成。而壓密作用為一種與經過時間有關之土壤體積壓縮現象，壓密作用產生之變形主要發生於飽和或接近飽和黏土，又可分為主要壓密 (primary consolidation) 變形及二次壓密 (secondary consolidation) 變形，前者為孔隙水之排出所引起土體孔隙之壓縮，後者則可能由於包圍黏土顆粒周圍水膜之潛變 (creep) 所發生。綜合言之，由土壤之內部應力來考慮壓密現象時，亦可將壓密現象視為土壤受一外加的有效壓縮應力 (effective compressive stress) 作用，體積發生收縮的現象。

有關土壤壓密作用泛指粉土與黏土等低透水土層受外加應力後孔隙水及空氣的排出所致之土壤體積變化行為。地下水層系統可概分為含水層與阻水層，含水層為透水性良好之土壤所組成，阻水層則由黏土等低透水性土壤組成。然而，由於地層之組成並非均值，故位於滲透性良好之含水層中常見存在許多較薄且側向長、寬度

不足以分隔鄰近含水層之低透水性土層，其常被視為由具高壓縮性之黏土層或粉土層所組成，這些土層內具有垂直滲流，且分別以連續或不連續方式存在於含水層各位置。因此壓密作用導致之地層下陷現象同時發生於阻水層，也普遍存在於含水層中。

含水層系統地下水水位變化及黏土層壓縮量間之關係亦可依 Terzaghi [10] 發展之有效應力原理說明，其中，總應力係由上層飽和、非飽和沉積土層及地殼構造應力所產生，總應力改變及孔隙水壓改變皆可導致有效應力改變。含水層中土壤固體顆粒與孔隙水體係其共同承擔土壤荷重及外加應力，其中固體顆粒承受之應力稱之為有效應力 (effective stress)，孔隙水體則有孔隙水壓力。抽水導致孔隙水壓下降，而注水則使孔隙水壓上升。假設含水層系統內黏土夾層之厚度為水平側向延展，黏土夾層內主要之孔隙水壓梯度變化為垂直 (z 方向) 分佈，若進一步假設其產生之主要應變也是垂直方向，則有效應力可採用一維的方式表示為 $\sigma' = \sigma - u$ ， σ' 為有效應力， σ 為總應力， u 為孔隙水壓力。在深層土壤，假設水位變化引致總應力變化可忽略 ($\Delta\sigma = 0$)，則含水層水位變化所引致之土層有效應力變化可表示成 $\Delta\sigma' = -\Delta u$ 。若統一除以水體密度，則含水層水位變化所引致之土層有效應力變化僅與水頭變化有關 $\Delta\sigma' = -\gamma_w \Delta h$ ，其中 $\Delta\sigma'$ 為有效應力增量，正值表示增加，負值表示減少； Δh 為受壓含水層之水頭改變量，正值表示水頭上升，負值表示水頭下降。因此抽水引致水頭降低，而有效應力增加，亦即固體顆粒承受之應力增加，造成壓密，反之亦然。但實驗結果顯示即使水位回升，土體並未能回復之原來的體積，視水文地質材料而異。應力與應變的本構關係可使用彈性、塑性與黏性進行描述。

大地工程使用土壤壓縮儀量測土壤的固結特性 [11]，實驗時間需花上數天到數週，繪出有效應力與體積應變的關係。壓縮試驗通過對土壤樣品施加不同的載荷，並測量試體變形，計算土壤壓密性質。圖 4 顯示 Libyan 黏土與 Cambridge 砂的受力壓密行為。當垂直應力逐漸增大時，垂向應變也隨之變大。實驗結果顯示受壓力時，黏土的應變量遠大於砂，亦即黏土層的壓縮量遠大於砂質土。而垂直應力減少後，砂質土回復較接近原壓密曲線，黏土的回復量遠低於原壓密曲線，這也是在地層下陷區水文地質調查中需特別注意含水層中是否包含或夾雜豐富的黏土層。

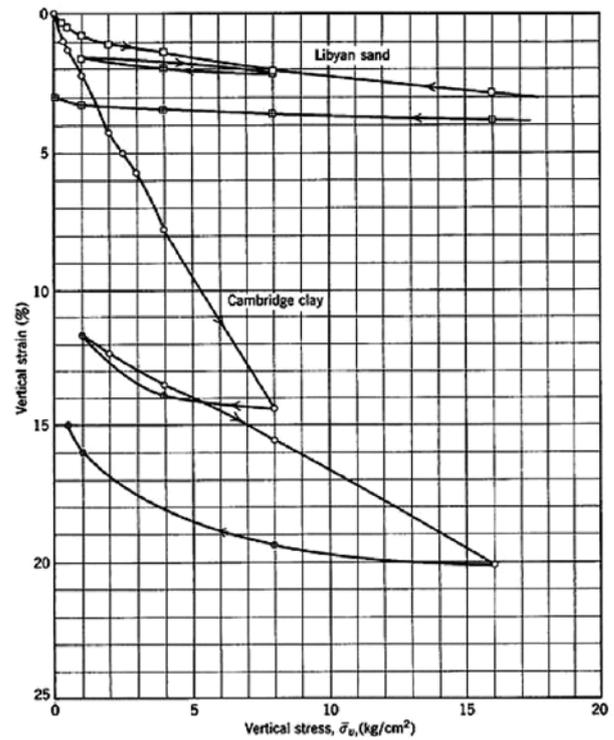


圖 4 土壤壓縮儀黏土與砂的受力壓密行為 [11]

震陷理論

地下水系統中人為抽水與自然乾濕季補注，將造成含水層水位上下震盪，可能導致地層的壓縮 [12]。震陷 (shakedown) 理論 [13] 用以描述在週期載重下，彈塑材料的變形行為。圖 5 顯示顆粒土壤在週期載重下的行為可分為四個階段。階段一為完全彈性行為 (purely elastic)：在此階段反覆施加之應力非常小，材料未進入到降伏階段，而呈現線性行為。受力產生的應變將會完全回復，沒有任何塑性永久變形產生。將反覆施作應力加大，將進入階段二的彈性震陷行為 (elastic shakedown)：此時反覆施加之軸差應力比完全彈性行為時所施加之軸差應力大，在最初有限次數的應力 - 應變循環下材料呈現塑性行為，但塑性變形微小。而在最終的反應則為線性行為。如持續將反覆施作應力加大，將進入第三階段塑性震陷行為 (plastic shakedown)。在有限次數的反覆載重下，材料呈現明顯的塑性變形累積，但隨後會達到穩定狀態，出現彈性變形伴隨遲滯的現象，顯示有部分的能量被材料所吸收。如繼續將反覆施作應力加大，將進入階段四的塑性潛變震陷行為 (plastic creep shakedown)。初期行為與塑性震陷行為相似，隨載重次數增加材料有明顯塑性變形累積，且每

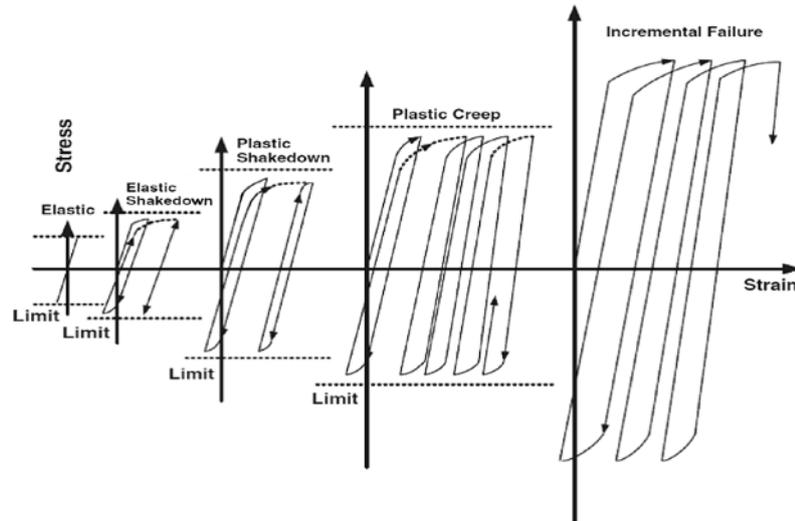


圖 5 反覆載重下，彈塑性材料的震陷行為^[13]

一應力循環皆有遲滯的現象。與塑性震陷行為為差異於後期發生的潛變行為，塑性變將持續累積，穩定而無突然崩潰的現象發生。如持續將反覆施作應力加大，將進入第五階段增量崩潰（incremental collapse or ratcheting）行為，材料明顯的進入降伏區，塑性變形迅速地累積，材料在數次的反覆載重後即發生破壞。

地層下陷防治

地下水超抽為台灣沖積地形地層下陷的人為主因，減少地下水用水量，增加地水補注，加強合理水權分配與提昇用水科技有助於為地層下陷的防治。由於地下水資源佔台灣淡水資源的三分之一強，濁水溪沖積扇與屏東平原使用地下水為淡水資源的比例更高。主要地層下陷區地下水的的需求源為農業、畜牧業、養殖漁業及公共給水。在產業方面，農業提供基本糧食，為基本安全所需，必需予以維持，藉由精準農業技術的發展，提昇水資源使用效率，減少地下水抽用量。而魚類為人類與活動最重要的蛋白質來源，海洋污染與全球氣候暖化造成魚類資源萎縮。隨著全球人口成長，人類對水產品需求增加，海洋捕撈水產品將因資源過度消耗而加以限制，養殖漁業需求量將持續增加。台灣養殖漁業主要分為內陸魚塢養殖、淺海養殖與海面箱網養殖，其中以內陸魚塢養殖面積最大，為維護海洋資源永續利用，養殖漁業將會持續發展，藉由改善養殖技術，減少地下水抽用，在農漁業發展與環境友善間取得平衡。

在管理面上，糧食、能源與水皆為資源，且具有競合的關係，應以糧食、能源與水資源的整體平衡發展作為宏觀管理基準。地層下陷造成國家多重資源的損失：地下水過度抽取，補注來不及回補，造成水資源量的損失。地層水壓下降，造成海水入侵，地下水質劣化，為質的損失。過度抽取富含礦物質的地下水灌溉農業，造成土壤鹽化，不利作物生長，為糧食與土地資源的損失。地下空間壓密，減少地下水資源與替代能源轉化之化學能與物質能介質的地質儲能空間，為水資源與能源產業的損失。

地層下陷成因，有自然與人為因素，必須予以確認區隔，才能對防治措施的有效性予以評估。雖然地下水抽取為地層下陷的主因，但是地下水資源並不是不能使用，而是應如何合理使用。圖 6 顯示濁水溪沖積扇雲林縣田洋國小地下水分層觀測井與龍巖國小累積地層下陷分層監測井時間圖。圖中顯示地層下陷呈現短週期隨乾枯季水位震盪的可回復現象與長期不可逆的趨勢。因此在可回復土壤壓密現象的地下水抽水應視為容許抽水量，而導致地層下陷不可回復抽水量則應作為地下水資源使用的管制上限。以美國南加州的水資源使用為例，嚴格限制私人抽取地下水，以生活污水回收再注入地層，一方面阻止海水入侵，一方面提供地下水資源。抽水時，以過去最低水位為限制標的，避免地層下陷的產生，並進行大區域的民生供水。在氣候變遷下，地下水資源越顯示其重要性，而地層下陷也越需及早防治。

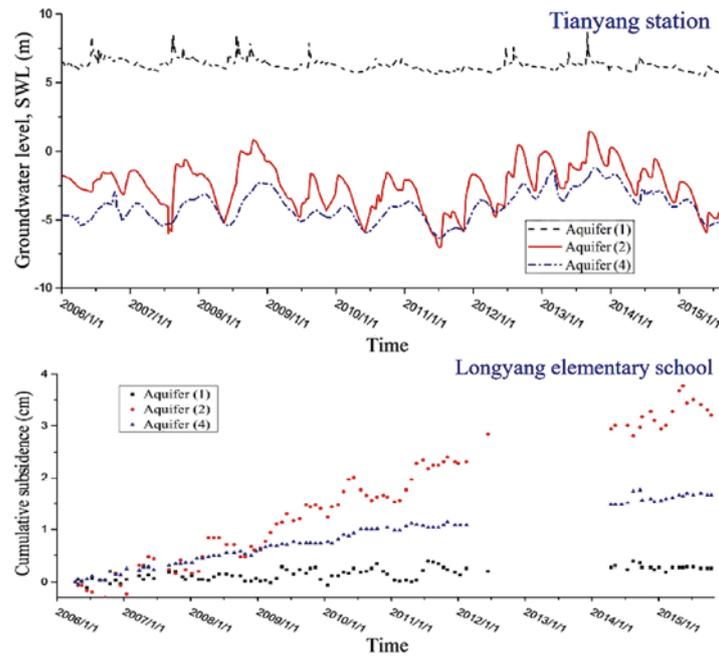


圖 6 濁水溪沖積扇雲林縣田洋國小地下水分層觀測井與龍巖國小累積地層下陷分層監測井時間圖

結語

台灣地區地下水使用由來已久，早期政府水資源開發，重視地表水庫。當環保意識抬頭，水庫場址難覓，則開發伏流水。民眾長期使用地下水，卻缺乏有效管理。在氣候變遷下，水資源需求的壓力日益增加，地下水扮演較為穩定的水資源來源。地層下陷實已危害糧食、能源與水土資源。地質調查所與水利署對台灣地區已經進行水文地質調查與建置數個地下水觀測井網，提供深度約三百米以內的水文地質與地下水位變化資訊，水利署也建置多站與多種地陷觀測儀器，提供不同時間與空間解析度的地層下陷監測資料。這些資料提供台灣地區地層下陷研究珍貴的資料，但地層下陷解決的挑戰仍舊在前：地質鑽探井間距約為五公里，平面解析度低，水文地質地層延伸範圍確認不易。鑽井深度多未達基岩，深層水文地質不詳，未能完全掌握可能之顯著壓縮層總厚度與深度。水位觀測井深度不足，未能掌握深層水壓變化。落實地下水管理，掌握地下水用水量，精進地陷量測技術，加深與加密的地質探勘、水文地質、地球物理及地球化學探測，有助於地層下陷的掌握與管理。

參考文獻

1. Miozzi E. (1969), Venezia nei secoli: Ed. Libeccio, vols. I,II,III, Venezia.
2. Castelletto, N., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti, and P. Teatini, (2008), Can Venice be raised by pumping water underground? A pilot

- project to help decide, *Water Resources Research*, Vol. 44, W01408, doi: 10.1029/2007WR006177.
3. Comerlati A., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti and P. Teatini, (2003), Can CO₂ help save Venice from the sea?, *EOSTrans.AGU* 84 (2003) (46), 552-553.
4. Galloway, D.L., Jones, D.R., and Ingebritsen, S.E. (1999), Land subsidence in the United States, *U.S. Geological Survey Circular*, 1182, pp. 117.
5. Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., Wang, S.J. (2004), Review on current status and challenging issues of land subsidence in China, *Eng. Geol.*, 76 (1-2), 65-77.
6. Hung, W.C., Hwang, C.W., Chang, C.P., Yen, J.Y., Liu, C.H., and Yang, W.H. (2010), Monitoring severe subsidence in Taiwan by multi-sensors: Yinlin, the south Choushui River Alluvial Fan. *Earth Science Geology* 59, 1535-1548.
7. 周子硯、徐國錦、景國恩、葉昭龍、饒瑞鈞 (2021)，地層下陷引致之空間資源損失與監測設置之探討——以濁水溪沖積扇為例，第十三屆地下水資源及水質保護研討會暨台灣地下水資源暨水文地質學會年會，第 76 頁，國立臺灣大學，台北。
8. Tsai, M.-S. and Hsu, K.-C. (2018), Identifying poromechanism and spatially varying parameters of aquifer compaction in Choushui River alluvial fan, Taiwan, *Engineering Geology*, 245, 20-32.
9. Chang, W.-J., Hou, S.-H., and Huang, A.-B. (2017), Physical simulation of aquifer compression due to groundwater fluctuation, *Engineering Geology*, 231, 157-164.
10. Terzaghi, K. (1925), Principles of Soil Mechanics I—Phenomena of Cohesion of Clays, *Engineering News-Record*, 95(19), 742-746.
11. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1991), *Soil Mechanics*, Wiley, 1991.
12. 劉軒豪 (2013)，顆粒性土壤受反覆載重與永久變形之關係，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
13. Johnson, K.L. (1986). Plastic flow, residual stresses, and shakedown in rolling contact. In: Proc., 2nd International Conference on Contact Mechanics and Water of Rail/Wheel Systems. University of Rhode Island, Kingston, University of Waterloo Press, Ontario, Canada. 



電與電磁地球物理調查方法 協助地下水資源調查之應用

林鼎竣／國立中央大學地球科學學系 博士候選人

張竝瑜／國立中央大學地球科學學系 教授、地震災害鏈風險評估及管理研究中心 教授

嚴精明／國立中央大學地球科學學系 博士候選人

韓怡娜／國立中央大學地球科學學系 碩士

尤納坦／國立中央大學地球科學學系、中央研究院臺灣國際研究生學程 博士候選人

林格瑞／國立中央大學地球科學學系、中央研究院臺灣國際研究生學程 博士生

曾俊儒／國立中央大學地球科學學系 碩士生

謝孟勳／國立中央大學地球科學學系 碩士生

電與電磁地球物理方法在過去數十年的快速發展，其具非破壞性優點，目前被廣泛應用在地下水資源調查上。本文由電與電磁地球物理方法的原理概述出發，進而列舉電與電磁地球物理對於地下水相關的應用，最後比較地電阻法與電磁地球物理方法的優點及局限性。期能於未來進行地下水資源管理及調查上，能加入地球物理方法來降低水文地質的不確定性，建置較完整且高解析度的水文地質架構模型。

前言

存在於地層裂隙或沉積物孔隙中的地下水，由於帶有溶解的鹽類離子，相較於岩石及礦物顆粒，孔隙地下水具有較佳的導電度。因此，存在於連通孔隙中的地下水的質與量，與地下介質的整體導電度息息相關，所以可以藉由量測地下的導電度／電阻率等物理特性，協助調查評估地下水資源的質與量。對於地下介質的物理特性調查，一般可以藉由非破壞的地球物理探勘調查方法進行；而在這些方法之中，電與電磁地球物理方法，能夠直接得到地下介質的電性構造，因此時常運用於地下水資源相關的調查任務。常見的地下水資源調查之電與電磁地球物理方法，包括地電阻方法、頻率域電磁方法及時間域電磁方法。

地電阻方法係利用一對與地面接觸良好之電極

（電流極），通入電流，藉由另一對電極（電位極）量測地下介質因電阻率的差異產生之電位差改變，推算地下空間之電阻率分布。而電磁地球物理方法，則是利用發射線圈通入電流所產生的主磁場，感應地下導體產生渦電流及次生磁場，並利用地表接收線圈，接收次生磁場進行分析之非破壞性探勘技術。由於電磁地球物理（Electromagnetic geophysics）方法不需設置良好接觸地面之電極，因此在佈設上相較於地電阻儀器較有效率。此外，對於地下水資源探勘之電磁法分類，一般可依其解析資料之方式，分為時間域（Time-domain）及頻率域（Frequency-domain）電磁方法。本文回顧並整理目前運用於地下水資源調查上，各種電與電磁地球物理方法之原理及案例，期能促進地下水相關跨領域科技之應用。

地電阻探測方法

地電阻法為將直流電或低頻交流電由一對電極通入地下，形成一個人工電場，再由另一對電極，量測兩極間的感應電位差，如圖 1 所示。根據歐姆定理 (Ohm's law) (1)，可得到電流 (I)、電位差 (V) 及電阻 (R) 的關係，並根據電位差變化計算地層的視地電阻率 (Apparent Resistivity)，進而再運用反演算方法逆推地層真實地電阻率 (True Resistivity)，了解地下的電性構造分布。

$$V = IR \quad (1)$$

運用上述原理，可假設在均質的地面上任意布上四根電極 (A 、 M 、 N 、 B)，經由一對電流電極 (A 、 B) 導入直流電或低頻之交流電，於地下建立人工電場；並利用另一對電極 (M 、 N) 測量電場在 M 、 N 間之電位差 (如，據此即可計算該地層的視電阻率 (Apparent Resistivity)，可推導出：地電阻法的基本施測原理為假設在一均質的地層上佈設四根電極，一對電流電極 (A 、 B) 及一對電位電極 (M 、 N)，藉由歐姆定理可以進一步計算出此均質地層的視電阻率 (Apparent resistivity)。

$$\begin{aligned} \Delta V &= \left(V_{AM} - V_{AN} \right) - \left(V_{BM} - V_{BN} \right) \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \\ \rho &= \frac{\Delta V 2\pi}{I} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

定義 $K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1}$

式 (2) 可進一步簡化成：

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (3)$$

上式中， ρ 為視電阻率， I 為導入之電流大小， ΔV 為電位差， V_{AM} 、 V_{AN} 、 V_{BM} 、 V_{BN} 分別為個別電流電極對電位極之電位差， \overline{AM} 、 \overline{BM} 、 \overline{AN} 、 \overline{BN} 為電極間的距離，式 (2) 中 K 則稱之為幾何因子 (Geometric Factor)。

然而，由於地層並非均勻材質，因此視電阻率並不能代表地下地層之真實電阻率 (True Resistivity)，而是表示在對應之電極排列下，所有小於此深度的電性地層的綜合效應，在電極間距很小的狀況下，視電阻

率會接近表層的實際電阻率平均值，但隨電極間距逐漸增大，則會反映較深層電阻率與表層電阻率的加權平均值，而非實際地層的電阻率，地層之真實電阻率及深度需經過逆推處理求得。

地電阻測量可依探勘需求，藉由改變電極排列方式及間距，得到不同測深範圍、不同解析度的結果。一般來說，測深範圍與電極排列展距有關，展距越大，測深越深；地電阻的成像解析度與電極間距有關，間距越小，解析度較高，而電極不同排列方式形成陣列。常見的地電阻測勘的電極排列法甚多，各有其探測上的優點與限制，野外施測所選定使用的方法，則依探測目標及施測地點的地形而異。一般基本之常用電極排列有：施蘭卜吉排列 (Schlumberger Array)、溫奈排列 (Wenner Array) (圖 1)、雙偶極排列 (Dipole-dipole Array) (圖 2) 及雙極排列 (Pole-pole Array) 等。

一般常見的大區域地電阻測量方式，可以分為一維地電阻方法以及二維地電阻方法。一維地電阻法是運用上述的電極排列原則，固定電極中點位置，例如以施蘭卜吉與溫奈排列法為例，固定電位極 M 、 N 之中點位置，逐次增加電流極的間距，如此可在一個地點反應不同深度之電性分布。其優點是能快速了解地下一維地層分層大致概況，而缺點則是易受到側向不均質影響，產生錯誤的解釋。主動式電極串進行野外施測，儀器易於操作且可自動快速收取高密度的資料，圖 3 為儀器佈設示意圖。除了基本的四個電極量測 (A 、 B 、 M 、 N)，也可由電腦連接進行遠端操作，設定陣列的電極串編號及量測順序，自動收取陣列資

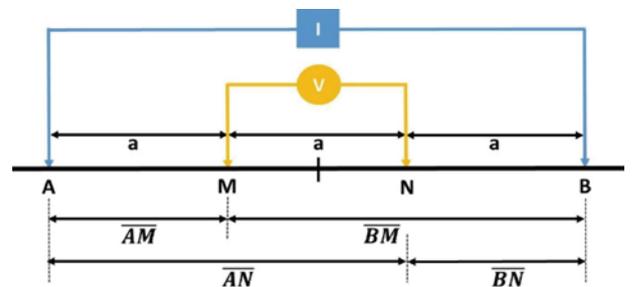


圖 1 溫奈排列 (Wenner Array) 示意圖

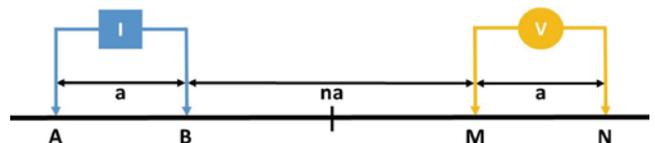


圖 2 雙偶極排列 (Dipole-dipole Array) 示意圖

料，並即時呈現初步資料點的擬似剖面，圖 3 為現地施測時的儀器配置。而二維地電阻方法則是運用前述之電極排列法，於地表沿一直線測線，改變電極間距與電極位置，如此可以測得測線之不同深度、不同位置之視電阻率分布，此種方法又稱為（二維）地電阻影像剖面法（Resistivity Image Profiling, RIP）。由於地電阻影像剖面法需逐次移動電流與電位之電極，因此對於中小範圍的環境監測與地下測勘，會搭配電極串進行施測，可以於測線上固定間距佈設電極，運用地電阻儀器設定陣列及電極量測順序，依預先選定之順序，逐次選用不同位置之電極分別作為電流與電位極（圖 3），如此可大幅減少施測時間，另外由於可以運用反饋疊加訊號，因此可減少訊號中之雜訊並提高解析度與增加施測深度，大幅提高影像解析度。

時間域電磁探測方法（TEM）

TEM 探測原理，類似透地雷達，但探測深度較透地雷達為深；一般透地雷達測深為十多公尺內，但 TEM 測深可達數十至數百公尺。TEM 探測的主要原理是以方波電流通入在地表面不接地的封閉線圈內（圖 4），如果將線圈內的電流突然切斷（圖 5），會使原先在封閉線圈周遭已經建立的磁場突然產生變化，依循法拉第感應定律，此變化將造成地下導體被感應產生次生磁場，該次生磁場，可被地表之接收線圈所測量。TEM 即是量測該次生磁場，由接收線圈記錄次生磁場之感應電動勢隨時間之變化值，藉以獲取地下岩層導電的相關物理特性，若目標物越好導電，電動勢會有越強的反應，越晚期訊號能反應越深部訊息，是一種效率極高的電磁探測方式。圖 6 展示良導體與不良導體暫態電壓衰減曲線圖，由輸出的暫態電壓值高低與其衰減的現象可據以研判地

下岩層的電阻率及其位置^[1]，在地質工程及環境污染偵測等方面應用相當廣泛。

時間域電磁方法使用的儀器設備，主要有：主機暫態電磁儀及三向量接收器等。圖 7 為暫態電磁儀，主要功能係輸出電流導入發射線圈以產生一次磁場，最大輸出電流為 30 A，並於接收線圈量測由二次磁場感應產生的暫態電壓，如圖 8 所示。時間域暫態電

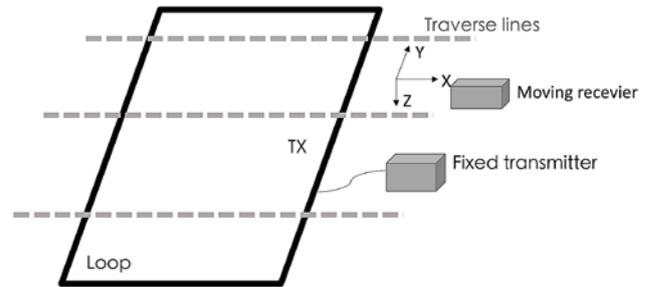


圖 4 常用的時間域電磁探測方法地面施配置圖

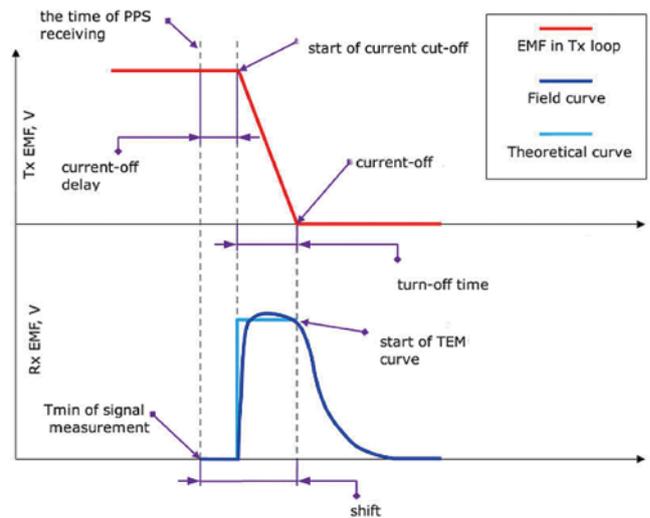


圖 5 TEM 系統在發射線圈內的階梯函數電流波形（上圖）與接收線圈內所產生的感應電動勢波形（下圖）^[2]

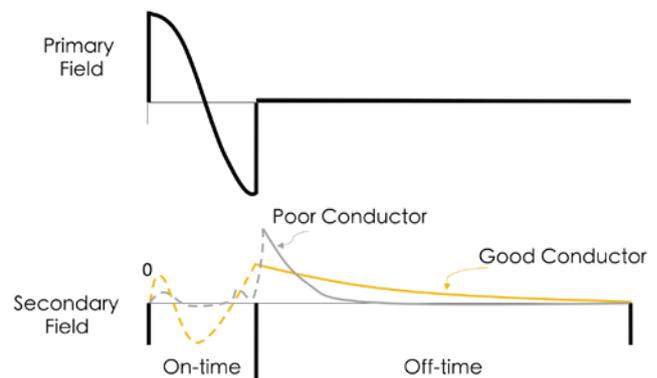


圖 6 良導體與不良導體暫態電壓衰減曲線圖。由暫態電壓值高低與衰減曲線斜率不同的現象可據以判斷目標的屬性是否為良導體^[1]

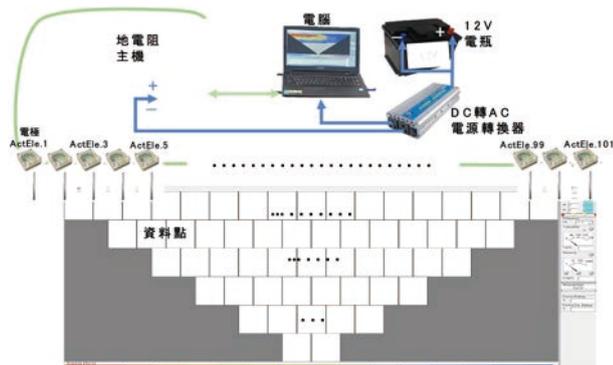


圖 3 地電阻探測儀器示意圖（儀器為 Lipmann 系統）

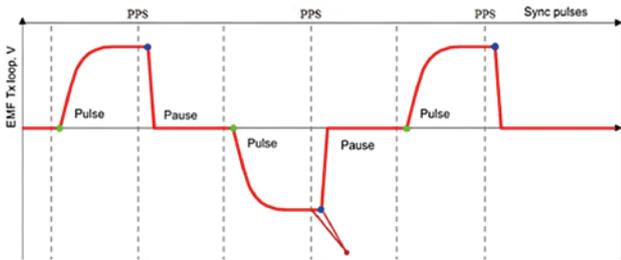


圖 7 TEM 主機與電池組，右圖為其發射的電壓曲線圖。
(本儀器為 FastSnap 發射主機)

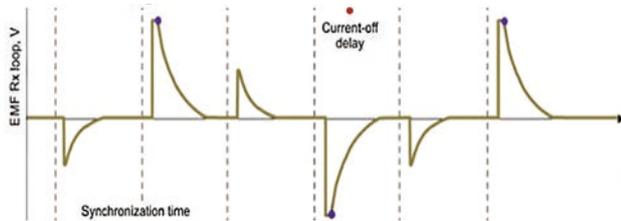


圖 8 接收器 (本儀器為 FastSnap 接收器)，主要功能係接受來自垂直於地面方向 (即 Z 軸) 與平行於地面 (即 XY 軸) 的二次磁場感應產生暫態電壓。右圖為其接收所產生的電壓曲線。

磁儀，主要目的在探查地下導體的位置，如地下水、礦脈探查及地層描繪、地下污染追蹤、工程基址調查等應用。運作模式為對發射線圈，通入方波函數的電流，以產生數千赫茲 (kHz) 的電磁脈衝，再接收並記錄從接收線圈內的暫態電壓，所謂暫態電壓是指從周遭導體所散射回來的次生磁場訊號。接收器主要功能係接受來自垂直於地面方向 (即 Z 軸) 與平行於地面 (即 X 或 Y 軸) 的次生磁場感應產生暫態電壓。內建多匝線圈與前置放大器，可針對每個分量的輸入進行獨立操作濾波與訊號增益。

時間域電磁法探測中，發射線圈與接收線圈的配置對於探測結果影響相當顯著，圖 9 為常用的二種線圈配置模式，一為共圈模式 (coincident loop)，發射線圈與接收線圈的形態與面積相似，可以測得大面積範圍內的平均效應，常用以探測深部目標，較適用於解析大範圍地層構造，另一為圈內模式 (in loop)，以接收線圈在發射線圈內移動接收訊號，接收線圈範圍越小，接收點越密集，越可以解析細部地層構造。每一量測點主要記錄地層的暫態電壓或阻抗，再以一維逆推其導電率，繪製調查範圍內地層視導電率分布圖，進而分析地層地質狀況。

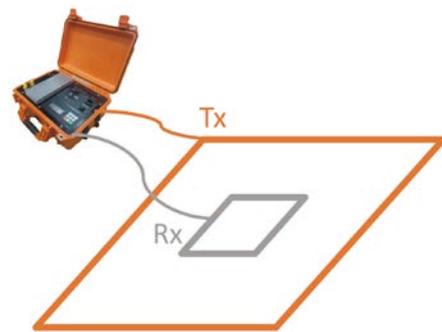
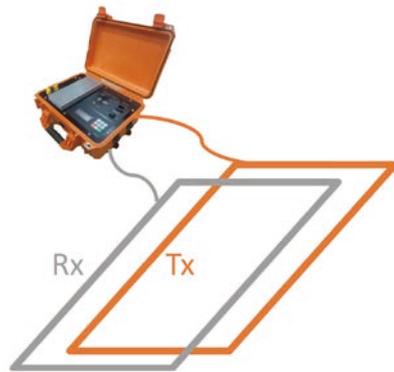


圖 9 暫態電磁法探測的線圈配置圖，左圖為共圈模式 (coincident)，常用以探測大面積的深部目標，右圖為圈內模式 (in loop)，以接收線圈在發射線圈內移動並接收訊號，可以解析細部構造。

電阻率與岩石／土壤水文特性之關係

此外，由於土壤和岩石主要由矽酸鹽礦物組成，它們本質上是絕緣體，代表它們具有低導電性。考量導電率／電阻率與土壤成分的性質 (粒徑分布、礦物學)、結構 (孔隙率、孔徑分布、連通性)、流體含量和流體相、溶解電解質的濃度、黏土含量和溫度有關。這些因素的關係可以由不同的經驗方程式描述：

Archie 定律^[3] 適用於不含黏土的沉積岩

$$\delta_a = \sigma_w \phi^m \quad (4)$$

式中 δ_a 為物體導電率， σ_w 為孔隙水導電率， ϕ 為介質孔隙度， m 為膠結因子。地層因子 (F) 的另一個表達式是：

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} = a \phi^{-m} \quad (5)$$

其中 ρ_r 是岩石/土壤整體電阻率， ρ_e 是岩石電阻率， a 是飽和係數。

孔隙空間和孔隙幾何形狀是影響土壤和岩石電學性質的最重要因素。孔隙主要存在於節理、裂縫、空洞（石灰岩和白雲岩中的溶穴）和沈積岩中的粒間空隙中。與火成岩和變質岩相比，沉積岩通常孔隙更多，含水量更高，電阻率值更低。鬆散沉積物的電阻率值通常低於沉積岩。充滿空氣的孔隙空間可以顯著增加地下材料的電阻率。

飽和與非飽和土壤/沉積物的阿奇定律

根據 Archie's Law，我們可以得到地層電阻率與孔隙率、飽和度及孔隙水電阻率之關係：

$$\rho = a \rho_w \theta^{-m} S_w^{-n} \quad (6)$$

曲折係數 a 、飽和指數 n 和膠結係數 m 是常數，用於描述不同形狀的裂縫和某種滲透率的影響。滲透率描述了孔隙在岩石/土壤介質中是如何相互連接的。它包括沉積岩沉積中相互連接的孔隙空間的初級滲透率，以及裂縫和斷層產生的次級滲透率。圖 10 為本研究團隊於 2019 年至屏東地區地下水研究^[4]，電阻率與飽和度的關係，展示了符合阿奇定律的實驗數據，該定律適用於具有非導電固體顆粒的多孔介質。當這些孔隙充滿流體（地下水）時，電阻率會顯著減少，反之增加。

又體積含水量 (θ) 可表示為孔隙率與飽和度的乘積：

$$\theta = \phi S_w \quad (7)$$

一般而言，均質岩石與土壤的飽和指數 (m) 介於 1.8 至 2.2 間，膠結指數 (n) 值約為 2 左右。假設區域內飽和指數及膠結指數 $m = n \cong 2$ ，則可將式 5 簡化成：

$$\rho_i = a \rho_w \theta^{-2} \quad (8)$$

進一步我們若假設未飽和之含水量為 θ_u ，未飽和層地層電阻率為 ρ_u ；飽和層之體積含水量為 θ_s ，而飽和層

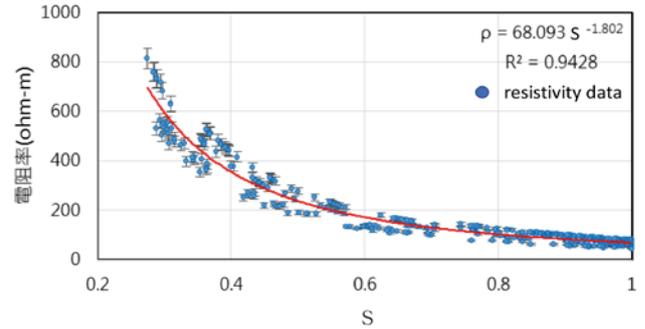


圖 10 平均孔隙率下電阻率與飽和度之間的關係

地層電阻率為 ρ_s ，則飽和與未飽和的地層中的體積含水量與電阻率的關係可表示為：

$$\frac{\rho_u}{\rho_s} = \frac{a \rho_w \theta_u^{-2}}{a \rho_w \theta_s^{-2}} \quad (9)$$

由上式利用比值關係消去參數 a 、 ρ_w ，可得電阻率與體積含水量的關係式為：

$$\frac{\theta_u}{\theta_s} = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_u}} = S_r \quad (10)$$

S_r 為相對飽和度 (Relative saturation)，表示相對於飽和層的含水量，在未飽和層含水量的比值。飽和情況下，相對飽和度為 1，因此相對飽和度也會隨著未飽和層的含水量下降而變小，同樣由上式可知，電阻率越小，體積含水量則越大。

Archie 公式的 Simandoux 方程式^[5] 適用於含有黏土的岩石/土壤

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{V_{cl}}{\rho_{cl}} S_w + \frac{\Phi^n}{a \rho_w} = S_w^2 \quad (11)$$

其中 ρ_{cl} 是黏土的電阻率， V_{cl} 是黏土的體積分數。在黏土中，導電率與粒徑分布有關，其中電荷密度基本位於黏土顆粒表面。因此，黏土含量高的岩石具有電阻率低的特點。

作為溫度函數的電阻率的近似公式是 (Keller and Frischknecht^[6])：

$$\rho_{(T)} = \frac{\rho_{18^\circ C}}{1 + a(T - 18)} \quad (12)$$

其中 ρ 是電阻率， T 是溫度， a 約為 0.025，其中 $\rho_{18^\circ C}$ 是室溫 (18°C) 下的電阻率。對於半導體材料 (大多數岩石，例如矽酸鹽、氧化物、碳酸鹽)，溫度升高會降低電阻率，而對於導體 (例如金屬)，溫度升高會增加電阻率。

圖 11 顯示了在保持含水量飽和的情況下，土壤電阻率隨溫度升高呈顯著下降趨勢。在升溫初期，電阻率顯著下降。當溫度較高時，電阻率的下降範圍逐漸減小並趨於穩定^[7]。流體導電率還取決於溫度，因為溶液中離子的遷移率隨溫度增加；因此，溫度的升高會降低流體的電阻率。

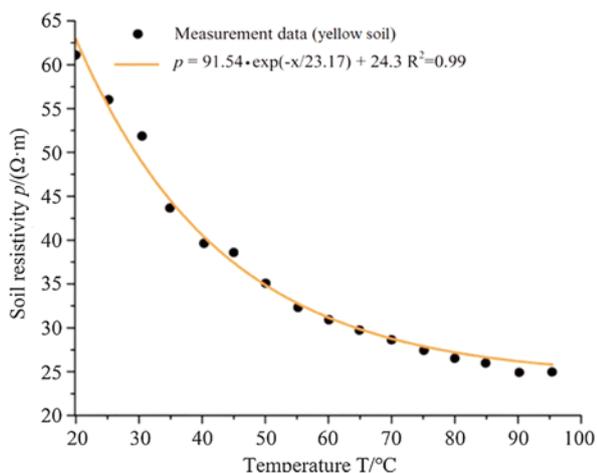


圖 11 土壤電阻率隨溫度變化的總體趨勢^[7]

介質的非均向性

層狀岩石可能具有較高的電非均向性；因此，歐姆定律的簡單形式可能不足以描述地下材料的電氣特性。因為電流不一定平行於外加電場，歐姆定律的簡單形式 $J = \sigma E = -\sigma \Delta V$ 可以改寫為：

$$J_i = -\sigma_{ik} \frac{\partial V}{\partial x_k} \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (13)$$

其中 J 是向量電流密度， J_i 是電流密度的第 i 個分量， E 是電場向量， V 是電壓， i_k 是導電率張量的第 i, k 分量。在具有單個電流和電位電極的均質接地中，根據電阻率和與電流源的距離， V 的表達式為 $V = -I\rho / 2\pi r$ 。在各向異性地面中，有兩種電阻率：水平電阻率和垂直電阻率。電壓在水平和垂直方向的電阻率和距離方面的表達式為：

$$V = \frac{-I \cdot \sqrt{\rho_h \rho_v}}{2\pi r} = \frac{-I\rho_h \lambda}{2\pi r} \quad (14)$$

其中 $\lambda = \sqrt{\rho_v / \rho_h}$ 稱為各向異性係數（橫向電阻率與縱向電阻率的比值）。對於層狀岩石， λ 較高，尤其是頁岩和黏土。頁岩各向異性係數可高達 4.0。

此外，岩石或土壤的介電特性取決於孔隙度、飽和度和礦物成分。阿奇定律不能考慮礦物成分。有兩個主要方程描述了土壤和介電常數的關係：

$$\text{介電常數：} k_a = 3.03 + 3Q_v + 14Q_v^2 - 76.6Q_v^3$$

$$\text{第二個方程是 } \sqrt{k} = (1 - \Phi)\sqrt{k_s} + \Phi\sqrt{k_w} + (\Phi - S)\sqrt{k_a}$$

其中 Q_v 是體積含水量， k_s 、 k_w 與 k_a 分別是土壤、水與空氣的介導電率。 S 是含水量， Φ 是孔隙率。

電與電磁地球物理在水文地質上之應用案例

地電阻法的概念最早由 Wenner^[8] 及 Schlumberger^[9] 所提出，而後被廣泛應用在工程、考古、地質調查、環境汙染等。地電阻影像法在水文地質相關的應用研究，最近十年已有相當多的例子。例如 Meads *et al.*^[10] 曾經利用地電阻影像法描繪河道與附近掩埋場的情況，Michot *et al.*^[11] 則應用地電阻法監測土壤中的含水量，Bentley and Gharibi^[12] 利用二維及三維地電阻影像探討整治場址，Berthold *et al.*^[13] 整合水文地質與地球物理，運用二維及三維地電阻法及水文地質資料研究於加拿大北部地區溼地及融雪對於含水層的地下水補注情形。Saad *et al.*^[14] 則利用地電阻影像法在沖積扇的水文地質背景下了解含水層構造 Farzamian *et al.*^[15] 利用二維地電阻剖面法在葡萄牙里斯本地區砂岩層進行注水試驗來監測時序變化，結合 Archies'law 及 Van Genuchten^[16] 提出的飽水曲線模型來推估區域內未飽和砂岩層的水文參數。其研究結果顯示地區內的水力傳導係數範圍為 0.5 ~ 0.7 (cm/min)。Park *et al.*^[17] 運用二維地電阻剖面法在同一區域重複施測，界定電阻率變化率異常區域，繪出垃圾掩埋場滲漏液汙染範圍。

地電阻方法在台灣同樣被廣泛運用於許多地下水相關研究上，游峻一^[18] 應用直流電阻法與人控音頻大地電磁波法，研究台灣西南海岸平原環境變化。劉威行^[19] 在嘉義汙頭地區進行地電阻法應用於淺層地下水深度及含水層厚度。馮正一等人^[20] 應用地電阻剖面法比對鑽探結果，探討電阻率高低變化與土壤含水量變化的相關性。陳泓幃^[21] 與吳尹聿^[22] 則於濁水溪沖積扇地區，利用高解析的二維地電阻探測方法，協助調查扇頂礫石層與扇央泥質地層邊界之分布情形，以協助定義扇頂礫石補注區邊界之分

布。吳佳珊^[23] 同樣應用二維地電阻剖面法探測屏東平原地下水的補注邊界，並界定電阻率 75 Ωm 為補注邊界，大於邊界值則為礫石層補注區邊界內。張竝瑜等人^[24] 利用地電阻方法，於濁水溪沖積扇上游地區重建地下水水位面分布，並利用二維地電阻的結果，量化推估比出水率等相關水文地質參數。林鼎竣^[25] 及張竝瑜等人^[26] 應用二維地電阻法結合 Van Genuchten 保水曲線模型及地下水觀測井，推估屏東平原扇頂地區及濁水溪沖積扇之非拘限含水層在乾濕季節的地下水位變化及比出水率。由於地電阻方法在地下電性地層的解析上，有著良好的效果，過去經驗亦驗證為一有效率且準確的探測地下水文地質工具。雖然佈線效率不及電磁地球物理方法，但可作為電磁地球物理探勘法準確度之驗證比較工具。

在電磁地球物理方法應用中，時間域電磁方法由於對於小於數百公尺之目標地層，具有一定之測深能力，因此經常被用來進行大面積地下水相關之輔助探測之用。Kanta *et al.*^[27] 整合了 TEM 和鑽井資料協助地下水資源管理，通過量測到的數據，計算地下水深度和含水層的厚度，並校正現有地層和斷層位態，更藉由電磁地球物理方法評估出最適合鑽井區域，以降低地下水調查及管理上的不確定性造成的成本。Lin *et al.*^[28] 結合 TEM 和磁共振探測 (MRS) 來定位潛在的地下水存儲並定位有利的鑽孔位置。Almeida *et al.*^[29] 則於巴西聖保羅州的 Paraná 盆地，利用 86 個 TEM 測站進行一維與二維反演算，並嘗試建立本區之三維水文地質模型。時間域電磁法除有對於地下水資源管理及調查外，對於污染及鹽水入侵等亦有許多應用，Metwaly *et al.*^[30] 運用 TEM 和地電阻法研究淺層含水層中的地下水污染，其中 TEM 提供了垂直向上的地下水電阻率變化，而地電阻提供側向分佈變化，並成功界定污染範圍，El-Kaliouby *et al.*^[31]、Trabelsi *et al.*^[32] 及 Gonçalves *et al.*^[33] 等成功地應用 TEM 來繪製淡水-鹽水界面。Kalisperi *et al.*^[34] 更利用 72 個站點中的 1179 個時 TEM 的調查網格，對希臘克里特島中北部 Geropotamos 含水層進行調查，得出了 1D 和 2D/3D 可視化模型電阻率結構，並指出了含水層中地下水的鹽鹼化區域。Chen^[35] 於台灣西南海岸，設置 330 個時間域電磁 (TEM) 測站，並進行一維平滑模型反演算，以建立淺層電阻率結構，其結果同時發現在其調查區北部海拔 20 至

120 m 處的砂與礫石含水層，電阻率分布約在 15 至 160 Ohm-m ，而研究區域南部的電阻率極低，小於 1 Ohm-m ，可能顯示存在海水入侵現象。因此，我們認為應可藉由快速大量之佈設 TEM 測點，並嘗試建立三維電阻率模型，可以提供建立區域淺層水文地質模型之相關參考依據。

電與電磁地球物理優點與局限性

一般來說，地電阻法與電磁地球物理方法對於水文地質應用有許多優點，兩者皆屬於非破壞性的地下探勘方法，能快速且用較低成本方式應用於探勘上，此外對於孔隙水、鹽水、重金屬及有機溶劑的污染物的敏感較高，能反映出明顯與背景地質不同的電性特徵，因此被廣泛用於地下水調查、環境污染及海水入侵等應用。本文比較了電與電磁地球物理方法在應用上的不同優點與其侷限性。

地電阻法優點與侷限性

地電阻法的技術在這幾十年來快速發展，由於儀器能以陣列串方式進行測量，且可現地不同情形的適用性來選擇相對應的電極陣列排列，能更快速且有效率收集高解析度的資料，並可以進行時序監測的應用，如 Chang 等人^[36] 運用地電阻剖面法於台灣屏東彭厝及大洲地區進行抽水試驗的時序監測，在連續抽水階段每十分鐘重複收集地電阻資料，並對不同時間所收集的電阻率分析，推估出水文地質參數。此外，對於地下電性分佈的變化，相較於電磁地球物理方法，地電阻對於側向電阻率變化有較佳的成像，因此有利於地下水流場的模型建置或藉由三維模型來調查地下水分布，適用於近地表的水文調查。

然而地電阻法的測量深度取決於測線的展距與陣列排列方式，一般而言，展距通常是探測深度的三到五倍，換言之，探勘目標的深度越深，需要越長的測線展距，但在現地調查時，往往會受限於施測環境。另外解析度則取決於電極間距的密集程度，若要取得更高解析度的成像，在相同測線展距下則需要佈設更多電極。相較於地電阻法，TEM 的探測深度較深，舉例來說，若用地電阻法調查約 100 公尺的深度需要超過 300 公尺以上的測線展距，然而 TEM 可以用約 50 公尺

的發射線圈得到超過數百米的測深，且在現地量測過程，TEM 的測量時間較地電阻快。

電磁地球物理方法的優點與侷限性

電磁地球物理方法因不需要佈設一直線的電極陣列，且不需要接地的電流極，所以相較於地電阻法較不會受限於地形限制且能快速進行量測。時間域電磁法具有比地電阻法更好的成像深度，特別是對於侷限含水層的探勘時能有較好的解析深度。此外，時間域電磁法的原理為量測感應的次生磁場訊號，越晚期訊號反應越深部訊息，與淺層反應的訊號無關，所以較不會受近地表的地質構造非均向性影響而失真，適用於深部水文地質調查，如地熱探勘及受侷限含水層等。

然而電磁地球物理方法對於人為噪訊如地下電纜、高壓電塔等干擾較敏感，會收到這些雜訊而影響資料品質，此外因為受限於發射線圈的截切時間（cutoff time）不夠短，無法取得較短時間的訊號而難以量測淺層目標，此外，對於側向的電阻率變化較低，因此通常 TEM 的解釋會以一維結果來解釋。

雖然地電阻與電磁地球物理方法因為原理不同而各有其侷限性，但同樣也可藉由兩種方法的優點來彌補成像深度、解析度上的不足，對於地下水資源調查仍有相當的實用性。

結論與展望

電與電磁地球物理方法的發展在過去數十年快速進步。地電阻法從最初的四極法，需要逐一移動電極進行量測，到現今儀器技術的精進，使用電極陣列串收集，有更良好解析度且易於操作，對於淺層地下水及地下水補注區域有許多成果。電磁地球物理方法，被應用於大範圍區域及深部地層的探勘，能快速量測到地下電性構造。

台灣在過去地下水調查最直接的方法為鑽井，目前台灣已有超過 800 口觀測井，且持續增加中，然而由於觀測井分布不均，增加觀測井間水文地質地的不確定性，另外除了部分地區有進行抽水試驗外，大多缺乏相關水文參數，因此我們可以應用地電阻與電磁地球物理方法的特性應用在地下水文地質調查，有助於地下水資源管理及調查，未來可以藉由結合現有觀測井資料及電與電磁地球物理方法的研究，比較鑽井結果進行聯合反

演算（Joint Inversion），降低不確定性，建置出更完整且高解析度的三維水文地質結構模型。

參考資料

- Allard, M. and Milkereit, B. (2007), On the origin of the HTEM species. Paper presented at the Proceedings of exploration.
- M.V. Sharlov, N.O. Kozhevnikov, and R.V. Sharlov (2017), Lake Baikal – A Unique Site for Testing and Calibration of Near-surface TEM Systems. Near Surface Geoscience 3-7 September 2017, Malmö, Sweden. 5 pp. doi: 10.3997/2214-4609.201702038
- Archie, G.E. (1942), The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146(01), 54-62.
- Lin, D.-J.(2020), The Estimation of the Groundwater Table and Specific Yield of Unconfined Aquifer with 2D Electrical Resistivity Imaging in the Pengcuo area of Pingtung Plain, Taiwan, National Central University.
- Simandoux, P. (1963), Dielectric measurements on porous media, application to the measurements of water saturation: study of behavior of argillaceous formations. Revue de L'institut Francais du Petrole, 18(Supplementary Issue), 193-215.
- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966), Electrical methods in geophysical prospecting.
- Wen, X., Jing, M., Cai, H., Zhang, Y., Hu, S., Teng, Y., and Lu, H. (2020). Temperature characteristics and influence of water-saturated soil resistivity on the HVDC grounding electrode temperature rise. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 118, 105720.
- Wenner, F. (1912), The four-terminal conductor and the Thomson bridge: US Government Printing Office.
- Schlumberger, C. (1920). Etude sur la prospection électrique du sous-sol: Gauthier-Villars.
- Meads, L.N., Bentley, L.R., and Mendoza, C.A. (2003), Application of electrical resistivity imaging to the development of a geologic model for a proposed Edmonton landfill site. Canadian Geotechnical Journal, 40(3), 551-558.
- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoulaud, B., King, D., and Tabbagh, A. (2003), Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. Water Resources Research, 39(5).
- Bentley, L.R. and Gharibi, M. (2004), "Two-and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site", Geophysics, V. 69, No. 3, pP. 674-680.
- Berthold, S., Bentley, L.R., and Hayashi, M. (2004), Integrated hydrogeological and geophysical study of depression-focused groundwater recharge in the Canadian prairies. Water Resources Research, 40(6).
- Saad, R., Nawawi, M., and Mohamad, E. (2012), Groundwater detection in alluvium using 2-D electrical resistivity tomography (ERT): Electronic Journal of Geotechnical Engineering, V. 17, PP. 369-376.
- Farzaman, M., Monteiro Santos, F.A., and Khalil, M.A. (2015), Estimation of unsaturated hydraulic parameters in sandstone using electrical resistivity tomography under a water injection test. Journal of Applied Geophysics, 121, 71-83. doi:10.1016/j.jappgeo.2015.07.014
- Van Genuchten, M.T. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. Soil science society of America journal, 44(5), 892-898.
- Park, S., Yi, M.J., Kim, J.H., and Shin, S.W. (2016), Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. Journal of Applied Geophysics, 135, 1-7. doi:10.1016/j.jappgeo.2016.07.004

18. 游峻一 (2003), 應用直流電阻法與人控音頻大地電磁波法研究台灣西南海岸平原環境變遷, 博士論文, 國立中央大學。
19. 劉威行 (2007), 地電阻法應用於淺層地下水偵測: 嘉義頂頭地區, (碩士地球科學類), 國立中正大學。
20. 馮正一、鄒佩蓉、陳奕凱、鄭旭涵 (2011), 應用地電阻剖面法於土壤地層水份變化與 SPT-N 值比對。
21. 陳泓樟 (2000), 利用二維地電阻探測方法調查彰化地區濁水溪沖積扇頂地下水補注區邊界之研究, 國立臺灣海洋大學應用地球科學研究所碩士論文, 共 68 頁。
22. 吳尹聿 (2011), 雲林地區濁水溪沖積扇地下水補注地質敏感區地電阻勘查, (地球科學類), 國立臺灣海洋大學。
23. 吳佳珊 (2013), 利用地表地電阻法協助劃定屏東平原地下水補注區邊界之研究, 國立海洋大學碩士。
24. 張竝瑜、陳宇文、蔡瑞彬、張良正、江崇榮、林海倫、陳祐誠 (2013), 應用一維地電阻於水力傳導係數推估 - 以濁水溪沖積扇第一含水層為例, 中國土木水利工程學刊, 第 25 卷, 第 4 期, 311-321 頁。
25. 林鼎竣 (2020), 運用二維地電阻影像法推估屏東平原扇頂地區非拘限含水層在乾濕季之地下水位變化及比出水率. 國立中央大學。
26. 張竝瑜、姚馨如、吳昱昌、宋家宇、林鼎竣、嚴精明、張良正、陸挽中、賴慈華 (2020), 用二維地電阻時序觀測方法推估非拘限含水層地下水位面變動及區域比出水率 - 以濁水溪中游名竹盆地為例, 土工技術, 第 165 期, 第 31-42 頁。
27. Kanta, A., Soupios, P., Barsukov, P., Kouli, M., and Vallianatos, F. (2013), Aquifer characterization using shallow geophysics in the Keritis Basin of Western Crete, Greece. *Environmental earth sciences*, 70(5), 2153-2165.
28. Lin, J., Lin, T., Ji, Y., Chen, Z., Zhao, Y., and Li, H. (2013), Non-invasive characterization of water-bearing strata using a combination of geophysical techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 91, 49-65.
29. Almeida, E.R., Porsani, J.L., dos Santos, F.A.M., and Bortolozzo, C.A. (2017). 2D TEM modeling for a hydrogeological study in the Paraná Sedimentary Basin, Brazil. *International Journal of Geosciences*, 8(5), 693-710.
30. Metwaly, M., Elawadi, E., Moustafa, S.S., Al Arifi, N., El Alfy, M., and Al Zaharani, E. (2014), Groundwater contamination assessment in Al-Quwy'yia area of central Saudi Arabia using transient electromagnetic and 2D electrical resistivity tomography. *Environmental earth sciences*, 71(2), 827-835.
31. El-Kaliouby, H. and Abdalla, O. (2015), Application of time-domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman. *Journal of Applied Geophysics*, 115, 59-64.
32. Trabelsi, F., Mammou, A. B., Tarhouni, J., Piga, C., and Ranieri, G. (2013), Delineation of saltwater intrusion zones using the time domain electromagnetic method: the Nabeul-Hammamet coastal aquifer case study (NE Tunisia). *Hydrological Processes*, 27(14), 2004-2020.
33. Gonçalves, R., Farzamian, M., Santos, F.A.M., Represas, P., Gomes, A. M., de Pina, A. L., and Almeida, E. P. (2017), Application of time-domain electromagnetic method in investigating saltwater intrusion of Santiago Island (Cape Verde). *pure and applied geophysics*, 174(11), 4171-4182.
34. Kalisperi, D., Kouli, M., Vallianatos, F., Soupios, P., Kershaw, S., and Lydakakis-Simantiris, N. (2018), A transient electromagnetic (TEM) method survey in north-central coast of Crete, Greece: Evidence of seawater intrusion. *Geosciences*, 8(4), 107.
35. Chen, C.S. (1999). TEM investigations of aquifers in the southwest coast of Taiwan. *Groundwater*, 37(6), 890-896.
36. Chang, P.-Y., Chang, L.-C., Hsu, S.-Y., Tsai, J.-P., and Chen, W.-F. (2017), Estimating the hydrogeological parameters of an unconfined aquifer with the time-lapse resistivity-imaging method during pumping tests: Case studies at the Pengtsuo and Dajou sites, Taiwan. *Journal of Applied Geophysics*, 144, 134-143. 



土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300 dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。



環境變遷與地下水之永續發展

葉信富／國立成功大學資源工程學系 副教授

黃嘉琦／國立成功大學資源工程學系 博士班研究生

地下水使用隨著社會經濟發展的共同演化，已成為我們生活至關重要的一環。然而，隨著環境不斷變遷，影響地下水的潛在因素與機制也變得更为複雜，無論在科學發展、政府機關或是社會大眾，對於地下水相關的環境議題也應該更加重視。本文透過彙整地下水與人類生活發展間的關係，嘗試傳達地下水對於我們的重要性與對地下水資源問題的重視，並藉由瞭解環境變遷如何影響地下水以及對地下水評估的需求。本文亦認為未來應以更廣泛的角度來考量應用地下水資源的利害關係，來建構更為健全的地下水資源永續架構，以長期永續規劃取代短期政策治理。

前言

在淡水資源中，地下水相較於地表水，為較穩定的水資源來源，也是地球最大的液態淡水水庫以及河川流量的主要來源之一，在陸地水文循環、生態系統甚至是人類的用水需求中扮演重要的角色^[1]。臺灣水資源來源以地表水為主，佔有 80%（包含河川取水與水庫蓄水），地下水則僅佔約 20%，且主要為農業所使用。雖然臺灣相較於全球之地下水使用量的比例較少，但氣候變遷對於地表水文過程的直接影響，以及人類活動造成水資源的匱乏與污染等，導致臺灣可用的地表水資源逐漸減少。近年環境變遷對於水資源的影響，或許將為往後水資源調配增添不少的未知數，因此進一步瞭解地下水資源狀況將有利於因應環境變遷進行調適與決策。本文主要探討地下水對於生活之重要性與發展及其如何受到環境變遷所影響，並期望以更廣泛的角度提供地下水資源永續的概念與思維。

地下水與生活之重要性

在淡水資源中，有高達 70% 儲存於極地的冰冠中，另外近 30% 是位於不易開發地底下之地下水，更僅有少於 1% 是可直接供給人類使用之地表水^[2]。儘管目前仍以地表水為主要使用來源，但若能夠適當且有效利用地下水資源，或許能夠解決現今許多地區所面臨的水資源缺

乏問題。當然，地下水利用早已遍布全球，不僅佔未凍結淡水資源的 99% 外，也是全球總用水量的三分之一，且半數運用於民生及灌溉用水^[3]，由此可見地下水資源對於人類活動的重要性。在環境變遷下，瑞典斯德哥爾摩大學研究團隊（Rockström *et al.*^[4]）將全球環境議題統整為九大地球限度（planetary boundaries），如表 1。地球限度被定義為引發不可逆、衝擊環境變化的臨界值，若超過這些臨界值時，將造成地球系統不穩定，形成對當前和未來社會的風險；換句話說，地球的忍耐是有限度的。2009 年該團隊提出之九大限度起初包含氣候變遷、生物多樣性損失、臭氧消耗、海洋酸化、氮／磷循環、森林砍伐與土地利用變遷、淡水利用、懸浮微粒汙染與化學汙染，其中已有三項超過限度。然而，2015 年又將土地系統變遷列為超出限度的項目，表示近乎一半的環境危機已經發生^[5]。剖析地球環境狀況有一定的難度，這些限度也僅能提供概略性的評估，因此更需要重視潛在的危機。本文彙整上述 2009 至 2015 年之地球限度項目，可發現「淡水利用」一直都在安全限度之內，但實際上水資源缺乏及管理問題卻時常出現在我們的生活中，此顯示地球限度在「淡水利用」項目上的評估可能有限制。Gleeson *et al.*^[6] 也提出認為須對「淡水利用」該項目的完整性進行調整，因為水在形態上主要會儲存在大氣、地表、地下以及冰山冰川之中，並經由

表 1 九大地球限度項目比較表

2009 年發佈之地球限度 (Rockström <i>et al.</i> [4])	2015 年發佈之地球限度 (Steffen <i>et al.</i> [5])
氣候變遷 *	氣候變遷 *
生物多樣性損失 *	生物圈完整性 (遺傳、功能多樣性) *
臭氧消耗	臭氧消耗
海洋酸化	海洋酸化
氮*、磷循環	生物地球化學物質流 (氮、磷循環) *
森林砍伐與土地利用變遷	土地系統變遷 *
淡水利用	淡水利用
懸浮微粒污染	氣溶膠負荷
化學污染	創新物料的採用

* 表示超過限度項目

水文循環交互作用，且與其它地球限度項目也有相互貢獻或牽制性，後來發現其實過去的研究中，在原本的淡水利用限度中僅考量地表水的部分，實際上，缺少考量對於同樣為淡水資源的地下水資源之評估。

從西元前人力驅動的傳統井，至十六世紀獸力驅動的水利設施，再到 18 世紀工業革命蒸汽引擎發明所帶來的機械式鑽井，人類為了取水便利不斷提高地下水的抽取技術，甚至增加了取水的深度，並將這些乾淨水資源應用在農業、工業及城市的發展上。特別值得注意的是，此期間歐洲面臨霍亂的爆發，霍亂主要透過進食受霍亂弧菌污染的食物或水傳播，因此地下水的開發、保護及管理也被認為與當時解決霍亂問題的根本有關。直至今日亦是如此，在開發程度相對不高的區域，就可能因為乾淨水資源的不足，而有疾病產生或醫療環境的問題，尤其在近年全球處於 COVID-19 疫情的當下，也凸顯乾淨水資源對於人類健康的重要性。隨著 1950 年代電力成為主要動力來源後，技術的提升帶動地下水的加速開採。如此無止境的開採也開始受到了科學家與利害關係人的關注，並建立國際水文地質學家協會 (International Association of Hydrogeologists, IAH) 以促進瞭解地下水資源狀況及提出解決地下水風險的方法。儘管地下水問題開始受到關注，卻還是免不了在主要都市 (例如墨西哥與日本等地)，出現因為地下水過度開採所造成的地層下陷現象。然而，產業發展速度相對於人為災害的認知總是特別快，1960 年代的綠色革命將農業技術藉由已開發國家轉移至開發中國家，全球農業產量大幅提升，也造成了將地下水使用於灌溉的普及性。到了 1980 年代，多數人口稠密區的都市化提高對於水資源的需求，甚至有地下水受到人為活動的污染，因此也造成了地下水資源的壓力。20 世紀後，地下水與社會已經

密不可分，近乎全球一半的人口仰賴地下水作為飲用水來源，且地下水對於農業擴張的貢獻，更使其對於經濟社會發展來說是關鍵驅動力 [3]。然而，這卻也衍生出許多當前的地下水問題，包含沿岸地下水開採導致海水倒灌，造成地下水與土壤鹽化影響原區域土地利用問題、過度抽水導致土壤結構變化而地層下陷，不可回溯的含水層縮減降低地下水的可蘊藏量，並增加地下水枯竭的可能性、農業灌溉與工業廠址所產生的化學或重金屬污染，亦隨著降雨入滲造成對地下水水質的污染威脅等。

環境變遷對地下水的衝擊

環境變遷主要可分為氣候變遷與人為活動兩個影響因素，評估氣候變遷對於陸地水循環的影響一直是世界各國的重點研究 [7,8]。在一個水文循環中，包含降雨、融雪及蒸發散等在氣候變遷下的變化都會導致地下水儲存量的變化 (如圖 1 所示)，而且每個地區主要改變的水循環因子各不相同，在濕潤地區為降雨，乾旱地區為蒸發散，高緯度及高山地區則仰賴融雪的補注。Wu *et al.* [9] 也發現特定區域因氣候變遷造成的降雨量增加反映於地下水補注量的增加，但因土地利用與農業發達而地下水抽取頻繁的地區，抽取量遠仍超過於自然補注量，因此我們無法輕易認定氣候變遷究竟對區域地下水儲存量的影響是好是壞，各個區域都需要依現地狀況進一步分析，才會知道如何應對水資源管理調配這項未來的巨大挑戰。氣候變遷對臺灣的水文影響主要包含豐枯水期交替越來越頻繁、降雨日數減少而乾旱時間延長、降雨強度增加導致河川輸砂量增加以及氣溫上升造成蒸發量增加等。經濟部水利署 [10] 依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會第五次評估報告衍生 2020 ~ 2039 年的降雨情勢，降雨量整體而言呈現下降的趨勢，透過風險評估方法分析未來民生與工業用水的用水缺口，在人口較為稠密的臺灣西部沿岸區域多數被評估為中度或高度風險地區，降雨量的下降亦使得未來臺灣的地下水補注將逐漸減少。

在人類活動方面，以傳統農業與地下水間關係為例，全球多數地下水使用於灌溉農業，農業擴張在一定程度上可作為農作物貿易與經濟發展的指標，更有所謂的主要農業區域，臺灣西部沿岸也不例外。地下水抽取隨著產業擴張與開發程度越高越頻繁，因此也相對出現地下水枯竭的水資源議題。Dalin *et al.* [11] 研究

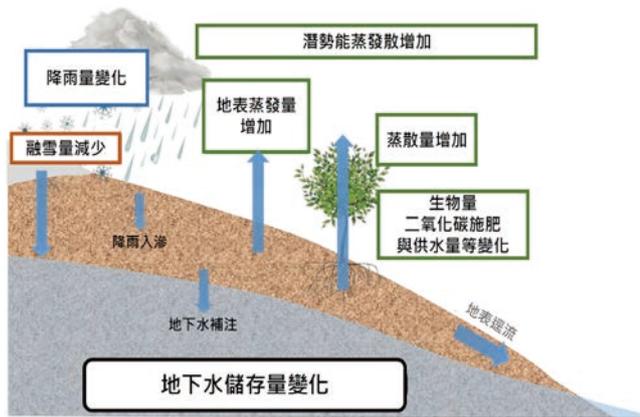


圖 1 陸地水文過程中不同控制因素對於地下水響應之示意圖。(修改自 Wu *et al.* [9])

結果顯示全球由灌溉所產生的地下水枯竭程度與地下水壓力指數 (groundwater stress index) 大於 1 的分布一致，其中也包含臺灣西部沿岸的主要農業灌溉區域，如圖 2 所示。地下水壓力指數大於 1 代表非永續的地下水消耗將影響地下水可用性及其仰賴地下水的地表水體及生態系統，也表示過度抽取地下水對於環境產生負面的影響。然而，在此僅僅為農業灌溉對於地下水的影響，若考量人口增加、工業抽水、都市化以及其他人為活動因素，地下水資源所受到的壓力可能遠超乎於想像。若再加上前述所提及的氣候變遷風險評估，臺灣西半部未來的水資源調配與管理勢在必行。

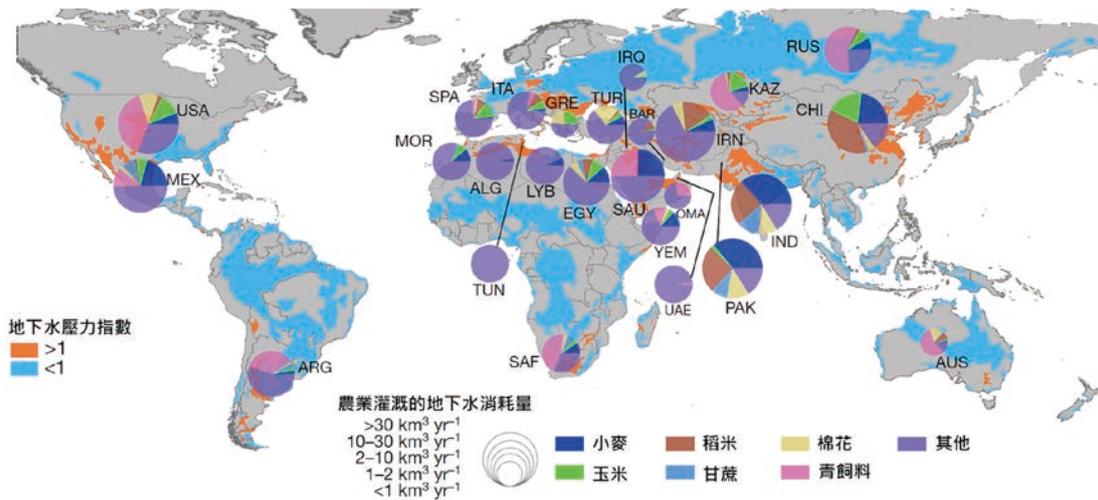


圖 2 2010 年全球特定作物對地下水枯竭的影響程度。圓餅圖顯示各國主要作物灌溉用水的比例，而其大小則表示總用水量。背景地圖顯示主要含水層的地下水壓力指數 (地下水壓力指數 = 區域面積「區域年平均地下水抽水量 / (補注量 - 地下水貢獻之環境流量)」/ 含水層面積)。部分國家過度開採地下水但無圓餅圖是因為其地下水利用主要與農業灌溉無關。(修改自 Dalin *et al.* [11])

臺灣中央研究院環境變遷研究中心在 2019 年重建臺灣地表覆蓋在 1904~1956、1956~1994 與 1994~2015 三個期間的變化 [12]，如圖 3 所示。由圖可見，臺灣早期致力於農業開發，農耕地一度達到全島總面積 35%，目前則降至約 25%。都市與其他用地隨著經濟發展則是快速上升至 10%，森林則是占據大部分山區與自然資源保護區在 55% 至 65% 之間變動。整體而言，臺灣土地利用起初以農業為主，隨著經濟發展轉變為建地與都市，森林則有稍微增加的傾向，後兩者的擴張則主要由農業用地轉變，其中土地覆蓋或利用變化對於地下水資源的影響包含區域人口密度增加導致用水量需求大增、部分基礎建設以不透水表面覆蓋原有地表，降雨難以入滲土壤補注地下水以及高耗水工業對於區域供水負擔的影響等等。

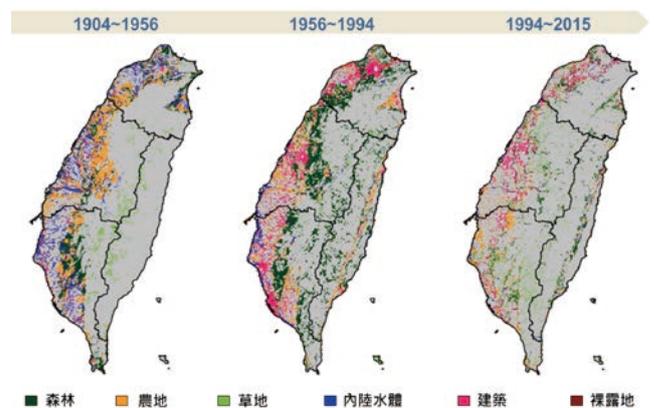


圖 3 臺灣早期 (1904~1956)、中期 (1956~1994) 與近期 (1994~2015) 的地表覆蓋變化圖，深綠色、黃色、淺綠色、藍色、粉紅色與紅褐色分別代表森林、農地、草地、內陸水體、建築以及裸露地，白色則為土地覆蓋未變動。(修改自 Chen *et al.* [12])

推估地下水儲存量的需求

取得地下水資源的資訊能夠幫助我們在環境變遷下更有效地解決相關的環境議題，但地下水的監測與調查通常受到其不可見性與地下結構的複雜性影響而難以執行。若單就一個水文系統來看，一個系統又可再切分成多個子系統，每個子系統的水文與地質特性不盡相同，包括含水層分布、斷層、褶皺影響等，我們難以細部剖析地下結構及地下水的分布狀況。此外，地下監測與調查通常為透過鑽井以了解岩芯與地下水位等的局部性單點測量，並配合既有或修正的空間內插方法建構整個區域的狀況，但井與井之間的實際狀況不得而知，儘管能夠藉由高密度鑽井來改善，但卻仍受到地區地文特徵以及調查成本所限制。

有鑒於此，科學家開始透過不同形式的方法來反推或衍生地下水的相關資訊。在水循環的基本水文變量中，可藉由河川流量與地下水儲存量間的連結為基礎，來定義不同分析方法所推估的地下水儲存量，因為在流域水文系統中，流域出口為整個水文過程的終點，無論降雨、入滲補注或蒸發散如何變化，水的流動終將匯集於河川，其中也包括地下水在含水層中流動並排水至河道所形成的部分流量（例如基流）。地下水與河川流量的關係主要可依水位高低分為三種：(1) 當地下水位高於河川水位時，地下水補注河川；(2) 當地下水位低於河川水位時，由河川補注地下水；(3) 當地下水位過低並與河川無直接連結時，主要由降雨形成的河川流量向地下水補注。Staudinger *et al.* [13] 以此為基礎來描述不同形式的地下水儲存量（如圖 4 所示），包含動態儲水量 S_D (dynamic storage)、擴展動態儲水量 S_E (extended dynamic storage)、移動儲水量 S_M (mobile storage) 以及固定儲水量 S_I (immobile storage)。 S_D 為在地下水與河川互相補注的階段，地下水儲存量與河川流量間有共同的動態變化關係； S_D 在經歷河川流量停止至下次降雨補注發生前的階段，由於蒸發散持續作用導致地下水儲存量下降，故此階段之儲水量為 S_E 。前述兩者皆為地下水有明顯增減的狀況，但地下水移動可能包含流域之間或是淺層與深層之間的交換，而這些涵蓋動態與交互流動的地下水則被稱為 S_M 。反之則存在不會移動並長期儲存於含水層中的 S_I ，其與移動儲水量的加總即為總儲水量 S_T 。

基於不同假設或理論的地下水儲存量推估方法則會獲取不同型態的儲水量，以下主要介紹五種常見的推估方法：

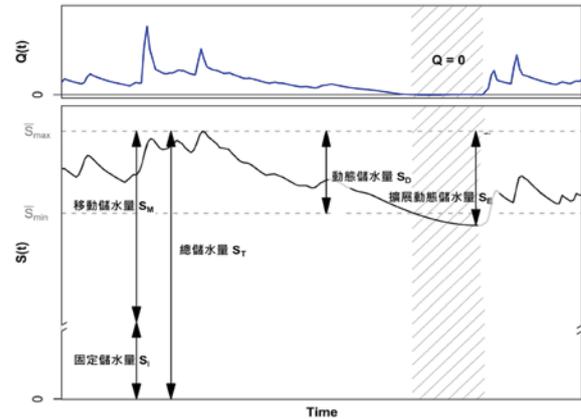


圖 4 以河川流量 Q 與地下水儲存量 S 之水文歷線描述不同形式之地下水儲存量。 t 為時間， \bar{S}_{\max} 及 \bar{S}_{\min} 分別為最大及最小動態儲水量。斜線區域則表示河川流量停止但儲水量持續減少的階段。

1. 水平衡：基於質量守恆，透過一水文系統中已知的輸入及輸出水文變量來計算 (Sayama *et al.* [14])。
2. 水文模擬：透過率定水桶模式將逕流機制，置換為數個儲水容器模型所組成，將開始降雨至地表土壤層視為第一個水桶裝水，一部分則往下流動至下一個水桶來代表滲入含水層，以此類推 [15]。
3. 示蹤計：當同位素或化學成分經由降雨補注到含水層地下水再到排放至河川的過程，會因為地下結構而產生不同的滯留時間，透過滯留時間與同位素及化學成分採樣的比例，反推該區域有多少地下水流動並探討流動過程可能存在得物理、化學或生物機制 [16]。
4. 重力測量：重力回溯及氣候實驗衛星 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE) 在 2002 年由 NASA 與德國航太中心在俄羅斯發射，負責探測的兩具衛星相距約 220 公里，藉由衡量地表重力對於其在軌道上運行速度的微小影響，從而推估近地表水含量的變化 [17]。
5. 儲水－排水方法：假設在乾燥期間，水文系統中的降雨與蒸發散遠低於河川流量時，即可單純探討河川與地下水間關係，並以河川流量進行反推儲水量 [18,19]。

從上述推估方法的基本介紹，可以瞭解以水文過程為基礎的方法皆可推估 S_D ，基於水文平衡之方法則可推估 S_E ，示蹤劑則因涉及整體地下水流動過程而可推估 S_M ，僅有 S_I 與 S_T 目前無法有效估計，也是獲取地下水資訊最受限的部分，不同儲水形式所對應之推估方法如表 2 所示。由此可見，由於不同儲水量估計方法推估的儲水類型不同，我們應透過推估方法的組合來剖析及建立更全面的集水區地下水儲水狀況。

表 2 不同儲水形式所對應之推估方法

地下水儲水形式	推估方法
動態儲水量 S_D	儲水—排水方法 水文模擬 示蹤劑
擴展動態儲水量 S_E	水文模擬 水平衡 重力測量
移動儲水量 S_M	示蹤劑
固定儲水量 S_I	—
總儲水量 S_T	—

地下水資源與永續發展目標

建立地下水資源永續管理策略的重點在於如何建立有效的適應性管理，即以當地環境或利害關係人的生活及資源運用型態為主，訂定對利害關係人影響較小且能顧及當地資源與產業未來永續的管理決策。過去在地下水資源管理中，許多國家皆會應用不同量化分析及複雜的地下水流模型來建構當地的地下水管理機制 [20,21]。然而，有鑑於模型或複雜科學在交流上的困難，會限制利害關係人的參與，進而會影響策略評估未來的適應性管理的發展，因此 Thomas [22] 認為使用如地下水位所計算的簡易指標較能夠作為評估當地地下水適應性管理策略的客觀基準。過去許多研究也將相關的永續指標應用於水文系統中來解釋水資源的可用性問題 [23,24]。

地下水資源的利害關係人包含地下水開採者、私人與公共用戶、環境保護主義者、管理者以及政策制定者等，由於他們對於地下水運用的傾向與目標不同，因此涵蓋的立場相當廣泛。不同使用者在管理策略的充分參與有助於做出明智的決策並預防可能的衝突，進而提升社會、經濟以及技術效益。由此可見，有效的地下水資源管理需要考量許多不同層面的因素來進行綜合評估。Tirupathi *et al.* [25] 提出由社會層面的公眾參與、環境層面的地下水監測、經濟層面的管制干預、機構層面的機



圖 5 地下水永續基底架構的五個層面

構責任以及與利害關係人相互信任的知識建立與傳播所組成的地下水永續基底架構 (groundwater sustainability infrastructure framework)，如圖 5 所示。此架構有助於比較地下水在空間與時間上的永續性狀態，進而優先考慮資源分配和評估需要改進的層面，並進一步建立地下水資源永續管理策略建議。

此外，聯合國於 2015 年所提出的永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 反映出對國際發展的整合性方向，以達到充分考量人類福祉、社會正義以及環境永續的關聯性 [26]，來降低各項目標間相互作用下可能產生的衝突。SDGs 代表實現人類永續未來以及解決與貧困、不平等、氣候變遷、環境惡化及水有關之全球挑戰的展望藍圖 [27]。在 SDGs 的背景下，地下水與確保所有人都能享有水及衛生及其永續管理 (目標 6：Clean water and sanitation) 有著最明確的聯繫。然而，地下水亦可以有助於消除貧窮 (目標 1：No poverty)、消除飢餓 (目標 2：Zero hunger)、性別平等 (目標 5：Gender equality)、永續城鄉 (目標 11：Sustainable cities and communities)、氣候變遷對策 (目標 13：Climate action) 和陸域生態 (目標 15：Life on land) [28]，如圖 6 所示。地下水的角色對於成功執行 SDGs 至關重要，但地下水利用的永續發展面臨著在環境與社會經濟間取得平衡的挑戰，且其永續性受到不同水文與社會經濟因素



圖 6 地下水資源與各項永續發展目標間之關聯

的衝擊。期望未來能夠藉由自然與社會人文科學領域的結合來尋求具有具體行動價值的見解來縮小 SGDs 與資源永續管理或系統方法論之間的差距，由更廣泛的角度解決相關的地下水與環境問題，同時考量在政策治理上將短期目標解決轉變為長期永續規劃。

結語

地下水的使用隨人類社會經濟發展演化，已與我們生活息息相關，但對於地下水資源相關的環境或災害議題仍須更加重視。

氣候變遷與人類活動皆以不同形式影響著全球的地下水資源，不斷提高環境變遷的複雜性加上各區域所受到的影響因地而異，如何針對特定環境進行地下水資源的調配，或保護而不衝擊相關產業與生活儼然成為更具挑戰的議題。

對於地下水或地下結構資訊的獲取，可藉由不同地下水儲存量推估方法的組合來協助我們更全面地瞭解區域地下水儲存量的流動機制與狀況，以提供該區域實施地下水資源開採或保護的相關措施。

地下水資源永續概念應以利害關係人為基礎，並透過適應性管理逐步調整以降低相關管理決策對其所造成的影響，且須評析既有或欲實施之治理措施是否為長期永續規劃而非短期目標的治理。

參考文獻

- Rodell, M., Famiglietti, J.S., Wiese, D.N., Reager, J.T., Beaudoin, H.K., Landerer, F.W., and Lo, M.H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557, 651-659.
- Awange, J. (2021). Global Freshwater Resources. In *Lake Victoria Monitored from Space* (pp. 3-19). Springer, Cham.
- Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice. (2019). Groundwater: critical for sustainable development. GRIPP infographic. International Water Management Institute (IWMI) and CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). 16p.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., and Foley, J.A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E. M., and Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.
- Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Porkka, M., Zipper, S.C., Jaramillo, F., Gerten, D., and Famiglietti, J.S. (2020). Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resources Research*, 56(4), e2019WR024957.
- Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., and van Ypersele, J.P. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R. Pachauri and L. Meyer (editors), Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p.
- Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., and Ma, L. (2017). The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *Journal of Hydrology*, 547, 184-195.
- Wu, W.Y., Lo, M.H., Wada, Y., Famiglietti, J.S., Reager, J.T., Yeh, P.J.F., Ducharme, A., and Yang, Z.L. (2020). Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*, 11, 3710.
- 經濟部水利署 (2016)。氣候變遷對水環境之衝擊與調適研究第 3 階段管理計畫 (3/5)。臺北市：經濟部水利署。
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., and Puma, M.J. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature* 543, 700-704.
- Chen, Y.Y., Huang, W., Wang, W.H., Juang, J.Y., Hong, J.S., Kato, T., and Luysaert, S. (2019). Reconstructing Taiwan's land cover changes between 1904 and 2015 from historical maps and satellite images. *Scientific Reports*, 9, 3643.
- Staudinger, M., Stoelzle, M., Seeger, S., Seibert, J., Weiler, M., and Stahl, K. (2017). Catchment water storage variation with elevation. *Hydrological Processes*, 31(11), 2000-2015.
- Sayama, T., McDonnell, J.J., Dhakal, A., and Sullivan, K. (2011). How much water can a watershed store?. *Hydrological Processes*, 25, 3899-3908.
- Seibert, J. and Vis, M.J. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315-3325.
- Cartwright, I., Cendón, D., Currell, M., and Meredith, K. (2017). A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations. *Journal of Hydrology*, 555, 797-811.
- Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., and Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9(5), 358-369.
- Huang, C.C. and Yeh, H.F. (2019). Hydrogeological parameter determination in the southern catchments of Taiwan by flow recession method. *Water*, 11(1), 7.
- Yeh, H.F. and Huang, C.C. (2019). Evaluation of basin storage-discharge sensitivity in Taiwan using low-flow recession analysis. *Hydrological Processes*, 33(10), 1434-1447.
- Thomas, B.F., Caineta, J., and Nanteza, J. (2017). Global Assessment of Groundwater Sustainability Based on Storage Anomalies. *Geophysical Research Letters*, 44(22), 11445-11455.
- Alley, W.M., and Konikow, L.F. (2015). Bringing GRACE Down to Earth. *Groundwater*, 53(6), 826-829.
- Thomas, B.F. (2019). Sustainability indices to evaluate groundwater adaptive management: a case study in California (USA) for the Sustainable Groundwater Management Act. *Hydrogeology Journal*, 27, 239-248.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F.P., and van Beek, L.P.H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488, 197-200.
- Richey, A.S., Thomas, B.F., Lo, M.H., Reager, J.T., Famiglietti, J.S., Voss, K., Swenson, S., and Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 51(7), 5217-5238.
- Tirupathi, C., Shashidhar, T., Pandey, V.P., and Shrestha, S. (2019). Fuzzy-based approach for evaluating groundwater sustainability of Asian cities. *Sustainable Cities and Society*, 44, 321-331.
- Gupta, J. and Vegelin, C. (2016). Sustainable development goals and inclusive development. *International environmental agreements: Politics, Law and Economics*, 16(3), 433-448.
- Fukuda-Parr, S. (2016). From the Millennium Development Goals to the Sustainable Development Goals: shifts in purpose, concept, and politics of global goal setting for development. *Gender & Development*, 24(1), 43-52.
- Conti, K.I., Velis, M., Antoniou, A., and Nijsten, G.J. (2016). Groundwater in the context of the Sustainable Development Goals: Fundamental policy considerations. Brief for Global Sustainable Development Report (GSDR). Delft, Netherlands: International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC).



地下水 污染整治 與 健康風險評估

王聖璋／淡江大學水資源及環境工程學系 助理教授

高雨瑄／國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心 助理研究員

梁菁萍／輔英科技大學護理系 教授

陳瑞昇／國立中央大學應用地質研究所 特聘教授

地下水為臺灣社會與經濟發展重要的水資源，水質優劣程度將影響用水安全與人體健康，因此地下水污染預防與整治為重要的水資源保護工作，本文綜整臺灣現行的地下水水質監測與管理制度、盤點地下水污染現況與主要的整治方法，並彙整地下水污染傳輸與健康風險等評估方法，以杜絕地下水污染持續發生，未來地下水水質保護工作需因應氣候變遷造成的水資源調配問題，以擬定地下水水資源管理策略，並研擬地下水水質與水量雙管齊下的管理政策，以利地下水資源永續利用。

前言

地下水資源為全球重要的水資源，主要做為民生、農漁畜牧、工業等用水標的之水源，因此地下水水量穩定與水質安全是水資源永續利用之重要關鍵因素，然而地下水水質經常受人為活動排放廢污水，並藉由自然水文循環之降雨與入滲等過程而造成水質改變、甚至劣化的情形（圖 1），當地下水污染物質濃度超過特定標準數值時，則視為地下水污染且需進行適當的整治與改善，以避免污染藉由抽用途徑造成可能的人體健康危害，因此地下水污染調查評估與整治調適等工作，已屬國際間高度關注之水資源永續發展議題，以臺灣而言，每年約有 32% 總用水量需仰賴地下水，因此人為活動與地下水水質之交互關係更受重視，地下水水質保護工作行之有年，並已累積豐碩成果，本文主要綜整臺灣地下水污染之監測與管理制度、污染現況、整治方法、污染傳輸模式、健康風險評估等重點，以利未來產官學研各界之工作推展。

地下水污染監測與管理制度

臺灣近二十年來已藉由地下水水文地質、水位、水質等地下水環境資料之監測蒐集，並提供各類型的

地下水環境資訊平臺，達到地下水水資源永續經營之目標。由於地下水業務面向廣泛，各部會依法定職掌進行相關工作執行，其中掌管地下水污染業務單位為行政院環境保護署（以下簡稱環保署）土壤及地下水污染整治基金管理會（以下簡稱土污基金會），為掌握臺灣地下水水質背景狀況，自民國 84 年起即針對各地下水分區設置區域性監測井，並辦理定期維護及採樣檢測工作，提供全國地下水污染潛勢與水質管理資訊，歷年水質監測資料亦公開於「環境水質監測年報」；此外，為釐清各類型地下水污染場址及高污染潛勢地區地下水污染狀況，自民國 90 年起陸續針對廢棄與運作中工廠、編定工業區、加油站與地上／地下儲槽系統、公告事業用地管理等設置場置性監測井，並依需求辦理污染潛勢調查、查證與改善工作，歷年污染場址資料亦公開於「土壤及地下水污染整治網」。

由於早期臺灣民眾對於土壤及地下水污染認知不足，因此在 70、80 年代陸續出現土壤及地下水污染事件，例如各縣市陸續發現鎘米問題、美國無線電公司桃園廠（RCA）地下水含氯污染、及臺南中石化（前臺鹼公司）戴奧辛污染等，為加強預防及整治土壤及地下水污染，故政府以確保土地及地下水資源永續利

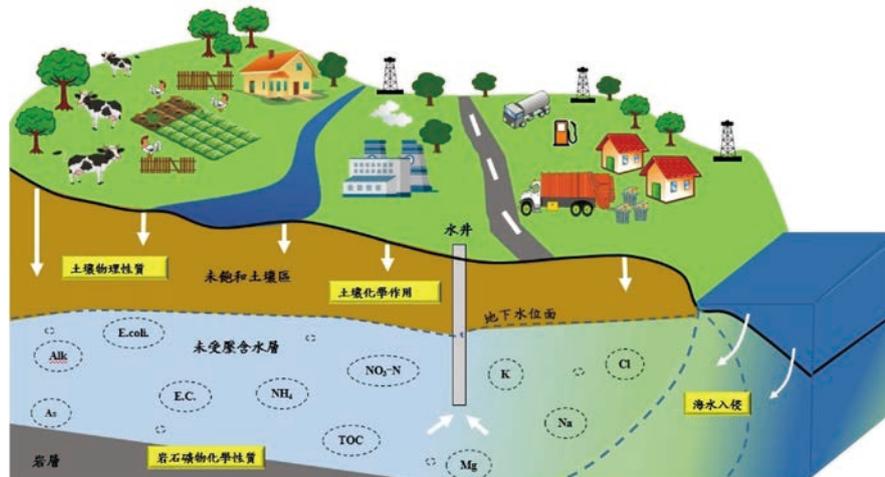


圖 1 地下水水質受自然過程與人為活動影響示意

用，改善生活環境，維護國民健康為目標，於民國 89 年公布施行「土壤及地下水污染整治法」（以下簡稱土污法），並於民國 92、99 年歷經二次修正歷程，目前土污法共分八章 57 條，內容對於土壤及地下水之防治措施、調查評估措施、管制措施、整治復育措施、財物及責任、罰則及附則等均有詳細規定。此外，為落實土污法規範事項，故環保署亦依據訂定相對應之子法及行政規則等，除可對民眾產生實質法律效果，亦能使政府單位施政有所依據，並協助環保單位行使裁量權，目前土污法相關子法與行政規則等共計包括 20 項法規命令、5 項相關公告及 39 項行政規則，而為妥善管理及運用土壤及地下水污染整治基金（以下簡稱土污基金），並推動土壤及地下水污染整治與預防等相關工作，於民國 90 年成立「土壤及地下水污染整治基金管理委員會」，目前地下水污染整治工作施政重點包括 (1) 健全完備法規制度，強化行政管理體系、(2) 檢討基金收支情形，提升經費執行成效、(3) 擴大辦理調查工作，及早發現潛在污染、(4) 結合各級行政團隊，共同推動整治復育、(5) 提昇本土專業能力，擴大民間共同參與。

綜觀臺灣地下水污染監測與管理工作已歷經 20 餘年，重點工作包括監測井網規劃、定期監測制度、高污染潛勢調查、監測井生命週期管理、污染管制標準檢討、新興污染物調查、監測資料分析與應用等，各項工作成果概述如下。

監測井網規劃

為掌握臺灣地下水背景水質狀況，前臺灣省環保

處於民國 82 年籌辦「台灣省地下水水質監測井網整體規劃」工作，自民國 84 年至 91 年陸續設置 431 口背景水質監測井（即區域性監測井），考量部分縣市尚未規劃完整背景水質監測井網，故於民國 102 年至 107 年辦理區域性監測井補充設置工作，目前已設置 455 口區域性背景水質監測井。背景監測井網規劃主要採平均每 50 平方公里設置一口區域性監測井為原則，規劃方法係利用美國環保署於 1985 年發展之 DRASTIC 系統，衡量 7 項水文地質參數（地下水位深度、淨補注量、含水層介質、土壤質地、地形坡度、未飽和含水層介質、水力傳導係數），並同時考量國內 4 項人為社會經濟活動參數（土地利用、人口密度、可疑地下水污染源、地下水抽水量），評估各地區污染潛勢指標，並規劃區域性監測井網數量及位置，監測井深度則以最易受地表污染影響之第一含水層為原則。

定期監測制度

區域性監測井自民國 91 年起即辦理定期地下水水質檢測工作，監測項目隨地下水污染監測／管制標準研修而陸續新增，目前監測項目包含一般水質項目、重金屬、揮發性有機物及其他項目等共計 50 項，而為有效運用監測經費，自民國 99 年起依據合格率、趨勢分析、監測井代表性等因素，逐年評估並逐口調整監測頻率，至今已累積超過 40 萬筆地下水水質檢測數據，每年度監測成果公開發於「環境水質監測年報」，歷年相關數據亦公開發於「全國環境水質監測資訊網」，供民眾查詢及下載使用。由歷年水質監測結果統計，顯示全國地下水符合監測標準比率（意即合格率）平均皆達 90%

以上，其中以氨氮、鐵、錳、及其他鹽化水質項目符合監測標準比率較低，故環保署已針對經常性超標項目探討其發生成因，並逐年繪製污染空間分布潛勢釐清歷年變化趨勢，相關研究成果及制度訂定彙整如表 1 所示。

高污染潛勢調查

有鑑於常見的地下水污染途徑為高污染潛勢事業之有害物質或廢水排放、儲槽或管線洩漏等，因此針對各類型地下水污染場址及高污染潛勢區，目前共計 1,900 餘口持續監測之污染調查監測井（即場置性監測井），以做為地下水污染調查與查證之用。由於污染源頭管理為地下水污染預防之重要工作，以工業區為例，依土污法第 6 條第 3 項及「目的事業主管機關檢測土壤及地下水備查作業辦法」規定，特定工業區、

科技園區、加工出口區等應定期檢測土壤及地下水品質狀況，並辦理申報備查程序，目前全國 162 處工業區申報備查率已達 100%。此外，為加速推動工業區污染場址調查改善及完備環境品質監測備查作業，彙整工業區監測現況、申報備查案件審核情形及污染場址公告列管狀況進行條件式分級，分別以紅燈、橘燈、黃燈及綠燈表示工業區土壤及地下水品質監測管理現況，相關成果亦公開於「工業區預警燈號管理系統」，目前共計有 5 處紅燈、16 處橘燈、21 處黃燈及 120 處綠燈，各項燈號分級方式及管理目標如表 2 所示。

監測井生命週期管理

由於監測井設置所費不貲且程序嚴謹，為提升既有地下水水質監測井之功能性與代表性，環保署已陸

表 1 地下水不合格率較高之水質項目及管理制度

水質項目	特性	研究成果及管理制度
氨氮	<ul style="list-style-type: none"> ● 情況普遍且來源複雜，對人體尚無立即性危害 ● 屬低毒性、影響適飲性物質 	<ul style="list-style-type: none"> ● 應用穩定同位素研析成因，並跨單位研擬氨氮源頭管理策略 ● 內政部營建署持續推動污水下水道建設計畫，提升公共污水下水道普及率 ● 水保處針對工業廢水加嚴事業廢水排放標準及劃定總量管制區 ● 農委會加強宣導合理化施肥管理
砷、鐵、錳	<ul style="list-style-type: none"> ● 砷具致癌性；鐵、錳則屬影響適飲性物質 ● 屬天然背景物質 	<ul style="list-style-type: none"> ● 鐵、錳僅屬地下水水質特性，因此與列管地下水污染控制或整治較無關 ● 建立地下水砷污染來源判定流程 ● 劃定臺灣地下水砷濃度潛勢範圍
氯鹽、硫酸鹽、總硬度、總溶解固體	<ul style="list-style-type: none"> ● 為海水組成成分且集中沿海地區 ● 屬影響適飲性物質 	<ul style="list-style-type: none"> ● 水質項目超過監測標準推測成因為海水入侵及感潮河段影響所致 ● 劃定地下水鹽化潛勢範圍 ● 建立地下水鹽化預警監測井網

表 2 工業區土壤及地下水品質監測分級燈號及管理目標

分級燈號	燈號分級方式	管理目標
紅燈	區內有污染情形且已擴散至區外	<ul style="list-style-type: none"> ● 風險評估與管理 ● 阻斷污染源 ● 加強周界預警 ● 避免污染持續擴大
橘燈	限於區內有污染情形	<ul style="list-style-type: none"> ● 完備周界預警 ● 風險評估與管理 ● 追查污染來源降低污染程度
黃燈	區內污染均已公告列管及執行改善工作	● 加速污染改善作業
	歷年檢測均未超過管制標準惟尚未完備備查檢測申報規定	● 完備污染檢測機制及申報備查事宜
綠燈	已符合備查辦法檢測申報規定（檢測資料獲主管機關備查確認）且檢測結果均未超過管制標準；屬低污染產業已認定免檢測	<ul style="list-style-type: none"> ● 潛在污染源管理 ● 背景濃度管理
-	工業區僅編訂尚未開發	<ul style="list-style-type: none"> ● 園區開發動態追蹤 ● 提早監測掌握環境背景

資料來源：行政院環境保護署工業區預警燈號管理系統 (<https://sgwref.epa.gov.tw/sgcm/dispPageBox/SgcmHp.aspx?ddsPageID=SGCMHP>)

續針對監測井設置、維護、廢井等生命週期制度，發布相對應之原則、手冊及規範等，供各級環保機關遵循。在監測井設置前應提出「監測井設置規劃報告」，妥善評估井址周遭環境及水文地質狀況，評估選用合適工法及材料等，而進行監測井設置則應符合「地下水水質監測井設置作業原則」規定內容辦理。為使監測井得以持續發揮監測功效，並延長使用年限，環保單位應依「地下水水質監測井維護管理作業參考手冊」辦理外部巡查維護、內部功能檢查、及內部功能維護等工作，另針對具井況不良情形，致採樣監測功能喪失之監測井，或受天然或人為外力因素破壞或設置不當，造成交互污染等可立即判定需廢井之情形，則依「地下水水質監測井廢井作業規範」辦理，避免監測井成為地下水污染之通道。

污染管制標準檢討

為防止地下水污染惡化，所訂定之地下水污染管制標準，自民國 90 年發布施行後，考量國際趨勢及國內產業發展，已於地下水中發現部分新興產業產生之有害物質，由於具有潛在健康風險之虞，已於民國 98 年、100 年及 102 年增訂監測／管制項目與標準，共完成三次條文的修正。目前訂定管制項目之類別包括單環芳香族碳氫化合物（4 項）、多環芳香族碳氫化合物（1 項）、氯化碳氫化合物（21 項）、農藥（8 項）、重金屬（10 項）、一般項目（3 項）及其他污染物（3 項）。而以地下水污染預防目的，所訂定之地下水污染監測標準，其監測項目除包含管制項目外，亦包含背景與指標水質項目（9 項），且監測值為管制值之二分之一；此外，由於地下水存在自然環境背景物質，依據地下水污染監測／管制標準第 2 條規定，環保署已於 102 年公告附件「地下水背景砷濃度潛勢範圍及來源判定流程」，若位於潛勢範圍之地下水，其含砷地下水之使用方式須依各類地下水用水標的，各事業單位主管機關應配合相關水質標準或用水需求，研擬合宜之水質淨化處理方式與地下水抽取深度、用水量等。

新興污染物調查

由於地下水通常為環境污染物質最終受體，又為國內主要的用水來源之一，因此在訂定地下水污染管制標準之項目與限值需考量國內其他環境管制標準，例如放流水、飲用水、土壤等相關標準列管項目及標準值，考量毒性及關注化學物質、環境用藥、農藥管

理等源頭管制方式。目前針對尚未列管為地下水污染監測標準項目，如持久性污染物、環境賀爾蒙、塑化劑等，環保署自 100 年起分階段完成我國六大產業（占全國產值約 57%）地下水品質調查，同時蒐集國內外資料，建立「地下水優先關切物質清單（Candidate Contamination List, CCL）」，並陸續調查新興產業與關切物質的基線資料。目前地下水優先關切物質清單共計 163 項，考量國內產業變化情形、原物料使用狀況、環境傳輸流布機制、毒理化特性等因子，逐年辦理國內地下水基線資料調查，以做為未來地下水污染管制標準修訂之參考。

資料分析與應用

歷年國內已彙整水質監測井基本資料、水質監測成果、監測井維護狀況等，以及污染場址之基本資料、定期監測資料、整治計畫書、列管歷程及狀態等，累積龐大的數據與文字資料，鑑於近年巨量資料分析技術興起，各領域對於資料清理、數據分析、視覺化呈現、機器學習等皆有重大進展。在地下水品質領域，近年研究以水質監測井及污染場址資料為基礎，利用地理統計分析各類水質議題污染潛勢分布地圖，並搭配其他高污染潛勢事業及水污列管等資訊，利用環域分析進行污染調查並建置監測預警網等工作，此外，針對部分水質經常性偏高議題，亦採用隨機森林與類神經網路等機器學習方法，歸納分析地下水水質長期遭受影響之主要原因，因此地下水相關資料分析與應用將逐步涵蓋跨單位資訊整合、資訊揭露、資料開放等議題，為未來政府施政與產業發展的重要趨勢。

地下水污染現況

依據環保署土壤及地下水污染整治網之污染場址查詢資料，截至 110 年 7 月底止，歷年地下水污染場址共計 327 處，列管狀態場址數量如圖 2 所示，以公告為控制場址數量最多、共計 114 處，其次為公告解除控制場址（102 處）及公告為整治場址（82 處）；而場址類別數量如圖 3 所示，以工廠數量最多、共計 164 處，其次為加油站（111 處）、其他（37 處）；而以縣市別區分之場址數量如圖 4 所示，以高雄市、桃園市、臺南市分別位居前三名，其次為臺中市、彰化縣、新北市，上述 6 個縣市之歷年地下水污染場址數量皆大於 20 處。此外，以列管狀態區分之不同場址類型地下

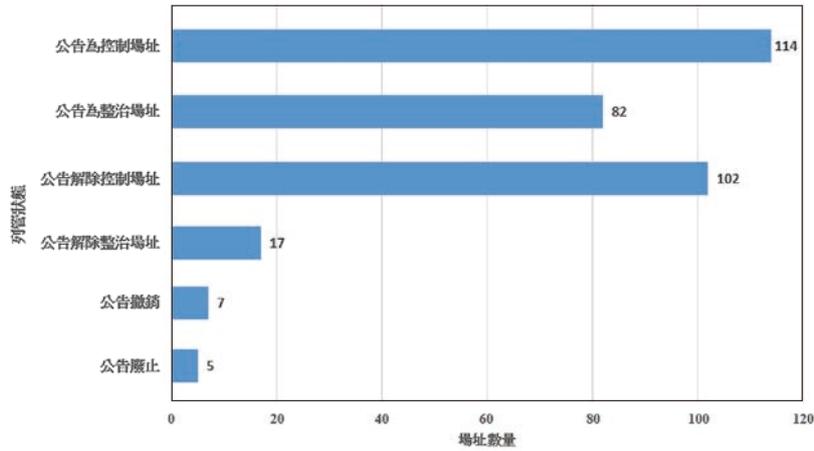


圖 2 依列管狀態區分之地下水污染場址數量

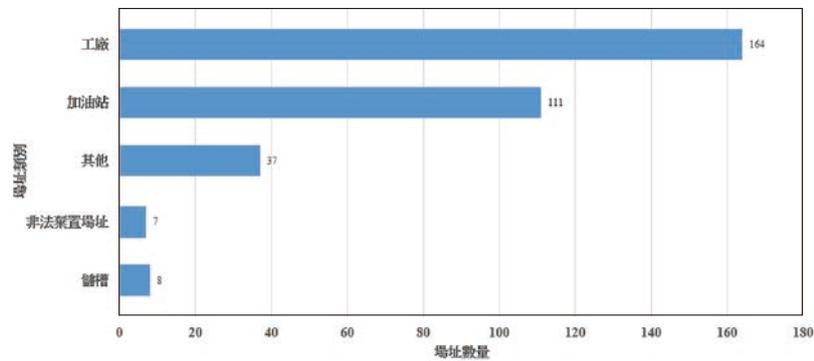


圖 3 依場址類型區分之地下水污染場址數量

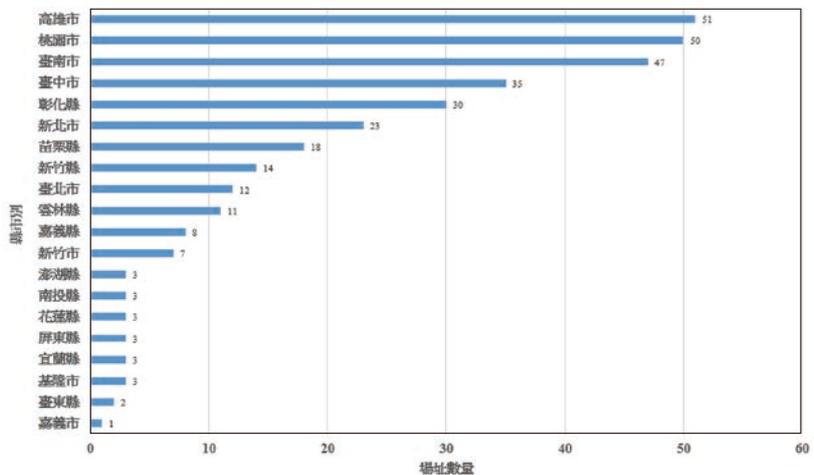


圖 4 依縣市別區分之地下水污染場址數量

水污染場址數量（圖 5），顯示公告為控制／整治場址以工廠數量最多，其次為加油站及其他，而公告解除控制／整治場址則以加油站數量最多，其次則為工廠及其他，說明加油站之地下水污染整治較工廠容易被解除列管；此外，以縣市區分不同場址類型列管情形而言，由圖 6 顯示場址數量大於 10 處之縣市別，除臺南市、臺北市、雲林縣等 3 個縣市之加油站數量高於

工廠外，其餘縣市之工廠數量皆高於加油站，包括高雄市、桃園市、臺中市、彰化縣、新北市、苗栗縣、新竹縣等 7 個縣市。而依列管狀態為公告為控制／整治場址並依縣市別區分之不同地下水污染場址類型，由圖 7 顯示公告為控制場址以臺中市、桃園市、高雄市分別位居前三名，而公告為整治場址則以桃園市、高雄市、彰化縣分別位居前三名。

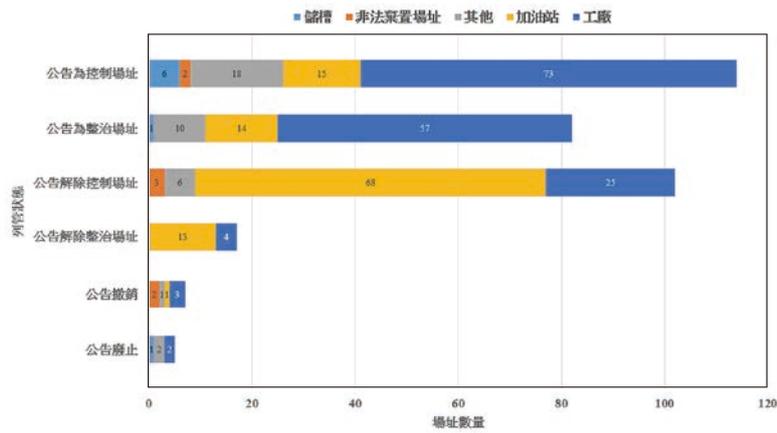


圖 5 依列管狀態區分之不同場址類型地下水污染場址數量

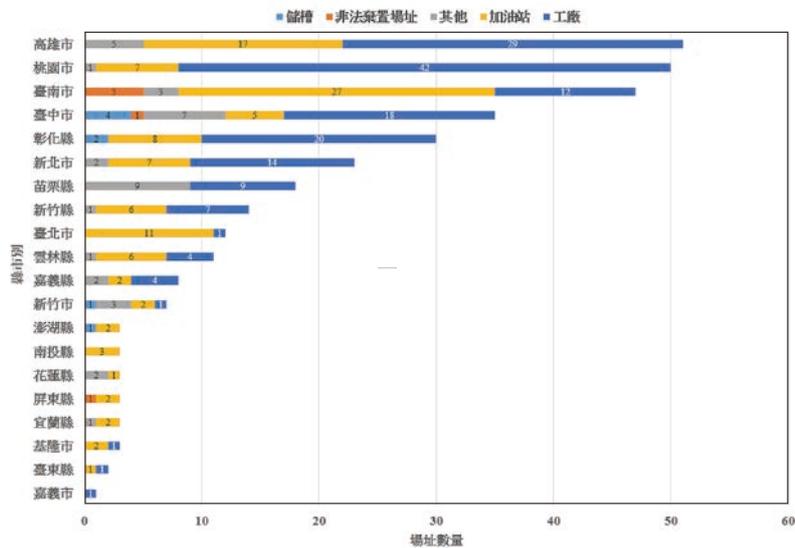


圖 6 依縣市別區分之不同場址類型地下水污染場址數量
(列管狀態包含公告為整治/控制場址、公告解除整治/控制場址、公告撤銷/廢止)

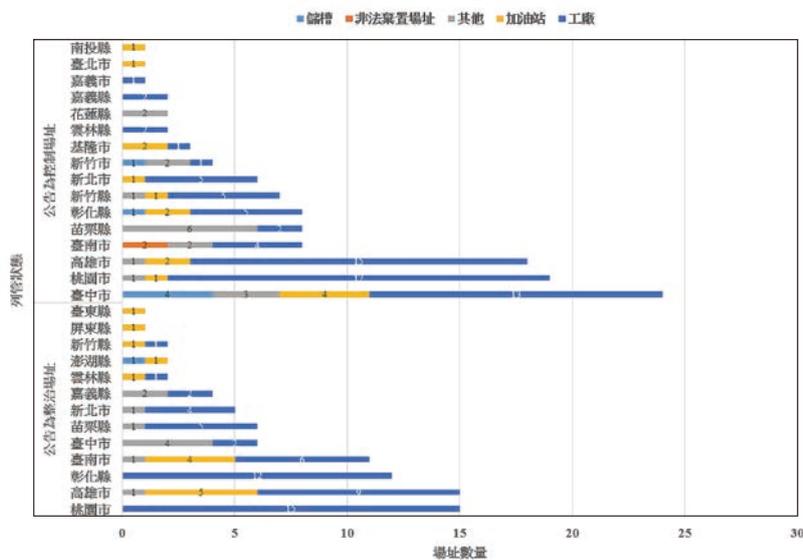


圖 7 依縣市別區分之不同場址類型地下水污染場址數量
(列管狀態為公告為整治/控制場址)

地下水污染整治方法

由上述地下水污染現況顯示臺灣最常發生地下水污染的場址類型為工廠及加油站，前者以重金屬及含氯有機物（氯烯類、氯烷類、氯苯類）污染為主、後者以總石油碳氫化合物、BTEX（benzene, toluene, ethylbenzene, xylene）、甲基第三丁基醚（Methyl tert-butyl ether, MTBE）污染為主，各類污染物與污染場址的整治技術篩選時，應考量技術可行性、污染範圍及程度、場址水文地質概況、調查與整治經費、整治時間及期程、對周遭環境與社會經濟影響等，再藉由小範圍先導試驗，依其結果進行全面性評估後，決定最終採用之整治技術，並於整治過程依整治成效進行檢討與調整。

環保署於民國 104 年依據不同污染物項目及不同污染介質，陸續訂定相對應之整治技術篩選與評估指導手冊，其中適用於地下水污染項目之整治工法，主要參考「土壤及地下水重金屬污染整治作業參考指引」、「土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引」、「土壤及地下水比水重非水相液體污染整治作業參考指引」等正式文件，目前國內外常用且可行的地下水污染整治技術，以現地處理技術為主，大致可依其整治工法實施之類別區分為：(1) 生物法（Biological Treatment）、(2) 物理／化學法（Physical／Chemical Treatment）、(3) 熱處理法（Thermal Treatment），地下水污染現地生物整治法（In-Situ Bioremediation）包括加強好氧生物整治法（Enhanced Aerobic Bioremediation）、監測式自然衰減法（Monitored Natural Attenuation, MNA）等兩類，而地下水污染現地物理／化學整治法則包括空氣注入法（Air Sparging）、雙相抽除法（Dual-phase

Extraction）、井內氣提法（In Well Air Stripping）、抽出處理法（Pump And Treat）、現地化學氧化法（In-Situ Chemical Oxidation, ISCO）、現地透水性反應牆（In Situ Permeable Reactive Barrier, PRB）、開挖及圍堵（Excavation and Containment）等，其整治方法概略比較如表 3 所示。

綜整臺灣地下水污染整治方式以現地化學氧化法（ISCO）最為常見，近年來廣泛應用於石油碳氫化合物與含氯有機溶劑之污染場址，其原理是將氧化劑注入地下環境中，於現地氧化地下水與土壤中的污染物，使其降解、破壞為較不具危險的二氧化碳、水及無機鹽類，除轉換目標污染物，也降低其質量、移動性及毒性，常見氧化劑包含過氧化氫、過錳酸鹽、過硫酸鹽、臭氧等。現地化學氧化法優勢為適用的處理污染物類型廣泛，且相較其他技術，可在短時間降解污染物，但其氧化時間與效果受地質條件及氧化劑特性之影響甚鉅。

地下水整治成效良窳之關鍵在於選用的整治反應機制與污染物的適當接觸，因此，於正確的時間與位置致使污染物與反應物接觸為各種整治方法選用之首要評估重點，於現場執行地下水污染整治工作時，常以添加微生物或化學反應物以降低地下水污染濃度，然添加之反應物常因自身活性過大、或於現地環境快速消耗、或短時間釋放濃度過高等情形，而造成反應物無法長時間維持於地下水環境，導致灌注影響範圍限縮、且與預期成效差異甚遠。綜上所述，近年來國內外持續發展地下水污染整治之生物或化學方法，透過反應物之溶解性、時效性或反應性等抑制作用，使反應物緩慢釋放於地下水之中，再搭配物理性之地下水流場控制方式，可確保反應物在地下水中有足夠的

表 3 地下水污染整治方法比較

整治技術	關鍵因子	整治期程	成本
加強好氧生物整治法	場址規模、污染物特徵與數量、水文地質條件	視場址特徵而定	中
監測式自然衰減法	測試規劃費用、環境監測及場址管理	視場址特徵而定	中
空氣注入法	受污染表面積、受污染地下水深度	平均期程低於 3 年	低
雙相抽除法	土壤性質、受污染地基深度	平均期程 3~10 年	高
井內氣提法	受污染地表面積（影響建井數）、設備處理效率	平均期程大於 10 年	高
抽出處理法	受污染地表面積、設備處理效率	平均期程低於 3 年	高
現地化學氧化法	氧化劑種類、氧化劑再生可行性、污染物特性、注入方法	平均期程為 1~3 年	中
現地透水性反應牆	污染物種類及特徵、反應牆規劃設計及建造	平均期程大於 10 年	高
開挖及圍堵	污染場址規模、土壤性質、開挖方法	平均期程大於 10 年	高

資料來源：彙整自環保署 107 年「污染場址綠色及永續導向型整治試辦與推廣計畫」

反應停留時間，以降低地下水污染整治之灌注成本，並有效提升地下水污染整治效率。

地下水污染傳輸評估

污染物在地下環境系統遷移受到天然過程或人為活動造成的各種物理、化學與生物過程影響而改變濃度或轉化成其它不同污染物，因此了解不同時間與空間的污染物的濃度大小與空間分布為地下水水質管理與減緩地下水污染的核心，任何減緩地下水污染的整治或控制措施都需要能預測在相對應的整治或控制活動下污染物宿命與傳輸行為。地下水污染物宿命傳輸模式為以數學方法描述近似真實世界地下水污染物的遷移行為，地下水污染物宿命傳輸模式藉由控制體積的質量守恆概念，並納入影響地下水系統中污染物遷移等各種物理、化學與生物過程各種現象關係，以量化地下水污染物的遷移行為與時空分布，對於相關地下水污染的調查、預防與整治控制方案的選擇與設計皆扮演重要的關鍵角色，且做為地下水污染健康風險評估的重要依據。

因此描述地下水污染物於地下環境的遷移與分布為執行調查與整治工作前的重要工作，數值解與解析解模式即為瞭解污染物於地下環境遷移與分布之有效工具，根據 McGuire *et al.* [1] 分析美國 45 個含氯有機物地下水污染場址中，發現有 60% 的污染場址使用解析解或數值解模式進行污染場址分析工作。數值解模式可用於三維污染物遷移模擬及較複雜的幾何形狀、水文地質或生物地質化學反應問題，數值解模式的使用者需具備較完整的地下水相關領域專業知識，而解析解模式的優點為解在時間與空間都是連續，且相對應的解析解的計算程式在執行污染物遷移模擬的穩定性非常高，且參數較少、使用門檻較低、無需長期的模式學習經驗，因此為非常適用使用者初步評估的有效工具。

目前國際上已有許多具圖形使用者或視窗界面的解析解計算工具，3DADE (Leij [2]) 與 N3DADE 為美國農業部 (US Department of Agriculture) 所發展的以 Leij *et al.* [3,4] FORTRAN 計算程式；AT123D 是以 Yeh [5] 解析解為基礎的計算程式，相對於 3DADE 與 N3DADE 而言，AT123D 有較大的污染源選用彈性，污染源可考量點、線、平面與立方體等幾何形狀；AT123D AT (Burnell *et al.* [6]) 針對數值積分進行改善

並發展使用者介面 [7]；此外，美國環保署 BIOSCREEN (Newell *et al.* [8]) 與 BIOCHLOR (Aziz *et al.* [9]) 為著名的解析解計算程式，BIOSCREEN 與 BIOCHLOR 都是以 Domenico [10] 近似解析解為主，前者主要適用於碳氫污染物，後者適用含氯污染物自然衰減；ATRANS 為 Neville [11] 所發展的程式，其考慮一個長方形污染源，利用疊加原理 ATRANS 可以考慮比 BIOSCREEN 更複雜的污染源；HYDROSCAPE (Funk *et al.* [12]) 則是以 BIOSCREEN-AT 的解析解，且採 MATLAB 計算程式，屬於友善的使用者介面。上述的解析解計算工具除 BIOCHLOR 為多物種解析解模式外，其它皆為單一物種解析解模式描述四氯乙烯之還原脫氯反應，依序降解為三氯乙烯、1,1-二氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯、氯乙烯、乙烯，於此降解過程之各項中間產物可能形成新的危害物質，甚至比原始污染物的毒性更高，因此 BIOCHLOR 之多物種解析解模式為常用的地下水含氯污染自然衰減模式，然而 BIOCHLOR 模式存在大延散係數的誤差問題，且所有物種皆採相同的遲滯因子，由於遲滯因子主要與含水層介質及污染物物化性質有關，此亦為此模式產生顯著誤差的關鍵。近年全新的多物種解析解模式不斷發展，Liao *et al.* [13] 考慮各物種不同的遲滯因子，亦解決較大的延散係數造成的誤差問題，搭配友善的圖形使用者介面 (Graphical User Interface, GUI)，以利使用者之參數輸入與結果輸出等操作。

上述模式之地下水水流皆以 Darcy 定律描述，依據質量守恆原理，飽和含水層地下水流動控制方程式如下。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

其中 h 為水頭； K_{xx} 、 K_{yy} 與 K_{zz} 分別為沿著 x 、 y 與 z 方向的水力傳導係數 [L/T]； t 為時間 [T]； q_s 為單位體積之抽水或注水流通量 [1/T]； S_s 為比貯水率 [1/L]。此式配合適當初始與邊界條件可求解水頭 $h(x, y, z)$ 隨時間與空間分布，進而計算地下水滲流速度 (seepage velocity) 如下。

$$\begin{aligned} v_x &= -\frac{K_{xx}}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{K_{yy}}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{K_{zz}}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

由 Darcy 定律所得之流速為污染物移流傳輸 (advective transport)，代表各質點與地下水流具有相同的遷移速度，然而實際上由於含水層介質異質性將造成污染物非均勻流動情形，因此以 Fick 定律為基礎的水力延散 (hydrodynamic dispersion) 理論可描述此非均勻流動情形，因此整合移流與延散理論而得之控制方程式如下。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\phi v_x C) \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (\phi v_y C) \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\phi v_z C) \\ & + C_s q_s + \sum_{n=1}^N R_n = \frac{\partial \phi C}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

此處 C 為濃度 [M/L^3]， C_s 為抽水或注水的濃度 [M/L^3]， $\sum_{n=1}^N R_n$ 為由 N 個化學反應產生的單位時間單位體積之質量 [M/L^3T]， D_{ij} 為水力延散係數張量 (tensor) [L^2/T]。依據上述移流與延散的解析解模式可

快速推估污染物與其降解產物共存的濃度變化情形，Liao *et al.* [13] 依據 BIOCHLOR 之模擬案例，以多物種污染傳輸解析解推估四氯乙烯及其降解產物之分布情形 (圖 8)。因此，地下水污染傳輸模擬為污染評估與整治過程之重要工作，以掌握污染傳輸分布並可做為健康風險評估的參考基礎。

健康風險評估與風險管理

有鑑於地下水為臺灣重要的水資源，受污染的地下水可能直接或間接影響人體健康，因此健康風險評估為地下水污染調查與整治過程中的重要工作，其利用跨域知識或技術以評估對人體健康具危害性的污染物質，經釋放到環境中而被人體經由食入、吸入或皮膚吸收等暴露途徑而對人體健康所產生影響之可能性。依美國國會於 1983 年公布之「聯邦政府風險評估」報告 (The Red Book, Risk assessment in the federal government: Managing the process, National Research Council of the National Academy of Sciences, NAS-

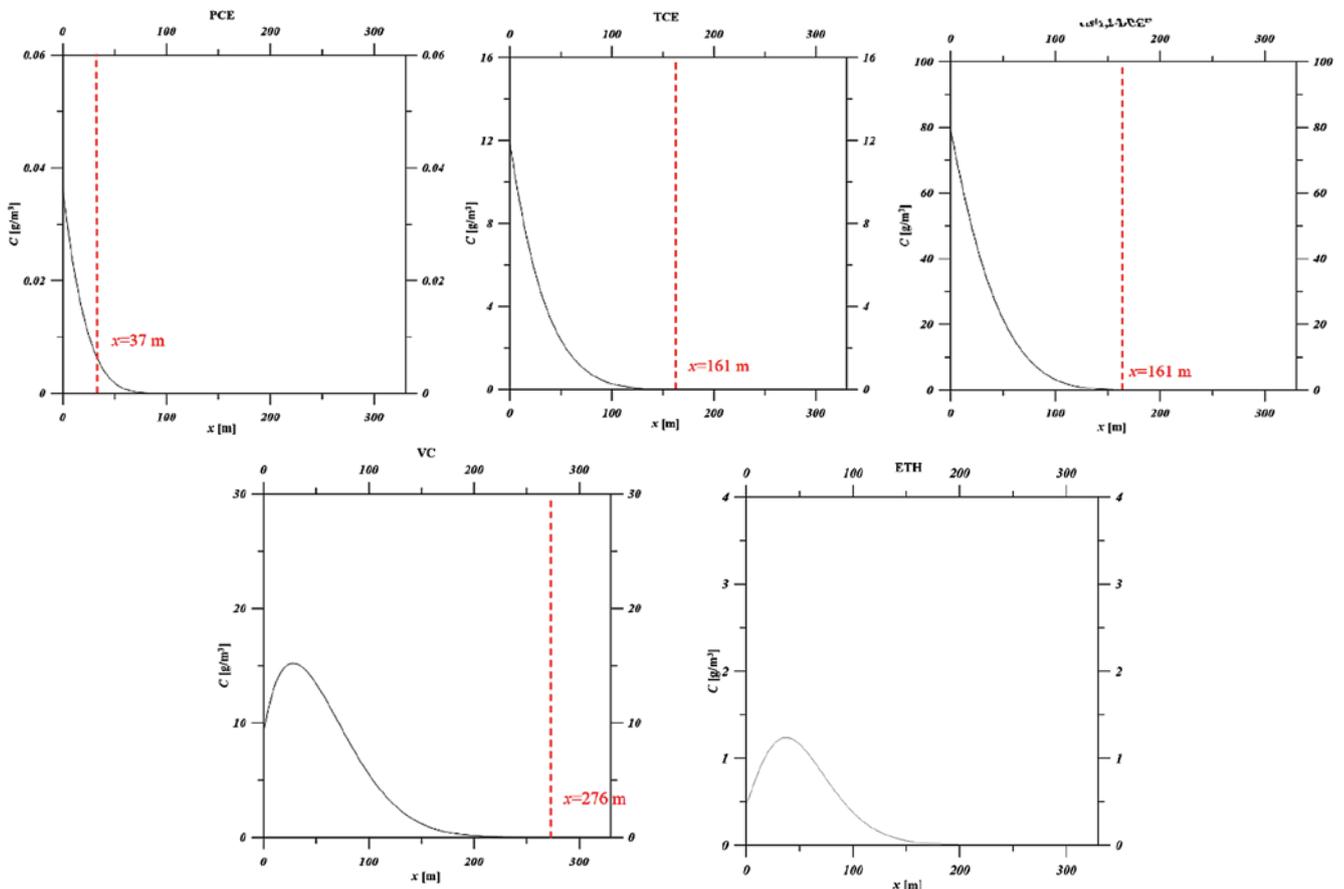


圖 8 利用 Liao *et al.* [13] 解析解模式模擬地下水四氯乙烯及其降解產物濃度隨位置變化之模擬結果 (紅色虛線代表濃度符合污染管制標準時之位置)

NRC)中指出「風險評估涵蓋要素包括依據流行病學、臨床、毒理學及環境研究之評估結果，來描述潛在之不良健康效應，並從這些結果外推及估計在某種暴露狀況下對於人體健康之影響種類及程度；判斷暴露於不同強度、時間之族群數量及特性，以歸納出公共衛生問題與影響族群程度」。美國環保署 (US EPA^[14]) 與國際癌症研究署 (IARC^[15]) 將化學物質的致癌性分別區分為五大類與四大類，美國環保署將四氯乙烯、三氯乙烯與氯乙烯歸類為 Group A (對人類為致癌物質)，IARC 則將三氯乙烯與氯乙烯歸類為 Group 1 (人類致癌性的證據充足)、四氯乙烯歸類為 Group 2A (人類可能致癌物，流行病學資料有限，但是動物實驗資料充足)，由此足見含氯污染物毒性可能造成人體健康危害 (表 4)。

表 4 USEPA 與 IARC 針對含氯烯類所進行的分類

污染物	USEPA	IARC
PCE	Group A	Group 2A
TCE	Group A	Group 1
DCE	-	-
VC	Group A	Group 1
ETH	Group D	Group 3

有鑑於含氯污染物殘留相形成長期的地下水污染源區與其致癌性，故需藉由健康風險評估估算其造成之健康危害，依據土污法第 24 條第 2 項規定整治場址

如因地質條件、污染物特性或污染整治技術等因素，而無法整治污染物濃度符合土壤、地下水管制標準者，可依環境影響與健康風險評估結果，提出土壤、地下水整治目標，此法規顯示健康風險評估於地下水污染場址管理與改善等過程扮演相當重要的角色。健康風險評估以危害鑑定 (Hazard Identification)、劑量反應評估 (Dose Response Assessment)、暴露評估 (Exposure Assessment)、風險特徵描述 (Risk Characterization) 為四個基本架構 (圖 9)，其中危害鑑定主要以現有的概略資料建立場址概念模型，包括污染源位置、場址周邊水文地質、可能的關切污染物質、影響的受體等；劑量反應評估主要以劑量 - 反應曲線計算污染物劑量效應因子，並將污染物毒性分為致癌性 (carcinogenic) 與非致癌性 (non-carcinogenic)；而暴露評估為探討關切污染物質經由各種途徑進入人體的可能性，須以危害鑑定所得的場址概念模型之暴露途徑與場址水文地質特性選擇適宜的宿命傳輸模式 (如前節所述)，藉以估計污染物於環境介質之流布情形、及污染物之受體接受濃度，再以此濃度與暴露因子計算各種暴露途徑之受體吸收污染物的劑量 (即暴露劑量)；最終之風險特徵描述則是綜合前述三個步驟進行綜合評估，以估計污染物影響人體健康的風險程度與影響方式，並依此擬定風險管理策略。綜整前述地下水污染調查與整治過程中涵蓋的污染傳輸模擬與



圖 9 健康風險評估架構

(<https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment>)

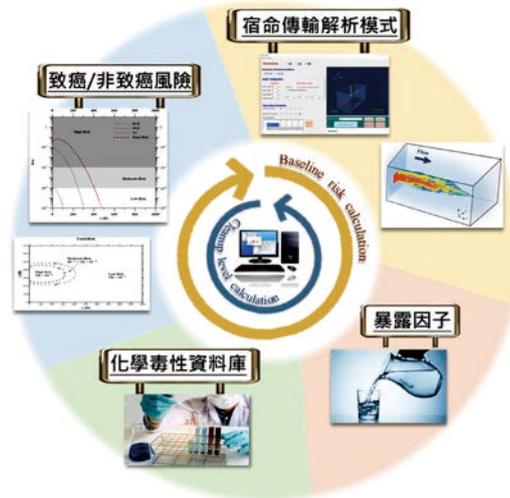


圖 10 應用污染傳輸模式進行健康風險評估之架構

健康風險，目前臺灣已積極發展地下水含氯溶劑污染場址健康風險評估平台，其架構包括污染物傳輸解析、本土化暴露因子與化學毒性資料庫、致癌與非致癌風險計算、互動式圖形使用者界面等（圖 10），此發展將有助於各界對於地下水污染造成健康風險危害的認知，並提升風險溝通與管理的有效性。

未來展望

面對全球極端氣候的影響，地下水勢必扮演水文循環過程可永續利用之水資源的角色，而隨著都市化擴張與經濟發展趨勢，部分地區的高度密集人為活動亦將顯著影響地下水水質優劣，因此地下水水質保護應受更高度的關注，以臺灣而言，未來地下水水質保護工作重點應為氣候變遷調適之地下水資源永續利用策略，建議推動方向包括研擬地下水水質與水量並重的管理政策、強化以用水需求為導向的水質監測與污染預警方法、建立地下水資源分級分區之開發與保育制度、持續發展本土化污染調查評估與整治技術等，以利地下水資源利用與國家永續發展。

參考文獻

- McGuire, T.M., Newell, C.J., Looney, B.B., Vangeas, K.M., and Sink, C.H. (2004), Historical analysis of monitored natural attenuation: A survey of 191 chlorinated solvent site and 45 solvent plumes. *Remiat. J.* 15, 99-122.
- Leij, F.J. and Bradford, S.A. (1994), 3DADE: A computer program for evaluating three dimensional equilibrium solute transport in porous media. Research no. 134. USDA, ARS, Riverside, CA: US Salinity Laboratory.
- Leij, F.J., Skaggs, T.H., and van Genuchten, M.T. (1991), Analytical solutions for solute transport in three-dimensional semi-infinite porous

- media. *Water Resour. Res.*, 27, 2719-2733.
- Leij, F.J., Toride, N, and van Genuchten, M.T. (1993), Analytical solutions for non-equilibrium solute transport in three-dimensional porous media. *J. Hydrol.* 151, 193-228.
- Yeh, G.T. (1981), AT123D: Analytical transient one-, two-, and three-dimensional simulation of waste transport in the aquifer system. ORNL-5602. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory.
- Burnell, D.K., Lester, B.H., and Mercer, J.W., (2012), Improvements and corrections to AT123D code. *Groundwater*, 50, 943-953.
- Burnell, D.K., Cooper, J, Xu, J, and Burden, D.S. (2016), Graphical user interface for AT123D-AT solute transport model. *Groundwater*, 54, 313-314.
- Newell, C.J., McLeod, R.K., and Gonzales, J.R. (1996), BIOS,CREEN natural attenuation decision support system, user's manual version 1.3. US, EPA: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development.
- Aziz, C.E., Newell, C.J., Gonzales, J.R., Haas, P.E., Clement, T.P., and Sun, Y. (2000), BIOCHLOR natural attenuation decision support system, user's manual version 1.0. EPA/600/R-00/008. Washington, DC: US EPA Office of Research and Development.
- Domenico, P.A. (1987), An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species. *Journal of Hydrology*, 91, 49-58.
- Neville, C, SS Papadopoulos & Associates, Inc. (1998), ATRANS: Analytical solutions for three-dimensional solute transport from a patch source Version 2. Bethesda, Maryland: SS Papadopoulos & Associates Inc.
- Funk, S.P., Hnatyshin, D, and Alessi, D.S. (2017), HYDROSCAPE: A new versatile software program for evaluating contaminant transport in groundwater. *Software X* 6, 261-266.
- Liao, Z.Y., Suk, H, Liu, C.W., Liang, C.P., and Chen, J.S. (2021), Exact analytical solutions to three-dimensional multispecies advection-dispersion equations coupled with a sequential first-order degradation reaction network. *Advances in Water Resource*, 155, 104018.
- US EPA (Environmental Protection Agency), 1999, Guidelines for carcinogen risk assessment (review draft). Risk Assessment Forum, Washington, DC. NCEA-F-0644. Available from: <http://www.epa.gov/ncea/raf/cancer.htm>.
- IARC (International Agency for Research on Cancer), (1994). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 60. Some industrial chemicals. Lyon, France: IARC; pp. 13-33.



放射性廢棄物地質處置之 地下水流動與傳輸分析

倪春發／國立中央大學應用地質研究所 教授兼任所長

余允辰／國立中央大學應用地質研究所 博士生、行政院原子能委員會核能研究所 副研究員

李奕賢／國立中央大學環境研究中心 副研究員

Vu, Phuong Thanh／國立中央大學應用地質研究所 碩士

放射性廢棄物深地層處置評估時，處置母岩通常包含複雜裂隙系統，處置母岩的地下水流動與污染傳輸分析是評估處置場址安全性的重要步驟之一。本研究藉由蒐集國際上放射性廢棄物地質處置相關的安全原則，概述與地下水流動及污染傳輸評估相關的法令與規範，說明地下水流動及污染傳輸在此議題的重要性。此外，亦透過資料蒐集與評析，簡述放射性廢棄物地質處置的概念，分類介紹國際上使用核能國家選擇處置母岩種類與其特性。本研究最後專注於處置母岩的潛在地下水流動與污染傳輸機制議題，比較不同地下水流動與污染傳輸評估方法在裂隙岩層的應用與限制，並提出放射性廢棄物深地層處置工作的待解決議題與重要挑戰。

關鍵詞：放射性廢棄物、地下水流動、污染傳輸、地質處置、裂隙岩層

The groundwater flow and transport analysis is one of the key processes for safety assessment of the radioactive waste in geological disposal sites, where the complex fracture systems are typically observed. The study collects and reviews international safety disposal regulations and standards, and addresses the essential issues in the guidelines relevant to the groundwater flow and transport behavior. In the study, the concepts of different types of geological disposals were introduced and the consideration of different host rocks in different countries were evaluated to show the site-specific conditions. The study then focuses on the issues of the groundwater flow and transport mechanisms in host rocks. The applications and limitations of simulation models were assessed based on different types of models in quantifying groundwater flow and transport in fractured rocks. Potential issues and challenges had been proposed to address the future tasks in assessing the geological disposal of the spent nuclear fuel.

Keywords: Radioactive waste, groundwater flow, transport, geological disposal, fractured rocks.

前言

核能為目前用以發電的能源之一，其原理為利用核燃料的分裂反應放出大量的熱能，經加熱蒸汽產生器中的水變成水蒸氣後，再推動渦輪機轉動，以帶動發電機切割磁場，進一步將機械能轉變為電能。雖然核能發電的過程中不會產生廢氣，但從核燃料的開採（即鈾擴開採）、濃縮、發電、退出爐心等過程，以及核能電廠產

生之運轉廢棄物，各反應器除役之廢棄物等，皆會產生放射性強度不一的廢棄物；此外，工業界、醫院、學校、研究機構等進行同位素應用亦會產生小量的廢棄物，上述的所有廢棄物統稱為放射性廢棄物^[1]。

放射性廢棄物為污染物的一種，若無適當的防護措施，則可能會對人體及環境造成嚴重危害，必須要謹慎處理、貯存與處置，以滿足相關的法令與技術規

範的要求，確保處置場附近生物的生命安全。為了進行放射性廢棄物處置場地下水汙染之防治與管理，考慮場址附近的水文地質條件，使用數學模式對流場及傳輸行為進行量化分析，評估污染物的傳輸行為及可能的化學反應則非常關鍵。相關數學模式分析方法可大略分為解析法（analytical method）及數值法（numerical method）兩種；其中，解析法多用於水文地質條件簡易、傳輸機制相對單純的案例；當地質條件與特性相對複雜（如裂隙或岩脈等），且包含多種須考慮的污染物傳輸與反應機制時，使用數值法為較合適的手段。

本文首先藉由蒐集國際上放射性廢棄物管理中與地下水污染與防治相關的重要法規，說明地下水流動與傳輸分析在此管理議題中的重要性；接著介紹目前通用的地質處置概念，探討地質處置概念中可能面臨的地下水流動與污染物傳輸問題；此外，亦彙整並簡述國際上重要核能國家選定的潛在處置母岩及其特性，說明潛在污染物的傳輸機制，以及目前不同的污染物傳輸評估方法。本研究將著重數值法之說明以及其應用，並藉由實際的案例運算展示數值法在複雜問題中的處理方法與措施，最終提出放射性廢棄物處置目前待解決的重要議題與挑戰。

國際上放射性廢棄物地質處置之相關規範

國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）在 2006 年訂定核子設施的安全標準，以及其安全相關計畫的基本安全目標、安全原則與安全概念，以作為各會員國奉行之圭臬。其目的是提升核子設施與輻射作業的安全性，以保護人類與環境免於輻射的潛在危害，此一核定版文件稱為基本安全原則（SF-1）^[2]。

針對放射性廢棄物之處置，IAEA 詳細訂定所有類型放射性廢棄物的安全目標以及必須滿足的要求（SSR-5：放射性廢棄物處置）^[3]；並且，特別針對地質處置設施的發展與監管提供指導與建議（SSG-14：放射性廢棄物地質處置設施）^[4]。其中，水文地質被列為重要考慮因子之一，並提到地下水移動機制的評估以及流向與流速的分析，是進行安全評估時的一項重要輸入參數項目。因為污染物最有可能的釋出形式是藉由處置區域的地下水流傳輸^[4]；此外，更針對氣象與水文危害進行特別論述，說明氣象與水文對傳輸的影響（IAEA-SSG-18：核子設施場址評估之氣象與水文危害）^[5]。因此，核能發電國家

在訂定其各自放射性廢棄物處置相關法令與規定時，皆將水文地質條件調查、地下水流動與傳輸模擬議題視為重要的研究項目。

地質處置概念與處置母岩種類及特性

國際上目前公認可行的處置方式為地質處置，此一處置方式較符合道德、環保要求與國際相關法令與規範^[4]。國際上放射性廢棄物多採高、低階兩類放射性廢棄物的分類方式，例如美國、瑞典、西班牙、巴西、保加利亞、捷克等國，不論是何種類型的放射性廢棄物，其整體的處置概念皆以「多重障壁系統」為原則，亦即，將放射性廢棄物與人類生活環境隔離，並使用「工程障壁」及「天然障壁」層層阻絕核種影響人類健康與環境安全（圖 1）^[6]。

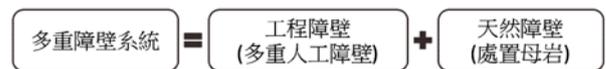


圖 1 多重障壁系統之設計概念

由於高、低放射性廢棄物所含核種半衰期長短與活度大小不同，影響人類環境的嚴重程度及相對應的處置措施也會有所差異。目前低放射性廢棄物採近地表、坑道或海床下處置的設計；其中，工程障壁元件包含盛裝容器、膨潤土混合材料、混凝土處置窖、回填渣料等，而在工程障壁以外則屬天然障壁的範圍（圖 2）^[7]。圖 3 為高放射性廢棄物深地層處置的多重障壁系統概念圖；高放射性廢棄物直接採用深地層處置的方式，亦即，將放射性廢棄物埋藏於深約 300 公尺或更深的穩定地層中，再將高放射性廢棄物盛裝於耐腐蝕、抗圍壓、抗剪力的銅殼廢棄物罐中。在廢棄物罐外層填充透水性極低，核種吸附性佳的緩衝材料，最後再以回填材料填充處置隧道，共同組成工程障壁。在此工程障壁以外則屬天然障壁的範圍，也就是處置區域附近的母岩^[8]。

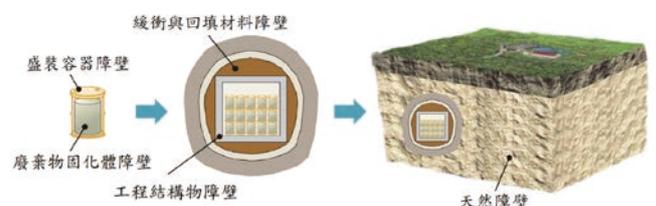


圖 2 低放射性廢棄物處置之多重障壁概念圖^[7]

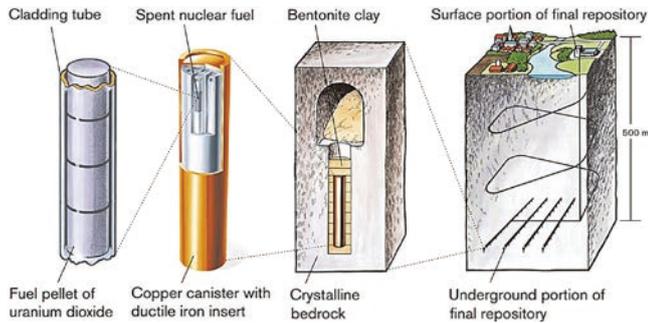


圖 3 高放射性廢棄物處置之多重障壁概念圖^[9]

前述工程障壁系統藉由「隔離」及「圍阻」以避免外部地下水及有害物質的侵入；萬一盛裝低放射性廢棄物的容器或者置放高放射性廢棄物的銅殼廢棄物罐受到損害，則工程障壁系統配合天然障壁同樣可以達到「遲滯」及「吸附」核種的釋出，使核種在到達人類生活圈前，便已衰變至可接受程度。綜上所述，地下水是影響放射性廢棄物是否釋出，以及不幸釋出後的傳輸媒介之一。因此，瞭解地下水如何影響工程障壁系統並造成處置元件的破壞，以及分析潛在核種釋出，遷移至人類生活環境的途徑，為放射性廢棄物潛在地下水污染及防治的重要工作。

工程障壁系統可藉由工程與製造手段生成，但天然障壁則取決於各國的地理位置、地質環境背景、處置策略等決定。目前世界各國在高放射性廢棄物處置母岩的選用可大致分為三類，分別為結晶岩、黏土（或泥）岩及其他類；以下分別簡介這三種母岩的特性與國際上選定作為潛在處置母岩的國家（表 1）：

結晶岩

結晶岩大部分由石英、長石等組成，結構十分緻密，因此透水性甚低，傳輸性質亦不佳，致使污染物在其中傳輸的速度十分緩慢；此外，結晶岩的力學強度高，對於熱、水、力、化等作用也相當穩定，使其成為最多國家首選的潛在處置母岩，使用結晶岩作為處置母岩的國家包括白俄羅斯、中國、捷克、印度、南韓、俄國、西班牙、瑞典及芬蘭等。

雖然結晶岩有低透水性的優點，但是結晶岩中常有長度、寬度不一的裂隙（fracture）分布，這些裂隙的透水性質可能高於岩石基質（matrix）好幾個數量級（order），可成為地下水流的快速通道，若這些大小、尺寸不一的裂隙相互交接成為裂隙系統且延伸至地表，則可能導致污染物有快速傳輸的路徑，此為結晶岩中重要的地下水流動及污染物傳輸所需探究之重要議題。

表 1 處置母岩種類與國家

處置母岩種類	國家
結晶岩	白俄羅斯、中國、捷克、印度、南韓、俄國、西班牙、瑞典及芬蘭等
黏土岩	比利時、保加利亞、法國、匈牙利及瑞士
其他	德國（鹽岩）、美國（凝灰岩）

黏土（或泥）岩

黏土岩大部分由黏土礦物組成，如伊利石、綠泥石及高嶺石等，這些黏土礦物因具有很強的吸附能力，因此能夠大量吸收污染物並有效遲滯其移動；此外，雖然黏土岩中也可能有裂隙的存在，但由於遇水後，岩層內容易自行填塞（自癒）的特性，使其裂隙分布通常較為分散、尺寸也較小，不易相互連通而成為快速地下水流通的裂隙系統。此外，黏土岩的透水性低，地下水在岩層內流動非常緩慢，同樣能夠有效減緩污染物的傳輸速度。

然而，黏土岩的力學強度較低，乾的黏土岩在開挖過程中可能會遇到因力學性質不佳而衍生的工程與營運問題；濕的黏土岩雖然具有自癒能力，但其力學強度將大大減損導致更不利的工程條件，此為黏土岩中重要的議題。國際上選擇黏土岩作為潛在處置母岩的國家則有比利時、保加利亞、法國、匈牙利及瑞士等。

其他

除了結晶岩及黏土岩外，德國將其境內的鹽岩也列為潛在的處置母岩選項之一。鹽岩為蒸發岩（Evaporite）的一種，因原有含礦物質的水體蒸發而形成的化學沉積岩。由於鹽岩同樣具有遇水自癒的能力，雖然力學強度尚可，但同樣在受水侵蝕後會有強度弱化的情事。此外，由於國際上對於鹽岩的研究不如結晶岩與黏土岩豐富，因此對於熱、水、力、化綜合作用下的影響也需要進一步探討。

美國則選擇凝灰岩（tuff）作為潛在處置母岩，凝灰岩為火山碎屑岩系列中的一種，在火山活動過程中，火山碎裂物吹入於大氣中的固化灰份所組成。凝灰岩的力學強度甚高，且岩石基質的透水性低，是被認為具有潛力的處置母岩之一。但其岩體中的裂隙系統也是地下水流動及污染物傳輸的快速通道，且國際上凝灰岩的分布較前述岩類少，對於熱、水、力、化綜合作用下的影響也須進一步探討。

綜上所述，結構緻密的結晶岩具有較高的力學強度，但是裂隙系統是重要的傳輸通道；包含黏土礦物的黏土岩則力學強度較低，會有衍生的工程議題。此兩類處置母岩在國內部分地區都存在，亦為目前國內處置母岩的可能選項。結晶岩為目前國際上較廣泛選用的處置母岩，地下水在其裂隙系統中的流動與污染物傳輸，是非常重要的卻相當複雜的研究課題。因此，本文以結晶岩或所謂的裂隙岩體作為探討對象，說明其常用的污染物傳輸數值方法，並展示相關的分析成果與應用範例。

裂隙岩體中污染物傳輸之數值分析方法

裂隙岩體地下水流及傳輸分析方法可大致區分為離散 (discrete)、連續 (continuum) 與當量網路 (equivalent network) 等模式。地下水流模擬採用的分析模式，通常於汙染物傳輸分析中也同樣依據此模式執行。離散裂隙網路模式，是依據各裂隙幾何參數，建構與現實裂隙岩體相近之離散裂隙網路，假設裂隙岩體是透過多組裂隙面所分割的許多小岩塊構成，而裂隙岩層中的地下水流動與傳輸，則透過裂隙面流動，經由計算裂隙面交錯網路之水流與污染傳輸，進行量化評估。連續模式則將裂隙岩層視為連續孔隙介質 (porous media) 型態，又可分為連續裂隙面以及等效孔隙介質模式兩種。連續裂隙面模式將裂隙網路轉化為多組無限長之裂隙面，組成連通的裂隙網路，大多研究假設此模式為連續正交裂隙面模式。然而，等效孔隙介質模式則是選用代表性體積 REV (representative elementary volume)，在 REV 內視為均勻等效孔隙介質，此一選定的 REV 可以是多個異質性孔隙介質岩塊所組成的裂隙岩體。此類模式常使用於較大尺度模擬範圍，或是裂隙頻率較高之裂隙岩體。當裂隙幾何參數無法有效量測，或是產生極大量且複雜裂隙網路時，可採用此模式解決相關問題。當量網路模式是將原始之裂隙網路採用統計之方式，以交接節點網路或是當量管流概念，獲得空間中線狀的一維管流網路。管流網路中的流量類比於裂隙流量，管徑則類比於裂隙滲透率或開口寬，此一架構在電腦計算能力不高的時代，大大節省電腦計算資源。無論採用何種模式進行裂隙岩體的地下水流模擬，都須仰賴求解地下水水流控制方程式獲得，三維地下水水流控制方程式是依據質量守恆的概念，配合達西定律獲得，有以下形式：

$$\nabla \cdot [K\nabla h] + Q = 0 \quad (1)$$

其中， K 為裂隙的水力傳導係數 [L/T]， h 為總水頭 (L)， Q 為源 / 匯項 [1/T]。而邊界條件可描述如下：

$$h|_{\Gamma_D} = h_D \text{ 與 } [K\nabla h] \cdot n|_{\Gamma_N} = q_N \quad (2)$$

其中， h_D 為定水頭邊界條件 (Dirichlet boundary, Γ_D)， q_N 為定流率邊界條件 (Neumann boundary)， Γ_N 為垂直於邊界的單位向量。起始條件則描述如下：

$$h(x, y, z) = f(x, y, z) \quad (3)$$

其中， $f(x, y, z)$ 為已知的水頭值 [L]。

污染物在裂隙岩體中的傳輸分析依據地下水流場進行，國際上目前主要有兩種模擬污染物在裂隙岩體中傳輸及其濃度的概念，第一種是使用流體質點追蹤 (particle tracking) 方法，先計算流動路徑，為節省計算資源，污染物傳輸行為就以移動路徑進行一維傳輸分析，此一傳輸分析可再配合化學反應模組計算複雜污染反應濃度 [10-17]。

另外一種模擬概念則是直接求解裂隙岩體流場中的移流延散方程式 (advection dispersion equation, ADE)，配合適當的化學反應方程式，求解污染團在裂隙岩體中的傳輸行為 [10,18-22]。相同地，無論採用何種概念進行裂隙岩體的傳輸模擬，都須仰賴求解傳輸方程式獲得，三維地下水污染傳輸控制方程式中，同樣是依據質量守恆的概念，但是依據費克定律 (Fick's law) 獲得，污染物的遷移控制方程式有以下形式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v\nabla C + \nabla \cdot [D_e \nabla C] + Q_c + R_c \quad (4)$$

其中， C 為液相體積容積濃度 [M/L³]， v 為滲流速度 (seepage velocity) [L/T]， D_e 為延散係數 (dispersion coefficient) [L²/T]， Q_c 為體積容積濃度之源 / 匯項 [M/L³/T]； R_c 為化學反應項 [M/L³/T]。而邊界條件可描述如下：

$$C|_{\Gamma_D} = C_D \text{ 與 } [D_e \nabla C] \cdot n|_{\Gamma_N} = q_C \quad (5)$$

其中， C_D 為定濃度邊界條件， q_C 為定濃度梯度邊界條件。起始條件則描述如下：

$$C(x, y, z) = C_0 \quad (6)$$

其中， C_0 為初始濃度 [M/L³]。

不同分析概念進行裂隙岩體的傳輸模擬，可以是如上式的完整三維地下水傳輸方程式，或者簡化為一維的傳輸方程式，進行流體質點路徑上的傳輸分析。

使用質點追蹤可快速獲得污染物在三維裂隙岩體中複雜的傳輸行為，由於較簡化，計算效率高，故可以執行多組參數敏感度或不確定性分析，藉以瞭解處置區傳輸特性的影響。質點追蹤模擬係假設溶質為不與地下水及母岩反應之粒子，僅跟隨地下水流場進行移動，其控制方程式可表示為：

$$\frac{dX}{dt} = v(X, t) \quad (7)$$

其中， X 為空間中之位置 [L]， t 為時間 [T]。當流場已知的情況下，則可以使用簡易數值方法求解一階偏微分方程式，如簡易的尤拉 (Euler) 方法所描述的一階偏微分方程式如下：

$$X(t + \Delta t) = X(t) + v\Delta t \quad (8)$$

其中， Δt 為特定的時間步階 (time step) [T]。藉由式 (8) 可記錄不同時間步階下質點的位置，再將所有時間步階下質點的線段及傳輸時間加總，即可獲得質點的軌跡總長以及總傳輸時間，並可換算特定時間步階的速度。由於計算方式簡易且快速，質點追蹤係目前溶質傳輸研究中非常普遍的方法之一。

當獲得三維空間的質點軌跡後，即可使用一維的概念執行化學反應計算，最終計算不同傳輸路徑上，流體質點分段的不同化合物的濃度。一維的污染物移流延散反應偏微分控制方程式 (advection reaction dispersion, ARD) 可表示為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial q_c}{\partial t} \quad (9)$$

其中， $v \frac{\partial C}{\partial x}$ 表示污染物的移流作用， $D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ 表示延散作用， $\frac{\partial q_c}{\partial t}$ 為污染物受反應作用的濃度變化。上式 (9) 亦為 PHREEQC 模式中使用的一維分析控制方程式。

測試案例與應用

限於篇幅，本文僅展示不同傳輸分析概念，在裂隙岩層中所獲得的傳輸分析結果。因為裂隙是主要關注分析區域，在結果的呈現上，將以裂隙上的傳輸模擬結果，作為討論依據。

流體質點追蹤法結合化學反應模式分析

為了模擬污染物在複雜裂隙岩體中的傳輸與反應行為，Vu *et al.* [23] 使用 FracMan 軟體作為水流模擬工具，並生成一複雜的三維裂隙系統進行穩態地下水流

場分析，並使用質點追蹤模組 MAFIC 模擬污染物的傳輸路徑，獲得污染物的傳輸路徑與軌跡。接著使用 PHREEQC 進行污染物的反應模擬，此法可將三維的傳輸軌跡降維度成為一維的線段，分析裂隙岩層中複雜的污染物隨時間反應與遷移情況。

當獲得三維空間中的質點傳輸路徑後，即可使用化學反應模組如 PHREEQC 進行後續的化學反應計算。PHREEQC 是常見用於執行化學反應分析的程式之一，其由美國地質調查所 (U.S. Geological Survey) 開發的免費軟體，在國際上的化學反應模擬研究中受到廣泛的應用並獲得良好的結果。PHREEQC 可計算物質形成種類與礦物的溶解、飽和指數，並可計算一維條件下物質的傳輸與反應，最終計算不同傳輸路徑上的不同化合物的濃度。

圖 4 為流體質點追蹤法結合化學反應模式分析案例之概念模式與裂隙網路。在此假想測試例中，分析案例的模擬範圍 $5,000 \times 5,000 \times 2,000$ m，假想例處置場位於模擬區域中央 $500 \times 500 \times 500$ m (圖 4(a))。模擬區域的地下水由左右兩側定水頭邊界主控，由左側的高水頭邊界 ($h = 1,000$ m)，流向右側低水頭邊界 ($h = 950$ m)。流體質點釋放位置位於處置場中央。圖 4(b) 為 FracMan 生成之全模擬區域裂隙網路分布。在此案例中，裂隙網路模式僅分析處置場的範圍，而在處置場之外，採用升尺度後的連續模式分析；亦即，以網格尺寸作為 REV，將裂隙分布轉換成網格上的等效孔隙介質參數如水力傳導係數。

圖 5 為分析案例之水流流場分析結果與質點傳輸路徑圖。圖 5(a) 為模擬範圍內三維的水流流場分布。此一結果顯示，雖然邊界條件為定水頭設定，整體水流趨勢是由左側往右側流動，但裂隙分布使得流場具高度非均

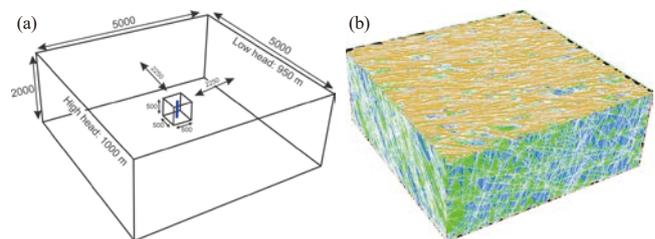


圖 4 流體質點追蹤法結合化學反應模式分析案例之概念模式與裂隙網路：(a) 分析案例之模擬範圍 $5,000 \times 5,000 \times 2,000$ m，假想例處置場位於模擬區域中央 $500 \times 500 \times 500$ m，區域地下水由左側高水頭邊界 ($h = 1,000$ m)，流向右側低水頭邊界 ($h = 950$ m)，流體質點釋放位置位於處置場中央；(b) 由 FracMan 生成之全模擬區域裂隙網路分布。此案例中，裂隙網路模式僅分析處置場址的範圍，處置場址之外，採用裂隙網路升尺度後的連續模式分析。亦即，以網格尺寸為 REV，將裂隙分布轉換成網格上的等效孔隙介質參數。

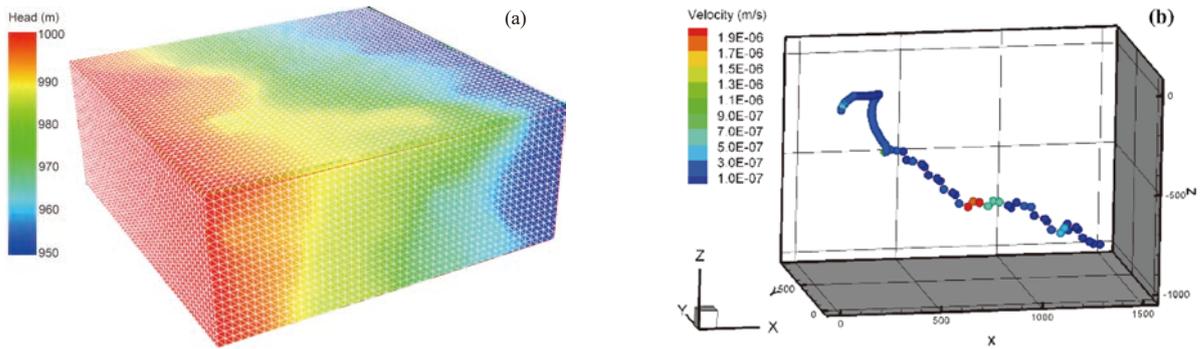


圖 5 分析案例之水流流場與質點傳輸路徑：(a) 模擬範圍 5,000 × 5,000 × 2,000 m 之水流流場分布，水流由左側往右側流動。雖然邊界條件為定水頭設定，但裂隙分布使得流場具高度非均勻性；(b) 流體質點路徑與路徑上的滲流速度分布，流體質點釋放位置位於處置場中央，質點流動由處置場往下游邊界，直至抵達邊界。此一流動路徑與路徑上各節點的速度為 PHREEQC 模式分析時，流場的輸入參數。

勻性，此一結果也使得流體質點的移動路徑與路徑上的速度變化極大（圖 5(b)）。此一流動路徑與路徑上各節點的速度即為 PHREEQC 模式分析時，流場的輸入參數。圖 6 說明了測試例中，選擇的核種傳輸反應鏈。此測試例使用 PHREEQC 分析模式，分析流體質點路徑上（圖 5(b)），U234 衰變至 Rn222 的歷程（圖 7）。透過流體質點追蹤法結合化學反應模式分析，可以有效提升複雜三維裂隙網路分析效率，由於模擬時間與傳輸距離長，使用三維模式計算量大，將難以討論反應傳輸機制。此測試例中，利用流體質點路徑，將反應傳輸分析問題降至一維，可有效探討反應傳輸機制。

使用 ADE 求解污染物傳輸行為與濃度

為了直接求解污染物在三維複雜裂隙系統中的傳輸與分布，Lee *et al.* [24] 隨機生成裂隙系統並進行連通

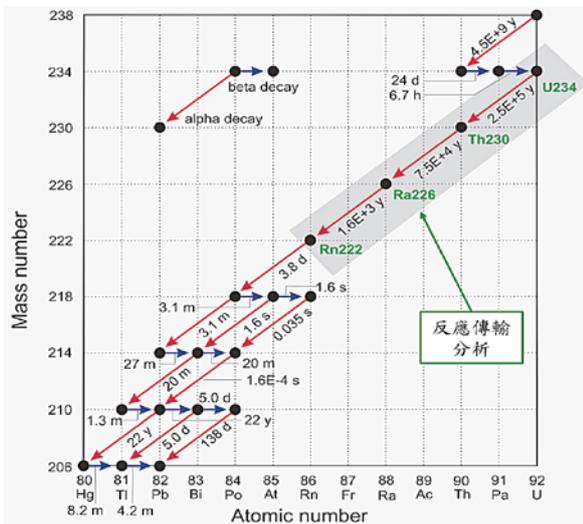


圖 6 測試案例選擇分析的核種反應鏈，反應傳輸專注於 U234 至 Rn222 的衰變（圖修改自 <https://www.pinterest.com/pin/20618110767746566/?nic=1a>）

性分析，將獨立或不具有導水能力的裂隙移除後，將剩下來的裂隙系統稱為有效離散裂隙網路（effective DFN, DFN_e），並使用自行發展的網格生成模式進行三維有限元素法的計算網格建構，並求解地下水的流動以及保守性污染物的傳輸。

圖 8 為 DFN_e 的裂隙分布及地下水流場與污染物傳輸之模擬結果。圖 8(a) 為三維 DFN_e 及其水頭分布。由於裂隙的大小、位態在空間中具高度變異性，而裂隙中使用非常精細的有限元素建構計算網格，如此才可獲得準確的水頭分布。圖 8(b) 則是不同時間下污染物的傳輸行為與濃度分布，由於裂隙系統錯綜複雜，污染物的傳輸行為及濃度分布亦呈現高度變異。此外，即便同一片裂隙亦具有不同濃度分布，顯示三維裂隙岩體之傳輸模擬深具挑戰與困難性。

待解決議題與挑戰

三維複雜裂隙岩體中地下水流動與污染物傳輸模擬尚有諸多尚未解決的議題以及挑戰，而放射性廢棄物處置亦有許多面向的困難需要克服，以下分別以調查面、分析技術面、管理面及溝通面進行說明並提供可能的建議作法：

調查面

在放射性廢棄物的處置概念中，地下水的流動特性除了影響膨潤土混合材料 / 緩衝材料的侵蝕，以及盛裝容器 / 廢棄物罐的腐蝕之外，更是核種在地層中遷移與分布的重要因素。為了充分瞭解深層地下水的運移，以及膨潤土混合材料 / 緩衝材料侵蝕、盛裝容器 / 廢棄物罐腐蝕特性，須獲得核種於安全評估計算所需

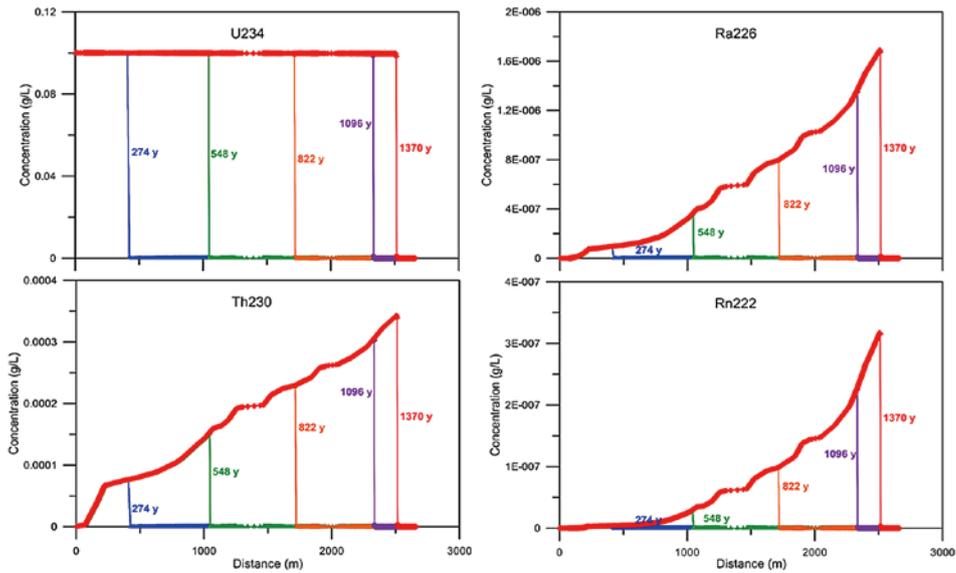


圖 7 沿流體質點路徑上，核種反應傳輸濃度分布。

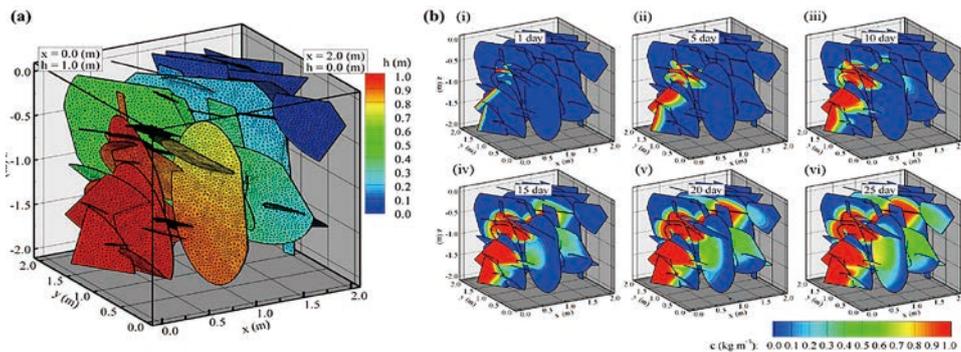


圖 8 DFNe 的裂隙分布及地下水流場與污染物傳輸之模擬結果：(a) 裂隙分布、有限元素網格生成與地下水模擬結果。(b) 不同時間下之污染物傳輸與濃度分布。(修改自 Lee *et al.* [24])

之地下水流相關參數。在確定處置母岩的水文地質特性及瞭解物理性質後，需建構符合現地狀況之水文地質概念模式，進行地下水模擬等一系列重要任務 [25]。

影響地下水流的地質特性稱為水文地質特性，可藉由現地調查、現地試驗、室內實驗等方法獲得地質材料與水文地質有關的參數（如岩石的水力傳導係數、孔隙率等）。配合集水區、分水嶺、河流、湖泊等自然條件進行模擬區域劃分或邊界條件設定，即可組成具現地代表性的水文地質概念模式，後續模擬者皆可依據此水文地質概念模式進行地下水流場及污染物傳輸模擬（圖 9）。

綜上所述，正確的模擬結果仰賴具代表性的水文地質概念模式，而具代表性的水文地質概念模式則依靠詳細的特性調查，在經濟、人力及經費有限的情況下，合理的分配各項調查所需的資源，讓各調查項目都能獲得具代表性的結果，以及持續精進調查與分析技術，能夠更有效且更準確地獲得並分析調查數據，是調查面所需精進的方向。

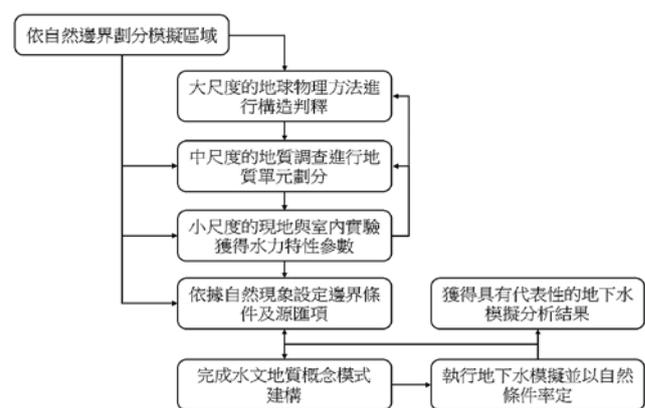


圖 9 水文地質概念模式建構及地下水模擬分析流程

分析技術面

當獲得代表性的水文地質概念模式後，亦須藉由數值分析方法模擬地下水流動及污染物的分布。如何獲得三維裂隙岩體中污染物的傳輸情形一直是這個領域數十年來面臨的挑戰與進步的目標。不同的研究學者與團隊

亦使用日益精進的方法、概念等，模擬更複雜、尺度更大的地下水流動與污染物傳輸行為。本文僅簡介了兩種最常見的求解概念，而此兩種方法各有其在分析面可精進之處，如質點追蹤配合化學反應模組具有將三維傳輸資訊降為一維線段的簡化行為，且質點追蹤與化學反應之計算應朝全耦合發展，以著實反應化學作用對於水流與傳輸的影響，綜合進行污染物傳輸與濃度分布計算。直接使用 ADE 求解三維複雜裂隙系統的地下水流動與傳輸現象已經是一大突破，若能再增加化學反應機制直接於傳輸過程中求解，則更可以精準地獲得污染物的傳輸行為同時判斷化學反應後各物種的濃度分布。

管理面

地下水污染與防治一直是污染物整治與管理中非常重要的議題，即便是目前最常見的含氯有機溶劑污染與防治，國際上就已發展許多方法與手段進行污染物傳輸模擬並協助整治策略擬定；對於放射性廢棄物處置而言，地下水污染與防治更涉及諸多研究領域與科學背景，包括工程、地質、構造、調查、輻射防護、氣候、熱、水、力、化作用等，皆須要廣泛的納入並通盤考量，並非少數機構、單位或研究學者即可勝任。此一跨領域工作更需要跨領域的溝通與合作，不同背景所關注的研究重點不同，甚至溝通的語言也不一致。因此，管理者如何用更高的角度、更廣的視野看待這個議題，以及如何規劃各研究領域的重點項目，同時安排橫向的溝通、聯繫與合作，是非常重要的且困難的挑戰。

溝通面

地下水污染與防治一直是人類關注的重點議題之一，因為地下水是非常重要的資源，且不同的污染會對於人類與環境造成不同程度的危害，必須審慎看待。除了積極的研究與防治外，民眾溝通也是非常重要的一環，藉由淺白的方式向民眾展示分析結果，成果轉譯並持續溝通、專注聆聽以了解需求與憂慮，是地下水污染與防治工作中不可或缺的一環。然而，此一工作仍須跨域合作，才能達成。

結論

放射性廢棄物處置為國際上重要的地下水污染、防治與管理議題之一。由於污染物可能會對人體及環境造成嚴重危害，必須審慎處理、貯存與處置，以滿足相關的法令與技術規範的要求。本文藉由蒐集國際上重要的

法令與規範，論述地下水及水文地質在此議題中的重要性，並蒐集與彙整國際上各國處置母岩與特性後，選擇最多潛在處置母岩類型的結晶岩作為技術探討對象，簡述兩種最常使用的污染物傳輸模擬概念，並展示相對應的結果，獲得重要結論如下：

IAEA 針對地質處置設施的發展與監管控制提供指導與建議；其中，水文地質被列為重要考慮因子之一，且地下水移動機制的評估以及流向與流速的分析，是進行安全評估時的一項重要輸入項目，因為污染物最有可能的釋出形式是藉由地下水流傳輸。

國際上各國的潛在處置母岩以結晶岩最多、黏土岩次之、其他岩類最少。而結晶岩為裂隙岩體的一種，雖其岩石基質具有低透水之特點，但裂隙可成為地下水流動及污染物傳輸的快速通道。因此，研究學者皆朝發展更精細、準確的方法，模擬三維裂隙岩體中的地下水流動及污染物傳輸。

目前常使用質點追蹤配合化學反應模組共同計算，或者直接求解 ADE 獲得污染物傳輸行為與濃度，前者有其運算快速且方法簡易的優點，後者則是可以較精準獲得污染物的濃度分布，本文分別展示此兩種概念所獲得之分析與應用。

地下水污染與防治尚有調查面、分析技術面、管理面及溝通面等不同面向的議題需要解決。三維複雜裂隙岩體中，地下水流動與污染物傳輸模擬亦尚有諸多挑戰，如何同步進行技術面的精進，同時在調查、溝通及管理面中成長，是地下水污染與防治議題之重要目標。

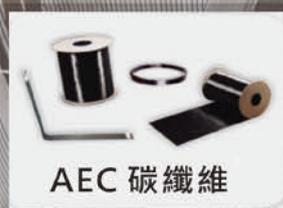
參考文獻

1. 台灣電力公司 (2021), <https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=203&cid=148&cchk=f8477804-f7b0-49c9-8ec6-3a1ba86ff2df>。
2. IAEA, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, Internal Atomic Energy Agency, Vienna (2006).
3. IAEA (2011a), Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, Internal Atomic Energy Agency, Vienna.
4. IAEA (2011b), Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, Internal Atomic Energy Agency, Vienna.
5. IAEA (2011c), Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-18, IAEA, Vienna.
6. 行政院原子能委員會 (2021), https://www.aec.gov.tw/%E4%BE%BF%E6%B0%91%E5%B0%88%E5%8D%80/%E6%B0%91%E7%9C%BE%E5%B8%B8%E8%A6%8B%E5%95%8F%E7%AD%94%E9%9B%86/%E6%94%BE%E5%B0%84%E6%80%A7%E7%89%A9%E6%96%99%E7%AE%A1%E7%90%86--220_237_2275.html。
7. 台電電力公司 (2017), 低放射性廢棄物最終處置技術評估報告 (精簡版) (定稿本), LLWD1-SC-2016-05-V05, 核能後端營運處。
8. 台灣電力公司 (2019), 我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告, SNFD2017 報告, TPC-SNFD2017-V1, 用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段。

9. SKB (2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
10. Hyman, J.D., Karra, S., Makedonska, N., Gable, C.W., Painter, S.L., and Viswanathan, H.S. dfnWorks, (2015), A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport. *Comput. Geosci.*, 84, 10-19.
11. Makedonska, N., Painter, S.L., Bui, Q.M., Gable, C.W., and Karra, S. (2015), Particle tracking approach for transport in three-dimensional discrete fracture networks. *Comput. Geosci.*, 19, 1123-1137.
12. Stalgorova, E. and Babadagli, T. (2015), Modified Random Walk-Particle Tracking method to model early time behavior of EOR and sequestration of CO₂ in naturally fractured oil reservoirs. *J. Pet. Sci. Eng.*, 127, 65-81.
13. Wang, L., Cardenas, M.B., Slotke, D.T., Ketcham, R.A., Sharp, and J.M. (2015), Modification of the Local Cubic Law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness. *Water Resour. Res.*, 51, 2064-2080.
14. Painter, S., Cvetkovic, V., Mancillas, J., and Pensado, O. (2008), Time domain particle tracking methods for simulating transport with retention and first-order transformation. *Water Resour. Res.*, 44.
15. Xu, T. and Pruess, K. (2001), Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks: 1. Methodology. *Am. J. Sci.*, 301, 16-33.
16. Steefel, C.I., Appelo, C.A.J., Arora, B., Jacques, D., Kalbacher, T., Kolditz, O., Lagneau, V., Lichtner, P.C., Mayer, K.U., and Meeussen, J.C.L. (2015), Reactive transport codes for subsurface environmental simulation. *Comput. Geosci.*, 19, 445-478.
17. Deng, H., Dai, Z., Wolfsberg, A., Lu, Z., Ye, M., and Reimus, P. (2010), Upscaling of reactive mass transport in fractured rocks with multimodal reactive mineral facies. *Water Resour. Res.*, 46.
18. Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., and Margritta, R. (1990a), Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation: 2. The transport model, *Water Resour. Res.*, 26, 491-500.
19. Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B., and Peaudecerf, P. (1990b), Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model, *Water Resour. Res.*, 26, 479-489.
20. de Dreuzy, J.-R., Pichot, G., Poirriez, B., and Erhel, J. (2013), Synthetic benchmark for modeling flow in 3-D fractured media, *Comput. Geosci.*, 50, 59-71.
21. Liu, L. and Neretnieks, I. (2006), Analysis of fluid flow and solute transport through a single fracture with variable apertures intersecting a canister: Comparison between fractal and Gaussian fractures, *Phys. Chem. Earth*, 31, 634-639.
22. Lee, I.H. and Ni, C.-F. (2015), Fracture-based modeling of complex flow and CO₂ migration in three-dimensional fractured rocks, *Comput. Geosci.*, 81, 64-77.
23. Vu, P.T., Ni, C.-F., Li, W.-C., Lee, I.-H. and Lin, C.-P. (2019), Particle-Based Workflow for Modeling Uncertainty of Reactive Transport in 3D Discrete Fracture Networks. *Water*, 11, 2502.
24. Lee, I.H., Ni, C.F., Lin, F.P., Lin, C.P., and Ke, C.C. (2019), Stochastic modeling of flow and conservative transport in three-dimensional discrete fracture networks. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 19-34.
25. JNC (2000), H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, 2nd Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, JNC Technical Report TN1410 2000-001, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai-mura, Japan. 

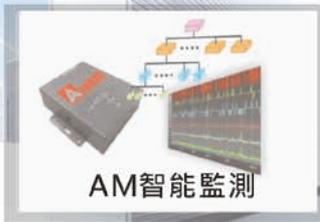


安得固



建築修復結構補強

STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM



免費服務電話
0800-009-666

台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw



曾文南化聯通管統包工程A1標

消能豎井(Baffle-drop structure)

結構

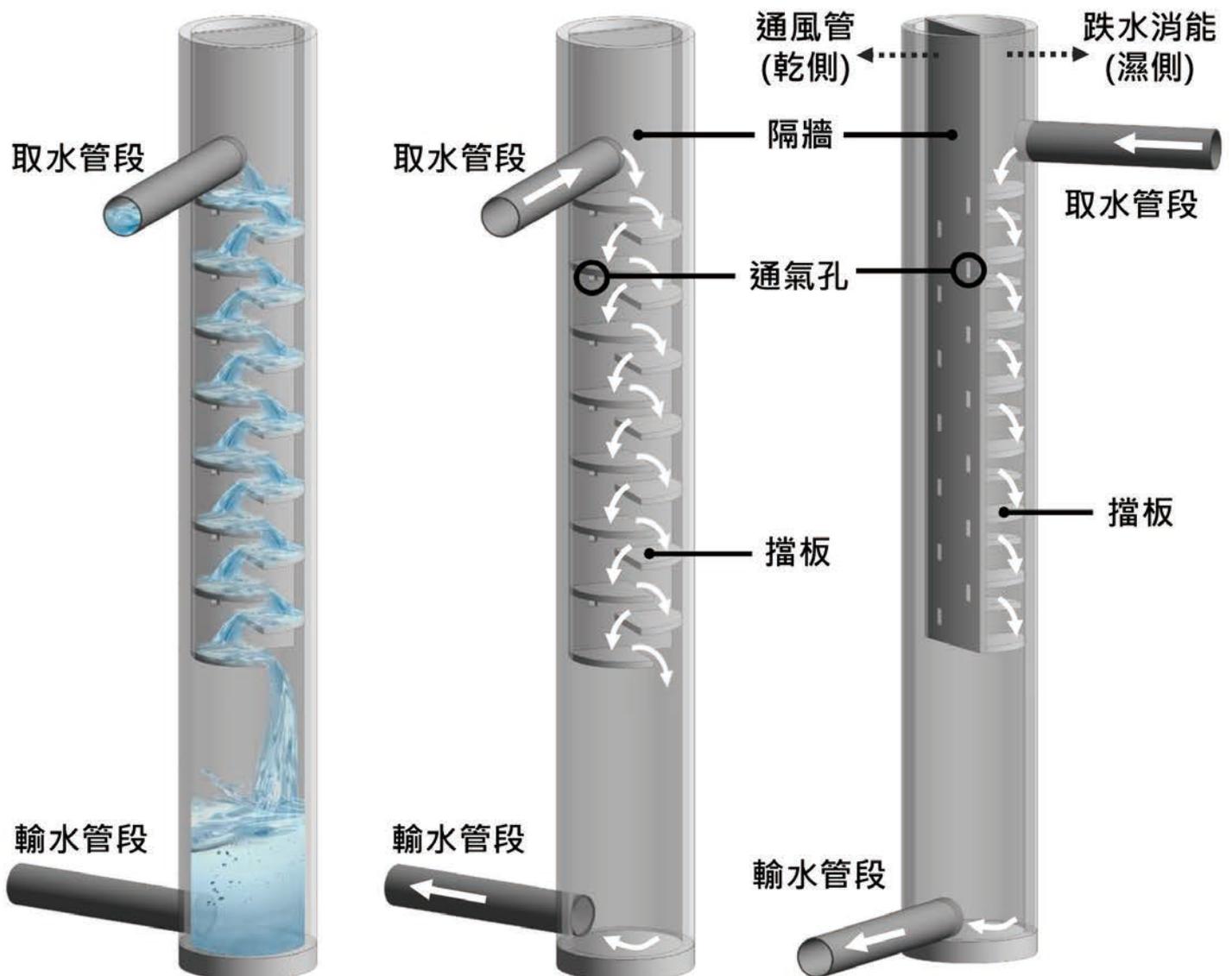
內徑7.6m，淨深62.15m。井內分乾、濕兩側，乾側為通風；濕側15階擋板為跌水消能。

功能

自動調節水頭能量、減少水中夾氣量、抑制穴蝕。

優點

無需人為操作，自動調整水位。





茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3期9折， 4期以上8.5折	

刊登月份：

49.1 49.2 49.3 49.4 49.5 49.6 共 次
(2月) (4月) (6月) (8月) (10月) (12月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱：
商號 (請蓋公司印)

負責人：

地址：

廣告聯絡人：

電話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款帳號	0 0 0 3 0 6 7 8	金額 新台幣 (小寫)	仟	萬	拾	萬	仟	佰	拾	元
------	-----------------	-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

繳納會費

- 常年會員年費 1,200元
 初級會員年費 300元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

- 國內·個人會員 新台幣300元
 國內·非會員及機關團體 新台幣1,800元
自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份

訂閱中國土木工程學刊，一年八期

- 國內·個人會員 新台幣1,600元
 國內·非會員及機關團體 新台幣3,600元
 國外·個人 美金80元
 國外·機關團體 美金200元
自第__卷第__期起__年期學刊__份

收款戶名	社團法人中國土木工程學會	
姓名	寄款人	
地址	主管：	
電話	經辦局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

- ◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓名		款別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費， <u>入會費一人僅需繳交一次</u>	繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
會員證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 國內・個人會員 新台幣 300元 <input type="checkbox"/> 國內・非會員及機關團體 新台幣 1,800元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
身分證號碼			訂閱中國土木水利工程學刊，一年八期 <input type="checkbox"/> 國內・個人會員 新台幣 1,600元 <input type="checkbox"/> 國內・非會員及機關團體 新台幣 3,600元 <input type="checkbox"/> 國外・個人 美金 80元 <input type="checkbox"/> 國外・機關團體 美金 200元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
卡別	<input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB		白天聯絡電話
信用卡卡號			通訊地址
信用卡末三碼			
信用卡有效期限	(月/年)		
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)



光纖光柵感測技術領導者



捷運隧道施工期間之地層下陷監測-
分層孔隙水壓計及分層沉陷計實際安裝應用：
優勢：
1.感測器可多個串接
2.減少鑽井數量
3.抗水抗雷擊



水庫防淤設施監測-象鼻鋼管安裝側傾儀、
閘門支撐結構安裝速度計實際應用：
優勢：
1.抗水抗雷擊
2.安裝深度可達水下40M
3.抗電磁波干擾



軌道交通路堤改善工程之低壓灌漿期間軌道板
不均勻沉陷監測-差異沉陷計實際安裝應用：
優勢：
1.高精度(解析度：0.05mm；精度 \leq 0.5mm)
2.最佳化之溫度效應補償校正
3.抗電磁波干擾



新加坡隧道環片監測-
埋入式應變計實際安裝應用：
優勢：
1.耐高溫養護
2.最佳化溫度補償
3.耐用長達15年以上



預力防護網工程監測-岩柱安裝應變計實際安
裝應用：
優勢：
1.一體化的岩柱鋼筋應變計
2.抗潮、抗雷擊
3.最佳化之溫度效應補償校正

本公司產品：

加速度計、差異沉陷計、分層孔隙水壓計、
側傾儀、沉陷計、應變計、地中傾斜管





華揚室內裝修設計股份有限公司
HUA YANG INTERIOR DESIGN CO.,LTD

14F-1, No.8, 1 Sec, keelung Rd 10566 Taipei Taiwan
E-mail. huayang@hyid.com.tw
Tel.+886 2 2765 1079

室內裝修工程
Interior Decoration Projects

景觀規劃設計
Landscape Planning and Design

● 百貨商場
Department Stores

● 醫院、銀行
Hospitals, Banks

● 休閒飯店
Resort Hotels

● 博物館
Museums

● 劇場、展場
Theaters, Exhibitions

● 辦公室、住宅
Offices, Residences

● 休閒飯店
Resort Hotels

● 集合住宅
Revenue Houses

● 醫院戶外
Outdoor Hospital Areas