

中華民國一〇七年八月・第四十五卷第四期

# 土木水利

*The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*

August  
2018



ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 45, No. 4

社團法人  
中國土木工程學會 發行  
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

土木工程與  
城市文明

木鐸集

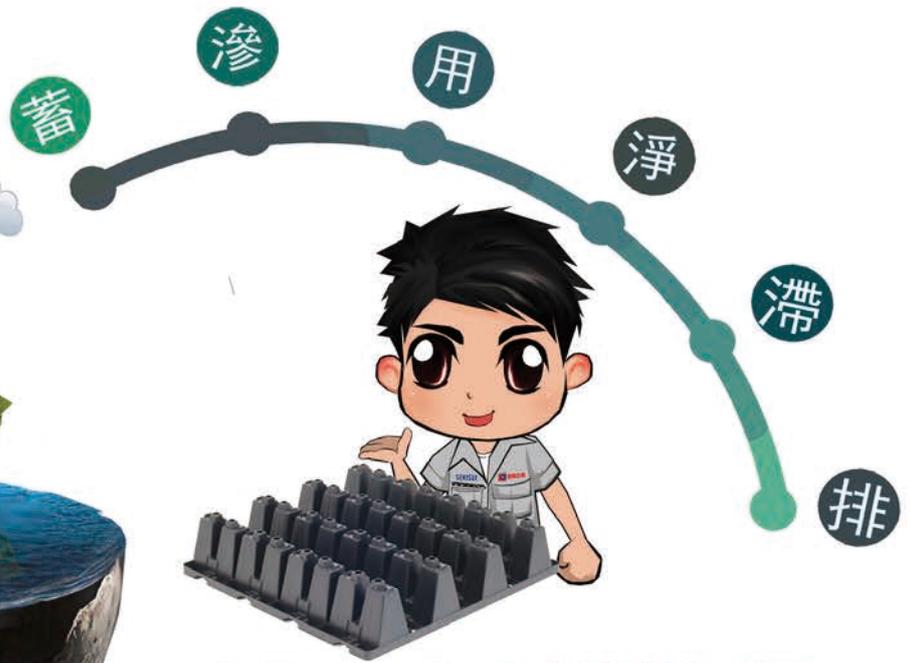
專輯

都市水資源  
永續利用

鹽下微言

工程市場「僧少粥多」  
基礎建設維修時代來臨

9 770253 380006



# CROSSWAVE

## 基地保水滲透資材



台中南屯文山水資源施工前



台中南屯文山水資源施工後

- + 95%儲留率
- + 不用扣件及五金零件施工
- + 快速施工
- + 高承載重量
- + 原廠正版進口

+ 完整的施工縮時攝影



- ✓ 高效率滯洪功能
- ✓ 解決熱島效應
- ✓ 前瞻計畫最佳治水材
- ✓ 綠建築最佳儲保水材料



連積企業有限公司

TEL: 02-8660-7768

# 土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



台北市區，缺乏開放空間，而且極為醜陋（洪如江攝）

## 土木水利半月集

### 先進工程

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

### 永續發展

- 永續發展
- 水資源工程
- 海洋工程
- 景觀工程
- 能源工程
- 工程美化
- 國土發展
- 大地工程
- 環境工程
- 綠營建工程
- 天然災害防治工程
- 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
- 土木史
- 大學教育
- 學生活動
- 終身學習
- 工程教育認證
- 技專院校

### 學會活動

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

### 出版活動

- 中國土木工程學刊
- 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

發行人：王炤烈

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二十三屆理監事

（依姓氏筆劃排序）

理事長：王炤烈

常務理事：陳仲賢 楊偉甫 歐來成 歐善惠

理事：朱旭 余信遠 吳瑞賢 宋裕祺 沈景鵬 林呈 林其璋

胡宣德 胡湘麟 高宗正 張荻薇 許泰文 陳彥伯 黃炎龍

廖學瑞 劉沈榮 劉恒昌 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：李元唐 李建中 周功台 陳清泉 楊永斌 薛春明

## 中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
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

## 本輯集：土木與文明

📖 土木工程與城市文明

洪如江 4

## 「都市水資源永續利用」專輯 (客座主編：駱尚廉特聘教授)

- 📖 專輯引言：都市水資源永續利用 駱尚廉 16
- 📖 都市水資源消耗評估指標 — 都市水足跡 莊雯凱／閻蓓德 18
- 📖 低衝擊開發技術之綠色基礎設施 — 灰燼添加於透水鋪面之應用 羅方辰／駱尚廉 23
- 📖 生物滲濾系統應用於水資源再生之病原菌控制 羅永修／童心欣 29
- 📖 應用過硫酸鹽於整治土壤及地下水有機污染物之發展與挑戰 卓儀秦／林逸彬 34
- 📖 台灣水體中抗腫瘤藥物之流佈、自然光分解及環境風險 林彥姍／林郁真 38
- 📖 污水能資源回收 — 微生物燃料電池技術之應用 張朝欽／于昌平 43
- 📖 雨水花園 — 兼「容」並「蓄」的景觀型態 楊文綺／張育森／張育傑 48

## 橋梁全生命週期管理研討會 ~ Morandi 橋崩塌帶來的省思 ~

本研討會從橋梁全生命週期管理的角度出發，首先以 Morandi 橋梁倒塌的可能因素進行初探，說明國內橋梁維護與補強現況、檢討臺灣預力混凝土橋梁之安全維護管理，以及橋梁監測與健康診斷技術的開發現況等課題。除此之外，國內重大工程常採用國際廠商共同承攬的模式，其分工與介面整合影響工程成敗至鉅。近年來重大工程常有發包不順的案例，顯示國內工程環境迥異於以往，以上均為全生命週期管理的重要課題，值得探討。

主辦單位：社團法人中國土木工程學會  
 協辦單位：交通部高速公路局、國家地震工程研究中心、台灣世曦工程顧問公司、林同棧工程顧問公司

時間：107年9月12日(三)下午13:20-17:20  
 地點：【台大應力所國際會議廳】

費用：會員 400 元  
 非會員 800 元

報名：一律網路報名  
<http://re.piee.pw/9WPVT>



網路報名連結

時間	議程	演講人	主持人
13:00-13:20	報到		
13:20-13:30	引言及開幕致詞 <b>Morandi 橋崩塌帶來的省思</b>	王昭烈理事長 中國土木工程學會	王昭烈 理事長 中國土木工程學會
13:30-14:00	<b>義大利莫蘭迪橋 2018年8月14日崩塌事件</b>	彭康瑜總工程師 林同棧工程顧問公司	
14:00-14:30	<b>我國高速公路橋梁維護與補強</b>	林炳松副總工程師 交通部高速公路局	
14:30-15:00	<b>從生命週期考量看臺灣長跨預力 混凝土橋梁安全維護管理</b>	陳振川特聘教授 國立臺灣大學	
15:00-15:20	中場休息 (20 min)		
15:20-15:50	<b>橋梁監測與結構健康診斷</b>	宋裕祺教授 國震中心橋梁組組長 台北科技大學工程學院院長	陳國隆 總工程師 交通部 高速公路局
15:50-16:20	<b>國際合約的分工與介面整合</b>	袁寧經理 中鼎工程公司法務部	
16:20-16:50	<b>國內面臨的工程環境與施工考驗</b>	高銘堂董事長 工程會採購申訴審議委員	
16:50-17:20	綜合討論	宋裕祺教授 國立臺北科技大學工程學院院長	

聯絡人：社團法人中國土木工程學會 黃于燦小姐 電話：(02) 2392-6325 #22

## 工程報導

- 📖 HBF、NJRA、SEED、T&Y等四種土壤液化分析方法應用於臺北市之比較及探討  
 彭振聲／曾俊傑／蕭秋安／廖繼仁／趙慶宇 52

## 鹽下微言

- 📖 桃園國際機場第三航廈流標與工程市場「僧少粥多」的新形勢 高銘堂 59  
 📖 莫蘭迪斷橋啟示：基礎建設維修時代來臨 拱祥生 62

## 學會資訊看板

- 📖 台電公司大潭電廠增建燃氣複循環機組發電計畫 工程參訪花絮 能源委員會／台電大潭工作隊 63  
 📖 國家會展中心南港展覽館擴建 工程參訪活動 資訊委員會 66  
 📖 出席加拿大土木工程學會 2018 年年會 (CSCE 2018) 紀實 張家瑞／陳世晃 67  
 📖 5/17 學術活動 — 高樓 TMD/TSD 設計及施工實務研討會 58  
 📖 6/14-16 國際交流 — 參加蒙古 2018 年年會 33  
 📖 6/29 工程參訪 — 淡海輕軌捷運工程 @淡水 58  
 📖 7/27 工程參訪 — 新店溪活水綠電溯源之旅 @桂山電廠、翡翠水庫 22  
 📖 8/6 專題演講 — 日月同輝 能源講座 @文化大學 47

## 廣告特搜

- 連積企業有限公司 — 基地保水滲透資材 封面裡  
 經濟部水利署南區水資源局 — 防颱準備好・災損自會少 封底裡  
 台灣世曦股份有限公司 — 分毫不差・才足以教人驚豔 封底

## 社團法人中國土木水利工程學會 107 年年會暨 2018 土水國際論壇

智慧工程、特色城市 Building Smart Engineering Project, Cultivating Urban Culture Characteristic

時間：107.12.7-8 地點：中鋼集團總部大樓 預計 9 月中旬開始網路報名，敬請期待！

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| Session 1: Smart Engineering Projects & Technologies           | 工程論壇一：土木工程（含軌道）              |
| Session 2: Civil Mega Projects                                 | 工程論壇二：水利工程（含防災）              |
| Session 3: Energy Related Projects & Technologies              | 工程論壇三：綠營建                    |
| Session 4: Disaster Prevention Related Projects & Technologies | 工程論壇四：政府組織改造                 |
| Session 5: Hydraulic Related Projects & Technologies           | 工程論壇五：2018 學生工程創意競賽優勝發表      |
| Session 6: Young Engineers Special                             | 工程論壇六：2018 學生 BIM 軟體應用競賽優勝發表 |





# 土木工程與城市文明

洪如江／國立臺灣大學土木工程學系 名譽教授、中國土木水利工程學會 會士

## 引言

文明 (Civilization)，指人類的「歷史」、「文化」與「生活方式」。

文化 (Culture) 指思想，信仰，美感、人文關懷 (或稱人道關懷)。

人類放棄「流浪森林之中」或「穴居」及「打獵與採集」的生活方式而「定居」下來，為糧食而從事「農牧」，為安全而建築「房屋」，進而形成「聚落」。當農牧產品有剩餘之後，分工合作開始；出現農夫、工匠、士兵、教師、巫師、醫生、官吏、等等行業，而逐漸演化出嚴密的社會組織 (或階級制度)。居住場所分離為「鄉村」與「城市」。農夫在鄉村生產糧食、燃料、原料，進入城市交換工商產品及知識。

漢文的**城市**一詞，包括硬體的**城** (城牆、護城河、房屋、街道、水井、等等結構物) 與軟體的**市** (物品的交易，知識的交易)。

在城市之中，為記帳、記錄、或占卜，發明文字，進而出現**書寫歷史**；文化的專業情境，提昇至更大的高度、深度、寬度；**生活方式** (食、衣、住、行、育、樂、衛) 更趨於精緻及多樣性。**文明**就從城市之中誕生。

## 歷史重要性的城市之例

### 世界上最早的人類聚落及城市，耶律哥 (Jericho)

巴勒斯坦人 (Palestine)，約於 9000BC 就在死海北側耶律哥 (Jericho) 建立聚落，並迅速發展為城市。最早提到耶律哥城的文獻為：**基督教聖經舊約**記載摩西 (Moses) 首徒約書亞 (Joshua) 率領以色列軍隊屠城的經過。

基督教聖經 Joshua 6-20：

“So the people shouted when the priests blew with the trumpets: and it came to pass, when the people heard the sound of the trumpet, and the people shouted with a great shout, that the wall fell down flat, so that the people went up into the city, every man straight before him, and they took the city.”

基督教聖經 Joshua 6-21:

“And they utterly destroyed all that was in the city, both man and woman, young and old, and ox, and sheep, and ass, with the edge of the sword.”

約旦 St. George's Greek Orthodox 教堂 (約建於 1600BC)，以馬賽克在地板鋪設耶律哥城之圖案 (圖 1，圖 2)。耶律哥 (Jericho) 城被毀，應在 1600BC 之後。

第二次世界大戰之後，耶律哥先後歷經約旦（1949 - 1967）、以色列（1967 - 1994）的統治。在國際壓力之下，1994 年耶律哥歸還巴勒斯坦政府（Palestine National Authority）。圖 3 照片示巴勒斯坦政府在耶律哥（Jericho）所立的看板，宣示主權。

圖 4 與圖 5，為筆者於民國 89 年 2 月初拍攝耶律哥遺址開挖後的部分照片。

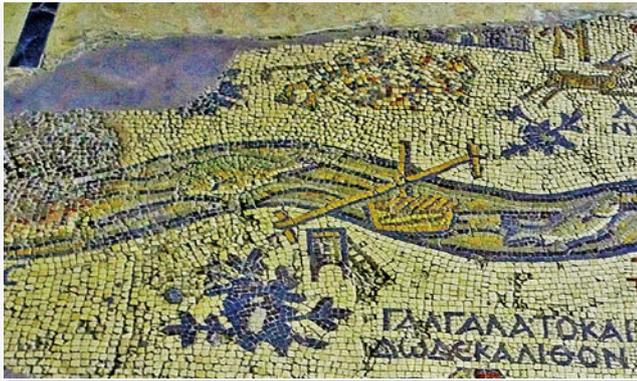


圖 1 耶律哥（Jericho）城馬賽克地圖（洪如江攝於約旦 St. George's Greek Orthodox 教堂地板）

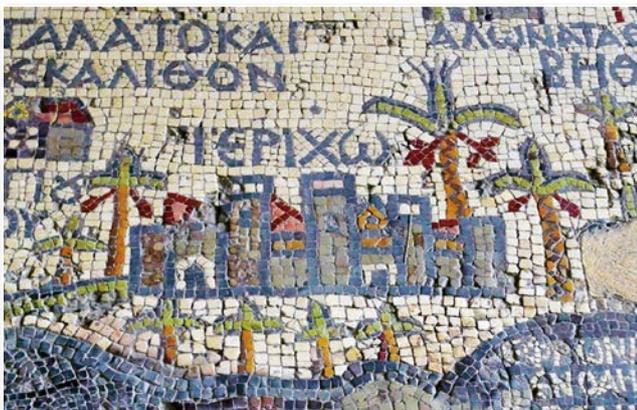


圖 2 耶律哥（Jericho）城門馬賽克地圖（洪如江攝於約旦 St. George's Greek Orthodox 教堂地板）



圖 3 巴勒斯坦政府（Palestin National Authority）在耶律哥（Jericho）所立的看板，宣示主權（洪如江攝）

但耶律哥是否被約書亞（Joshua）率領以色列軍隊屠城，考古學家在二次大戰之後的現場考古研究，有不同（甚至於否定）的意見（參考 *Wikipedia* - Battle of Jericho 或 *National Geographic*, 2018, Atlas of the Bible, Entry in the Promised Land）。

但筆者認為，屠城不是一件榮耀的好事，若非事實，何必以聖經對號入座，引發巴勒斯坦人對以色列人的仇恨。其次，基督教聖經所描述的許多重大事件，例如大洪水，亞伯拉罕（Abraham）率領以色列人離開烏爾（Ur，圖 6）前往迦南（Canaan），等等，都一再被證實。

### 大河文明的城市之例

美索不達米亞古文明的兩河下游蘇美（Sumer）地區，約 4000BC - 3500BC 建立城市，例如烏魯克（Uruk，4000BC - 3100BC）、烏爾（Ur，3800BC - 500BC）、巴比倫（2300BC - 1000AD）。約 3400BC，發明象形文字。約 2750BC，發明世界上最早有系統的文字：楔形文字（cuneiform），刻劃於泥版（俗稱泥版書）而有世界上



圖 4 耶律哥（Jericho）城遺址大面積考古開挖後的現狀（洪如江攝）



圖 5 耶律哥（Jericho）城遺址重點小範圍考古開挖後的現狀（洪如江攝）



圖 6 美索不達米亞 (Mesopotamia) 烏爾 (Ur) 遺址的 Google Earth 衛星影像 (Credit Google Earth)

最早的書寫歷史與文明。烏爾為以色列元老亞伯拉罕 (Abraham) 故鄉。參考洪如江 (106 年 8 月土木水利雙月刊)「美索不達米亞古文明的生死關鍵」一文。

埃及古文明土木工程建設的重點，在金字塔與神廟，而不在城市。其第一王朝 (1st Dynasty, 3100BC - 2890BC) 所建的首都**孟菲斯** (Memphis)，位於尼羅河大三角洲南尖端，曾經是商業、貿易與宗教中心。但因**亞歷山大城**的興起，以及 Giza 地區三大金字塔的建成，孟菲斯迅速衰落。另**底比斯** (Thebes) 城中，卡納克神廟群 (Karnak Temples)，再加上鄰近的陸克索神廟群 (Luxor Temples)，不但非常壯觀、精緻，而且在廟宇內部的大面積石壁、巨大石柱的柱面，雕刻不計其數的神像、象形文字的官方記錄，成為解讀埃及歷史的根

源。首都**開羅**城，因埃及博物館中豐富的埃及古文明文物而有歷史重要性。參考洪如江 (105 年 8 月土木水利雙月刊)「土木工程與埃及古文明的生死關鍵」一文。

中國古代具有歷史重要性的城市，多在黃河流域。殷商首都**朝歌** (今河南安陽殷墟)，在周武王所帥領的聯軍進攻之前，將所有殷商國家檔案 (字甲) 17,088 片，妥善深埋於 YH127 坑 (後代考古學家，中央研究院歷史語言研究所的李濟、董作賓、石璋如、等等，所定名)。加上許多其他坑洞開挖所獲得的字甲及字骨約 7000 多片，終於解讀所有殷商時代的**甲骨文**，而將中國的信史推回 3600 年前。中國秦、漢、隋、唐首都**長安** (今西安)，不但是中國最強盛的幾個朝代的首都，絲綢之路的最東起點，中西 (包括印度) 國際貿易、文化交流及文明接觸最重要的城市；更難能可貴的是，分別在隋、唐所建的城門或城牆多被保留到今日，參考洪如江 (105 年 12 月土木水利雙月刊)「土木工程與中華文明的永續長存」一文)。相對於此，許多名城極富歷史重要性而且極為精美的城門、城牆、甚至於古蹟，居然在現代被拆除。西安的秦始皇墳墓與武則天墳墓 (可以稱為地下金字塔)，尚未開挖；秦始皇殉葬兵馬俑的兩個大坑之一開挖部分之後，其規模之大與陶俑之精緻 (圖 7、圖 8)，震驚全世界。佛教文明進入中國，與中國道家思想及儒家思想，相互激盪，使得中華文明再一次向上躍昇。當然，**洛陽**、**開封**，也是黃河流域具有歷史重要性的城市。



圖 7 中國西安兵馬俑一號坑內部全景 (洪如江攝)

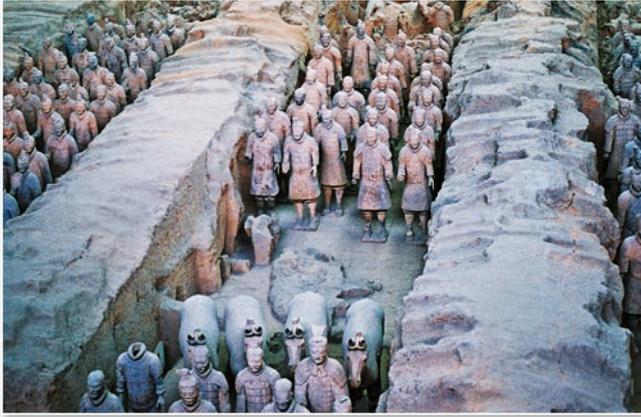


圖 8 中國西安兵馬俑一號坑內局部（洪如江攝）

### 愛琴海及其周圍具有歷史重要性的城市之例

愛琴海南部克里特島的麥諾安（Minoan）古文明（3000BC-13800BC）首府諾索斯（Knossos），希臘大陸的邁錫尼（Mycenae）、斯巴達（Sparta）、雅典（Athens）、今土耳其境內的特洛伊（Troy），都曾經是盛極一時的城邦。因天災（尤其是地震）與城邦互鬥，最後只剩下雅典，創建希臘古典文明（800BC - ）。

參考洪如江（106年6月土木水利雙月刊）「土木工程與希臘文明的生死關鍵」一文。

### 日本京都，中國唐朝文化的翻版

日本京都的寺廟、庭園、民宅、等等，深受中國唐朝文化（尤其是禪宗思想）的影響，即使在中國大陸城市也不多見。

筆者建議觀賞我國公共電視發行、林盛豐教授撰稿及旁白的影片「城市的遠見第五集，京都」。

### 城市文化之一，思想

希臘城邦林立的時代，有蘇格拉底（Socrates, 470 - 399BC）、柏拉圖（Plato, 428 - 358BC）、阿基米德（Archimedes, 287 - 212BC）、亞力士多德（Aristotle, 384 - 347BC）、等等大思想家，但都集中在雅典城。

中國春秋（770 - 476BC）戰國（475 - 221BC）時代的大思想家有：老子（600? - 470BC?）、孔子（551 - 479BC）、墨子（約 480 - 400BC）、孟子（372 - 289BC）、莊子（約 369 - 286BC）、荀子（約 313 - 238BC）、韓非子（約 281 - 233BC）、等等。分散在多個城邦國家。城邦互鬥或一一被滅之後，統一的帝國出現，只有皇帝的聖旨以及皇帝欽定的經典才算是正統思想，從此不再有大思想家。

西方國家要等到發生於翡冷翠（Firenze）的文藝復興之後，才有思想自由、文藝創作自由。

英國倫敦，1753年，成立大英博物館（The British Museum），其建築的內外，多處仿倣自希臘衛城（Acropolis）帕特農神廟（Parthenon, 437BC - 432BC建）的型態。免費參觀，開放思想的表現。1801年建立的國會大廈（圖9），西方國家近代民主政治（國家領導人由公民以一人一票選出，國家政策由國會議決）的發源城市。



圖 9 英國國會大廈（1840~1860建），民主政治的象徵（洪如江攝）

### 城市文化之二，信仰

#### 亞伯拉罕宗教（Abraham Religions）的聖城：耶路撒冷

亞伯拉罕宗教（Abraham Religions），包括猶太教（Judaism）、基督教（Christianity）、與伊斯蘭教（Islam）等三宗教都把耶路撒冷城（Jerusalem, 3000BC-）（圖10）當作其聖城，自古相互爭戰至今；尤其是以色列（Israel）與巴勒斯坦（Palestine）之間的戰爭或流血衝突。

參考洪如江（107年2月土木水利雙月刊）「土木工程與文化（一）思想及宗教信仰與土木工程」一文。

#### 翡冷翠（Firenze）：和諧、神聖、富裕的城市

從城外高地觀看，整個翡冷翠城都是歷史悠久而且格調一致的矮屋，環繞聖母百花大教堂（Basilica di Santa Maria del Fiore），發展出和諧、神聖、而且是富裕的城市（圖11）。至今不需要建設摩天大樓型態的混凝土叢林。



圖 10 耶路撒冷，三宗教（猶太教、基督教、伊斯蘭教）都當作其聖城，自古相互爭戰至今（洪如江攝）



圖 11 翡冷翠（Firenze），以聖母百花大教堂（Basilica di Santa Maria del Fiore）為中心發展出和諧、神聖、而且富裕的城市

## 城市文化之三，美感

### 世界藝術之都的巴塞隆納（Barcelona）

大獨裁者法郎哥元帥死亡之後，民主政府以都市更新，大幅度增加開放空間、公共綠帶及公園；市民也隨之整理家園及私有房屋，讓市容煥然一新。再動員世界一流的藝術家（Miro、Aguilar、Botero、Caro、Chillida、De Vires、Horn、Hunt、i Cadira、Lichtenstein、Llena、Llimos、Miyaaki、Monoz、Munoz、Nagel、Peper、Sala、Serra、Tapiés、Venet、Viladomat、Corbero 等等），為巴塞隆納的每一個社區，創作一個地標性的室外巨型雕塑，成為社區的地標。高第所設計的但尚未完工的聖家堂（Sagrada

Familia），已經是代表巴塞隆納城市的地標（圖 12）。巴塞隆納也借舉辦世界奧運會的機會，將濱臨地中海的地區整理為美輪美奐的新社區。這些努力，使巴塞隆納成為舉世無雙的藝術之都及城市博物館；藝術品不再只是關在博物館中的文物。

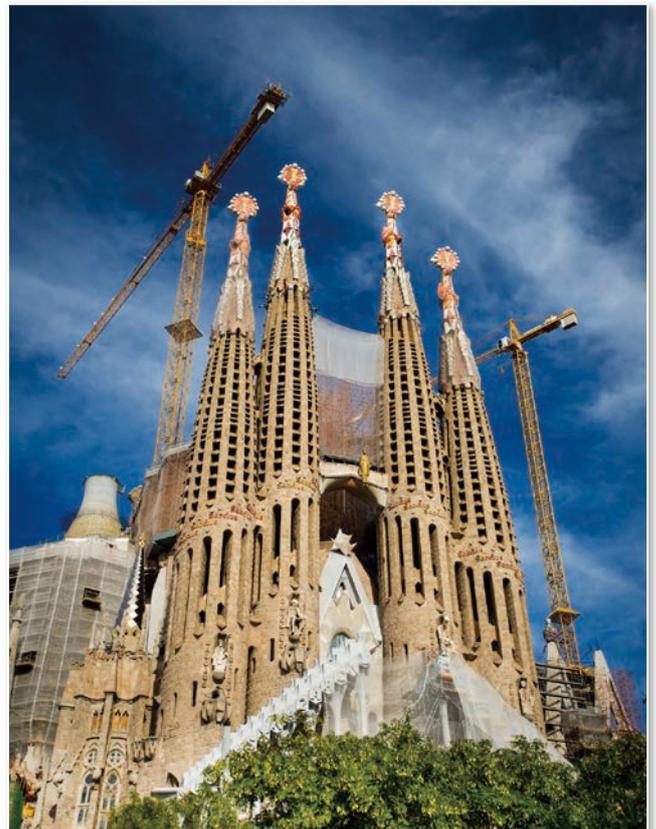


圖 12 西班牙巴塞隆納聖家堂（林明勳攝）

筆者強烈建議觀賞我國公共電視發行、**林盛豐**教授撰稿及旁白的影片「城市的遠見第1集」。

### 世界文化之都的巴黎 (Paris)

關於巴黎為世界文化之都，難以本文的篇幅詳加介紹。筆者強烈建議觀賞我國公共電視發行、**林盛豐**教授撰稿及旁白的影片「城市的遠見第6集」。

法國人的一切設計，不美就不對勁。城市街道工程，水平線一致，材料一致，禁止路邊停車。城市地下大排水溝中建立污水處理博物館，其寬敞、潔淨、美觀、及教育功能，達到吸引觀光客及市民到地下大排水溝的程度。巴黎的博物館，圖書館，河岸，橋樑，林蔭大道，城市地標（尤其是巴黎鐵塔），不但求美，而且創造浪漫氣氛。參考洪如江（107年2月土木水利雙月刊）「土木工程與文化（二）土木工程之美」一文、洪如江（107年6月土木水利雙月刊）「土木工程的人文關懷」一文。

### 城市美感的靈性，河流

一個城市，只要有一條河流貫穿或只是擦邊而過，多會認為是上天的恩賜。

徐志摩的白話詩「再別康橋」，以康河為主軸，傳誦華人社會。他的散文「我所知道的康橋」有這兩段話：『康橋的靈性全在一條河上；康河。我敢說，是全世界最秀麗的一條河。』與『這河身的兩岸都是四季常青最蔥翠的草坪。』

巴黎塞納河濱，有自然之美（圖13）與浪漫的氣氛（圖14）。倫敦泰晤士河濱，富有親水環境（圖15）。捷克首都布拉格河濱之美，示於圖16。瑞典斯德哥爾摩的河濱之美，示於圖17。匈牙利首都布達佩斯多瑙河之美，示於圖18。

台北市河濱的防洪牆及高架橋，尤其是高架橋（圖19，圖20），可能是筆者所到過近百城市中對自然環境（尤其指河濱環境）破壞、最醜陋、而且對人最不友善的土木工程。



圖13 巴黎塞納河濱的自然之美（洪如江攝）



圖14 巴黎賽納河富有浪漫的氣氛（王鶴翔拍攝）



圖15 倫敦泰晤士河濱的親水環境（洪如江攝）



圖16 捷克布拉格河濱及社區之美（洪如江攝）

圖 17 瑞典斯德哥爾摩的河濱之美  
(洪如江攝)



圖 18 匈牙利首都布達佩斯  
多瑙河 (洪如江攝)



圖 19 台北市新店溪岸防洪牆及高架橋，阻擋市民親水活動，而且造成壓迫感，構成圍城效應 (洪如江攝)



圖 20 台北市基隆河岸防洪牆及高架橋，阻擋市民親水活動，而且造成壓迫感，構成圍城效應 (洪如江攝)

### 城市文化之四，人文關懷 (或稱人道關懷)

土木工程的人文關懷，參考洪如江 (107 年 6 月土木水利雙月刊)「土木工程的人文關懷」一文。

一個城市，首要的人道考量在提供一個安全而且友善的空間。其最起碼的需求在合宜的房屋住宅、幸福感的城市環境 (包括自然環保、人造環境、社會環境)。

就房屋住宅而言，新加坡的住者有其屋政策，是

至目前為止的最高理想。

城市自然環境的惡化，包括：以混凝土叢林取代自然叢林 (包括喬木、灌木、青草)，以土石或垃圾填平水池，太多瀝青鋪面或混凝土鋪面。

城市公共綠地 (公園，花園) 佔城市面積百分比 (%)，根據 Mayor of London, 2012, *World Cities Culture Report*，如下：

新加坡 47%，雪梨 46%，倫敦 38.4%，  
約翰尼斯堡 24%，  
柏林 14.4%，紐約 14%，巴黎 9.4%，東京 3.4%，  
上海 2.6%，孟買 2.5%，伊斯坦堡 1.5%

茲以 Google Earth 衛星影像（圖 21 至圖 23）分別顯示上海、東京、與紐約這三大城市的混凝土叢林。

城市因空氣污染，一年死亡人數，根據 Lelieveld, *et al* (2015) 例示如下：

德里 19,700 人，上海 14,900 人，北京 13,700 人，  
雅加達 10,400 人，孟買 10,200 人，莫斯科 8,600 人，  
東京 6,000 人，開羅 6,000 人，洛杉磯 4,100 人，  
紐約 3,200 人，巴黎 3,100 人，倫敦 2,800 人，  
香港 2,600 人，墨西哥市 1,600 人

將上列城市公共綠地百分比（%）與市民因空氣污染而死亡人數加以交叉比對，六個城市的資料如下：

城市	公共綠地百分比（%）	因空氣污染而死亡人數
上海	2.6%	14,900 人
孟買	2.5%	10,200 人
東京	3.4%	6,000 人
巴黎	9.4%	3,100 人
紐約	14 %	3,200 人
倫敦	38.4%	2,800 人

由以上非常簡單的比對，大致上可以看出：城市的公共綠地（公園、花園）百分比（%）較低者，市民因空氣污染而死亡的人較多。

台北市的公共綠地百分比，根據 Global leadership on culture in cities, Taipei, 為 3.6%。圖 24 為台北市的 Google Earth 衛星影像，圖 25 為筆者以相機在台北市火車站對面高樓向北所拍攝的局部市區天空線。筆者強烈建議：政府持有土地，例如仁愛路的前空軍總司令部、松山機場，宜改建為公共綠地（例如大安森林公園），應可減少市民因空氣污染而傷亡人數。

世界上文明城市的自來水，多可以生飲。台灣的自來水，經自來水廠處理，已經可以生飲（限於水廠之內）；但經輸水管、家庭水池與水塔之後，已經不夠生飲的潔淨程度，必須浪費人力及龐大能源燒開水。就自來水能否生飲而言，台北市（以及台灣的所有城市）還不能算是文明城市。

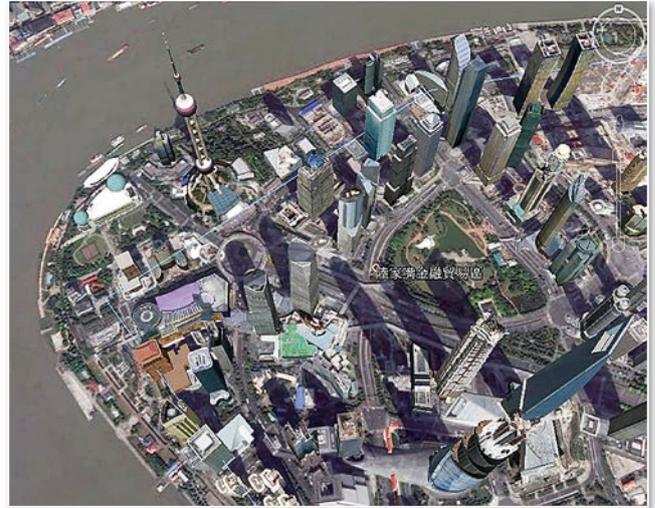


圖 21 上海混凝土叢林的鳥瞰影像  
(Credit Google Earth)



圖 22 日本東京混凝土叢林的鳥瞰影像  
(Credit Google Earth)



圖 23 紐約混凝土叢林的鳥瞰影像  
(Credit Google Earth)

全世界最好的大眾捷運系統，台北捷運系統，提供安全而且對使用者友善的空間，讓台灣人善良的人性顯現出來，參考洪如江（106年12月土木水利雙月刊）「土木工程與自然」一文（圖24至圖26）。圖26與圖27，分別示台北捷運系統地下車站月台與高架車站月台的優良空間。



圖 24  
台北市區的 Google Earth 衛星影像  
(credit Google Earth)



圖 25 台北市區，缺乏開放空間，而且極為醜陋（洪如江攝）



圖 26 台北捷運地下車站月台層安全舒適與宜人的空間市所少見（洪如江攝）



圖 27 台北捷運高架車站月台視野及通風良好（洪如江攝）

將本文圖 19、圖 20、圖 24 至圖 27，以及筆者「土木工程與自然」一文的圖 24 至圖 26，放在一起看，台北市在演出「三城記」的戲碼：

1. 捷運系統：近似理想國 (Utopia) 的城市。
2. 台北市的天空線、一般街景、大量摩天大樓的空屋：醜陋而難以符合永續發展理想的都市。
3. 大量宮殿式建築的城市：古台北城的城牆被拆光了；古城門，除了北門 (圖 28) 之外，都已經被改成宮殿式建築 (圖 29)；中正紀念堂 (圖 30)，國家音樂廳 (圖 31)，國家戲劇院，及圓山大飯店，也都是宮殿式建築。

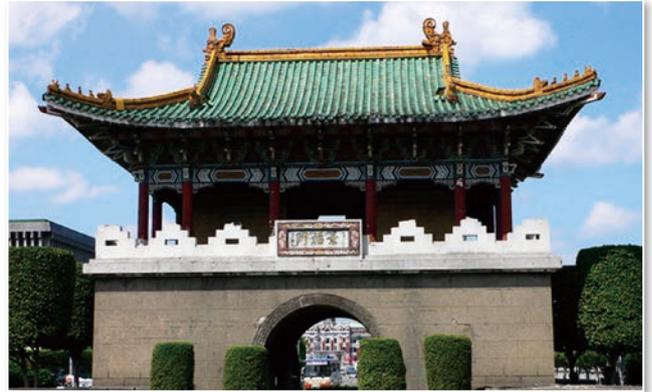


圖 29 台北市景福門，拆掉古蹟屋頂，換上宮殿式大帽子的假古蹟



圖 28 台北市北門，台北市唯一保留下來的真古蹟城門 (洪如江攝)



圖 30 宮殿式建築的中正紀念堂 (洪如江攝)



圖 31 宮殿式建築的國家音樂廳

## 城市的生活方式

人的生活，包括食、衣、住、行、育、樂、衛。衣與樂，不在本文討論。

糧食，與土木工程關係密切的是水。農田所需的灌溉用水，公共用水，與家庭用水（尤其是潔淨的自來水），多由水庫（例如翡翠水庫）工程供應。

台灣的城市，用最大的人力及財力，拼命在建混凝土叢林。首善之區的台北市，公共綠地只剩全市土地的3.6%；新加坡公共綠地為全市土地的47%，而且住者有其屋為其首要政策。我國內政部營建署公布的空屋數量高達86萬餘宅，六都空屋約為全國空屋的

63%。但卻有大量年輕人因買不起房屋而不敢結婚，少子化成為國家危機。六都，尤其是台北市，房價之高，已經超過外國許多一線城市者，主要是土地價格被炒作。

台北市有全世界最好的捷運系統，公共汽車也方便；但在尖峰時段，街道常因汽機車（多數來自外縣市）密集而爭道（圖32）。在這兩年，逐步增闢人行步道與腳踏車專用道，恢復許多市民在城市中的尊嚴。就城市長遠發展而言，增建電力推動的軌道（或輕軌）系統，逐漸取代燃燒化石能源的汽機車，減少空氣污染所引發的人命傷亡。巴黎，幾條大街兩側，寬敞的林蔭步道（圖33），舒適而且安全。



圖 32 尖峰時段，台北市街頭的汽機車密集而爭道（洪如江攝）



圖 33 巴黎大街兩側，布設寬敞的林蔭步道，舒適，而且安全（徐國華攝）

教育，包括學前教育、家庭教育、學校教育、社會教育、在職教育、與自我教育。其中，學校教育若從幼稚園到大學畢業，需要 18 年。因此，校舍的安全就是最重要的工程。台灣 921 大地震，293 所中小學校舍全毀。幸好地震發生在凌晨 1 點 57 分，否則將有上萬學童及教師遇難。不少開發中國家，地震發生在上學時段，大量師生遇難。這些國家的大人物，只是把「重視教育」掛在嘴巴。

市民的保衛，包括颱風、豪雨、地震、坡地災害、火災、車禍、疾病、恐怖攻擊、等等可能引發災害的預防、急救、治療、重建、復原、等等作業。在預防方面，所有土木及建築工程，必須高度安全，而且對使用者友善。萬一發生房屋或橋樑倒塌、坍方、潰堤、淹水、等等災害，土木工程業者應迅速動員防救災專家、工程機械，進入災區救災、建臨時屋或永久屋，安置災民。

## 新一代城市文明的遠憂

到目前為止，世界人口的 50% 已經居住在城市之中。台灣人口的 80% 已經生活在城鎮之中，50% 人口已經生活在台北、台中與高雄這三大都會中。大部分的人在城市中誕生、成長、生活、工作、受教育、與娛樂。

Florida (2006) 指出，全球 20 個「城市廊道」(Urban Corridors, 或 Megalopolis; 美國 10 個，歐洲 3 個，中國 3 個，日本 3 個，台灣 1 個)，居住人口只有 6 億 6 千萬人 (約為世界人口的 10%)，卻佔世界經濟活動的一半、世界級科學活動的 3 分之 2、與全球創新產業 (innovations) 的 4 分之 3。

但上述 20 個「城市廊道」所創造的財富，卻由少數人在享受，貧富懸殊日益擴大，「社會公平正義淪喪」。富裕城市受到「恐怖攻擊」(2001.09.11 紐約，2005.07.07 倫敦，2015.11.13 ~ 14 巴黎) 或「政治難民湧進」的災難，究竟是文明的衝突 (Clash of Civilization, Huntington, 1996)？或是貧富的衝突 (Rich/Poor Conflicts, Barbanti, Jr., Olimpio, 2003) 所導致？

工廠 (包括燃煤的火力發電廠) 及汽機車燃燒巨量化石能源，噴發超量懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>)，每年因而致

死人數，根據 WHO (2018)，全球已超過 700 萬人，且逐年快速增加。參見本文第六節。

絕大多數的城市中人，在龐大的政治權力與經濟權力之下，相對渺小；「新一代的城市文明」就此登場，成為人類文明的大部分。巨無霸城市越來越多，鄉村相對沒落，對整個國家，甚至於整個世界而言，是福？是禍？有識之士，提出永續發展的思想：經濟 (發展)、社會 (公平正義) 與環境 (保育) 的均衡發展，而且，不透支下一代賴以為生的資源。問題是，正如幾千年以來的人類文明一樣，總有某一或某幾個帝國主義國家，為稱霸或統治世界，只求經濟及兵力的強大，以便對外侵略或擴張勢力。導致永續發展的理想難以實現，而發生強者的文明的衝突 (The Clash of Civilizations, 例如 Huntington, 1996) 或弱者的恐怖攻擊。而攻擊，幾乎都發生在城市。是為遠憂。

## 參考文獻

1. 王軍 (民國 94 年)，*城記*，高談文化，台北市。
2. 李仁芳 (2015)，*巷弄創業家*，聯經出版，台北市。
3. Barbanti, Jr., Olympio (2003), "Rich/Poor Conflicts", *Beyond Intractability*. Eds. Guy Burgess and Heidi Burgess. Conflict Information Consortium, University of Colorado, Boulder.
4. Florida, Richard (2006), "The New Megalopolis", *Newsweek*, July 3~10, 2006.
5. Girardet, Herbert (1992), *The Gaia Atlas of Cities – New Directions for Sustainable Urban Living*, Gaia Books Ltd, London.
6. Huntington, Samuel P. (1996), *The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order*, Simon & Schuster.
7. Jacobs, Jane (1969), *The Economy of Cities*, Random House, New York.
8. Jacobs, Jane (1984), *Cities and the Wealth of Nations – Principles of Economic Life*, Random House New York.
9. Kostof, Spiro (1992), *The City Assembled – The Elements of Urban Form through History*, Thames & Hudson, London.
10. Landau, Royston (1968), *New Directions in British Architecture*, Studio Vista, London.
11. Lelieveld, et al (2015), "The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale", *Nature* **525**, 367-371.
12. Mayor of London (2012), *World Cities Culture Report*.
13. Ohmae, Kenichhi (2000, 2001), *The Invisible Continent*, Nicholas Braley, London.
14. The World Bank (2003), *Building Safer Cities*, Edited by Alcira Kreimer, Margaret Arnold, and Anne Carlin. 



# 都市水資源永續利用

專輯引言

專輯客座主編 駱尚廉／國立臺灣大學環境工程學研究所 特聘教授

水資源為維持人類生活與生產的基本要素，亦為維持生態平衡與完整的關鍵資源；臺灣近年來受到全球氣候變遷與先天地理特性的影響，水資源的取得日趨嚴峻，全球水資源惡化現象與旱澇事件亦屢見不鮮，因此近年來國際間對於水資源的研究愈加重視，亦強調其跨領域治理的重要性。如致力全球永續發展推動之 Future Earth，於其 21 項全球研究計畫（Global Research Projects）中包含水的未來計畫（Water Future, sustainable water future program），以及 8 項挑戰中包含水 — 能源 — 食物鏈結（Water-Energy-Food Nexus）研究；另聯合國 17 項永續發展目標（Sustainable development goals, SDGs）中亦列出水的可及性與衛生（Ensure access to water and sanitation for all）為目標之一，並與其他永續發展目標間具有交織關聯性，足見水資源管理與未來人類及生態發展之密切關係。依據全球水系統計畫（Global Water System Project, GWSP）指出，人類活動正以全球化顯著的方式改變全球水系統，然而人類卻尚未足夠了解水系統，也不知如何因應水系

統的改變。惟在 SDGs 中的水管理目標中，吾人已理解要綜合水量、水質、生態完整性、生物多樣性保護、工程技術、社會規範與動態，以及經濟面向共同規劃。

據此，相關研究學者經反思城市化與傳統水資源供排水及處理系統後，紛紛提出綠色或生態城市（Green or Ecological City）、低碳城市（Low-Carbon City）、低影響開發（Low Impact Development, LID）及海綿城市（Sponge City）等建設理念，陸續展開永續水資源利用之相關議題研究，並於 2004 年在美國馬里蘭大學舉辦第一次 LID 學術研討會，並陸續在 Wilmington、Seattle、San Francisco、Philadelphia、St. Paul、Houston 及北京等地舉辦各屆大會，提供 LID 與海綿城市技術發展平台。各國政府基於水資源永續利用與改善城市生態環境之需求，紛紛編列巨額經費推動之。以我國為例，行政院所編列之「前瞻基礎建設計畫」中，水環境建設總預算經費即高達 2 千多億元，為僅次於軌道工程建設的第二大項工程，其所推動之三大主軸為水與



發展、水與安全、水與環境，均為都市水資源永續利用之關鍵。

2015年臺灣中、南部發生嚴重旱象，促使全國對整體水資源的總量與分配重新再思考，咸認為民生污水廠的放流水，為一穩定的再生水源，但傳統的高級處理程序造成高耗能、高碳排放及高成本的三高困擾，對目前國內偏低的自來水價、再生能源比率過低、溫室氣體排放減量承諾、國際經濟競爭的高壓力下，以及再生水中仍含有各類新興污染物與環境荷爾蒙物質，將民生污水回收的再生水應用於工業用水及民生用水均有許多不利因素及使用上的疑惑。因此，污水回收再利用仿生系統技術之開發及應用，亦為各先進國家熱點研究項目。

老子道德經第二十五章「有物混成，先天地生。寂兮寥兮！獨立而不改，周行而不殆，可以為天地母。吾不知其名，故強字之曰道…。王法地，地法天，天法道，道法自然。」；Van der Ryn & Cowan (1996) 與 Benyus (1997) 提出生態設計 (Ecological design) 及仿生學 (Biomimicry) 概

念，兩人都提到「人類科學技術發展出現難題時，應該回到大自然中去找答案」、「自然界的生物應用非常巧妙的設計，非常環保的化學物質以及非常精巧的材料和能源方案，成功解決清潔能源問題和物質循環利用的問題」。因此，開發及應用污水回收再用之仿生系統技術，降低高級處理（離子交換、電透析及薄膜處理）之耗能、碳排放、處理成本及新興污染物質濃度，提供天然、穩定、優質、價廉之新興水源，開發高解析度水足跡量化模式，評價各類別進階技術之直接與間接用水衝擊等，均為都迫切需要探討的課題。

撰寫本專輯之成員均為國立臺灣大學「永續水資源利用—海綿城市與仿生系統技術開發與應用」核心研究群的伙伴（此計畫已進行半年，其中有四位教授未來得及於此次投稿），為增加閱讀性，我已拜託大家盡量以簡介方式說明，希能使讀者更容易理解如何與環境互生互助，進而改變行為促進生態永續。





# 都市水資源消耗 評估指標 — 都市水足跡

莊雯凱／國立臺灣大學環境工程學研究所 碩士生

闕蓓德／國立臺灣大學環境工程學研究所 教授

隨著氣候變遷以及更多地區的都市化與工業化，全球水資源缺乏（Water scarcity）問題日趨嚴重；而位於人口集中的都市地區更是水資源缺乏衝擊的首當其衝區域。因此，都市地區的水資源管理甚為重要，並需要兼顧全面性以及區域特性的水資源評估指標，以分析都市地區的水資源消耗情形，進而研擬應對水資源消耗的減量措施。而水足跡評估方法目前被廣泛地應用於集水區以及農產品等不同尺度之水資源消耗分析，能夠精細提供不同水資源消耗者之水資源消耗量等資訊。也因此，近年來水足跡的評估對象漸漸朝向都市水資源系統進行分析。本文針對水足跡以及都市水足跡，整理其發展、定義以及目前的應用案例，並提出現有的都市水足跡評估在後續應用上所受到的限制以及目前仍待完善的方法學。

## 水足跡評估指標的發展

水足跡的概念及評估方法係由 Hoekstra<sup>[1]</sup> 提出，並將水足跡定義為製造一產品所消耗與污染的淡水資源，為虛擬的水資源概念。近年所訂定的國際標準 ISO14046 中，也將水足跡定義納入生命週期的角度與概念，能夠量化與水資源有關的衝擊指標（ISO<sup>[2]</sup>）。而水足跡的估算除了一般系統邊界內消費端的直接用水（如家戶用水、道路清洗用水、工業用水等）外，同時也考量系統邊界外生產端的間接用水（如食物供應鏈中產品製造過程的間接耗水，Virtual water）（Hoekstra *et al.*<sup>[3]</sup>）。

從直接用水與間接用水中，Hoekstra *et al.*<sup>[3]</sup> 進一步將水資源區分為藍水（表面水與地下水資源）、綠水（降雨於綠地土壤並直接儲存在未飽和土壤中，能夠讓植物直接使用的水資源（不含土壤滲漏作用而構成的地下水補注量），以及灰水（能夠稀釋人類活動產生之污

水之環境水體水資源），因而衍生出此三種水資源的消耗之定義，分別為藍水足跡、綠水足跡以及灰水足跡；其中，藍水足跡定義為表面水或地下水資源的消耗，包括人類的直接消耗、表面水的蒸發、產品製造的消耗以及不會回到原本集水區的回流水資源；綠水足跡意指在降雨之下，被土壤所攔截的水資源，並為植物蒸發散作用所消耗之水量；而灰水足跡則以水質的角度評估人類活動對於環境水體的污染情形，代表能夠把污水中之污染物稀釋到河川特定水質標準以下時所需消耗的水量，也因此依據不同污染物的稀釋性質，會有不同的灰水足跡（Hoekstra *et al.*<sup>[3]</sup>）。從上述的定義可知，水足跡的評估概念及原理與生命週期評估（Life cycle assessment, LCA）的概念相似，而其範疇比起生命週期評估來說更加專一且精細，並能夠彌補 LCA 盤查水資源時通常以取水量評估而有高估的現象；此外，根據灰水的定義，其為虛擬不存在的水消耗，也因此 LCA 並無法評估灰

水的衝擊；綜合以上，水足跡的分析應能夠更進一步的完善與彌補 LCA 的評估 (Morera *et al.* [4])，幫助都市地區的水資源管理決策者更加了解水資源的消耗情形與其背後的消耗來源。

由於水足跡評估考量到人為活動所構成的產品或行為時的藍水、綠水與灰水資源消耗，因此其應用範圍相當廣泛，能夠依據不同的分析範疇評估細至產品大至國家之不同尺度下水足跡，同時從水質與水量的角度全面性地分析都市尺度下的水資源消耗；此外，在量化水資源若僅以水資源供給來源（如雨水等）為指標時並不直觀，需要考量各個面向之間的潛在關係；其中，若以水資源循環的權益相關者角度來說，需考量供水安全、長期成本、公共健康衛生、根據競爭需求分配水資源以及環境外部成本（能源使用、溫室氣體排放、水質狀況等）；而若以都市規劃權益相關者的角度來看，則需考量洪水風險管理、都市河流流量以及保護水資源對於文化與生態價值等，而只有全面性的探討都市水資源系統能夠解決上述問題。也因此，水足跡的評估概念更能夠完善幫助地區的水資源管理決策者了解水資源的消耗情形。

## 水足跡估算方法

根據 Hoekstra *et al.* [3] 對於水足跡的評估步驟如圖 1 所示，主要分為四個步驟：

- (1) 水資源消耗的評估目標以及評估時空間範疇界定。
- (2) 根據水足跡評估的方法進行盤查，分別計算製程、產品或直接用水消耗中系統內部植被的藍水、綠水以及污水產生的灰水消耗量；而在盤查時應需考量時空間範疇，將系統邊界以建構組元 (Building blocks) 區分不同的盤查種類，以利系統性的盤查來增加盤查效率。

- (3) 計算研究範疇內的可用水量，為來自系統外部集水區的表面水資源以及系統內部的降雨，進而分析可用水量與水足跡之間的差異，評估研究地區的水資源缺乏程度（或永續性）；也因此可以看出主要的資源消耗以及資源缺乏熱點，並進一步以環境、社會、經濟的角度評估三者的效益與衝擊，以及找出造成水資源消耗熱點的主因。

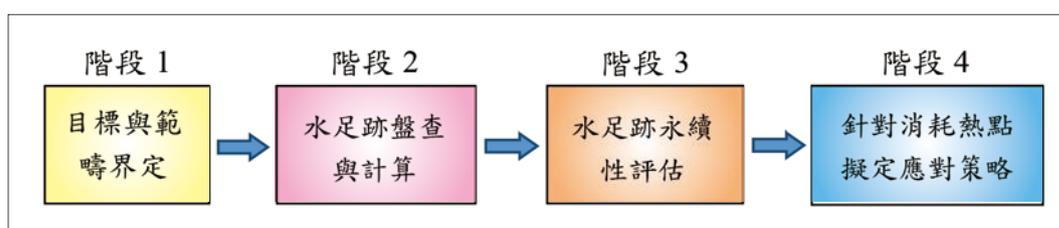
根據上述的熱點與主因擬定應對策略，增加地區對於水資源衝擊的調適能力。

## 水足跡評估的應用

水足跡概念發展以來已被應用於多種領域，若是以衡量類別區分，水足跡可分為製程水足跡 (Water footprint of a process step)、產品水足跡 (Water footprint of a product)、消費者水足跡 (Water footprint of a consumer)、社區水足跡 (Water footprint of a community)、企業水足跡 (Water footprint of a business)、國家或區域水足跡 (Water footprint of a nation/region) (周嫦娥等人 [5])。

而若是以衝擊導向分類，利用水足跡數據呈現不同面向之衝擊，可分為壓力水足跡 (Stress-weighted water footprint)、生命週期評估水足跡 (Life Cycle Assessment water footprint)、機會成本水足跡 (Opportunity Cost water footprint)、能源水足跡 (Energy water footprint)、遙測水足跡 (Remote sensing water footprint)、預測水足跡 (Forecasting water footprint) 等 (Takawira [6])。

此外，水足跡概念中由於具有完整且精細的水資源的分類系統，也因此被廣泛應用於評估農業、全球或國家水資源的運用，而近年來水足跡則開始應用於都市尺度上的分析。



資料來源：(Hoekstra *et al.* [3])；本文繪製

圖 1 水足跡評估步驟

## 農業水足跡 (Agricultural water footprint)

農業一直是水資源最大耗用者，約佔全球水足跡的 99% (Mekonnen and Hoekstra<sup>[7]</sup>)；而隨著人口增加及農業用地的擴大，水資源的消耗量也隨之增加，特別是灌溉地區更為顯著 (Siebert and Döll<sup>[8]</sup>)；也因此，對於農業用水評估更為重要。當水足跡的概念以及評估方法在 2003 年由 Hoekstra 提出後，Rost *et al.*<sup>[9]</sup> 將水足跡概念應用於灌溉農業用水，以模式模擬估算全球 11 種農作物之藍水與綠水消耗，是首次較為明確將藍水與綠水分開計算之文獻。而後 Siebert and Döll<sup>[8]</sup> 以 5ft × 5ft 空間解析度之網格，擴大估算全球 26 類別農作物之藍水與綠水足跡。

## 國家水足跡 (National water footprint)

水足跡的概念亦延伸應用於國家尺度，並定義為提供該國居民的商品及服務所需要的水量總和 (Hoekstra and Chapagain<sup>[10]</sup>)。隨著經濟蓬勃發展，國際間貿易愈趨頻繁，產品進出口使得水足跡計算須更全面考量；國家水足跡則可分為內部水足跡與外部水足跡；其中，內部水足跡為國家內居民生產消費的產品與服務所使用的水量，而外部水足跡為國民使用外國生產的產品和服務所需要的水量 (周嫦娥等人<sup>[5]</sup>)。Hoekstra and Chapagain<sup>[10]</sup> 研究中統計各國農業用水、民生用水與工業用水，且考量進出口貿易虛擬水資源，計算世界各國水足跡之總和，全球水足跡共為 7,450 Gm<sup>3</sup>/yr，平均為 1,240 m<sup>3</sup>/cap/yr。單純以用水量看，印度為全球水足跡最大的國家 (987 Gm<sup>3</sup>/yr)，若將各國之總水足跡除以其人口數進行標準化，美國擁有最大的人均水足跡 (2,480 m<sup>3</sup>/cap/yr)，緊接著為希臘、義大利等南歐國家，而人口基數多的中國則是呈現較低的人均水足跡 (700 m<sup>3</sup>/cap/yr)。可歸納造成各國水足跡差異的四項主要因子為：消費水平 (國民收入)、飲食習慣 (食肉多寡)、氣候 (作物灌溉需求)，以及農耕技術 (用水效率)。

## 都市水足跡 (Urban water footprint)

近年來全球人口越趨集中於都市，都市地區成為經濟與交通樞紐，使得都市的土地利用模式與空間發

展型態發生改變，同時都市大量人口過度消耗資源與能源，因此都市系統愈受重視，將水足跡聚焦於都市水資源之管理。都市水循環系統包含從集水區收集水、原水儲存、清潔和淨水、透過供水管網分配、污水進入下水道、污水處理廠處理，最後如考量再生水則是將處理後的水返回到集水區 (URBAN\_WFTP<sup>[11]</sup>)。

Vanham and Bidoglio<sup>[12]</sup> 統計米蘭都市範圍內農產品及相關產業的藍水、綠水及灰水足跡，顯示居民對都市外來水資源的依賴之外，透過數據也可了解到居民的日常飲食攝取比例，幫助未來在有限的土地與水資源條件下規劃適合的政策。Renouf and Kenway<sup>[13]</sup> 在宏觀層面上推動都市水管理目標，針對可持續性的水資源之發展，考量都市整合水系統及都市代謝流等，嘗試建立適合的都市水資源評估框架。Chini *et al.*<sup>[14]</sup> 考量足以供都市運轉之能源與水資源，估算美國各個城市區域內的直接與間接水足跡，綜合分析多個城市系統，同時將水足跡應用於食物 — 能源 — 水資源網絡 (Food-Energy-Water Nexus) 之量化，了解都市水循環的脈絡，為今後的研究奠定基礎，以便未來可使用單獨統一的方法評估多個城市水足跡，並解決永續都市水資源之問題。

## 都市水足跡評估的挑戰

除了資料可獲性的限制之外，則需思考都市水足跡評估後續的應用價值；其中，水足跡的探討目的在於估算都市水資源系統的消耗總量，藉以提供都市水資源管理者水資源消耗主要來源的決策支持資訊，得以更有效率的擬定水資源消耗的減量對策。然而，若僅估算都市各類建築物型態的水足跡總量時，都市的水資源管理者並無法真正有效的擬定應對的水資源消耗減量決策；而需要更進一步透過地理資訊系統，以空間分析的方式顯現出都市藍水、綠水以及灰水足跡的分布趨勢，則能夠有效地讓水資源決策者了解都市內部的耗水主因以及優先需要減量的地區。也因此，若能夠破除估算都市水足跡所需的資料可獲性限制，並進一步更仔細的細分出都市內部的土地利用型態，除了能夠增加都市水足跡估算的真實性之外，透過空

間分析方法，以比都市尺度還要細的空間統計單元來分析都市水足跡，則能夠作為更有效的水資源決策支持系統；而若能夠將都市水足跡評估在後續與社會經濟因子或水資源減量策略等整合分析，則更能夠突顯出都市水足跡評估的應用價值，以期增加都市水資源管理的完整性與效率。

圖 2 為本研究團隊估算之臺北市藍水及綠水足跡總量，以及四個因子中不同土地利用型態對於該項水足跡的貢獻程度。透過內政部國土利用分類系統歸類出臺北市內部不同的土地利用型態，並根據每種土地利用型態的平均逕流係數，得以估算都市內部不同土地利用型態所負責構成的雨水資源消耗；同時，水表用水的統計資料也能夠反映出建築物內部所構成的藍水足跡。

透過地理資訊系統與水足跡評估指標的整合，可以讓都市地區的水資源決策者更加了解內部的水資源消耗情形，並針對水資源消耗的熱點優先進行減量策略的推行；如圖 3 所示為臺北市地區各類一級經濟發

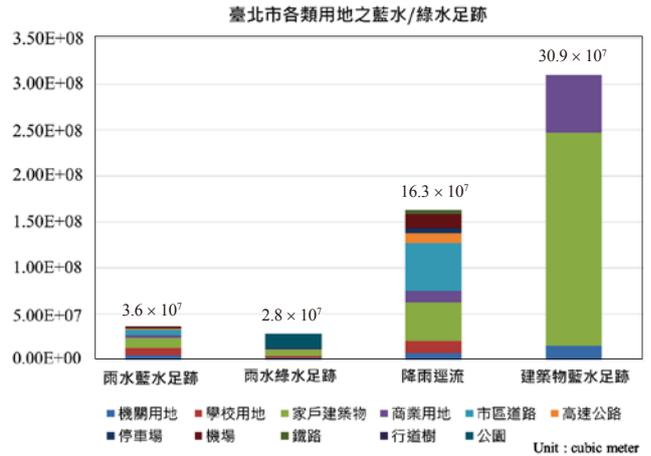


圖 2 2016 年臺北市地區各類用地之藍水、綠水足跡估算結果與貢獻來源

布統計區之藍水足跡與綠水足跡的加總量，以此較高空間解析尺度的方式統計都市水足跡，得應用於後續減量策略之效益評估，作為良好的決策支持工具，讓都市地區在推行永續政策時，能夠先行了解資源消耗的現況，並同時透過詳細的空間決策資訊研擬應對策略。

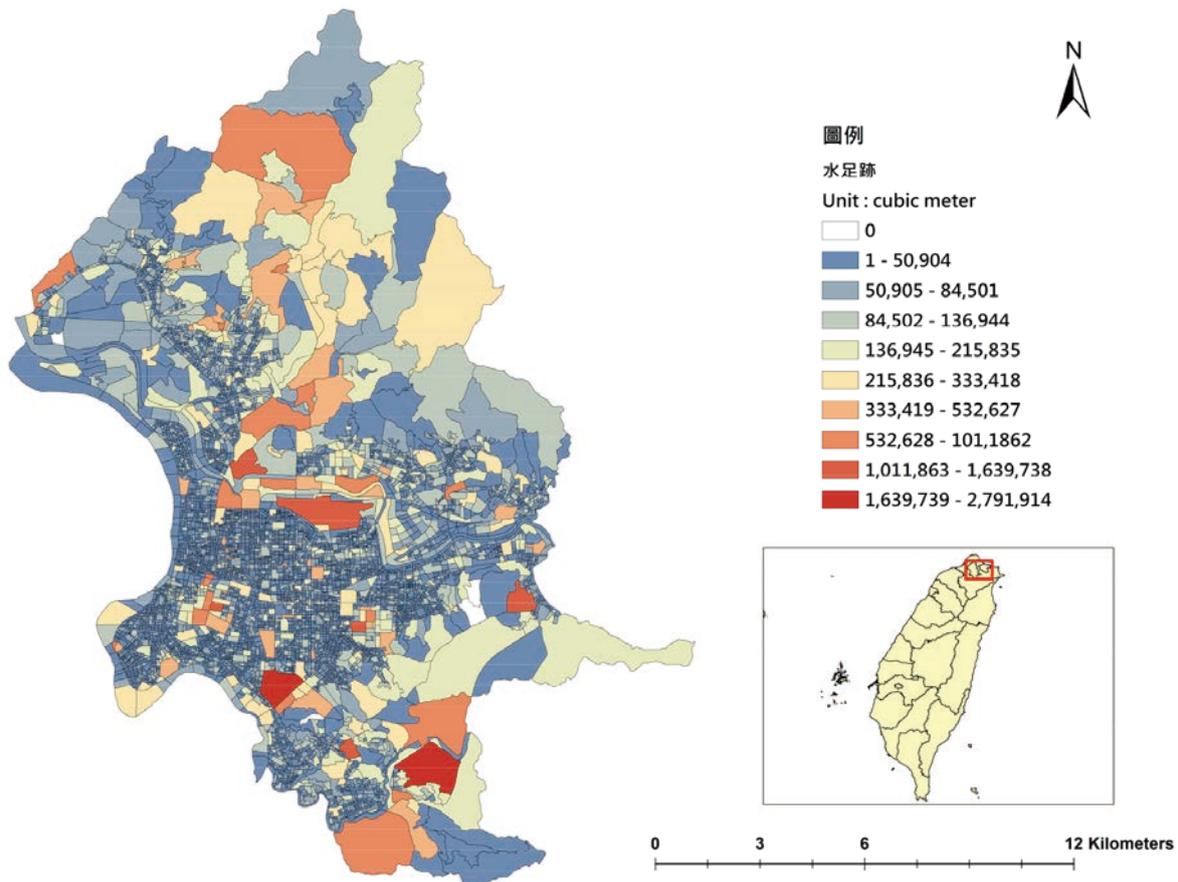


圖 3 2016 年臺北市地區藍水、綠水足跡加總分析結果

### 參考文獻

1. Hoekstra, A. (2003), "Virtual water: An introduction", *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series*, 11, 13-23.
2. ISO, I. (2014), *14046: Environmental Management - Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
3. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. (2011), *The Water Footprint Assessment Manual, Setting the Global Standard*, Earthscan, London.
4. Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M. and Comas, J. (2016), "Water footprint assessment in wastewater treatment plants\*", *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741-4748.
5. 周嫦娥、李繼宇、林惠芬、阮香蘭 (2011), 「企業水資源管理新指標 — 水足跡」, 工業污染防治。
6. Takawira, G. (2017), "Review of Methodologies of Water Footprint", *International Journal of Advanced Research*, 5(5), 1-5.
7. Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2014), "Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment". *Ecological Indicators*, 46, 214-223.
8. Siebert, S. and Döll, P. (2010), "Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation", *Journal of Hydrology*, 384(3), 198-217.
9. Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J. and Schaphoff, S. (2008), "Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system", *Water Resources Research*, 44(9).
10. Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. (2006), "Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern", *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change*, Springer, 35-48.
11. URBAN\_WFTP. (2014), *Introduction of Water Footprint (WFTP) Approach in Urban Area to Monitor, Evaluate and Improve the Water Use*, Eds., W.U.o.E.A.L.S. Institute of Environmental Engineering, U.o.P. Department of Industrial Engineering, U.o.I. Unit for Environmental Engineering, Central Europe.
12. Vanham, D. and Bidoglio, G. (2014), "The water footprint of Milan", *Water Science and Technology*, 69(4), 789-795.
13. Renouf, M.A. and Kenway, S.J. (2017), "Evaluation approaches for advancing urban water goals", *Journal of Industrial Ecology*, 21(4), 995-1009.
14. Chini, C.M., Konar, M. and Stillwell, A.S. (2017), "Direct and indirect urban water footprints of the United States", *Water Resources Research*, 53(1), 316-327. 

### 工程參訪 — 新店溪活水綠電溯源之旅 @ 桂山電廠、翡翠水庫 107.7.27



由中工會，本學會與日月光基金會合辦「新店溪活水綠電溯源之旅」。感謝桂山電廠歐平廠長、翡翠水庫管理局謝政道局長親自接待與簡報。會中特別播放新店溪水力發電廠微電影。



電影中的黃美玉女士親連現場現身說法



贈送微電影紀念版給歐平廠長



年逾 90 台電老員工伉儷情深



# 低衝擊開發技術之綠色基礎設施 — 灰燼添加於透水鋪面之應用

羅方辰／國立臺灣大學環境工程學研究所 博士生

駱尚廉／國立臺灣大學環境工程學研究所 特聘教授

隨著全球之快速都市化發展與經濟型態之轉變，為追求更好的生活品質，人類紛紛前往高都市化地區謀生，加速都會區之發展。在大量工程設施與住宅興建下綠地愈來愈少，不透水面積增加，造成地表保水能力降低，地表逕流量增加，都市熱島效應也隨都市之擴大而日益嚴重。利用雨水下水道系統雖可以迅速排水，但氣候變遷所造成的暴雨逕流常使原雨水下水道系統無法負荷，加上降雨前五至十分鐘的前期逕流污染濃度高，若沒妥善處理，不僅發生淹水現象，亦會導致懸浮微粒、重金屬、碳氫化合物、營養物和病原體的水污染，同時也浪費許多寶貴的水資源。透過低衝擊開發（Low Impact Development, LID）技術中綠色基礎設施（Green Infrastructure, GI）可以改善土地利用狀況，減少都市中水資源損失。本文整理綠色基礎設施之資料，針對透水鋪面作介紹，並透過回收灰燼添加於鋪面中以去除都市逕流污染物案例，說明其未來的研究與應用潛力。

## 低衝擊開發技術

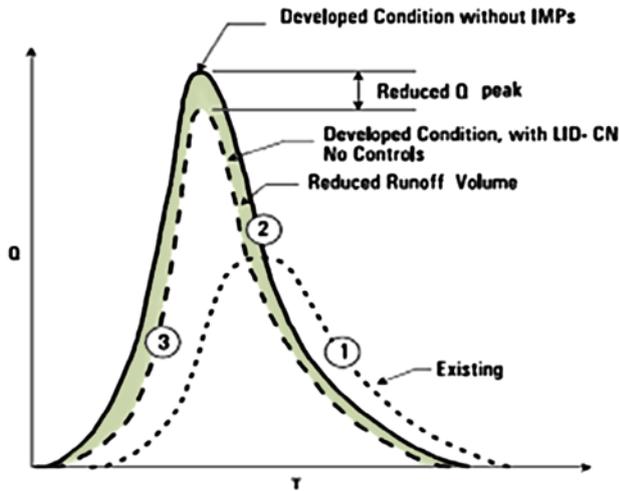
經濟的快速發展下人口至都市地區去發展，致使綠地逐漸被不透水層之建築物與路面給取代，造成不透水面積大幅增加，進而導致都市逕流與入滲型態改變，造成逕流總量增加、洪峰流量增加及污染物的擴散等負面效應。

低衝擊開發技術的初始概念為最佳管理措施（Best Management Practices, BMPs）針對可能發生或已發生之污染的狀況採取管制、削減或處理的措施，即以控制污染源頭、減少污染物傳輸進入河川及處理逕流三種控制方式來進行，以不改變原始型態之治理方式<sup>[1]</sup>。

低衝擊開發技術（Low Impact Development, LID）名詞及概念最早來自美國於 1990 年代，美國馬里蘭州 Prince George 區發展出來<sup>[2]</sup>，其概念主要是透過生態工法，如：土壤和植被的入滲、蓄流和蒸發等等大自然

本身的功能來降低暴雨所產生的逕流量。與傳統污水下水道的管末處理方法不同之處，使用源頭管理和其他設計來控制暴雨所產生的逕流量和污染，其設計必須因地制宜，如考慮土壤性質、面積大小、交通狀態等其他開發型態<sup>[3]</sup>。低衝擊開發策略的三大原則包括：(1) 盡量減少開發地區之不透水表面的面積；(2) 盡量保持原有的水文狀態；(3) 盡量充分利用入滲能力、增加集流時間，以達到降低開發行為對水質水量衝擊的目標。圖 1 為低衝擊開發前後逕流歷線圖<sup>[2]</sup>。

低衝擊開發方法常見綠色基礎設施（Green Infrastructure）包含：植生屋頂覆蓋（Vegetated roof covers）、雨水儲集（Rainwater Harvesting）、透水性鋪面（Permeable Pavement）、雨水花園（Rain Garden）、植物草溝（Vegetated Swales）、花槽（Planter）以及生態滯留池（Bio-retention）、窪地濕地（Swale Systems）等<sup>[4]</sup>。這些生態工法技術可使減緩逕流量、減少不透水



資料來源：[2]

圖 1 低衝擊開發前後逕流歷線

面積、增加地表蓄洪、入滲及過濾等能力，並維持或恢復流域或區域之水文平衡與生態功能。

目前都市雨水管理模式已實施於各國包含：美國、英國、澳洲、日本等國家，各國對於低衝擊開發技術之名稱也略不同。如：美國稱之為低衝擊開發 LID (Low Impact Development)，英國稱為永續排水系統 SuDS (Sustainable Drainage Systems)，澳洲使用水敏感都市設計 WSUD (Water Sensitive Urban Design)，紐西蘭則稱低衝擊城市設計與發展 LIUDD (Low Impact Urban Design and Development)，都是運用各種現地、自然的方式，尋找都市與水共存的方法。所有概念皆從「源頭管理」水資源，強調多部門的整合，尤其結合水利與都市計畫、建築設計等部門。下列表 1 為各國對於低衝擊開發之名稱與定義。

表 1 各國對於低衝擊開發之名稱與定義

項次	國家	名稱
1	美國、加拿大、歐洲、台灣	低衝擊開發 (Low Impact Development)
2	英國、蘇格蘭、瑞典	永續城市排水系統 (Sustainable Urban Drainage System, SUDS)
3	澳洲	水資源敏感都市設計 (Water Sensitive Urban Design, WSUD)
4	日本	雨水貯留；浸透設施
5	中國	海綿城市；城市低影響開發
6	紐西蘭	低衝擊城市設計與發展 (Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)
7	新加坡	活躍，美麗，乾淨的水源 (Active Beautiful Clean Waters)

資料來源：本研究整理

## 綠色基礎設施

綠色基礎設施為低衝擊開發技術非常重要的工法，常見綠色基礎設施為生態滯留單元、植生屋頂覆蓋（綠屋頂）、透水性鋪面及植生溝。國內「水環境低衝擊開發設施手冊與案例評估計畫書」則對於低衝擊開發之綠色基礎設施分為以七種，分別是透水鋪面、生態滯留單元、滲透側溝、雨水桶、植生溝、綠屋頂和樹箱設施<sup>[5]</sup>。表 2 為綠色基礎設施效益<sup>[6]</sup>。以下針對常見四種綠色基礎設施作介紹：

### 生態滯留單元 (Bio-retention Cell)

生態滯留單元為現地綠化暴雨逕流處理系統，以小面積、小區塊形式設計及適合當地氣候的植物所造景淺窪地方。其機制包含物理性的入滲及吸附，以及滯留槽中生物性的反應。生態滯留單元可設置於停車場分隔島、道路分隔島或易積水之區域，屬小型貯留形式 LID 技術及 GI 設施。

### 植生屋頂覆蓋 (Vegetated roof covers)

植生屋頂覆蓋又稱為綠屋頂 (Green roof) 指在平面或斜面屋頂上進行薄層綠化，以土壤種植植物，強調以品質輕、成本低、維護容易之人工地盤技術。綠屋頂一般分為三種：(1) 粗放型 (extensive) (2) 半精養型 (semi-intensive) (3) 精養型 (intensive)，型態上的選擇取決於預算、植物種類所需水分、土壤選擇、雨水儲存及載重能力等需求。

### 植生溝 (Grass swales and channels)

植生溝或稱草溝、草渠為自然排水系統的一項技術，既是排水系統並兼具滲透功用。利用樹木及草類等植生來控制雨水之逕流速率或吸附過濾來改善水質，植生溝雖然需要後續定期的維護費用，但相對而言為自然且低成本之方法。一般植生溝可分為乾式溝 (dry swale) 及草溝渠 (grassed channel) 兩類。

### 透水性鋪面 (Permeable pavements)

地面鋪面常見於都市人行道、車輛道路或是停車場等用途。傳統的鋪面就是將原本具有滲透能力的土壤變成不透水層鋪面。而透水性鋪面具有將雨水滲透至地下之功能，不會導致土壤中缺氧缺水等現象產生，同時也可降地低表逕流之產生。常見三種透水性鋪面技術為：(1) 透水混凝土磚 (permeable concrete blocks) (2) 透水混凝土鋪面 (permeable concrete pavement) (3)

表 2 綠色基礎設施效益

Benefit	Reduces Stormwater Runoff				Increases Available Water Supply	Increases Groundwater Recharge	Reduces Salt Use	Reduces Energy Use	Improves Air Quality	Reduces Atmospheric CO <sub>2</sub>	Reduces Urban Heat Island	Improves Community Livability					Improves Habitat	Cultivates Public Education Opportunities
	Reduces Water Treatment Needs	Improves Water Quality	Reduces Grey Infrastructure Needs	Reduces Flooding								Improves Aesthetics	Increases Recreational Opportunity	Reduces Noise Pollution	Improves Community Cohesion	Urban Agriculture		
Practice																		
Green Roofs	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Tree Planting	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bioretention & Infiltration	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
Permeable Pavement	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Water Harvesting	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Yes
  Maybe
  No

資料來源：[5]

多孔隙瀝青鋪面 (porous asphalt pavement)。接下來針對透水鋪面種類與效益作介紹。

### 透水鋪面種類與效益

傳統性鋪面不具有滲透性常因都市逕流而延伸許多污染物如：懸浮固體、營養鹽、致病菌、有機物與重金屬<sup>[7]</sup>。透水性鋪面可以減緩都市逕流與污染物也可以用作鋪面表面的替代品，如道路，停車場，人行道和行人專用區域<sup>[8]</sup>。相對於其他綠色基礎設施，透水性鋪面不需再進一步徵用土地。透水性鋪面專門設計用於促進雨水滲透通過鋪面及結構，通過各種鋪面層過濾

與污染物運輸與去除，可達到雨水管理和環境效益，為源頭控管設施之技術。圖 2 為常見綠色基礎設。表 3 為傳統性鋪面與透水性鋪面優缺點分析。

透水性鋪面種類依照其外觀、功能與應用可分為透水性混凝土 (Pervious concrete, PC)，多孔隙瀝青鋪面 (Porous asphalt, PA)，植草磚之混凝土格框鋪面 (Concrete and plastic grid pavers (CGP and PGP))，非連續拼接或鏤空鋪面 (Permeable interlocking concrete pavements, PICP)，透水性混凝土磚 (Permeable clay brick pavements, PCB)。透水性鋪面材質可分為一般混凝土、瀝青混凝土、與混凝土磚。以下對透水性鋪面種類作介紹：



生態滯留單元



植生屋頂覆蓋 (綠屋頂)



透水性鋪面



植生溝

圖 2 常見綠色基礎設

資料來源：[6]

表 3 傳統性鋪面與透水性鋪面優缺點分析

	傳統性鋪面	透水性鋪面
優點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 相較於透水性鋪面所承受的重量、壓力與強度較高。</li> <li>2. 較不易受氣候影響。</li> <li>3. 較不需長期維護。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 減少路面的逕流量，減少過量雨水排放系統度，並儲存水量，可以大大節省整成本。</li> <li>2. 避免下游地區淹水，減輕道路排水系統負荷。</li> <li>3. 捕獲污染地下水或排水系統的污染物。</li> <li>4. 降低灰色基礎設施 (Grey Infrastructure)</li> <li>5. 降低熱島效應與噪音污染。</li> <li>6. 透水性鋪面具有高滲透性與透氣性。</li> </ol>
缺點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 傳統性鋪面不具有高滲透性與透氣性。</li> <li>2. 導致熱島效應與噪音污染。</li> <li>3. 易造成污染源擴散與增加。</li> <li>4. 暴雨逕流量導致道路排水系統負荷增加，使用雨水下水道處理暴雨逕流量其成本較高。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 透水性鋪面不適合設置於具有污染物負重的地區，如：回收場、加油站等。</li> <li>2. 透水性鋪面所承受的載重與交通車輛較傳統鋪面低。</li> <li>3. 面臨氣候變化的挑戰</li> <li>4. 需要定期維護。</li> </ol>

資料來源：[9-11]

### 透水性混凝土 Pervious concrete (PC)

透水混凝土藉由粗粒料骨材、水泥與水攪拌而成，使粒料表面接觸互相固結而發揮強度，同時形成多孔隙的結構體，提供透水功能，有時會在透水混凝土上方另外鋪設其他透水性材料，增加耐損性及美觀。

### 多孔隙瀝青鋪面 Porous asphalt (PA)

多孔隙瀝青混凝土，為將傳統密級配瀝青混合料中之中，其粗粒骨材間的空隙率約提高，能使降於鋪面上的水可由大量的孔隙迅速滲透至路基。

### 植草磚之混凝土格框鋪面 Concrete and plastic grid pavers (CGP and PGP)

鏤空的鋪面則直接提供植被生長的環境及水流入滲，使人車行走上面不至造成植物壞死。

### 非連續拼接鋪面 Permeable interlocking concrete pavements (PICP)

鋪面與鋪面間間隙填入細砂，鋪面下採用透水性底層如無細骨材混凝土、砂土層。

### 透水性混凝土磚 Permeable clay brick pavements (PCB)

使用水泥、骨料、摻和物、水及其他無機添加物等原料製作之透水性地磚，水流可進入高透水性空間及鋪面接縫，再向下入滲進入碎石鋪層以進行貯水。圖 3 為各類透水鋪面種類。

## 灰燼添加於透水性鋪面之可能性研究

如今在人類對於能源的需求與廢棄物的製造產生

下，火力發電廠燃燒後產生的煤炭的飛灰、底灰；中鋼煉鋼廠所製鋼而產生的飛灰（空氣污染防治設備捕捉下來）、底灰（爐床燒）；焚化爐燃燒垃圾後所產生的飛灰、底灰與農業廢棄焚燒灰燼（稻殼灰，稻稈灰），如未妥善處置將會污染環境。

灰燼之再利用用途相當多，包涵土木建材、水泥及骨材等。灰燼的物化特性與水泥相當，其中以灰燼應用於水泥價值為最高。現今各國都有訂定各類灰燼應用於波特蘭水泥混凝土使用（火力發電廠飛灰 — 卜作嵐）之品質規範標準，以確保飛灰添加於混凝土後，於工程使用上不致嚴重影響飛灰混凝土早期及晚期強度與相關品質要求。國內環保署對於焚化再生粒料應用於道路鋪面標準規範。表 4 灰燼資源化再利用途徑。表 5 為各類灰燼化學特性。

灰燼主要化學成份為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 。灰燼中含有各類雜質，當中焚化爐飛灰變異性最大，雜質多，重金屬含量高，為有害廢棄物，且含有氯鹽， $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量亦高。因此需透過前處理技術使灰燼更穩定並且做成可再生資源。常見灰燼再利用前處理方式有：直接再利用法、燒結法、熔融法、固化／穩定法、化學處理法（酸萃取等）及玻璃化法<sup>[17-19]</sup>。各類灰燼加於鋪面案例於表 6 所示。

## 結語

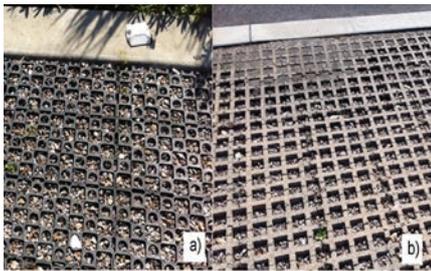
傳統的管末處理已無法解決都市化發展下所導致不透水面積增加而致使發生暴雨逕流的現象，憂慮會有更多污染物的產生及後續維護問題，低衝擊開發技術可解決此辦法，因此低衝擊開發中綠色基礎設施佔重要角色。本文整理低衝擊開發技術與綠色基礎設施之原理與發展並列舉各類灰燼廢棄物再利用於鋪面之



透水性混凝土  
Pervious concrete (PC)



多孔瀝青鋪面  
Porous asphalt (PA)



植草磚之混凝土格框鋪面  
Concrete and plastic grid pavers (CGP and PGP)



非連續拼接鋪面  
Permeable interlocking concrete pavements (PICP)



透水性混凝土磚  
Permeable clay brick pavements (PCB)

圖 3 透水性鋪面種類

資料來源：[10-12]

表 4 灰爐資源化再利用途徑

灰爐種類	資源再利用
飛灰	1. 水泥業：作為波特蘭水泥原料，混合材料，作為飛灰水泥。 2. 土木材料：路面路基等鋪築材料、水壩、填地、瀝青混凝土。 3. 建築材料：磁磚、空心磚、隔熱板、陶瓷製品。 4. 骨材類：混凝土骨材、人工輕質骨材、碎石、砂之替代品。 5. 農業利用：土壤改良，矽酸鉀肥料、有機肥料。 6. 其它：油漆及塑膠之填料，消波塊、人工魚礁及有價金屬回收等。
底灰	1. 建築材料：以底灰取代部份骨材製造面磚、磁磚、空心磚、隔熱磚等製品。 2. 土木材料：以底灰摻入水泥混凝土或瀝青混凝土中，取代部份膠結粒料；或當成路基路底鋪築材料；或當成新生地回填材料等用途。 3. 農業利用：利用底灰當作土壤改良劑以改造土壤之結構，使其更具有經濟利益。

資料來源：[13]

表 5 各類灰爐化學特性

種類 wt %	焚化爐 底灰	焚化爐 飛灰	火力發電廠 底灰	火力發電廠 飛灰	稻殼灰	水泥
SiO <sub>2</sub>	4.99-56.57	11.80-31.81	46.9	54.9	99.4	20.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.98-14.48	8.89-17.39	20.6	25.8	-	5.37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.63-19.09	1.44-15.70	7.2	6.9	0.0078	3.33
CaO	11.85-21.63	20.05-25.80	5.57	8.7	0.268	64.20
MgO	1.35-1.82	1.61-3.53	2.23	1.8	0.0477	1.53
Na <sub>2</sub> O	5.79	-	-	-	-	-
Cl-	-	2-10	-	-	-	0.50
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	1-1.5	-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	-	0.6	0.254	2.19
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	-	-	-	2-3	0.0153	-

資料來源：[14-16]

表 6 灰爐添加於鋪面研究案例

編號	論文名稱	研究目的	灰爐前處理
1	Asphalt concrete and permeable brick produced from incineration ash using thermal plasma technology	1. 透過玻璃化方法 1,400 至 1,600°C 前處理 MSWI 灰爐 (飛灰與底灰), 添加於瀝青混凝土和透水性磚塊其再利用。 2. 透水率 (滲透指數 > 0.01 cm/s), 抗壓強度 (30.6 MPa) 和彎曲強度 (8.6 MPa) 符合標準。TCLP 結果顯示, 重金屬濃度遠低於法規定限度。	玻璃化方法
2	Study on use of MSWI fly ash in ceramic tile	1. 將 MSWI 灰爐再利用與陶瓷磚混和 2. 飛灰添加 20%, 並且燒結 960 度後具有 18.6 MPa 的抗壓強度和 7.4% 的吸水率。TCLP 試驗重金屬濃度低於法規值。	高溫燒結
3	Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete	添加焚化爐飛灰於水泥中水泥對於 MSWI 飛灰的固化效果非常好。水泥最不會溶出有害物質。	固化處理
4	A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder Heavy metal leaching characteristics and compressive strength	透過一系列測試來研究火力發電廠底灰與地質聚合物粘結劑添加於多孔混凝土, 並測試其重金屬溶出特性和抗壓強度, 並與一般底灰添加於多孔性混凝土做比較。	固化處理
5	Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar	添加稻殼灰於水泥砂漿中探討其強度, 孔隙率和耐腐蝕性之研究。	高溫燒結

資料來源: [17-22]

技術案例作介紹, 並說明此研究於污染物去除及廢棄物再利用之各種未來研究潛力。

透過添加不同種類的灰爐於綠色基礎設施中的透水性鋪面材質取代經濟較高的水泥不但達到廢棄物再利用也可降低成本與都市中減少地表逕流量及增加區域土地的保水能力。未來亦可對透水性鋪面材料的強度、保水率, 透水率與毒性物質溶出產生之環境生態與人體健康之影響之結果進行比較分析找出最適的模式。

### 參考文獻

- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J. F. and Vogel, R. M. (2005), "Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 441-448.
- Low-Impact Development Design Atrategies: An Integrated Design Approach*, Prince George's County (1999).
- EPA, U.S.E.P. A. (2000), *Low-Impact Development (LID): A Literature Review*, Document No. EPA-841-B-00-005, Washington, DC.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A. and Chaubey, I. (2012), "Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research", *Water, Air, and Soil Pollution*, 223(7), 4253-4273.
- 內政部營建署 (2015), 水環境低衝擊開發設施操作手冊編制與案例評估計畫。
- Gallet, D. (2011), "The value of green infrastructure: A guide to recognizing its economic, environmental and social benefits", *Proceedings of the Water Environment Federation*, 17, 924-928.
- Tota Maharaj, K. and Scholz, M. (2010), "Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions", *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 29(3), 358-369.
- Beecham, S. C., Lucke, T. and Myers, B. (2010), *Designing Porous and Permeable Pavements for Stormwater Harvesting and Reuse*, International Association for Hydro-Environment Engineering and

Research.

- Shackel, B. (2010), "The design, construction and evaluation of permeable pavements in Australia", *ARRB Conference, 24th*, Melbourne, Victoria, Australia.
- Scholz, M. and Grabowiecki, P. (2007), "Review of permeable pavement systems", *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836.
- Mullaney, J. and Lucke, T. (2014), "Practical review of pervious pavement designs", *CLEAN-Soil, Air, Water*, 42(2), 111-124.
- 內政部營建署 (2015), 水環境低衝擊開發設施操作手冊編制與案例評估計畫, 委託技術服務案。
- 陳盈中 (2005), 吸附於燃煤飛灰表面銅離子之鍵結型態與溶出特性。
- 高思懷 (1996), 垃圾焚化灰渣利用之研發建制及推廣計畫。
- 張正源 (2006), 焚化灰渣物理化學特性之探討與研究。
- Patel, M., Karera, A. and Prasanna, P. (1987), "Effect of thermal and chemical treatments on carbon and silica contents in rice husk", *Journal of Materials Science*, 22(7), 2457-2464.
- Yang, S.-F., Chiu, W.-T., Wang, T.-M., Lee, W.-C., Chen, C.-L. and Tzeng, C.-C. (2009), "Asphalt concrete and permeable brick produced from incineration ash using thermal plasma technology", *J. Environ. Eng. Manage*, 19(4), 221-226.
- Shi, H.-S. and Kan, L.-L. (2009), "Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete", *Journal of Hazardous Materials*, 164(2), 750-754.
- 柴希文 (2006), 「垃圾焚化飛灰處理方法及其通路研究」, 台灣環境資源永續發展研討會論文集。
- Haiying, Z., Youcai, Z. and Jingyu, Q. (2007), "Study on use of MSWI fly ash in ceramic tile", *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 106-114.
- Jang, J. G., Ahn, Y. B., Souri, H. and Lee, H. K. (2015), "A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: Heavy metal leaching characteristics and compressive strength", *Construction and Building Materials*, 79, 173-181.
- Chindaprasirt, P. and Rukzon, S. (2008), "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar", *Construction and Building Materials*, 22(8), 1601-1606.





# 生物滲濾系統 應用於 水資源再生之 病原菌控制

羅永修／國立臺灣大學環境工程學研究所 碩士生

童心欣／國立臺灣大學環境工程學研究所 教授

臺灣受人為活動排放及極端氣候影響，導致自然水資源受到污染，除可用水源逐漸萎縮之外，更造成生態環境嚴重破壞與人類使用的安全疑慮，水資源開發遂成為一重要課題。生物滲濾系統具有規模彈性、低能源需求及操作成本，並且能針對不同污染物作個別設計，對於各用戶之非飲用水需求皆有極大助益。本文藉由整理文獻並輔以不同之現地研究案例介紹生物滲濾系統之設計、功能與優勢，同時呈現目前生物滲濾系統對於中水回收病原菌抑制效果之研究成果，提供未來開發新興水源應用之資訊。

## 水資源匱乏問題

人為活動蓬勃發展下，全球暖化造成各地氣候異常，不僅危及人民財產生命安全，同時影響了全球水資源時空分布的情況。表面水體也因為高強度工業活動和都市發展同時伴隨著人口成長，水質受到嚴重影響，許多地區都面臨當地水資源缺乏的壓力<sup>[1]</sup>。乾淨且穩定的水資源變得愈來愈難取得，產業發展將受到嚴重限制。農業上將缺少穩定的水源供應灌溉，倚重農業做為經濟來源的國家將大受打擊之外，也伴隨著糧食供應問題；工業上將花費更多成本在水資源的取得；河川的污染造成淨水處理廠負擔加重，進而影響民生用水；甚至因為水源不穩定和水體污染而造成自然環境的劣化，對生態資源的保護更艱難。水資源匱乏問題成為各國眼下面臨的一大挑戰。

臺灣位在全球最大季風區內，存在降雨乾溼季的問題。在全球暖化的影響下，颱風等極端降雨事件對臺灣造成的經濟損失和人員傷亡愈加嚴重，如 2009 年莫拉克颱風對農林漁業造成的產品損失就高達近兩百億新臺幣<sup>[2]</sup>，是近十年農業損失最嚴重的風災。除了災

害損失，極端降雨也將大量營養鹽（氮、磷、鉀，來自於施肥）與農業廢棄物（枝葉、動物排泄物、牲畜舍墊料等）等伴隨土壤帶入河川中，引發嚴重的優養化和淤積，造成自然水體惡化，同時縮短水庫使用年限，對南臺灣民生和工業用水造成嚴重影響<sup>[3]</sup>。我國環境保護署於 2007 年的統計資料也指出，臺灣有近百分之四十的水庫優養化導因於過量非點源（Non-point-source）營養鹽污染導致<sup>[4]</sup>。在降水停留時間短的情況下，水源又受到污染而使得可用水量減少，除了以法律控制污染源排放及保護集水區水源之外，投入部分再生水於灌溉和製程以紓困水源不足問題亦能節省水資源的使用，發展效率及經濟上可行的水再生技術遂成為一亟需開發和研究的主题。

## 水資源再生

為促進水資源永續利用，我國制定了《再生水資源發展條例》並規範再生水的使用。據該條例定義，再生水係指廢（污）水或放流水，經處理後可再利用之水；依處理水源不同又分為系統和非系統再生水。將事業所

產生相對難處理的高強度廢水送至污水處理廠集中處理，而低強度廢水可藉由家戶排出端或社區型處理廠處理後回到可運用水資源作非飲用水用途。事業體不僅可針對製程中的特殊物質設計相對應之處理流程進而提升回收率之外，亦可建立水回收系統，將處理後的放流水再次投入製程中，減輕對水資源的依賴<sup>[5]</sup>；污染強度較低的家戶污水可運用較簡易之設備處理後放流，減低中央負擔。若於處理設備後架設儲供水模組，形成一回收水系統，便能利用該水資源用於如景觀澆灌、環境清洗等非飲用用途，增加淡水資源的使用效率<sup>[6]</sup>。對於再生水的成本可行性研究上也現金流計算及益本比分析獲得證實，農業灌溉水源僅使用部分再生水即可在較低操作成本情況下維持同等收益<sup>[7]</sup>。

「水再生」在自然中本就持續進行著，處理行為旨在加速這些自然循環之過程，讓水資源更快回到人類行為中。水質穩定是再生水運用與否的重點，若經適當處理，再生水可符合大部分用水水質要求。再生水處理的程序和目標與污水處理廠的二級放流水相似，皆在減少水中有機質和鹽類，以減緩臭味發生和微生物孳生的情況。一般的處理程序依序為過濾、吸附、消毒、緩衝調節後再回到水處理廠進行淨水程序或是直接用於非飲用用途<sup>[8]</sup>。依照環保署公告之《建築物生活污水回收再利用建議事項規定》，對於非飲用水用途之回收水在大腸桿菌群數（coliform）、生化需氧量（biochemical oxygen demand）、pH、餘氯量及濁度皆有規範。其中控制微生物生長和臭味發生的關鍵多在於 BOD 和餘氯量，但家戶端之回收水源其餘氯大多都在使用過程中被消耗殆盡，額外之加氯流程也會提升成本，同時還有消毒副產物（disinfection byproducts, DBPs）生成的潛在問題，亦為再生水使用安全上之考量。一般民眾礙於用水規模小、資金不足及程序複雜，無法做到上述之程序，但亦有一些技術可以做到家戶規模簡單的水回收和處理程序，其中以生物滲濾系統（或稱生物濾床，biological filter）最為成熟。

## 生物滲濾系統

生物滲濾系統是利用具有高比表面積、高吸附能力的材料，將廢水中的污染物以沉澱、攔阻、吸附、與材料間的反應和附著在濾材上的微生物之代謝作用降解和捕捉，進而達到水質淨化處理功效<sup>[9]</sup>。由於規模

彈性、成本相對低廉、能源與技術需求低，同時能達到一定程度上的水質淨化，可做為自然水體接受放流水之前的緩衝。該技術不僅適用於家戶端的水回收應用，事業體的放流也會做此預處理以提升放流水質，且開發中國家的居民也較負擔得起<sup>[6,10]</sup>，但設計上須考量目標污染物（target compounds）濃度及特性、環境條件（降雨時空分布、地形等）、放流用途等諸多因素以設計較合適的操作系統。

為提升處理效率，可從 (1) 濾材特性，(2) 水力條件，(3) 系統內氧化還原條件等方面調整<sup>[10]</sup>。工業產出廢棄物如廢胎碎片、爐渣、飛灰等因為有高比表面積而被認為是具使用價值的吸附材料<sup>[11,12]</sup>，在底泥污染的整治上也具應用潛力，但因具有其他有機污染物溶出造成二次污染之問題，在使用上仍需多加考量或須進行前處理。另外也有提出利用表面塗層改質原本材料，以提升離子交換容量，增加重金屬吸附效果者<sup>[13]</sup>；使用生質廢棄物燒結而成之生物炭因為具良好吸附能力<sup>[14]</sup>，同時達到廢棄物再利用目的，也成為可應用的吸附材料之一。

水力條件設計上，則考慮水力停留時間（hydraulic retention time, HRT）和濾床阻塞（clogging）的問題。前者影響污染物在系統中反應的時間，氨氮進行完整氧化和脫氮之過程到需要較長時間反應<sup>[9]</sup>，停留時間過短會造成反應不完全而影響處理效率，微量有機物與塑膠微粒也因為結構難以分解及濃度過低，需要較長的反應時間或加入改質材料協助反應<sup>[15]</sup>；後者因懸浮顆粒累積在濾床表層導致流量下降<sup>[16]</sup>，同時阻塞會造成系統內污水與濾材接觸面積降低影響處理效率，需藉由篩選不同粒徑之濾材、刮除濾床表層沉積<sup>[16]</sup>或是適時反沖洗（backwashing）以維持濾床表現。

## 應用與相關研究

利用生物滲濾系統處理水中污染物的研究發展多元，為因應極端降雨造成的大量非點源污染以及考量畜養業的排放問題，研究集中於開發低成本和高適應性的滲濾系統以緩衝短時間的大量排放，並考慮操作的簡易程度以快速應用於實廠規模用於控制營養鹽<sup>[3]</sup>為主，另外針對處理農藥及個人藥物等微量有機污染物<sup>[17]</sup>之相關研究也相繼發表。Gottschall *et al.*<sup>[15]</sup> 使用木屑加入水處理廠的混凝污泥作為濾材處理畜牧廢水中的營養鹽及

動物用抗生素，並且於實場操作達半年。結果發現加入污泥之濾床出流中的硝酸鹽、反應性磷酸鹽及抗生素的處理效率較未加入污泥之濾床提升許多，最高可達90%。雖然尚未確定含鋁鹽污泥是否對磷酸鹽及抗生素具處理效果，但相較其他研究，污泥的添加確實有助於硝化及脫氮作用，而抗生素亦能有效被木屑吸附。此結果不僅可以減緩優養化之情況，同時原為廢棄物之污泥做應用，減少水處理廠的處理成本。

對家戶排放污水進行處理並回收是另一個主要研究方向，家戶污水來自於盥洗、清潔用水，污水組成成分複雜如油脂、清潔劑、食物殘渣、排泄物及個人護理用品 (pharmaceutical and personal care products, PPCP) [18]，由於成分各異和各污染物濃度不穩定，以傳統污水處理流程並無法有效降解所有污染物。利用生物滲濾系統對污染物及可能致病微生物進行簡單處理後，回收做非飲用及非身體接觸用途，以增加水資源使用效率。Niwigaba *et al.* [19] 以多種濾材架設實驗性規模 (pilot-scale) 的家庭中水處理及回收設備，並將回收水用於當地蔬果灌溉，在 BOD 與 COD 的處理表現可達 90% 以上，並且對糞生大腸菌群 (fecal coliform) 的去除率也達 95%，雖然在蔬果灌溉方面並未對土壤品質有額外的提升效果，生長上並未特別突出，但仍可作為一補充灌溉水源，尤其對於水源易受污染且相對不穩定之地區仍有其應用價值。

## 生物濾床抑制病原菌之可能性研究

以下介紹筆者研究以生物滲濾系統模組對指標微生物抑制效果之研究成果：

配製一模擬之家戶生活污水 (溶解性有機碳、氨氮、正磷酸鹽濃度分別為約 20、10、10 毫克/每升)

通入以發泡煉石、經高溫燒結之碎牡蠣殼及玻璃珠為濾材之生物濾床，並以該污水馴化 (acclimation) 兩個月後以大腸桿菌 (*Escherichia coli*) 加入進流水，以選擇性培養基計數進流與出流之大腸桿菌活體數量。另外，以一組未經馴化之濾床作為對照組。其設計參數整理於表 1。

在加入進流水前，先以滅菌 (autoclaved) 及未滅菌之濾材進行批次實驗並植入大腸桿菌，確認濾材本身抑制大腸桿菌生長的效果後再加入進流水操作管柱過濾實驗。不同條件之濾材批次抑制實驗對大腸桿菌的抑制效果如圖 3。從批次實驗中發現，未滅菌濾材在 48 小時內可將接種於反應槽內的大腸桿菌降低至無法計數，滅菌濾材反應槽內的大腸桿菌卻持續生長，表示濾材本身對大腸桿菌沒有抑制效果，抑制效果應來自於濾材上具活性之微生物的交互作用所致。而經過馴化之濾床對大腸桿菌的去除比較情形如圖 4 及圖 5 表示。從圖 4 可知，相較於未馴化的濾床，經過馴化的濾床其污水出流大腸桿菌較進流穩定減少約 90% 以上，經計算平均去除率達 1.77 log，而從圖 5 得到玻璃珠濾床的去除率僅達 60%。



發泡煉石

經灼燒之牡蠣殼

圖 1 使用濾材

表 1 濾床設計參數整理

管柱類型	高度 (cm)	管徑 (cm)	管柱體積 (cm <sup>3</sup> )	濾材種類及配比	濾材粒徑 (mm)	填充體積 (cm <sup>3</sup> )	流量 (mL/min)	EBCT (min)
濾材濾床 (經馴養)	35	4.6	582 (估算值)	發泡煉石：牡蠣殼 = 1：5	*2.00 ~ 4.76	432	2.89	149.5
玻璃珠濾床 (經馴養)				玻璃珠	4	455	3.01	147.8
濾材濾床 (對照組)				發泡煉石：牡蠣殼 = 1：5	*2.00 ~ 4.76	366	2.47	148.1
玻璃珠濾床 (對照組)				玻璃珠	4	382	2.56	149.3

\*AASHTO (美國國際公路及運輸協會) 篩分析法，10 號篩與 4 號篩之間

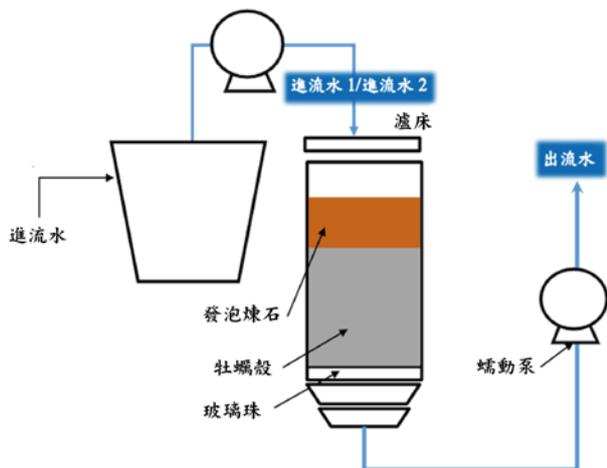


圖 2 滲濾系統示意圖

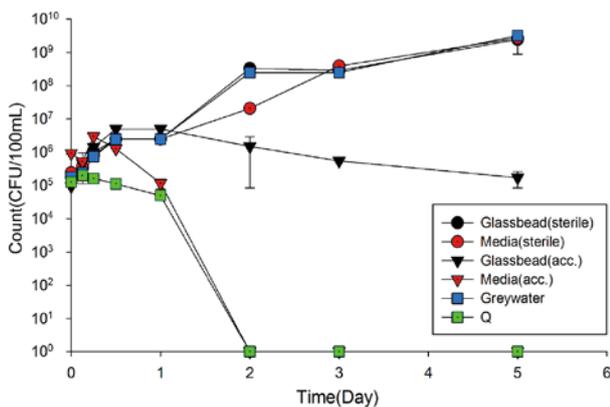


圖 3 滅菌濾材與未滅菌濾材之批次大腸桿菌抑制隨時間變化趨勢圖

可知經馴化的濾床相較對照組因為具有微生物之間的交互作用，致使大腸桿菌生長受到抑制而減少；而玻璃珠濾床可提供之附著表面積較濾材少，去除率也下降。顯示經過馴化之生物滲濾系統確實具有抑制指標微生物生長之能力，對回收水的使用安全上具一定成效。

### 結語、展望與挑戰

我國目前遭遇的水資源問題有 (1) 降水時空分布不均；(2) 水源污染；(3) 水庫功能衰退，導致可用水源減少。本文整理近年來應用生物滲濾系統於不同規模水資源再生的研究。從研究中得知，由於該技術能源和技術需求低，且同時利用多種物理化學及微生物代謝機制來降解水中污染物，對於成分複雜的污水可以簡單有效的

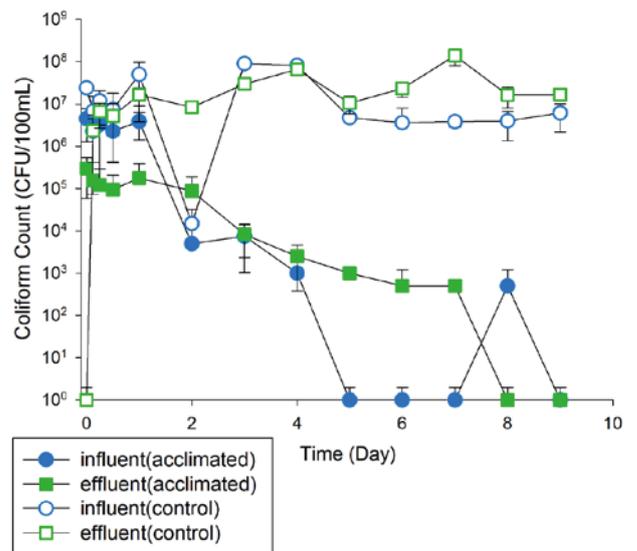


圖 4 含大腸桿菌之污水經濾材濾床（經馴化 (ACCLIMATED) / 未馴化 (CONTROL)) 後之變化趨勢圖

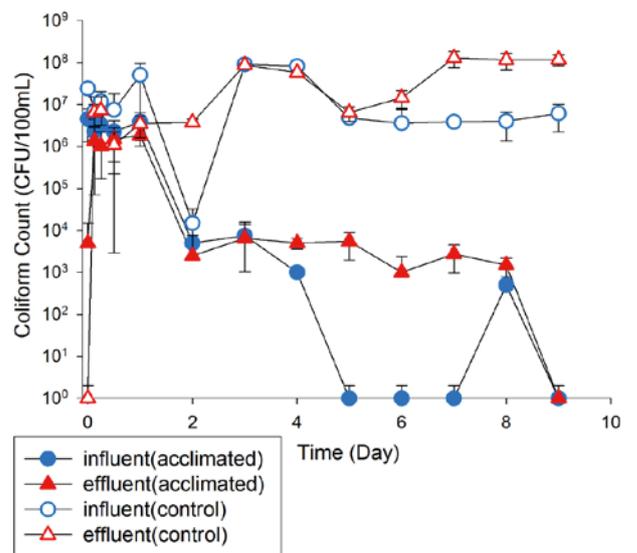


圖 5 含大腸桿菌之污水經玻璃珠濾床（經馴化 (ACCLIMATED) / 未馴化 (CONTROL)) 後之變化趨勢圖

處理，且可依據需求設計不同規模，除了做為控制自然水體優養化和污染物的技術外，並於實驗室規模之模組證實能抑制致病指標菌，應用於中水回收上亦極具潛力。但同時，該技術對特定之污染物或高強度污染的耐受度和處理效率為其限制，在面對未來極端氣候影響加劇、廢污水成分漸趨複雜及民眾使用接受度低的挑戰上，仍須更多學術與實務面的努力，以提升生物滲濾系統於水資源再生上的成效，使我國水資源在支持環境保育和經濟發展的需求上更顯充裕。

## 參考文獻

- Garcia, X. and Pargament, D. (2015), "Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental considerations for decision-making", *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 154-166.
- 行政院農委會 (2016), 農業統計年報。
- Lee, C.-S., Chang, C.-H., Wen, C.-G. and Chang, S.-P. (2010). "Comprehensive nonpoint source pollution models for a free-range chicken farm in a rural watershed in Taiwan", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1), 23-32.
- 行政院環保署 (2007), 臺灣飲用水用途水庫優養化指標統計資料。
- Yen, F.-C., You, S.-J. and Chang, T.-C. (2017), "Performance of electro dialysis reversal and reverse osmosis for reclaiming wastewater from high-tech industrial parks in Taiwan: A pilot-scale study", *Journal of Environmental Management*, 187, 393-400.
- Leong, J. Y. C., Oh, K. S., Poh, P. E. and Chong, M. N. (2017), "Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review", *Journal of Cleaner Production*, 142, 3014-3027.
- Maestre-Valero, J. F., Martin-Gorriz, B., Alarcón, J. J., Nicolas, E. and Martinez-Alvarez, V. (2016), "Economic feasibility of implementing regulated deficit irrigation with reclaimed water in a grapefruit orchard", *Agricultural Water Management*, 178, 119-125.
- USEPA (2012), *Guidelines for Water Reuse*, Chapter 6.
- Dalahmeh, S. S., Pell, M., Hylander, L. D., Lalander, C., Vinnerås, B. and Jönsson, H. (2014), "Effects of changing hydraulic and organic loading rates on pollutant reduction in bark, charcoal and sand filters treating greywater", *Journal of Environmental Management*, 132, 338-345.
- Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z. and Raveh, E. (2007), "Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) — A novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households", *Chemosphere*, 66(5), 916-923.
- Babel, S. and Kurniawan, T.A. (2003), "Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review", *Journal of Hazardous Materials*, 97, 219-243.
- Chang, N.-B., Hossain, F. and Wanielista, M. (2010), "Filter media for nutrient removal in natural systems and built environments: I — Previous trends and perspectives", *Environmental Engineering Science*, 27, 689.
- Genç-Fuhrman, H., Mikkelsen, P. S. and Ledin, A. (2007), "Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from stormwater: Experimental comparison of 11 different sorbents", *Water Research*, 41(3), 591-602.
- Yu, X.-Y., Ying, G.-G. and Kookana, R. S. (2006), "Sorption and Desorption Behaviors of Diuron in Soils Amended with Charcoal", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8545-8550.
- Gottschall, N., Edwards, M., Craiovan, E., Frey, S. K., Sunohara, M., Ball, B. and Lapen, D. R. (2016), "Amending woodchip bioreactors with water treatment plant residuals to treat nitrogen, phosphorus, and veterinary antibiotic compounds in tile drainage", *Ecological Engineering*, 95, 852-864.
- Hatt, B. E., Fletcher, T. D. and Deletic, A. (2008), "Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration systems", *Environmental Science & Technology*, 42(7), 2535-2541.
- Maeng, S. K., Ameda, E., Sharma, S. K., Grützmacher, G. and Amy, G. L. (2010), "Organic micropollutant removal from wastewater effluent-impacted drinking water sources during bank filtration and artificial recharge", *Water Research*, 44(14), 4003-4014.
- Ghaitidak, D. M. and Yadav, K. D. (2013), "Characteristics and treatment of greywater—A review", *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2795-2809.
- Niwagaba, C. B., Dinno, P., Wamala, I., Dalahmeh, S. S., Lalander, C. and Jonsson, H. (2014), "Experiences on the implementation of a pilot grey water treatment and reuse based system at a household in the slum of Kyebando-Kisalosallo, Kampala", *Journal of Water Reuse and Desalination*, 4(4), 294-307. 

## 國際交流 — 參加蒙古 2018 年年會 107.6.14-16



本次蒙古年會由張鈺輝副秘書長代表出席，並發表 Challenges Faced by Taiwan Civil Engineers & Examples of Innovation/Advanced Technology Applied 演講。張副秘書長受到蒙古熱烈的款待。





# 應用過硫酸鹽於整治土壤及地下水有機污染物之發展與挑戰

卓儀秦／國立臺灣大學環境工程學研究所 博士生

林逸彬／國立臺灣大學環境工程學研究所 副教授

農藥的使用、生活污水的排放以及工業廢水廢棄物的不當處置所導致的土壤及地下水污染問題，一直是台灣及許多發展中國家所面臨的重大環境議題，找尋良好的土壤及地下水污染整治方法是現今持續努力的重要課題。使用現地化學氧化法（In-Situ Chemical Oxidation）是整治土壤及地下水污染快速且常見的作法，近年以過硫酸鹽為氧化劑的應用研究也逐年增加，本文將簡述應用過硫酸鹽於現地化學氧化法去除有機污染物的發展、反應機制、應用案例與未來挑戰，以期能開拓土壤及地下水污染處理方法之面向。

## 過硫酸鹽應用於現地化學氧化法的發展

有效整治受有機物污染之土壤及地下水為建立永續水資源之重要議題。土壤及地下水污染整治技術類型甚多，必須考量污染物質的種類與特性、污染廠址水文地質條件、整治經費與預算等，才能選擇最適合的整治技術。其中現地化學氧化法係將各種化學氧化劑，直接注入土壤或地下水污染層中，透過氧化劑本身或反應產生之自由基降解各種有機污染物，相對於其他整治方法，現地化學氧化法具有較少的基礎設施投資、較低的操作維護成本、及較快速的處理時間等優點<sup>[1]</sup>。圖1為常見之現地化學氧化處理操作示意圖，利用幫浦將氧化劑注入井中，氧化劑會擴散至周圍的土壤及地下水層，再與污染物混合、反應，並可由鄰近之監測井觀察處理效率。

常見的氧化劑包含雙氧水（hydrogen peroxide,  $H_2O_2$ ）、過錳酸鹽（permanganate,  $MnO_4^-$ ）、臭氧（Ozone,  $O_3$ ）等，但各有其應用上的限制，以雙氧水為氧化劑的芬頓法最佳的反應條件多在酸性 pH 值，且

會產生大量污泥及氣體，過錳酸鹽氧化法對苯、石油等有機物的去除效果不盡理想，也容易產生二氧化錳沉澱而降低土壤滲透性<sup>[3]</sup>，而使用臭氧做為氧化劑除了要有固定的臭氧產生設備，也要解決臭氧因半衰期短無法有效散佈在地底層的問題<sup>[4]</sup>。由於上述氧化劑的限制，以過硫酸鹽做為氧化劑的化學氧化技術也逐漸被發展，過硫酸鹽包含過單硫酸鹽（peroxymonosulfate,  $HSO_5^-$ ）和過二硫酸鹽（peroxydisulfate,  $S_2O_8^{2-}$ ）兩類，擁有 O-O 鍵（peroxide group），主要以液態或粉末的形式存在，在環境中可穩定存在數小時至數週，與上述其他氧化劑相比，兼具了在自然中存在時間長，適合在反應介質中長途運輸，可適用在較廣 pH 範圍的特性，亦可以藉由活化反應產生自由基，增加對有機污染物的選擇性，快速降解特定有機污染物<sup>[5]</sup>。

## 反應機制與活化方法

過硫酸鹽氧化反應對有機物的降解機制可以分為兩種途徑：自由基降解反應與非自由基降解反應<sup>[6]</sup>。過

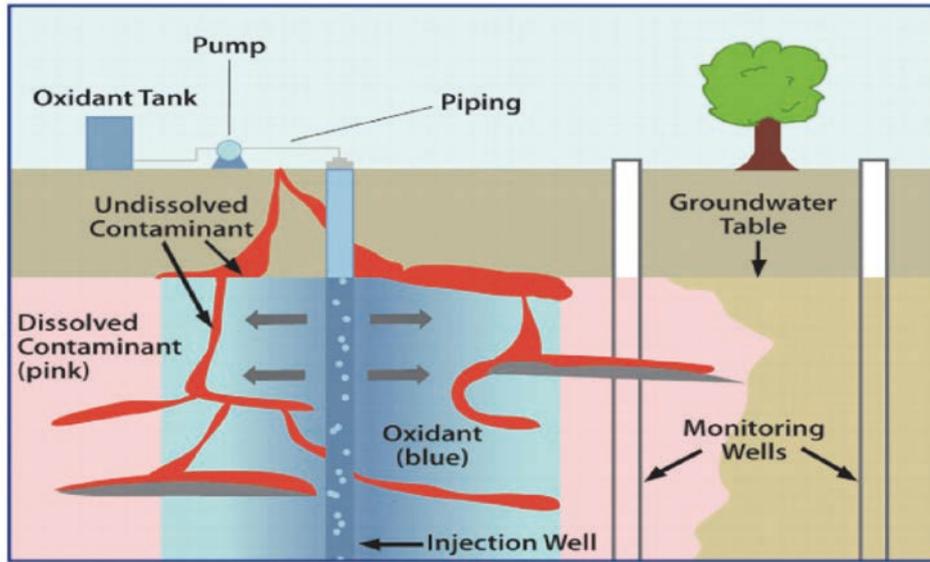


圖 1 現地化學氧化處理操作示意圖 [2]

硫酸鹽本身即為強氧化劑 ( $E^0 = 2.1V$ )，但與多數有機物反應較慢，因此會利用活化方式提高過硫酸鹽的反應性。最早使用過硫酸鹽化學氧化法降解有機物的方式是將過硫酸鹽分子結構中的 O-O 鍵斷裂，轉變成氧化性較高的硫酸根自由基 ( $SO_4^{\cdot-}$ ,  $E^0 = 2.5-3.1 V$ )，硫酸根自由基可與水或氫氧基反應產生氫氧自由基 ( $OH^{\cdot}$ )，硫酸根自由基或氫氧自由基再將水中的有機物污染氧化成無機物或無害物質 [7]。常見的過硫酸鹽自由基活化方法可分為以下幾項，(1) 熱分解活化法，是利用紫外光或微波等方式提供額外能量使過硫酸鹽產生硫酸根自由基 [8,9]；(2) 鹼性活化法，將反應環境酸鹼值調整至鹼性（通常大於 pH 11）可加速過硫酸鹽的分解並產生超氧化物 ( $O_2^{\cdot-}$ ) [10]；(3) 過渡金屬離子活化，利用過渡金屬離子在水中的氧化還原特性，金屬離子氧化會失去一個電子變成價態較高的離子，而過硫酸鹽則接收電子分解成一個硫酸根 ( $SO_4^{2-}$ ) 和一個硫酸根自由基 [11]；(4) 異相催化方法，使用金屬氧化物表面的金屬氧化還原反應或非金屬碳材之官能基特性，將過硫酸鹽分解得到硫酸根自由基，此方法可以有效分離催化劑並減少有害金屬離子的溶出 [12]；(5) 利用有機物直接與過二硫酸鹽反應，如：酚 (phenol)、醌 (quinone)。圖 2 列出上述所提及之產生硫酸根自由基的過硫酸鹽活化方

法。其中，鹼性活化法最常應用於地下水污染整治。除此之外，亦有部分現地處理方式結合過氧化氫活化過硫酸鹽，增加操作便利性與自由基產生效率。

然而，自由基的反應機制，會受到自然水體中的鹵素、天然有機物及其他水質參數的影響，可能間接影響反應速率或產生毒性更強的副產物 [14]。因此，以非自由基反應機制降解污染物的處理方式亦是目前廣為被探討的議題。利用氧化銅 ( $CuO$ ) 活化過二硫酸鹽去除 2,4-二氯酚 (2,4-dichlorophenol) 是較早提出以過硫酸鹽為氧化劑產生非自由基降解反應的研究 [15]。其他如使用改質的奈米碳管、石墨烯、 $CoFe_2O_4-GO$  和  $CuBi_2O_4$  等金屬氧化物活化過硫酸鹽也是非自由基的降解過程 [16,17]。

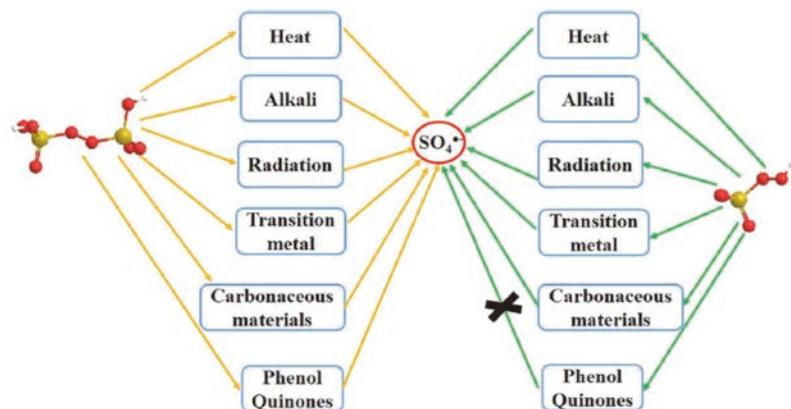


圖 2 活化過硫酸鹽產生自由基的方法 [13]

### 國內外應用案例

表 1 列出國內 105 年列管之控制場址地下水污染物種類與場址數百分比，可以發現三氯乙烯仍是台灣地下水污染最常見的污染物，台灣許多研究都著重在受三氯乙烯污染的地下水整治，部分研究結果顯示，使用活性碳或不同型態的鐵礦物活化過二硫酸皆可以使三氯乙烯在水體中被有效降解<sup>[18,19]</sup>，活性碳雖有直接吸附有機物的效果，但是當地下水中存在多種污染物時，會形成競爭吸附降低處理效果，也必須耗費成本進行活性碳再生，亦有現地研究結果提出，連續注入大量過硫酸鹽是維持三氯乙烯具有長期良好處理效率的方式<sup>[20]</sup>。苯、甲苯等碳氫化合物是石油相關產品的主要成分，其密度比水小，是最常見的輕質非水相液體（Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL）污染物，相關文獻指出，約有八成的苯、甲苯可以透過亞鐵離子活化過二硫酸的氧化方法而順利被移除<sup>[21,22]</sup>，不過上述使用亞鐵離子或其氧化物作為活化劑的缺點是，硫酸根自由基會和亞鐵離子快速反應，降低與有機物反應的能力<sup>[23]</sup>。

表 1 地下水污染物種類百分比分佈<sup>[26]</sup>

污染物	次數	占比 %	污染物	次數	占比 %
三氯乙烯	20	25.60%	甲基第三丁基醚	4	5.10%
氯乙烯	9	11.50%	萘	3	3.80%
順-1,2-二氯乙烯	8	10.30%	四氯乙烯	3	3.80%
總石油碳氫化合物	8	10.30%	氯苯	2	2.60%
苯	5	6.40%	鎳	1	1.13%
1,1-二氯乙烯	4	5.10%	二甲苯	1	1.13%
二氯甲烷	4	5.10%	鉛	1	1.13%
甲苯	4	5.10%	乙苯	1	1.13%
總計				78	100%

在國外已有許多案例使用過硫酸鹽對受污染的地下水體進行現地處理，並比對不同催化劑活化過硫酸鹽對現地處理的影響，以及其成本效益分析。利用鹼性活化法在現地對被 BTEX（苯、甲苯、乙苯與二甲苯）污染的水體進行處理，可以得到有效的去除效果，在美國加州曾分別利用鹼、過氧化氫或螯合鐵為活化劑對直接注入之過硫酸鹽進行活化，以降解受三氯乙烯、甲基第三丁基醚、苯或石油碳氫化合物污染之廠址<sup>[24]</sup>，其現地處理之設備單元如圖 3 所示，圖 4 顯示



圖 3 以過硫酸鹽現地處理污染地下水之設備單元<sup>[24]</sup>

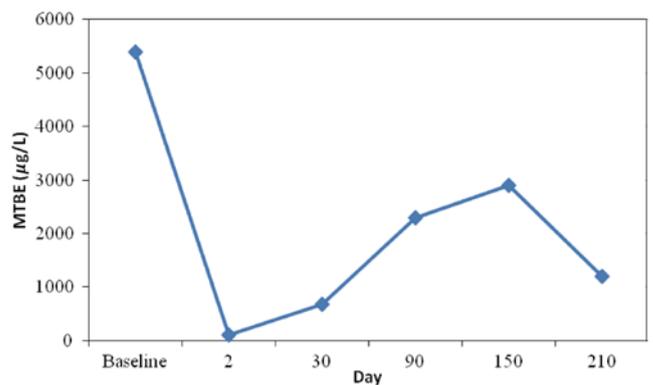


圖 4 甲基第三丁基醚現地處理結果<sup>[24]</sup>

甲基第三丁基醚經由過氧化氫活化過二硫酸鹽法進行處理可以得到 77% 以上的去除。亦有文獻提及，活化的方法必須考量到污染物的種類及污染地的條件，選用良好的活化劑皆可使污染物的去除率達到 85% 以上，而使用過氧化氫或鹼為活化劑是較佳的過硫酸鹽活化方法，但其主要反應機制仍為硫酸根自由基或氫氧自由基的降解反應<sup>[25]</sup>。

## 未來挑戰

硫酸根自由基的生成可視為過硫酸鹽氧化反應中重要的一環，然而，硫酸根自由基濃度的量測，多半是從過硫酸鹽的消耗或反應目標物的減少來推算，許多地下水環境因子，包括含水層天然有機物及表面礦物、水質參數等，與過硫酸鹽或硫酸根自由基反應所造成的影響仍尚未釐清。多數的研究機制只提及活化後的硫酸根自由基與有機化合物進行反應，硫酸根自由基會還原成硫酸根，被氧化的有機化合物則可能轉變成其他有機物的自由基型態，也未有明確的研究說明硫酸根自由基後續完整的鏈反應，有鑑於此，非自由基機制的過硫酸鹽氧化反應或許是一個後續值得加以研究的課題，推測可以減少自由基反應機制後續的不確定性，不被破壞的活化劑表面亦可增加重複利用性減少資源損耗。進一步的實場應用，可探討過硫酸鹽結合不同固體活化劑應用於透水性反應牆對有機污染物降解的可行性，並與現有的處理技術進行比較，期許更加完善土壤及地下水污染的整治。

## 參考文獻

- Pham, A. L., Doyle, F. M. and Sedlak, D. L. (2012), "Inhibitory effect of dissolved silica on  $H_2O_2$  decomposition by iron (III) and manganese (IV) oxides: implications for  $H_2O_2$ -based in situ chemical oxidation", *Environ. Sci. Technol.*, 46(2), 1055-1062.
- US EPA (2012), *A Citizen's guide to in situ chemical oxidation*.
- Liu, H., Bruton, T. A., Doyle, F. M. and Sedlak, D. L. (2014), "In situ chemical oxidation of contaminated groundwater by persulfate: decomposition by Fe(III)- and Mn(IV)-containing oxides and aquifer materials", *Environ. Sci. Technol.*, 48(17), 10330-10336.
- Blanchard, C. (2010), *Applying Chemical Oxidation Technologies at NAPL-Impacted Sites to Facilitate Risk-Based Closure*. Groundwater & Environmental Services, Inc. (GES), 10.
- Waldener, R. H., Tratnyek, P. G., Johnson, R. L. and Nurmi, J. T. (2007), "Oxidation of chlorinated ethenes by heat-activated persulfate: Kinetics and products", *Environ. Sci. Technol.*, 41, 1010-1015.
- Yun, E. T., Yoo, H. Y., Bae, H., Kim, H. I. and Lee, J. (2017), "Exploring the role of persulfate in the activation process: radical precursor versus electron acceptor", *Environ. Sci. Technol.*, 51(17), 10090-10099.
- Liang, S. H., Kao, C. M., Kuo, Y. C., Chen, K. F. and Yang, B. M. (2011), "In situ oxidation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using passive ISCO system", *Water Res.*, 45(8), 2496-2506.
- Yang, S., Wang, P., Yang, X., Wei, G., Zhang, W. and Shan, L. (2009), "A novel advanced oxidation process to degrade organic pollutants in wastewater: Microwave-activated persulfate oxidation", *J. Environ. Sci.*, 21(9), 1175-1180.
- Lin, Y. T., Liang, C. and Chen, J. H. (2011), "Feasibility study of ultraviolet activated persulfate oxidation of phenol", *Chemosphere*, 82(8), 1168-72.
- Furman, O. S., Teel, A. L. and Watts, R. J. (2010), "Mechanism of base activation of persulfate", *Environ. Sci. Technol.*, 44, 6423-6428.
- Anipsitakis, G. P. and Dionysiou, D. D. (2004), "Radical generation by the interaction of transition metals with common oxidants", *Environ. Sci. Technol.*, 38, 3705-3712.
- Liu, J., Zhao, Z., Shao, P. and Cui, F. (2015), "Activation of peroxy-monosulfate with magnetic  $Fe_3O_4$ - $MnO_2$  core-shell nanocomposites for 4-chlorophenol degradation", *Chem. Eng. J.*, 262, 854-861.
- Wang, J. and Wang, S. (2018), "Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants", *Chem. Eng. J.*, 334, 1502-1517.
- Anipsitakis, G. P., Dionysiou, D. D. and Gozalez, M. A. (2006), "Cobalt mediated activation of peroxymonosulfate and sulfate radical attack on phenolic compounds. Implications of chloride ions", *Environ. Sci. Technol.*, 40, 1000-1007.
- Zhang, T., Chen, Y., Wang, Y., Le Roux, J., Yang, Y. and Croue, J. P. (2014), "Efficient peroxydisulfate activation process not relying on sulfate radical generation for water pollutant degradation", *Environ. Sci. Technol.*, 48(10), 5868-5875.
- Cheng, X., Guo, H., Zhang, Y., Liu, Y., Liu, H. and Yang, Y. (2016), "Oxidation of 2,4-dichlorophenol by non-radical mechanism using persulfate activated by Fe/S modified carbon nanotubes", *J. Colloid Interface Sci.*, 469, 277-286.
- Chen, L., Ding, D., Liu, C., Cai, H., Qu, Y., Yang, S., Gao, Y. and Cai, T. (2018), "Degradation of norfloxacin by  $CoFe_2O_4$ -GO composite coupled with peroxymonosulfate: A comparative study and mechanistic consideration", *Chem. Eng. J.*, 334, 273-284.
- Liang, C., Lin, Y. T. and Shih, W. H. (2009), "Treatment of trichloroethylene by adsorption and persulfate oxidation in batch studies", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 8373-8380.
- Lin, Y. T., Liang, C. and Yu, C. W. (2016), "Trichloroethylene degradation by various forms of iron activated persulfate oxidation with or without the assistance of ascorbic acid", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 55(8), 2302-2308.
- Chang, Y. C., Chen, T. Y., Tsai, Y. P. and Chen, K. F. (2018), "Remediation of trichloroethene (TCE)-contaminated groundwater by persulfate oxidation: a field-scale study", *RSC Adv.*, 8(5), 2433-2440.
- Liang, C. J., Kuo, Y. T., Lin, M. D. and Hsu, I. Y. (2009), "Effects of activation process on persulfate oxidation of benzene", *Journal of Engineering, National Chung Hsing University*, 20(2), 111-126.
- Long, A., Lei, Y. and Zhang, H. (2014), "Degradation of toluene by a selective ferrous ion activated persulfate oxidation process", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53(3), 1033-1039.
- Ahn, S., Peterson, T. D., Righter, J., Miles, D. M. and Tratnyek, P. G. (2013), "Disinfection of ballast water with iron activated persulfate", *Environ. Sci. Technol.*, 47(20), 11717-11725.
- JAG Consulting Group, Inc. [http://jagconsultinggroup.com/Home\\_Page.html](http://jagconsultinggroup.com/Home_Page.html).
- Cronk, G. (2008), "Case study comparison of multiple activation methods for sodium persulfate ISCO treatment", *Battelle, 6th International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*.
- 105 土壤及地下水污染整治年報 — 污染場址列管統計及重要場址介紹。



# 台灣水體中抗腫瘤藥物之 流佈、自然光分解及環境風險

林彥妘／國立臺灣大學環境工程學研究所 博士後研究員

林郁真／國立臺灣大學環境工程學研究所 教授

過去十幾年環境水體中偵測到的藥物已被認定為污染物並歸納為「新興污染物」(emerging contaminants or chemicals of emerging concern)。在許多藥物種類中，尤以抗腫瘤藥物被視為可能對水中非靶標物種 (non-target species) 具特殊之風險且不容忽視 (Kümmerer 2004)。殘留於污水處理後放流水中之藥物具有不易被生物降解與吸附之特性，且台灣污水系統大部分排放至淺水河川，加上台灣地理位置處於亞熱帶且陽光充足，是故探討藥物之環境水體宿命及風險時，其自然光宿命為極具重要性之研究。

## 抗癌藥物之特性

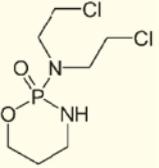
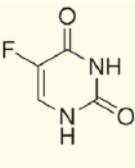
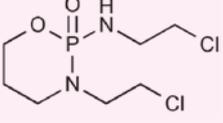
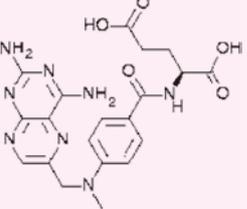
職業暴露於化療劑 (藥物用於治療癌症) 長期以來被視為一種潛在的健康危害。然而，暴露於化療藥物不限於藥物被製備和施用到病人的健康設施，其可透過環境水體與之接觸，甚至更廣泛地影響當地居民和生態系統。患者食用後，這些藥物可能經由污水釋放到環境水體中，或未使用的藥物可能會與垃圾併同處理。然而抗腫瘤藥物於人體及環境中不易在短時間內完全代謝降解，由於癌症病患數量遽升，治療癌症用的抗腫瘤藥物使用量隨之大幅增加，使得世界各地之廢污水與環境水體中皆測得這些藥物之存在。

Cyclophosphamide 為其中最常見之一，污水處理廠廢水中已測得其濃度為 6 ~ 17 ng/L<sup>[1,2]</sup>，而在瑞士、中國及德國醫院廢水中測得 6 ~ 4,486 ng/L<sup>[1,3,4]</sup>。其降解能力不佳且已由污水廠進入義大利之表面水體 (2.2 ~ 10.1 ng/L) (Zuccato *et al.*<sup>[5]</sup>) 及蘇黎世湖中 (~ 0.06 ~ 0.17 ng/L)<sup>[2]</sup>。另一常用藥物 5-fluorouracil 亦常於醫院廢水檢出顯著之濃度 (在奧地利醫院廢水中高達

124 ng/L<sup>[6,7]</sup>，在法國醫院廢水中測得 0.09 ~ 4.0 ng/L<sup>[8]</sup>)；然而 5-fluorouracil 在表面水體中較少檢出<sup>[9]</sup>。Ifosfamide 在德國、瑞士及澳洲污水處理廠出流水已測得 6 ~ 2,900 ng/L<sup>[2,10,11,12]</sup>，而在中國及德國醫院廢水測得濃度高達 10,647 ng/L<sup>[3,10]</sup>。

5-fluorouracil 廣泛用於結腸直腸癌和乳腺癌之治療<sup>[13]</sup>，而 cyclophosphamide 常用於治療白血病、淋巴瘤及部分腦癌患者，cyclophosphamide 亦為免疫抑制劑用於自身免疫性疾病和器官移植後之治療<sup>[13]</sup>，ifosfamide 為 cyclophosphamide 之衍生藥物，常用於子宮頸癌、肉瘤及淋巴瘤之治療<sup>[14]</sup>，methotrexate 為廣泛用於治療急性淋巴性白血病、淋巴瘤及乳癌<sup>[15]</sup>。中央健保局 (NHI) 之統計數據顯示 cyclophosphamide 使用量為 27 ~ 272 公斤/年，5-fluorouracil 為 74 ~ 297 公斤/年，methotrexate 為 6 ~ 12,489 公斤/年 (BNHI 2005)。然而 cyclophosphamide、5-fluorouracil、ifosfamide 及 methotrexate (結構式詳表 1) 之環境宿命資訊目前仍非常有限。Cyclophosphamide 及 ifosfamide 活性污泥培養

表 1 目標抗腫瘤藥物之結構式

Compounds	Structure	Compounds	Structure
<b>Cyclophosphamide</b> C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> Cl <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> P MW: 261.1		<b>5-Fluorouracil</b> C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> FN <sub>2</sub> O <sub>2</sub> MW: 130.1	
<b>Ifosfamide</b> C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> Cl <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> P MW: 261.1		<b>Methotrexate</b> C <sub>20</sub> H <sub>22</sub> N <sub>8</sub> O <sub>2</sub> MW: 454.4	

實驗中證實其具環境持久性<sup>[1,2,16]</sup>，而 5-fluorouracil 經過 50 天培養至多僅 30% 被去除<sup>[17]</sup>。目前雖已有研究顯示經由自然光直接和間接之光解途徑可顯著減少各種藥物的環境濃度<sup>[18-24]</sup>，抗腫瘤藥物之自然光降解行為及其光轉化及於環境水體中降解副產物之環境風險尚缺乏研究。

## 抗癌藥物於台灣環境水體之流佈

根據中華民國中央健保局的統計資料，methotrexate、cyclophosphamide 及 5-fluorouracil 為使用量較大（最大年使用量分別約為 12,500 公斤、272 公斤及 297 公斤）之抗癌藥物，由於這些藥物多屬於化學結構較複雜之有機物，其主要經由人體排泄進入廢水中而流入承受水體中，而許多研究已顯示此類化合物無法由傳統污水處理技術達到完全去除，若經由環境水體傳輸至鄰近水源將危及用水安全。根據 2011 ~ 2012 年針對台灣地區人口集中之台北及高屏地區之醫院廢水、河川水體及污水處理廠進行調查<sup>[25]</sup>，篩選 13 處醫院廢水、20 處河川水

體及 1 處污水處理廠及集水區水源 11 處水體進行分析，發現醫院廢水、污水處理廠污水及河川水體普遍測得殘留的抗腫瘤藥物，尤其醫院廢水中之濃度顯著偏高，主要污染源集中於病床數較多之醫院。調查結果亦顯示台灣水體環境中高濃度之抗癌藥物主要來自醫院廢水，檢出頻率以 cyclophosphamide 及 5-fluorouracil 偏高而 ifosfamide 次之，在其他環境水體如河川及廢水處理廠進出流水中其分佈濃度亦顯著較高。5-fluorouracil 在醫院廢水中之濃度高達 1,477 ng/L，cyclophosphamide 最高濃度亦高達 1,169 ng/L。在河川水體中，5-fluorouracil 最高濃度達 161.5 ng/L，cyclophosphamide 最高濃度 96.0 ng/L 次之。高屏地區廢水處理廠進流水中 5-fluorouracil、cyclophosphamide 及 ifosfamide 之濃度皆偏高，分別為 302.1 ng/L、398.7 ng/L 及 204.6 ng/L，出流水中則以 5-fluorouracil（80 ng/L）分布濃度較顯著。翡翠水庫集水區水體則檢出相對濃度較低之 cyclophosphamide 及 ifosfamide，其最高濃度分別為 41.9 ng/L 及 15.1 ng/L，5-fluorouracil 則未檢出。



圖 1 現場取樣及水體樣品前處理流程

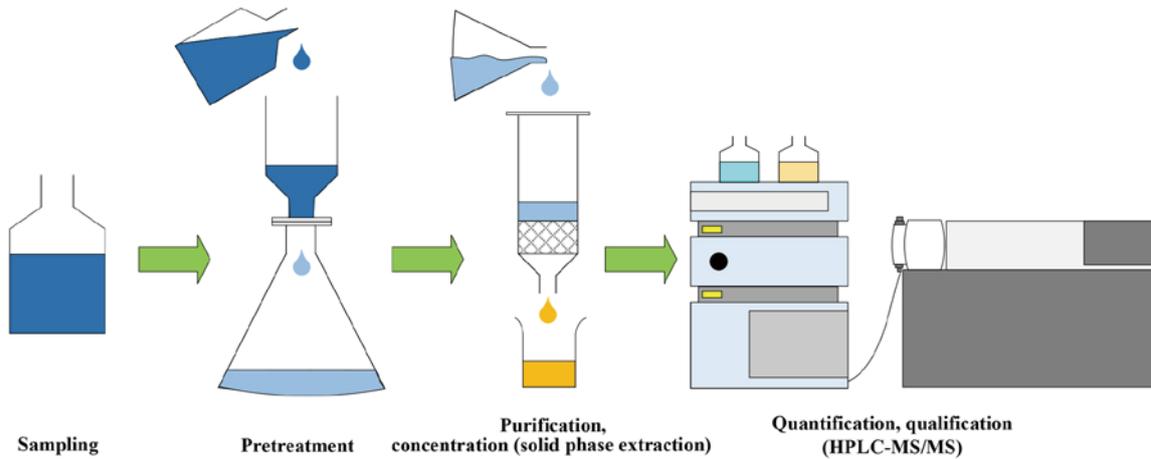


圖 2 水體樣品前處理至樣品分析流程

### 抗癌藥物之自然光分解機制

自然水體尤其是河川含有各種物質，包含：懸浮固體物 (SS)、溶解性有機物質 (DOMs)、重金屬、碳酸氫根離子 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 及硝酸根離子 ( $\text{NO}_3^-$ )，其中 DOMs、 $\text{HCO}_3^-$  及  $\text{NO}_3^-$  在太陽光照射下，會受到光能之激發而產生反應性物質 (photoreactants)，例如：hydroxyl radical ( $\cdot\text{OH}$ )、singlet oxygen ( $^1\text{O}_2$ )、triplet-state DOM ( $^3\text{DOM}^*$ ) 及 aqueous electrons ( $e_{\text{aq}}^-$ )、alkyl peroxy radicals ( $\text{ROO}\cdot$ )、carbonate radicals ( $\text{CO}_3\cdot^-$ )，因此我們稱之為光感物質 (photosensitizers)。自然光分解為有機污染物光照後進行轉變的過程，通常我們將自然光解分為直接光解及間接光解。對太陽光之波長具吸收能力之有機物，在能量充足之情況下進行轉變而降解的過程，即稱為

直接光解。直接光解機制主要為化合物藉由直接吸收光能量並產生裂解轉變為較小分子物質之反應，此類化合物結構通常擁有雙鍵、苯環或羰基。透過光感物質吸光後產生的高反應性激發態物質後，與標的化合物接觸而進行降解之化學反應的過程則稱為間接光解。

由於環境水體為混合基質且成分複雜，經由間接光解產生的激發態物質非單一物種，過去少數相關研究多採用合成基質探討激發態物質 (photoreactants) 的反應性，目前仍極少文獻利用實際環境水體進行各種 photoreactants/photosensitizers 之自然光分解重要性判定。根據過去相關研究已指出主要影響間接光解的水體基質為 DOMs、硝酸根離子以及碳酸氫根離子，其中 DOMs 照光後主要產生  $^3\text{DOM}^*$  與  $^1\text{O}_2$ 、硝酸根離子照光

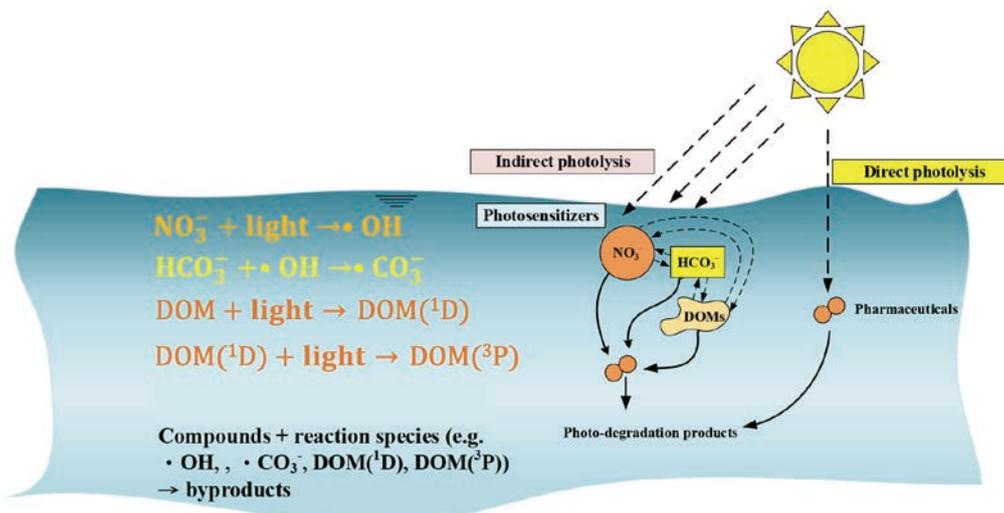


圖 3 環境水體中自然光分解機制示意圖

後產生 $\cdot\text{OH}$ 、碳酸氫根離子與 $\cdot\text{OH}$ 可生成 $\text{CO}_3\cdot^-$ ，歸納四種間接光激發態物質於環境水體中之來源與反應式如表 2 所示：

表 2 四種激發態物質於環境水體中的來源與反應式

Photoreactants	Source	Reaction mechanism
$^3\text{DOM}^*$	DOMs	$\text{DOM}+\text{h}\nu \rightarrow ^1\text{DOM}^* \rightarrow ^3\text{DOM}^*$
$^1\text{O}_2$	DOMs, $\text{O}_2$	$\text{DOM}+\text{h}\nu \rightarrow ^1\text{DOM}^* \rightarrow ^3\text{DOM}^* \rightarrow ^3\text{DOM}^* + ^3\text{O}_2 \rightarrow ^1\text{O}_2$
$\cdot\text{OH}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_3^-+\text{h}\nu \rightarrow \text{NO}_3^{\cdot-} \rightarrow \text{NO}_2 + \cdot\text{O}^-$ $\cdot\text{O}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{OH}^-$
$\text{CO}_3\cdot^-$	$\text{NO}_3^-$ , $\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-+\text{h}\nu \rightarrow \text{NO}_3^{\cdot-} \rightarrow \text{NO}_2 + \cdot\text{O}^-$ $\cdot\text{O}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{OH}^-$ $\cdot\text{OH} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3\cdot^-$

資料整理自 [26-28]

研究發現環境水體之特性如 pH、硝酸根離子及碳酸氫根離子皆為影響 5-fluorouracil 光降解速率之關鍵因子，而光感物質硝酸根離子為影響 cyclophosphamide 光降解速率之主要水質參數。比較不同水體基質中 5-fluorouracil 及 cyclophosphamide 之直接光降解實驗結果，顯示 DI water 中 5-fluorouracil 之光降解作用半衰期為  $56 \pm 11$  小時，methotrexate 為  $27.6 \pm 3.7$  小時，cyclophosphamide 及 ifosfamide 則無顯著之直接光解 [25]。

針對不同實際環境水體中之光解實驗顯示，典型的環境水體中碳酸氫根為最常見的無機陰離子，其中河川水中之硝酸根離子含量最高，由於水體中亦顯著含有碳酸氫根離子，因此 5-fluorouracil、cyclophosphamide、ifosfamide 及 methotrexate 在此環境下光解速率最快，其半衰期分別為 9.2 小時、 $57 \pm 6$  小時、38 小時及  $7.7 \pm 0.2$  小時。此結果說明環境水體之特性如硝酸根離子為影響 cyclophosphamide 光降解速率之主要水質參數，而 pH、硝酸根離子及碳酸氫根離子皆為影響 5-fluorouracil 光降解速率之關鍵因子，碳酸氫根離子為影響 ifosfamide 及 methotrexate 光降解速率之主要水質參數，而環境水體中碳酸氫根離子及碳酸鹽之濃度為 5-fluorouracil 與  $\text{CO}_3\cdot^-$  作用降解之關鍵因子 [25]。

## 抗腫瘤藥物在水體中之環境風險

由於 5-fluorouracil 及 cyclophosphamide 在水體環境中檢出頻率及分布濃度皆高，而廢水處理程序對其無顯著處理成效，其流入環境水體雖可經由間接光解進行自然衰減，然而其衰減及分解速率緩慢，若長期

持續釋放至水體中將易累積於環境中而提高其對環境生態之風險。

一般化合物的毒性資料可分成急毒性與慢毒性兩種，這些研究將實驗生物，包含微生物、動植物等，觀察不同化合物之濃度或劑量對該生物造成的影響，可能造成死亡、基因變化、蛋白質變化等諸多影響，常見的生物毒性資料有半生物致死濃度 (half lethal concentration,  $\text{LC}_{50}$ )、半有效濃度 (half maximal effect concentration,  $\text{EC}_{50}$ )、半抑制濃度 (half maximal inhibitory concentration,  $\text{IC}_{50}$ )、無觀察反應濃度 (no-observed-effect concentration, NOEC) 等，可用此以建立化合物之暴露安全評估準則。環境污染物之風險評估方式，乃計算該物的環境濃度 (predicted or measured environmental concentration) 與其預期無效濃度 (Predicted No Effect Concentration, PNEC) 之比值，亦稱風險商數 (RQ, risk quotient = MEC/PNEC)，藉此評估殘留物於環境水體的濃度是否造成危害，此值若低於 0.1，屬於可接受範圍；若該值介於 0.1 ~ 1，可能需要進一步調查此物質；若其值大於 1，則有必要詳細研究該污染物對環境之確切影響及應變措施 [29]。而 PNEC 的估算方式乃根據生物急毒性或慢毒性測試所得之數據，除以一評估係數 (assessment factor) 而得，然評估係數會因不同的生物毒性數據或不同的毒性測試物種而有所不同。

依據目前台灣各種水體環境中目標抗腫瘤藥物之最高濃度 (measured environmental concentration)，及國內外生態毒理試驗所得之 PNEC 之比值，計算所得到之廢水與表面水體風險商數結果顯示河川承受水體之抗腫瘤藥物殘留污染物濃度較低，主要可能經由河川之稀釋作用或自然衰減 (尤其是光解) 後其污染風險顯著降低。其中 5-fluorouracil 在醫院廢水中的最大濃度與環境最低無影響濃度之比值遠大於 1，其 RQ 值為 15，故宜針對醫療廢水進一步適當處理。此外，5-fluorouracil 光解副產物分析結果顯示，雖然 5-fluorouracil 可經由水體中硝酸鹽和碳酸氫鹽作用進行間接光解 (去除 93%)，其反應時間 42 小時內卻未發生礦化作用，此現象顯示藥物轉化為未知毒性之其它有機物 [30]。

由於抗腫瘤藥物多數具有生物活性且已流佈於醫院廢水及都市污水中，若未妥善處理將會流入飲用水源造成水質安全的疑慮。風險評估結果亦顯示目標抗腫瘤藥物中 cyclophosphamide 及 5-fluorouracil 為台灣醫院廢水及廢水處理廠中之高風險污染物，故抗腫瘤藥物於環境

水體中之流佈與自然光降解之副產物是否產生其他具環境危害性衝擊仍為需進一步探討之重要議題。

## 誌謝

本文資料來源與整理自科技部「水體環境中抗腫瘤藥物自然光宿命與其副產物之機制研究 - 激發態物質之光反應動力學」(研究編號: MOST 102-2221-E-002-009-MY3)、國家衛生研究院「國內水體環境中抗癌與管制藥品之來源探討與宿命評估」(研究編號: NHRI-EX104-10120PC)及科技部「高瞻計畫: 科學 Online 科技部高瞻自然科學教學資源平台」。

## 參考文獻

1. Steger-Hartmann, T., Kümmerer, K. and Hartmann, A. (1997), "Biological degradation of cyclophosphamide and its occurrence in sewage water", *Ecotoxicol. Environ. Safe*, 36(2), 174-179.
2. Buerge, I.J., Buser, H.R., Poiger, T. and Muller, M.D. (2006), "Occurrence and fate of the cytostatic drugs cyclophosphamide and ifosfamide in wastewater and surface waters", *Environmental Science & Technology*, 40, 7242-7250.
3. Yin, J., Shao, B., Zhang, J. and Li, K. (2010), "A preliminary study on the occurrence of cytostatic drugs in hospital effluents in Beijing, China", *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 84, 39-45.
4. Steger-Hartmann, T., Kümmerer, K. and Schecker, J. (1996), "Trace analysis of the antineoplastics ifosfamide and cyclophosphamide in sewage water by twostep solid-phase extraction and gas chromatography-mass spectrometry", *J. Chromatogr.*, A. 726 (1-2), 179-184.
5. Zuccato, E., Calamari, D., Natangelo, M. and Fanelli, R. (2000), "Presence of therapeutic drugs in the environment", *The Lancet*, 355(9217), 1789-1790.
6. Mahnik, S., Rizovski, B., Fuerhacker, M. and Mader, R. (2004), "Determination of 5-fluorouracil in hospital effluents", *Anal Bioanal Chem.*, 380, 31-35.
7. Mahnik, S.N., Lenz, K., Weissenbacher, N., Mader, R.M. and Fuerhacker, M. (2007), "Fate of 5-fluorouracil, doxorubicin, epirubicin, and daunorubicin in hospital wastewater and their elimination by activated sludge and treatment in a membrane-bio-reactor system", *Chemosphere*, 66, 30-37.
8. Mullet, J.-U., Karolak, S., Fontova, A., Huart, B. and Levi, Y. (2009), "Development and validation of a sensitive and selective method using GC/MS-MS for quantification of 5-fluorouracil in hospital wastewater", *Anal Bioanal Chem.*, 394, 2203-2212.
9. Martin, J., Camacho-Munoz, D., Santos, J.L., Aparicio, I. and Alonso, E. (2011), "Simultaneous determination of a selected group of cytostatic drugs in water using high-performance liquid chromatography-triple-quadrupole mass spectrometry", *Journal of Separation Science*, 34, 3166-3177.
10. Kümmerer, K. (2004), *Pharmaceuticals in the Environment: Sources, Fate, Effects and Risks*, Springer London, Limited.
11. Ternes, T.A. (1998), "Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers", *Water Research*, 32(11), 3245-3260.
12. Buseti, F., Linge, K.L. and Heitz, A. (2009), "Analysis of pharmaceuticals in indirect potable reuse systems using solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry", *Journal of Chromatography*, A 1216, 5807-5818.
13. Ghoshal, K. and Jacob, S. T. (1997), "An alternative molecular mechanism of action of 5-fluorouracil, a potent anticancer drug", *Biochem. Pharmacol.*, 53 (11), 1569-1575.
14. Lo, Y., Shen, L.-J., Chen, W.-H., Dong, Y.-H. and Wu, F.-L.L. (2016), "Risk factors of ifosfamide-related encephalopathy in adult patients with cancer: A retrospective analysis", *Journal of the Formosan Medical Association*, 115, 744-751.
15. Jolivet, J., Cowan, K.H., Curt, G.A., Clendenin, N.J. and Chabner, B.A. (1983), "The Pharmacology and Clinical Use of Methotrexate", *New England Journal of Medicine*, 309, 1094-1104.
16. Kümmerer, K., Steger-Hartmann, T. and Meyer, M. (1997), "Biodegradability of the anti-tumour agent ifosfamide and its occurrence in hospital effluents and communal sewage", *Water Research*, 31(11), 2705-2710.
17. Yu, J. T., Bouwer, E. J. and Coelhan, M. (2006), "Occurrence and biodegradability studies of selected pharmaceuticals and personal care products in sewage effluent", *Agric. Water Manage.*, 86(1-2), 72-80.
18. Andreozzi, R., Raffaele, M. and Nicklas, P. (2003), "Pharmaceuticals in STP effluents and their solar photodegradation in aquatic environment", *Chemosphere*, 50(10), 1319-1330.
19. Boreen, A. L., Arnold, W. A. and McNeill, K. (2004), "Photochemical fate of sulfa drugs in the aquatic environment: Sulfa drugs containing five-membered heterocyclic groups", *Environmental Science & Technology*, 38(14), 3933-3940.
20. Lam, M.W. and Mabury, S.A. (2005), "Photodegradation of the pharmaceuticals atorvastatin, carbamazepine, levofloxacin, and sulfamethoxazole in natural waters", *Aquat. Sci.*, 67, 177-188.
21. Lin, A.Y.C. and Reinhard, M. (2005), "Photodegradation of common environmental pharmaceuticals and estrogens in river water", *Environ Toxicol Chem* 2005; 24:1303-1309 Lovdahl, M.J., Priebe, S.R., 2000. Characterization of clinafloxacin photodegradation products by LC-MS/MS and NMR., *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 23, 521-534.
22. Packer, J. L., Werner, J. J., Latch, D. E., McNeill, K. and Arnold, W. A. (2003), "Photochemical fate of pharmaceuticals in the environment: Naproxen, diclofenac, clofibrac acid, and ibuprofen", *Aquat. Sci.*, 65 (4), 342-351.
23. Piram, A., Salvador, A., Verne, C., Herbreteau, B. and Faure, R. (2008), "Photolysis of  $\beta$ -blockers in environmental waters", *Chemosphere*, 73 (8), 1265-1271.
24. Tixier, C., Singer, H. P., Oellers, S. and Muller, S. R. (2003), "Occurrence and fate of carbamazepine, clofibrac acid, diclofenac, ibuprofen, ketoprofen, and naproxen in surface waters", *Environ. Sci. Technol.*, 37(6), 1061-1068.
25. Lin A.Y.C., Lin YC, and Lee WN (2014), "Prevalence and Sunlight Photolysis of Controlled and Chemotherapeutic Drugs in Aqueous Environments", *Environmental Pollution*, 187, 170-181.
26. Mack, J. and Bolton, J.R. (1999), "Photochemistry of nitrite and nitrate in aqueous solution: A review", *J Photochem Photobiol.*, A 128, 1-13.
27. Mill, T. (1999), "Predicting photoreaction rates in surface waters", *Chemosphere* 38, 1379-1390.
28. Zafiriou, O.C., Jousot-Dubien, J., Zepp, R.G. and Zika, R.G. (1984), "Photochemistry of natural waters", *Environ Sci Technol.*, 18:358A-371A.
29. Komori, K., Y. Suzuki, M. Minamiyama and A. Harada, (2013), "Occurrence of selected pharmaceuticals in river water in Japan and assessment of their environmental risk", *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(6), 4529-4536.
30. Lin A.Y.C., Wang XH, and Lee WN (2013), "Phototransformation determines the fate of 5-fluorouracil and cyclophosphamide in Natural Surface Waters", *Environmental Science & Technology*, Apr., 47, 4104-4112. 



# 污水能資源回收 — 微生物燃料電池技術之應用

張朝欽／國立臺灣大學環境工程學研究所 博士生

于昌平／國立臺灣大學環境工程學研究所 副教授

一直以來，人類活動產生之污水被大量排出，污水中含有之豐富有機物與有價物質無法循環再回收成有效可利用之能資源，反而投注額外能源與成本進行處理，造成大量資源浪費。隨著近代循環經濟概念興起以及微生物燃料電池（Microbial Fuel Cell, MFC）技術之突破，許多學者開始關注循環經濟型之創新污水處理系統，於處理污水同時產生電能抑或降低水中重金屬毒性，甚至從中回收有價物質以達到永續之目標。本文整理微生物燃料電池之技術原理與組態發展，並透過生活污水與金屬廢水處理之案例，揭露此技術於水資源回收之各種潛力，最後討論此技術於未來實際放大化之挑戰與機會，以期本技術能應用於我國污水能源回收技術之列。

## 微生物燃料電池技術原理與發展

近數十年隨著人口快速增長，許多人類活動產生之污水被大量排出。傳統生物處理方法以管末角度出發，將污水視為一種廢棄物，排放之污水多進入各污水廠沉澱池與曝氣池等程序以去除其中豐富有機物，達到淨水的效果。污水含有之豐富有機質不僅無法循環再回收成有效可利用之能源，還需投注額外能源才能達到去除之效果。隨著近代循環經濟概念興起以及微生物燃料電池（Microbial Fuel Cell, MFC）產電技術之突破，許多學者嘗試將有機質中蘊含之能量納入污水處理系統，將其回收運用，循環經濟型的創新污水處理系統概念乘勢而起。相關的研究大量投注於微生物燃料電池，期望結合循環經濟的概念，同時處理廢水並產生電能，達到永續之目標。

微生物燃料電池技術之概念於 1911 年由 Potter 發現 (Potter<sup>[1]</sup>)，此技術源自於特殊厭氧微生物於陽極

端以污水中之有機物為電子供給者，透過胞外呼吸作用釋放能量合成自身細胞，同時將電子與氫離子透過不同傳輸機制傳送至胞外電子受體。Heidelberg 等人則進一步發現這些能夠行胞外呼吸將電子送往胞外之產電菌多為異化金屬還原菌，代表菌屬包含 *Shewanella* 和 *Geobacter* 等 (Heidelberg *et al.*<sup>[2]</sup>)，這類菌群統稱為胞外產電菌，能在厭氧條件於胞內氧化有機物質釋放電子，產生的電子經胞內呼吸鏈傳遞到胞外電子受體（如碳電極）行還原作用，借由此過程產生的能量維持微生物自身地生長。微生物釋放出之電子與氫離子分別經由外部導線與內部電池傳輸至陰極端之電子接受者（例如氧氣），完成還原反應，達到降解有機質並同時產電之功能。

目前關於微生物燃料電池之產電效能根據 Fan 等人於 2008 年之成果已可達到每立方公尺千瓦等級之輸出效能。其於實驗室規模使用碳酸氫鹽緩衝溶液成

功使空氣陰極 MFC 輸出功率高達  $1.55 \text{ kW/m}^3$  ( $2770 \text{ mW/m}^2$ ) (Fan [3])。Nevin 等人亦於 2008 年植種純產電 *Geobacter* 菌株於雙槽式微生物燃料電池，更進一步輸出  $2.15 \text{ kW/m}^3$  (Nevin *et al.* [4])。

相較於現行其他污水能源回收之技術，微生物燃料電池產生之電能為直流電，能降低轉換損失、直接供給儲能裝置與環境感測器，對於未來實現循環經濟達到污水採礦之目標具有相當之優勢。

### 微生物燃料電池構型簡介

微生物燃料電池早期即發展出多種組態，其中以陽極、陰極與質子交換膜三者組成之雙槽結構為主要發展成熟之型式，分成 H 型以及立方型。立方型由於兩極間距小能使氫離子快速地通過質子交換膜使內阻降低而逐漸廣而被使用。Rabaey 等人於 2004 年以此構型測試出較佳之功率，其利用葡萄糖作為基質，以鐵氰化物作為陰極電解液，鐵氰化物易溶於水，在陰極幾乎沒有極化現象，使得實際操作容易接近理論電位，輸出功率可產生高達  $4.31 \text{ W/m}^2$  之效能 (Rabaey *et al.* [5])。圖 1 為雙槽式微生物燃料電池之示意圖，陽極端微生物釋放電子與氫離子分別通過導線與質子交換膜到達陰極端與電子接受者（以下為氧氣）反應還原為  $\text{H}_2\text{O}$ 。

2004 年 Liu 和 Logan 等人捨棄雙槽擁有的陰極反應槽，設計出單槽空氣陰極系統（詳圖 2）。此系統能使電極直接與空氣接觸，陽極微生物釋放之電子與氫離子分別通過導線與質子交換膜到達陰極端與空氣中之氧氣反應還原為  $\text{H}_2\text{O}$ 。此設計能省去曝氣所需之能源消耗也同時簡化微生物燃料電池構造，縮小反應器體積、降低成本 (Liu and Logan [7])。2005 年 Rabaey 由此設計基礎

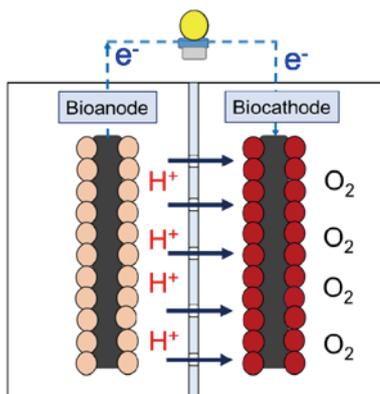


圖 1 雙槽 MFC 組態示意圖  
(修改自 Rismani-Yazdi *et al.* [6])

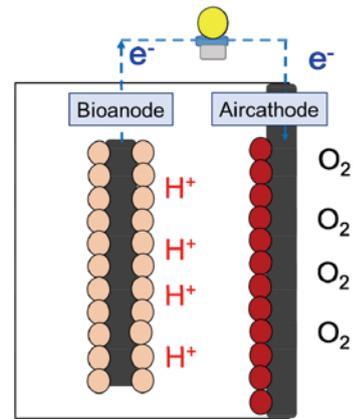


圖 2 空氣陰極 MFC 組態示意圖  
(修改自 Liu and Logan [7])

上發展出管狀單槽微生物燃料電池。此構型使用石墨顆粒作為陽極，並在陰極注入鐵氰化物溶液。透過縮短陽極與陰極室距離與較大 PEM 表面積使其內電阻可降至  $4 \Omega$ ，能大幅提升微生物燃料電池產電效率，並且可產生最大  $90 \text{ W/m}^3$  之能量密度 (Rabaey *et al.* [8])。

### 微生物燃料電池電極材料特性

電極材料亦為組成微生物燃料電池組態之關鍵因子，本身材料之導電度、表面特性、生物相容性與成本關乎微生物燃料電池之輸出效能與模組成本。為了提高生物附著量，增添產電量，許多研究對電極表面進行改質或直接使用生物容易附著之碳氈或者較高表面積之石墨球、碳刷（詳圖 3）以及奈米碳管等材料以增加能量密度。

電極表面的改質包括將碳材料表面進行加熱、酸處理或塗料塗佈，其中經過酸處理後之電極表面正電荷增加，能夠增加生物膜、減少污染物附著，降低污染物干擾電荷傳送至電極，能有效增加功率 (Feng *et al.* [9])。Kim 等人則利用氧化鐵塗料提高生物相容性，使功率和庫倫效率增加 (Kim *et al.* [10])。

電極材料方面，其中碳氈是一種厚度較大、結構鬆散且成本較低廉的材料，細菌容易附著其上進行生長。其雖孔隙率較大，但因厚度大，內部表面的基質和電子的質量傳輸會受到限制 (Wei *et al.* [11])。石墨球為另一種表面積大、微生物生存空間大之電極，直徑約莫  $1.5 \sim 5.5 \text{ mm}$ 。You 等人以葡萄糖溶液為基質，利用管狀空氣陰極槽內填裝石墨球得到最大功率密度  $50.2 \text{ W/m}^3$  與最大電流密度  $216 \text{ A/m}^3$  (You *et al.* [12])。

然而其孔隙率較低，大量堆疊與長期使用會有堵塞與電流蒐集死角之問題。

Logan 等人則開發出碳刷電極，其將四束 10 cm 長的碳纖維捲成一網，將數捆放置於氫中前處理後製作成刷子的長相，即可得到大表面積和大孔隙率的碳刷，主要可分成兩種尺寸，小碳刷直徑 2.5 公分，長度 2.5 cm，表面積  $18,200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ，含有 95% 孔隙率；大碳刷直徑 5 公分，長度 7 cm，表面積  $71,700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ，含有 98% 孔隙率。小碳刷最大功率密度可高達  $73 \text{ W}/\text{m}^3$  (Logan *et al.* [13])。

Peng 等人則指出奈米碳管 (CNT) 能促進電子從微生物傳送到電極 (Peng *et al.* [14])。奈米碳管能小單元複合成塊狀海綿 (不規則 / 規則狀)，其在幾公分厚內有不同層存在，能將催化分子裝在孔穴內。使用小單元複合成的海棉塊狀結構孔隙率高達 99%，彈性和穩定性高，對有機物潤濕性高，壓縮後能保有原來形狀 (Gui *et al.* [15])。

整體而言，高導電性、高表面積與低成本之碳電極為微生物燃料電池之理想電極，優選之碳材能降低成本並提高整體效能，是未來微生物燃料電池放大化之關鍵因子。

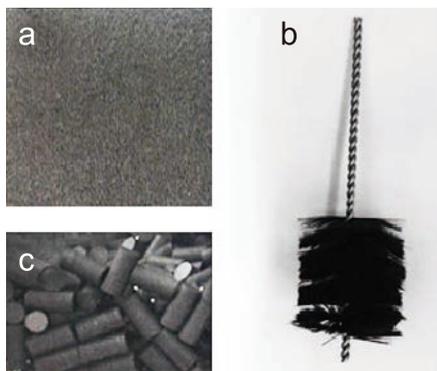


圖 3 電極實體圖之 (a) 碳氈；(b) 碳刷；(c) 石墨球  
(圖片來源:本研究團隊)

## 生活污水採礦案例

### 能源回收

生活污水之能源回收近幾年已有許多成功案例。張等人於 2012 年成功將 40 個體積為 50 mL 之小型空氣陰極電池成功架設成總體積 10 L 之管狀連續流模組 (見下圖 4)。試驗中污水 COD 濃度為  $2.12 \text{ g L}^{-1}$ ，總氮濃度為

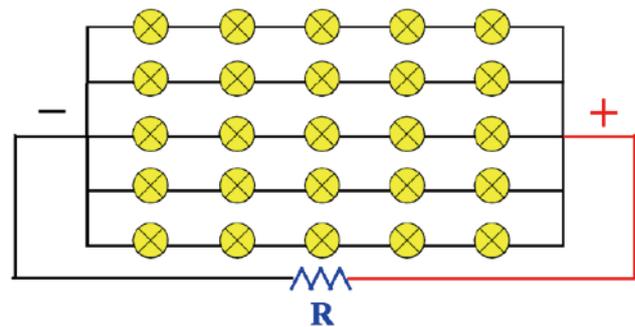


圖 4 微生物燃料電池空氣陰極放大化模組示意圖  
(修改自 Zhuang *et al.* [16])

$41 \text{ mg L}^{-1}$ ，氨氮濃度為  $29 \text{ mg L}^{-1}$ ，pH 值則落在 6.69。40 個電池中先行將每五組小型電池串聯，形成 8 組大型電池，然後再將其並聯成一組巨大電池，運行六個月後能得到最大功率密度  $6.0 \text{ W}/\text{m}^3$  (Zhuang *et al.* [16])。

Ieropoulos 等人於 2013 年更進一步使用純尿液作為微生物燃料電池之進流基質，搭配其開發之陶瓷模組以降低放大化成本，每個小型陶瓷模組體積為 6.25 mL，共採用 24 組。試驗中尿液 COD 濃度為  $12.5 \text{ g L}^{-1}$ ，導電度範圍為  $36 \sim 40 \text{ mS cm}^{-1}$ ，pH 值則落在 6.4~6.7。透過單個小電池兩兩並聯，形成 12 組大電池，最後再將這 12 組大電池串聯成一組巨大電池 (見下圖 5)，成功輸出 7.2 V 之開路電壓 (Ieropoulos *et al.* [17])。測試結果顯示，串聯後之微生物燃料電池能成功驅動額定輸入電壓 3.7 V 之手機 (Samsung GT-E2121B)，使手機進行長達 4 分 20 秒之通話。待手機電池電能耗盡後，電壓會下降至 3.2 V，微生物燃料電池只需要充電 12 小時即可再次驅動。

微生物燃料電池技術已進行許多放大化之試驗，透過槽體體積之放大與電池數目之增加，已能於成功淨化水質同時，回收污水中之能源、成功對小型電子裝置進行供電。其顯示微生物燃料電池技術於污水採礦已具有相當應用潛力。

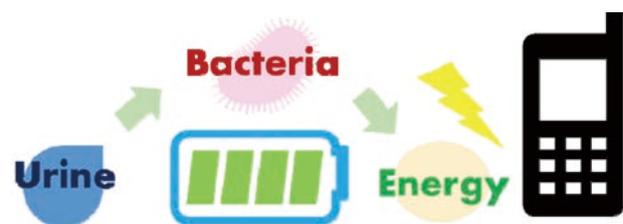


圖 5 微生物燃料電池尿素供電手機示意圖  
(圖片來源:本研究團隊)

## 有價物質回收

除了電能之回收，微生物燃料電池技術亦能從污水中回收有價物質。Fischer 等人嘗試利用雙槽式微生物燃料電池氧化還原之特性進行鳥糞石回收，其將污水廠處理後之污泥置於陰極槽，陽極產電菌釋放之電子與氫離子從陽極到達陰極後將污泥中之磷酸鐵還原出來，再加入鎂與氨，使其於陰極形成鳥糞石結晶，達到磷之回收 (Fischer *et al.* [18])。Logan 等人則利用空氣陰極微生物電解池探討不同陰極材料與施加電壓對於磷回收之影響，結果顯示網狀結構電極相較於平板式電極具有較佳之結晶沉澱效果。網狀結構之不鏽鋼網施加 1.05 V 時能達到  $0.85 \pm 0.09 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  之鳥糞石 ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 回收效率 (Cusick and Logan [19])。

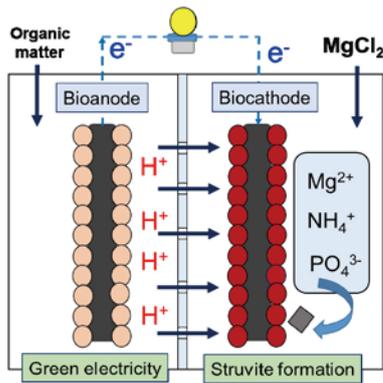


圖 6 微生物燃料電池磷回收示意圖  
(圖片來源：本研究團隊)

## 金屬廢水治理案例

微生物燃料電池除了可以從生活污水中進行能源的回收，產出電能並回收有價物質，此外，亦能降低水中重金屬毒性甚至於降低毒性之過程回收能源。Wang 等人於 2008 年即藉由改變六價鉻濃度 (25, 50, 100 and 200 mg/L) 與 pH 值 (2, 3, 4, 5 和 6) 探討 H 型槽體之微生物燃料電池在不同條件下降解含六價鉻廢水並同時產生電能之效能。結果顯示 pH 值為 2，陰極六價鉻濃度為 100 mg/L 時經過 150 小時左右即能 100% 有效去除六價鉻，將其還原成毒性較小之三價鉻並同時提供約  $130 \text{ mW/m}^2$  之電能 (Wang *et al.* [20])。Tao 等人則於 2011 年利用雙槽無膜式微生物燃料電池來同時產電並去除二價銅。試驗中以人工配製的硫酸銅作為陰極液，二價銅為電子接受者。試驗結果顯示，當陰

極銅濃度為 200 mg/L 時能有高達 93% 之去除率，並同時提供約  $50 \text{ mW/m}^3$  之電能 (Tao *et al.* [21])。

## 挑戰與機會

本文整理微生物燃料電池簡要之技術原理與組態發展，並列舉相關生活污水與金屬廢水應用之案例，揭露此技術於污水處理及能資源回收之各種潛力。惟大多數案例仍屬於實驗室規模之試驗，實際污水處理量規模仍無到達一噸以上之案例，未來模組放大之工作與挑戰仍需投入更多研究能量，並重視成本效益評估，以期將此污水採礦技術早日應用於循環經濟型之創新污水處理系統。

## 參考文獻

- Potter, M. C. (1911), "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds", *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 84(571), 260-276.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.1911.0073>
- Heidelberg, J. F., Paulsen, I. T., Nelson, K. E., Gaidos, E. J., Nelson, W. C., Read, T. D. and Fraser, C. M. (2002), "Genome sequence of the dissimilatory metal ion-reducing bacterium *Shewanella oneidensis*", *Nature Biotechnology*, 20(11), 1118-1123.  
<https://doi.org/10.1038/nbt749>
- Fan, Y. (2008), "Sustainable power generation in microbial fuel cells using bicarbonate buffer and proton transfer mechanisms", *Environmental Science & Technology*, 42(16), 6303-6305.  
<https://doi.org/10.1021/es800780d>
- Nevin, K. P., Richter, H., Covalla, S. F., Johnson, J. P., Woodard, T. L., Orloff, A. L. and Lovley, D. R. (2008), "Power output and coulombic efficiencies from biofilms of *Geobacter sulfurreducens* comparable to mixed community microbial fuel cells", *Environmental Microbiology*, 10(10), 2505-2514.  
<https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2008.01675.x>
- Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S. D., Verstraete, W. and Verhaege, M. (2004), "Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer", *Applied and Environmental Microbiology*, 70(9), 5373-5382.  
<https://doi.org/10.1128/AEM.70.9.5373>
- Rismani-Yazdi, H., Carver, S. M., Christy, A. D. and Tuovinen, O. H. (2008), "Cathodic limitations in microbial fuel cells: An overview", *Journal of Power Sources*, 180(2), 683-694.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.02.074>
- Liu, H. and Logan, B. E. (2004), "Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane", *Environmental Science and Technology*, 38(14), 4040-4046.  
<https://doi.org/10.1021/es0499344>
- Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P. and Verstraete, W. (2005), "Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation",

- Environmental Science and Technology*, 39(20), 8077-8082.  
<https://doi.org/10.1021/es050986i>
9. Feng, Y., Yang, Q., Wang, X. and Logan, B. E. (2010), "Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells", *Journal of Power Sources*, 195(7), 1841-1844.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.030>
  10. Kim, J. R., Min, B. and Logan, B. E. (2005), "Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 68(1), 23-30.  
<https://doi.org/10.1007/s00253-004-1845-6>
  11. Wei, J., Liang, P. and Huang, X. (2011), "Recent progress in electrodes for microbial fuel cells", *Bioresour. Technology*, 102(20), 9335-9344.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.019>
  12. You, S., Zhao, Q., Zhang, J., Jiang, J., Wan, C., Du, M. and Zhao, S. (2007), "A graphite-granule membrane-less tubular air-cathode microbial fuel cell for power generation under continuously operational conditions", *Journal of Power Sources*, 173(1), 172-177.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.07.063>
  13. Logan, B., Cheng, S., Watson, V. and Estadt, G. (2007), "Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells", *Environmental Science and Technology*, 41(9), 3341-3346.  
<https://doi.org/10.1021/es062644y>
  14. Peng, L., You, S. J. and Wang, J. Y. (2010), "Carbon nanotubes as electrode modifier promoting direct electron transfer from *Shewanella oneidensis*", *Biosensors and Bioelectronics*, 25(5), 1248-1251.  
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.10.002>
  15. Gui, X., Wei, J., Wang, K., Cao, A., Zhu, H., Jia, Y. and Wu, D. (2010), "Carbon nanotube sponges", *Advanced Materials*, 22(5), 617-621.  
<https://doi.org/10.1002/adma.200902986>
  16. Zhuang, L., Yuan, Y., Wang, Y. and Zhou, S. (2012), "Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater", *Bioresour. Technology*, 123, 406-412.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.038>
  17. Ieropoulos, I. A., Ledezma, P., Stinchcombe, A., Papaharalabos, G., Melhuish, C. and Greenman, J. (2013), "Waste to real energy: the first MFC powered mobile phone", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(37), 15312.  
<https://doi.org/10.1039/c3cp52889h>
  18. Fischer, F., Bastian, C., Happe, M., Maillard, E. and Schmidt, N. (2011), "Microbial fuel cell enables phosphate recovery from digested sewage sludge as struvite", *Bioresour. Technology*, 102(10), 5824-5830.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.089>
  19. Cusick, R. D. and Logan, B. E. (2012), "Phosphate recovery as struvite within a single chamber microbial electrolysis cell", *Bioresour. Technology*, 107, 110-115.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.038>
  20. Wang, G., Huang, L. and Zhang, Y. (2008), "Cathodic reduction of hexavalent chromium [Cr(VI)] coupled with electricity generation in microbial fuel cells", *Biotechnology Letters*, 30(11), 1959-1966.  
<https://doi.org/10.1007/s10529-008-9792-4>
  21. Tao, H. C., Li, W., Liang, M., Xu, N., Ni, J. R. and Wu, W. M. (2011), "A membrane-free baffled microbial fuel cell for cathodic reduction of Cu(II) with electricity generation", *Bioresour. Technology*, 102(7), 4774-4778.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.057>

### 專題演講 一日月同輝 能源講座 @ 文化大學 107.8.6

為呼應政府推動電業變革政策，日月光文教基金會與中國土木工程學會八月六日共同主辦「日月同輝講座」，邀請台電前董事長黃重球以「面對能源轉型國際電業新風貌」為題演講。



黃重球董事長



現場座無虛席



曾元一董事長引言



王昭烈理事長致贈感謝狀及總結



中時電子報 107.8.7  
 電力的未來在哪？  
<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20180806003719-260405>



聯合新聞網 107.8.7  
 電力供應將逐步以需求端為重  
<https://udn.com/news/story/7238/3294024>



# 雨水花園 — 兼「容」並「蓄」的 景觀型態

楊文綺／國立臺灣大學園藝暨景觀學系 碩士班研究生  
張育森／國立臺灣大學園藝暨景觀學系 教授  
張育傑／臺北市立大學地球環境暨生物資源學系 教授

水，被視為生命之源，是發展國民經濟不可缺少的重要自然資源。隨著氣候變遷、都市快速發展與人口劇增，在水資源取得日漸不易的情況下，水資源的永續發展已成為全球迫切課題。雨水花園 (rain garden) 為一種下凹式的景觀綠地，能夠緩衝暴雨時無法從不透水鋪面下滲的地表逕流，減低道路淹水的同時，亦淨化雨水來涵養地下水或補給景觀用水，為低衝擊開發中重要的一環。藉由雨水花園於城市中的設立，除了能維持城市的綠化，亦兼顧生態、環保的效益。

## 雨水花園簡介

### 雨水花園緣起與效益

雨水花園為生物滯留池 (Bioretention basin) 的一種系統，起源於 20 世紀的 1990 年代美國馬里蘭州的喬治王子郡，一名建商在建住宅區時，為每棟住宅規劃了一部分雨水花園，經過幾年的監測，發現雨水花園能有效滯留並淨化雨水 (Roy-Poirier *et al.* [1])，是一種有效控制雨洪與雨水淨化再利用之生態永續淺凹綠地 (Dietz *et al.* [2]; Pataki *et al.* [3])，被視為一種以節水、水資源再利用為目的的花園形式。

在控制地表逕流、增加土壤含水量的同時，可淨化水質與空氣收集並淨化後的雨水可涵養地下水或補給景觀用水等，增加景觀美質亦可提供生物棲息地、促進生物多樣性並改善微氣候 (王等人 [4]; 劉 [5])，目前也被用於生產蔬果以增加雨水花園的經濟性 (Richards *et al.* [6])。

雨水花園一般由植物層、蓄水層、種植土層、填料層、礫石排水層組成，由於較為特殊的功能和工程結構，雨水花園內部形成了與一般綠地景觀不同的生態環境 (Liu *et al.* [7])。在枯水期時，雨水花園就如同一般綠地景觀的存在，而當滿水期時，便能發揮其特色。

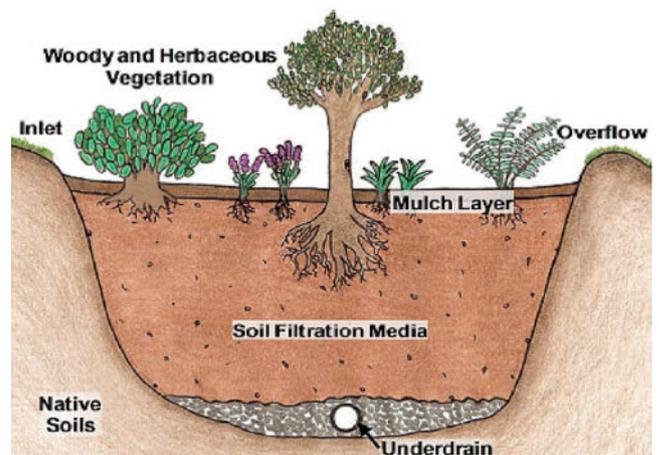


圖 1 雨水花園示意圖 (Roy-Poirier *et al.* [1])

臺灣降雨豐沛，然因地形因素及降雨季節集中等因素，造成大量地表逕流而無法妥善利用，雨水花園正可作為解決之道。

## 雨水花園植栽選擇

雨水花園除可收集和淨化水資源系統，更是可美化環境的景觀型態，因此植物的選擇既須具淨化力又要兼顧觀賞性。以下為雨水花園植栽選擇四大原則：

- (1) 本土植物優先，適當搭配外來物種：本土植物對當地的氣候及土壤條件等具較佳的適應能力（劉<sup>[5]</sup>），在人為建造的雨水花園中能發揮良好的淨化能力並使花園景觀具有極強的地方特色，然而國外的相關研究、建造和植物選擇已有豐富經驗，應可從中選擇較具適應本地的植物種類。
- (2) 具備耐淹又抗旱的特性：雨水花園中的水量與降雨息息相關，會有滿水期與枯水期交替出現的現象，因此植物既要適應短暫水生環境又要有一定的抗旱能力（王等人<sup>[4]</sup>；鄧<sup>[8]</sup>；Dietz *et al.*<sup>[2]</sup>）。
- (3) 根系發達、枝葉繁茂且以具淨化能力者為佳（劉<sup>[5]</sup>；Payne *et al.*<sup>[9]</sup>）：植物對雨水中污染物質的降解和去除機制主要有通過光合作用，吸收利用氮、磷等物質，通過根系將氧氣傳輸到介質中，在根系周邊形成好氧、厭氧菌皆可生存的有氧區和缺氧區的混合區域，使之發揮相輔相成的降解作用（Allen *et al.*<sup>[10]</sup>），以及利用根系對污染物質的攔截與吸附作用，特別是對是重金屬。
- (4) 考慮整體景觀性：選擇可相互搭配種植的喬木、灌木與草本植物，以提高淨化力和觀賞性（劉<sup>[5]</sup>；

Dietz *et al.*<sup>[2]</sup>），如可將根系泌氧性強與弱的植物混合栽種，創造有氧區和缺氧區共同存在的環境，亦可將草本植物與木本植物搭配種植，提高植物群落的結構層次性和觀賞性。如蘆葦、千屈菜、黃菖蒲、美人蕉等為皆常見的雨水花園植物（王等人<sup>[4]</sup>；劉<sup>[5]</sup>）。

## 臺北市雨水花園案例檢討

目前臺北市雨水花園案例的設置工法主要分為兩大類，一種為傳統型的植生溝槽，也就是下凹式綠地；另一種則是以大型蓄水槽盛接雨水，再以雨水作為灌溉水源，稱為雨撲滿的形式。

### 下凹式綠地（Bioretention basin）

此形式的雨水花園，植栽選擇上的限制因子較多，滿水期時植物須能承受短暫淹水的逆境，枯水期時則須具備一定的耐旱性，一般雨水花園入水口處會鋪設礫石，目的是為了避免暴雨時水流過於強烈而沖刷植栽，同時亦可初步過濾汙染物。

以臺大校園的桃花心木道為例，其下凹式綠地設置在道路兩側，穿插於腳踏車停車格間。應用的植物種類約 14 種，包含銀紋沿階草、麥門冬、鳶尾、山蘇、積水鳳梨、錦竹芋、箭羽竹芋、鵝掌藤、朱蕉、斑葉海桐等，及原本即生長於此的桃花心木。生長表現較佳的有銀紋沿階草、麥門冬、積水鳳梨、鵝掌藤，斑葉海桐和朱蕉亦有維持一定觀賞性，表現較差的有箭羽竹芋、鳶尾。臺大校園的景觀維護頻度高，生長較



圖 2 國立臺灣大學桃花心木道植生溝槽於大雨時蓄水之情況

差的植株多直接被汰換，針對這點應在種植植栽前加強評估整體生長環境的合適度，除了可降低人力維護外亦不造成植株的浪費。以雨水花園的功能來看，從圖 2 可看出在大雨時，這些下凹式的植穴確實發揮短暫蓄水效果，減少道路淹水的情況發生。

另一例子為南港區玉東公園裡設置的大型窪地，主要的植栽構成爲黃扇鳶尾、射干、山蘇、波士頓腎蕨及銅錢草，以最低窪處之銅錢草生長最佳，生長勢過強已蔓延至其他植栽區，最高處的射干、鳶尾雖有部分缺肥的情況，但整體生長狀況佳，波士頓腎蕨及山蘇則生長極差，兩者均有嚴重的黃化及葉燒情況。一般雨水花園積水不應該超 3 天，然該雨水花園最低窪處經常處於積水狀態，應加強改善排水。另外以本案例來看，窪地邊坡較陡有養分淋洗的問題，加上完全無遮陰，因此植栽選擇除了對水分的考量外，尚須考慮對強光的耐受性以及耐鹽性。



圖 3 臺北市南港區玉東公園

## 雨撲滿 (Rainwater tank)

雨撲滿形式基本與一般景觀綠地相同，之所以稱爲雨水花園，是取「以雨水灌溉」之意，利用大型容器盛裝雨水，在必要時候藉由架設的管道將雨水送至需灌溉的區域。雨撲滿的形式又可分成地上型雨撲滿及地下雨撲滿兩種。由於綠地本身並非呈現下凹狀，因此不會發生大雨時短暫淹水的問題，所以在植栽種植上的限制較少。

羅斯福路的雨水花園工法是屬於地上型雨撲滿，於地面架設雨撲滿，雨撲滿有管線連接著出水口。根據調查，該案例植栽種類有 29 種，例如朱蕉、唐竹、紫薇、變葉木、蜘蛛百合、鳶尾、法國秋海棠、美人蕉與翠盧莉等，植物多樣性高。植物生長尚可至良好，但較缺乏維護管理，有些區塊植栽稀疏而降低美觀性，此外，園區土壤含水量較低，因此公園的灌溉設施以及儲水桶的實用性皆有待進一步檢討。



圖 4 臺北市羅斯福路綠點 — 雨水花園



圖 5 臺北市大安區油杉社區 LID 公園

另一種則是地下型雨撲滿，將雨撲滿埋在植栽區底下，例如大安區油杉社區 LID 公園，收集地表雨水淨流，將水涵養於水撲滿基地內，藉由基地的貯水層保水，再透過滲透層適時向上補助基地水源。此區植栽生長表現良好，唯植物季相變化明顯，冬季觀賞性較差，建議除了喬木、灌木外，可依季節種植適當地被植物以增加景觀效果。

## 結論與建議（未來展望）

1. 目前有些景觀綠地雖以雨水花園稱之，但其設計並不符合定義，如雨撲滿。建議架設雨撲滿的案例亦可將部分綠地規劃為淺窪地，以更符合雨水花園之名此舉好處在於當枯水期時，雨水花園便可利用雨撲滿儲存的雨水，如此一來植栽選擇的門檻又降低些。

2. 雨水花園的植栽不能僅考量其耐淹或耐旱性，需依施作地點、整體規劃設計做調整（如光度、土壤性質等），找出適合當地生長之植栽，使其發揮最大效益。

3. 文中提及的雨水花園案例效果未知，建議相關的政府或學術單位能做長期的追蹤，以了解目前應用的介質、植栽等對蓄水及水質淨化的影響，有利日後做規劃上的修正，建立較完善的雨水花園。

4. 未來可將再生水（reclaimed water）、可食地景（edible landscape）與雨水花園的概念結合，枯水期以再生水作替代水源。再生水本身即有植物生長所需之營養元素，有利降低化學肥料使用率，落實環境友善。雨水或再生水皆能藉由雨水花園做進一步的淨化，以符合多元使用的水質標準，實現都市水資源的再利用，充分體現循環經濟理念。

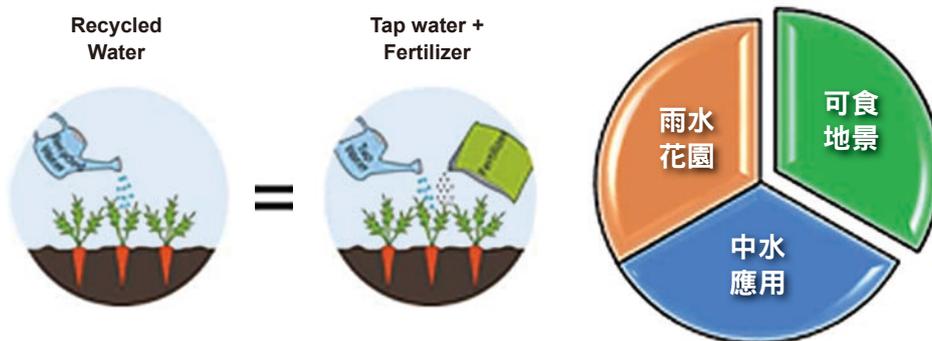


圖 6 再生水灌溉示意圖 (from: King County)

## 參考文獻

- Roy-Poirier A., P. Champagne, and Y. Filion. (2010), "Review of Bioretention System Research and Design: Past, Present, and Future", *J. Environ. Eng.*, 136, 878-889.
- Dietz M.E. and J.C. Clausen. (2005), "A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment", *Water Air Soil Pollution*, 167, 123-138.
- Pataki, D.E., M.M. Carreiro, J. Cherrier, N.E. Grulke, V. Jennings, S. Pincetl, R.V. Pouyat, T.H. Whitlow, and W.C. Zipperer. (2011), "Coupling biogeochemical cycles in urban environments: Ecosystem services, green solutions, and misconceptions", *Frontiers in Ecol. Environ.*, 9, 27-36.
- 王佳、王思思、車伍、李俊奇 (2012), 「雨水花園植物的選擇與設計」, 北方園藝 9, 77-81.
- 劉佳妮 (2010), 「雨水花園的植物選擇」, 北方園藝 17, 129-132.
- Richards P.J., C. Farrell, M. Tom, N.S.G. Williams, and T.D. Fletcher. (2015), "Vegetable raingardens can produce food and reduce stormwater runoff", *Urban For. Urban Greening*, 14, 646-654.
- Liu J., D.J. Sample, C. Bell, and Y. Guan. (2014), "Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater", *Water*, 6, 1069-1099
- 鄧潔 (2011), 「雨水花園在我國城市道路暴雨逕流控制中的應用研究」, 中國水土保持 8, 33-35
- Payne, E.G.I., T. Pham, A. Deletic, B.E. Hatt, P.L.M. Cook, and T.D. Fletcher. (2018), "Which species? A decision-support tool to guide plant selection in stormwater biofilters", *Advances in Water Resources*, 113, 86-99.
- Allen, W. C., P. B. Hook, J. A. Biederman, and O. R. Stein. (2002), "Wetlands and aquatic processes: Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation", *J. Environ. Quality*, 31, 1010-1016.
- Richards P.J., N.S.G. Williams, Williams, T.D. Fletcher, and C. Farrell. (2017), "Can raingardens produce food and retain stormwater? Effects of substrates and stormwater application method on plant water use, stormwater retention and yield", *Ecol. Eng.*, 100, 165-174



# HBF、NJRA、SEED、T&Y 等 四種土壤液化分析方法應用於 臺北市之比較及探討

彭振聲／臺北市政府工務局 局長

曾俊傑／臺北市政府工務局土木建築科 科長

蕭秋安／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 經理

廖繼仁／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 計畫經理

趙慶宇／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 工程師

目前國內廣為採用之 SPT-N 土壤液化分析方法包括：本國雙曲線函數法（HBF，2012）、日本 T&Y 法（1983）、日本道路協會法（NJRA1996）、美國 NCEER 法（1997）。本文主要說明臺北市政府「106 年臺北市土壤液化潛勢圖製作暨地質鑽探補充調查專業服務工作」之計畫成果，並針對上述四種土壤液化分析方法進行比較探討。

## 前言

鑒於美濃地震在臺南市造成嚴重液化災情，為能進一步瞭解居住環境之土壤液化潛勢並做必要之改善工程，避免強烈地震來襲時造成重大人命與財產損失，行政院於 105 年 4 月 29 日核定實施「安家固園」計畫，逐年撥付經費協助各縣市政府進行老舊建築物耐震評估補強及土壤液化潛勢區改善防治等工作。

臺北市為臺灣首善之區，人口密集且工商業發達，政府相關單位陸續於臺北都會區推動許多重大交通建設與基礎設施，以建構國際化之都市水準。由於臺北市地質環境特殊，瞭解地震發生時可能導致土壤液化相關災害有其必要，臺北市政府陸續辦理諸多相關研究計畫，包括配合國家災害防救科技中心之大臺北地區規模地震衝擊情境之災害潛勢與建物人員災損分析等，也曾有小精度、小比例尺的土壤液化潛勢圖之產出，並於 105 年 9 月 10 日率先全國公開中級土壤液化潛勢圖。為求更新與精進圖資，臺北市政府在

「安家固園」經費的支持下執行「106 年臺北市土壤液化潛勢圖製作暨地質鑽探補充調查專業服務工作」計畫，除了廣泛蒐集整理既有地質鑽探資料，更針對既有資料不足區域進行補充地質鑽探作業，以製作精度更高的中級土壤液化潛勢圖。

## 土壤液化之成因

土壤液化的發生必須同時具備三個要素：低塑性土壤（砂土或粉土）、高地下水位（飽和狀態土層）以及足夠強烈之地震力，一般發生在河岸、海岸、舊河道、沖積平原及海埔新生地等區域。當排列鬆散且孔隙中充滿水的砂質土層受到地震激烈搖晃，土壤顆粒排列將趨於緊密而擠壓孔隙，使得孔隙水壓增高、砂粒間的接觸力減少甚至消失，砂與水混合成如泥漿般的流動體，失去支承上部結構物的能力，嚴重將導致結構物下陷或傾斜、人孔上浮、地下管道破裂等災損，如圖 1 所示。

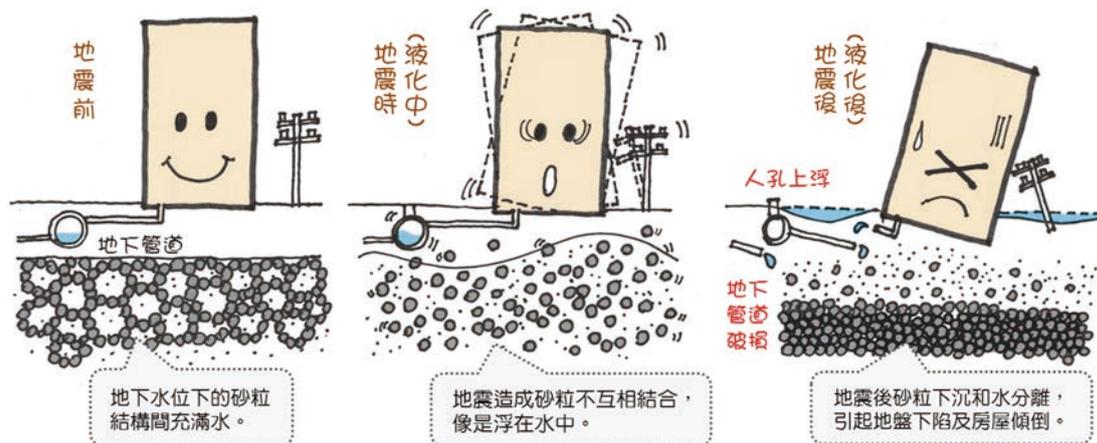


圖 1 砂土顆粒結構於液化過程之改變

另外，土壤液化亦經常伴隨噴砂現象。液化發生時，淺層砂土可能受到過高孔隙水壓驅使而衝破上方覆蓋土層，夾帶大量懸浮砂粒溢出地表，並在噴砂孔附近形成圓錐狀堆積；噴砂型式受地層條件影響，視覆蓋土層厚度及透水性而不同，有些噴砂孔甚至會形成直徑數十公分之凹陷大洞。土壤液化不一定伴隨發生噴砂現象，但有噴砂現象則表示下方土層必曾經發生液化。

### 土壤液化分析方法探討

現地土壤於地震作用下是否發生液化現象，多以地震引致之反覆剪應力比 (Cyclic Stress Ratio, CSR) 相較於土壤抗液化強度比 (Cyclic Resistance Ratio,

CRR)，定義抗液化安全係數 FL (= CRR/CSR)，當 FL ≤ 1 時即視為土壤發生液化。

本計畫目標為製作大區域中級土壤液化潛勢圖資，土壤液化潛勢評估採用國內試驗資料最豐富之現地試驗 SPT-N 法。目前廣為採用之 SPT-N 土壤液化評估法包括：本國雙曲線函數法 (HBF, 2017)、日本 T&Y 法 (1983)、日本道路協會法 (JRA, 1996)、美國 NCEER 法 (1997)，彙整比較詳表 1 及圖 2 所示。依內政部營建署安家固園計畫所建議，本計畫採用 HBF 法進行液化潛勢分析，此方法具有分析公式簡單、參數具明確物理意義、預測精度佳等優點，另外並提供其他方法之分析結果以利比對。

表 1 SPT-N 土壤液化評估法彙整表

分析方法		HBF (2017)	T-Y (1983)	NJRA (1996)	NCEER (1997)
研究背景 / 案例來源		臺灣及世界地震案例 (參考 Seed 法)	日本地震案例	日本地震案例 (1995 年阪神地震後修正)	世界地震規模 7.5 案例 (改自 Seed 法)
地震反覆剪應力比 CSR	地震反覆剪應力	平均反覆剪應力	平均反覆剪應力	最大反覆剪應力	平均反覆剪應力
	地震規模	—	修正 0.1 (M-1)	—	—
	深度應力折減	修正 (折線回歸)	修正 1-0.015z	同 T&Y 法	修正 (多項式回歸)
土壤抗液化強度比 CRR	地震規模	MSF 修正 (M <sub>w</sub> /7.5) <sup>-1.8</sup>	—	—	MSF 修正 10 <sup>2.24</sup> /M <sup>2.56</sup>
	鑽桿能量 ER	60%	80%	72%	60%
	有效覆土應力	$\sqrt{Pa/\sigma_v'}$	$\frac{1.7N}{1 + \sigma_v'}$	$\frac{1.7N}{1 + \sigma_v'}$	$\sqrt{Pa/\sigma_v'}$
	細粒料 FC (%)	修正 k <sub>s</sub> × (N <sub>i</sub> ) <sub>60</sub>	修正 N <sub>a</sub> = N <sub>i</sub> + ΔN <sub>f</sub>	修正 N <sub>a</sub> = c <sub>1</sub> N <sub>i</sub> + c <sub>2</sub>	修正 (N <sub>i</sub> ) <sub>60CS</sub> = α + β (N <sub>i</sub> ) <sub>60</sub>

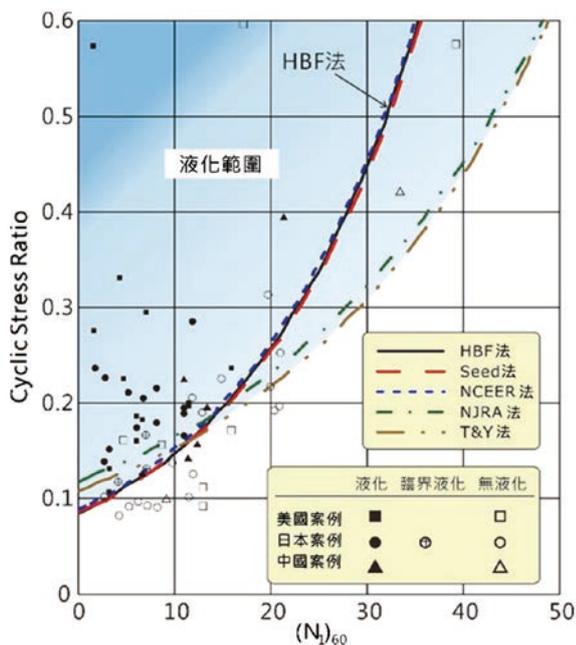


圖 2 SPT-N 土壤液化評估法之臨界液化強度曲線比較圖 (改自黃俊鴻等人, 2012)

## 106 年臺北市「安家固園」計畫成果及比較

### 臺北市地理、水文基本概述

臺北市總面積約 271.8 km<sup>2</sup>，其中平原與山區各約占 43% 及 57%，平原區主要位於臺北盆地中淡水河與新店溪以東部分，盆地北緣由大屯火山群所屏障，以安山岩熔岩與火山角礫岩不整合覆蓋於中新世地層上；盆地南側則為西部麓山帶，由第三系沉積岩地層所構成的。臺北盆地大致順著大漢溪由西南向西北傾斜，平均高度 7.95 m，平均坡度 1.81%。臺北市區平緩區面積約 120 km<sup>2</sup>，平均高度 5.78 m，平均坡度 1.95%。

參考中央地質調查所的流域地質圖，本計畫工址出露地層主要為松山層，為全新世之現代沖積層，以砂土、黏土、粉土交互出現構成，由於緊臨河道，因此土層之側向變異較大，變化快速。松山層的泥層強度普遍較低，本身不透水且含水量高，易發生變形，砂層的強度則略高，由於屬河道造成之堆積物，因此經常呈現被泥層包圍之凸鏡狀，易產生局部受壓水層，若位於淺層，較易發生液化與變形。

### 補充地質鑽探需求評估與配置規劃

根據招標文件需求，本期圖資整合前期圖資精度不足區，以精度不足區搭配地質分區所設定的鑽孔密度為標的初步佈設，並綜合考量以下因素進一步配置鑽孔，

包括：(1) 既有鑽孔資料整合，參考既有鑽孔分佈之特性；(2) 人口密集區及老舊建物聚落；(3) 初級土壤液化潛勢地圖之中高潛勢區域；(4) 重大開發區（如社子島）。

本計畫補充鑽探共計 190 孔，遍布臺北市 12 行政區，孔深以 30 m 為原則，部份於台北盆地周邊鑽孔則在鑽入堅硬地層 1 m 後停止，鑽孔位置分布如圖 3。液化分析採用之鑽孔密度（包含既有鑽孔及本期補充鑽孔）原則達到每平方公里 4 孔，其中關渡平原及部分北投區屬未開發地區，故鑽孔密度較低，如圖 4 所示。

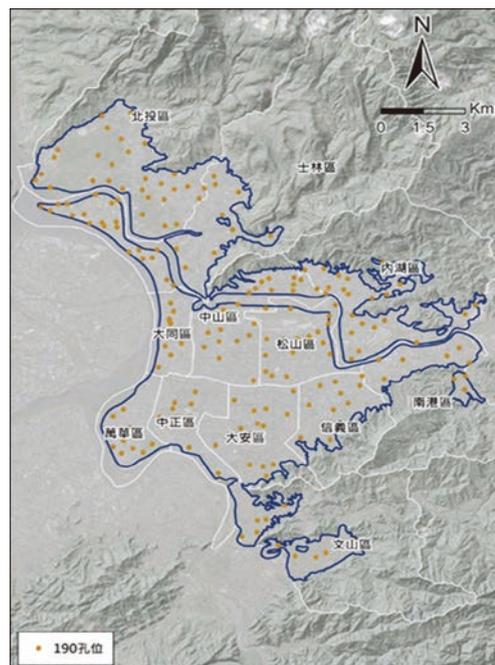


圖 3 補充鑽孔位置分布圖

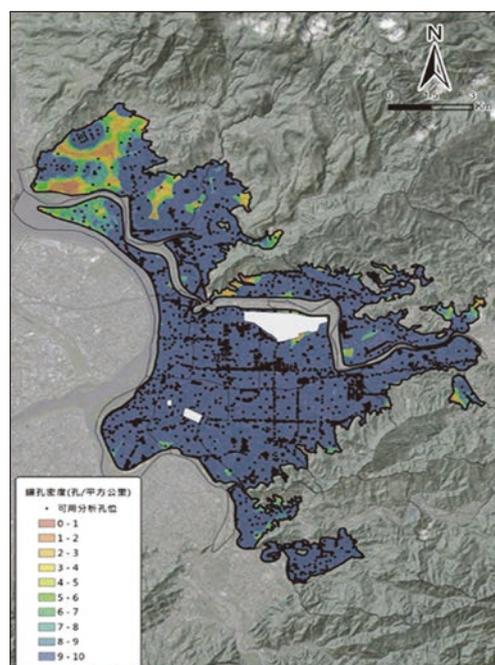


圖 4 鑽孔密度分布圖

## 地下水位觀測

為取得計畫範圍內之地下水位資料，本計畫由補充地質鑽探孔位挑選出均勻分布之 30 處設置自計式水位觀測井，每分鐘紀錄一筆，150 處設置人工水位觀測井，約每兩週觀測一次，整體水位觀測井布置情形如圖 5。將地下水位觀測結果平均值通過距離權重反比法 (IDW) 進行內插分析，即可推估整體分析區域內的地下水位面，如圖 6 所示。

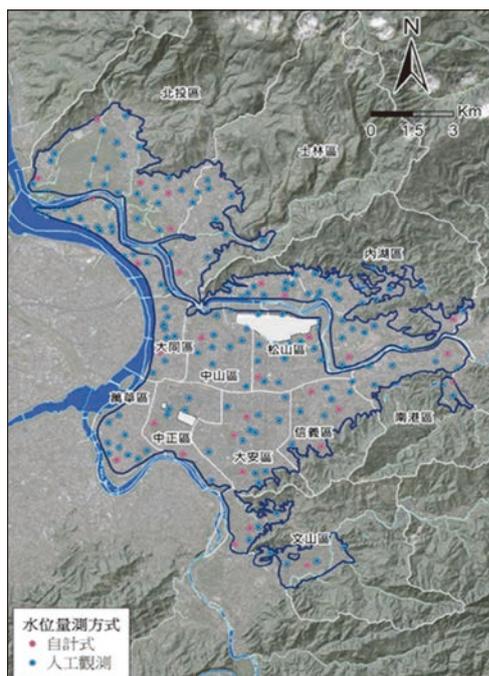


圖 5 水位觀測井分布圖

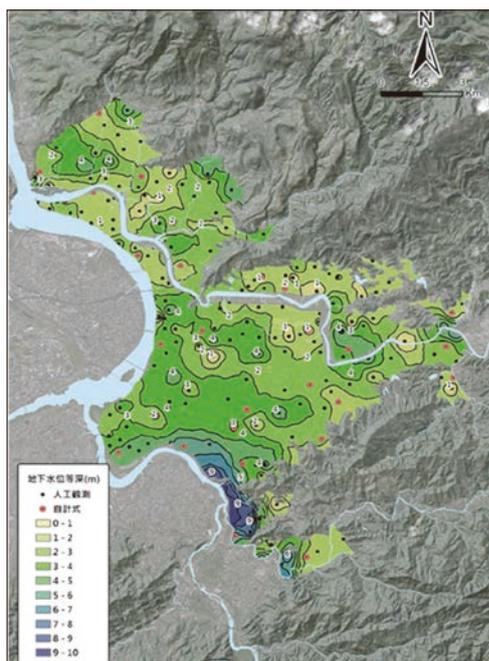


圖 6 地下水位等深度圖 (淺層)

## 鑽探資料蒐集與篩選

本計畫廣泛蒐集地質鑽探資料，並整理或數化建檔為 GEO2010 格式資料庫；通過自行開發的自動化篩選程式，依表 2 條件篩選、比對出符合液化分析需求的資料，實際用於分析之鑽孔總計 4769 孔，如表 3 及圖 7 所示。

表 2 鑽探資料篩選條件表

項目	條件描述
深度	鑽孔深度需 > 15m，才視為有效鑽孔參與分析
SPT-N	1. N 值須完備且間隔大致規律，若漏缺則視情況酌予修復或濾除 2. 20 公尺深度內之 N 值必須都有值，若有空值則該井錄將濾除 3. 若該井 30 公尺內最後一筆資料之 N 已大於 50，則設定該深度至 30 公尺皆以最後一筆 N 值作為代表值
FC	沒有輸入 FC 值資訊的鑽孔視情況酌予修復 (依該深度上下相同土壤分類之數值予以填補) 或濾除
$\gamma_t$	1. $\gamma_t$ 範圍超乎正常區間，視情況酌予修復或濾除 2. 如 $\gamma_t$ 為空值則內定 $\gamma_t = 1.8 \text{ t/m}^3$ 3. 如 $\gamma_t > 3 \text{ t/m}^3$ 者，該井錄將濾除
USCS	1. USCS 分類欄位資料型態不合、漏缺、或明顯錯誤酌予修復或濾除 2. USCS 分類欄位漏缺部分，以下列判斷式酌予修復： • IF $FC < 50$ and $N < 50$ then USCS = "SM" • IF $FC < 50$ and $N \geq 50$ then USCS = "GM" • IF $FC \geq 50$ and $PI < 7$ then USCS = "ML" • IF $FC \geq 50$ and $PI > 7$ then USCS = "CL"
PI	1. 配合 USCS 分類檢核 PI 值欄位是否合理或有漏缺 (人工判斷) 2. 檢核 PI 值未填被誤判成 0 或砂質土有高 PI 值等明顯錯誤
座標	以計畫為單位檢視該批鑽孔資料是否有 67-97 座標偏移 (人工判斷)
區位	1. 鑽孔非屬山區、臺地、水中之鑽孔 (人工判斷) 2. 由數值地形模型產製 6% 坡度圖以及 20 m 等高線，用以檢核鑽孔位置是否屬於平原區域

表 3 鑽探資料篩選結果彙整表

鑽孔來源	篩選前孔數	篩選後孔數	通過比例
本計畫補充地質調查	190 孔	190 孔	100%
最新版 GEO2010 鑽探資料庫 (含本公司近年執行中尚未歸檔之鑽探資料)	6544 孔	2656 孔	40.6%
臺北市政府提供公共工程鑽探報告 (50 案)	403 孔	315 孔	78.2%
臺北市政府工務局之營建工程資料庫	3444 孔	1550 孔	45.0%
自行蒐集整理	58 孔	58 孔	100%
合計	10639	4769	-

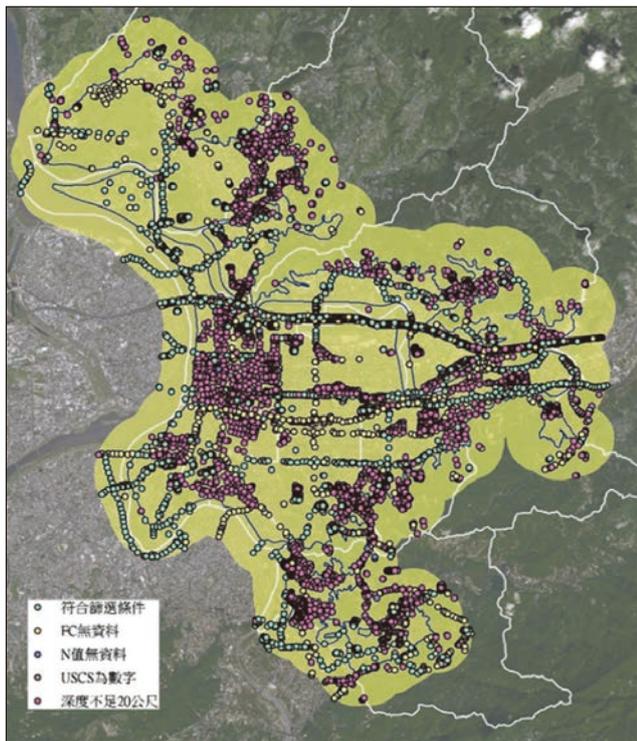


圖 7 鑽探資料篩選結果分布圖

### 分析地震力

臺北市主要震害多來自盆地東南方的宜蘭、花蓮外海地震，受盆地效應影響，長震動延時將使地盤共振效應顯著。依據「建築物耐震設計規範」（營建署，2011年）規定，工址應分別檢核中小地震、設計地震及最大考量地震發生時土壤液化之潛勢。土壤液化潛勢圖資採用設計地震進行評估，分析地震力參數如表 4 所示。

表 4 分析地震力參數表

分析地震力參數	中小地震	設計地震	最大考量地震
尖峰水平地表加速度 (A <sub>max</sub> )	0.07 g	0.24 g	0.32 g
地震矩規模 (M <sub>w</sub> )	7.1	7.3	7.5

### 土壤液化潛勢地圖分析成果

將本計畫蒐集得之 4769 孔可用地質鑽探資料，套入地下水位等深度圖資以及能量修正後的 SPT-N 值，即可進行單孔的土壤液化潛能指數計算，完成各單孔液化潛能指數計算後，可利用內插分析推估各孔間「無觀測資料處」之液化潛能指數，進而繪製成土壤液化潛勢圖，常見內插分析方法如距離平方反比法

(IDW) 及克利金法 (Kriging)，考量鑽孔叢集分佈之特性，本期圖資採用 Kriging，經敏感度分析後，Kriging 的結果亦較恰當。此外，在內插分析前須進行「工程地質特性分區」，避免資料失真。本計畫液化潛勢分析結果如圖 8 所示，相關說明如下：

- (1) 大同區、中山區、士林區社子島、北投區南側及中正區部分區域位於淡水河沿岸區域，地層以砂土為主砂泥互層，地下水位深度較淺，因此本區域之土壤液化潛勢較高。
- (2) 中正區南側、大安區南側及文山區屬新店溪區，地層屬夾卵礫石層砂泥互層，且地下水位深度較深，屬土壤液化潛勢中低範圍。
- (3) 北投區北側、士林區北側、中山區北側、松山區北側、大安區東側、信義區及內湖區，地層屬泥為主砂泥互層，亦屬土壤液化潛勢較低範圍。
- (4) 其它範圍，如松山區南側及南港區沿基隆河道範圍，屬夾粉土、黏土之砂泥互層為主，屬土壤液化潛勢中高度範圍。

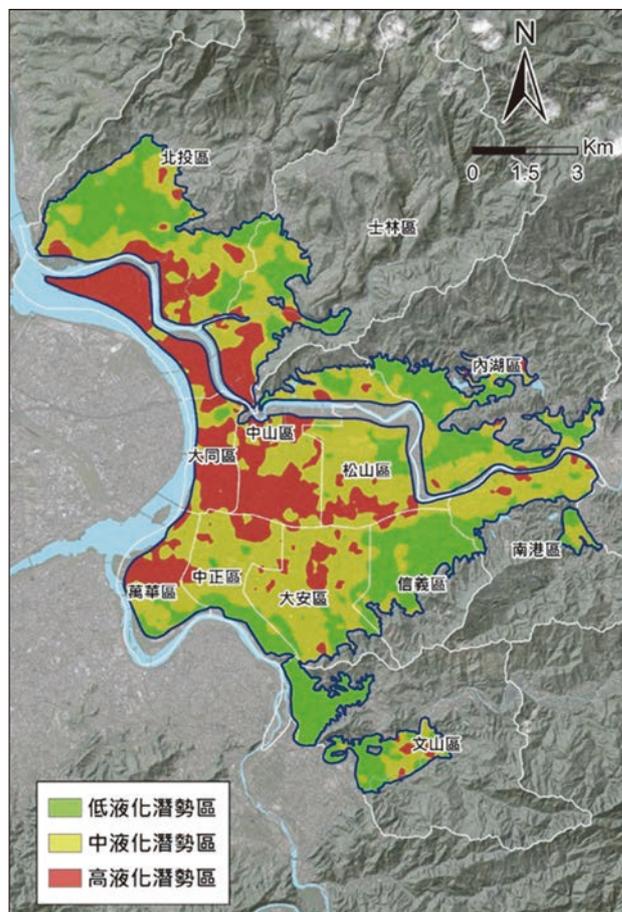


圖 8 土壤液化潛勢成果圖

### 不同分析方法之結果比較

本計畫為進一步探討不同分析方法之圖資產出結果，分別比較 HBF 法與 NJRA 法、Seed 法與 T&Y 法之差異，結果如圖 9 至圖 11 所示，可觀察得三種評估

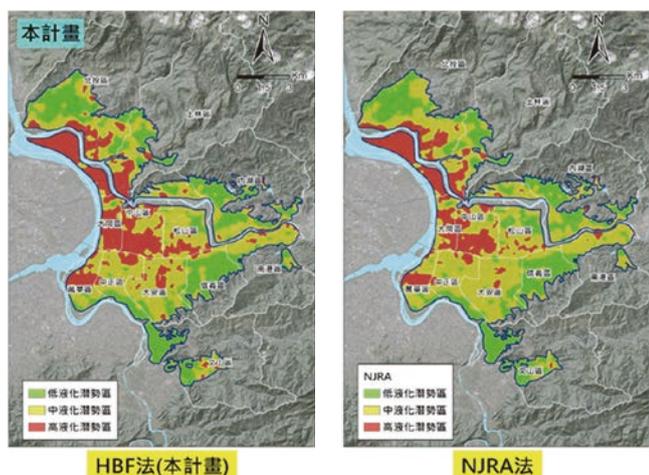


圖 9 NJRA 分析法敏感度分析成果比較圖

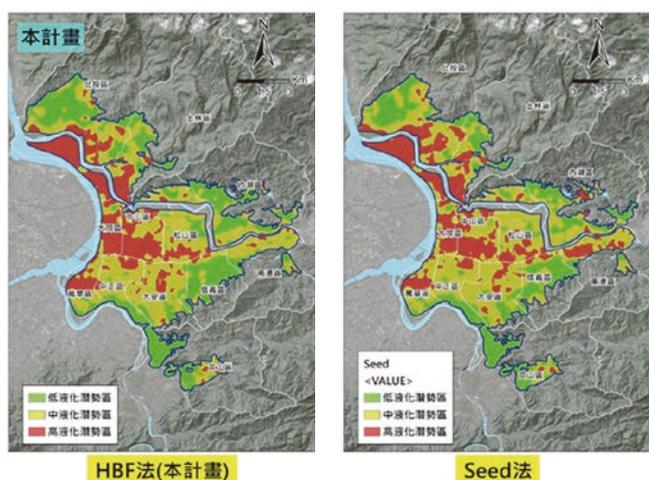


圖 10 Seed 分析法敏感度分析成果比較圖

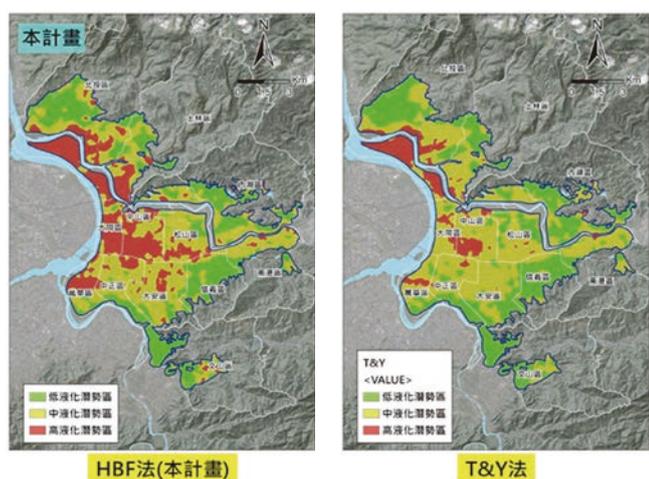


圖 11 T&Y 分析法敏感度分析成果比較圖

法中，Seed 法之中高液化潛勢面積最大，偏保守側，T&Y 法中高液化潛勢面積最小，偏不保守側，但三種評估法之液化潛勢分佈趨勢與 HBF 法大致相近。

目前常用之液化評估準則與近期國家地震工程研究中心提出的 HBF 法，或者 NJRA、NCEER、T&Y 評估法均以 SPT-N 及細粒土壤含量 FC (%) 等為評估土壤液化之主要參數。然而通過本計畫進一步探討，淡水河流域之地質分區屬於地層中細粒料含量 FC 較小、N 值較高之砂土地層，NJRA 法之土壤液化潛勢分析結果相對較為保守；而在基隆河流域範圍之地質分區屬於細粒料含量 FC 較大、N 值較低之粉砂地層，NCEER 法及 HBF 法之土壤液化潛勢分析結果相對較為保守。

### 結論與建議

比較過去相關研究以及本計畫分析結果，可以發現局部地區各研究與本計畫所分析結果有些許差異，經評估主要差異來源為資料精度、分析方法及分析地下水位；然而各圖資的鑽孔資料庫、液化評估方法選用以及地下水位考量方式均不相同，尚難於同一基準上進行探討比較。慶幸的是，早期地質鑽探資料蒐集及彙整不易，因此在進行土壤液化潛能分析時，僅能針對所蒐集單獨個案資料來進行；但隨著地調所近年來致力於公共工程地質探勘資料庫的建置，具參考價值的地質鑽探資料日漸增多，隨著歷次製圖採用的鑽孔數量、平均鑽孔密度增加，土壤液化潛勢分析結果將更加精確。

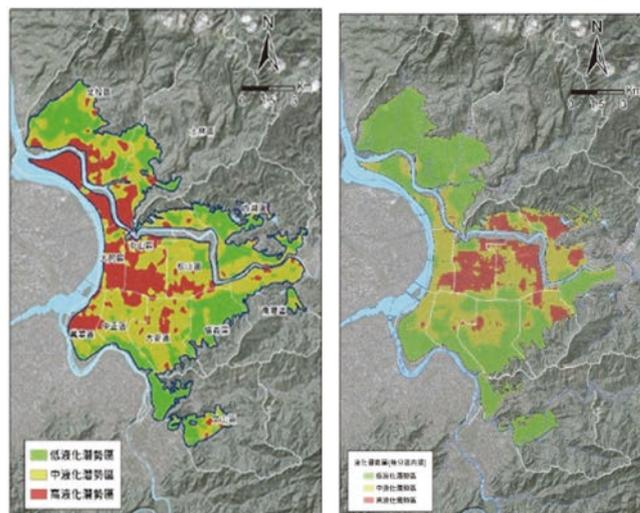


圖 12 本計畫成果圖資與初級圖資

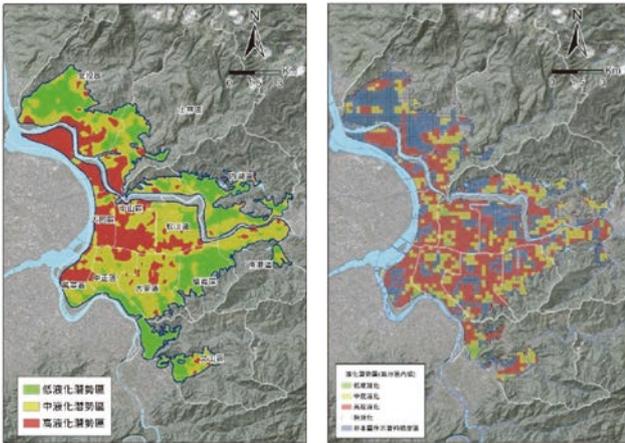


圖 13 本計畫成果圖資與臺北市前期中級圖資

### 參考文獻

1. Seed, H.B., Idriss, I.M. and Arango, I. (1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data," *J. of Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482.
2. Tokimatsu, K. and Y. Yoshimi (1983), "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT-N Value and Fines Content," *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74.
3. Seed, H.B., Yokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation," *J. of Geot. Engr.*, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1425-1445.

4. 內政部營建署 (1974),「建築技術規範」, 台內營字第 573693 號函。
5. 內政部營建署 (1982),「建築技術規範」, 台內營字第 91123 號函。
6. 內政部營建署 (1989),「建築技術規範」, 台內營字第 557769 號函。
7. 日本道路協會 (JRA) (1990),「道路橋示方書.同解說」, V耐震設計篇。
8. 交通部技監室 (1995),「公路橋梁設計耐震規範」, 交技 (84) 字第 000256 號函。
9. 日本道路協會 (JRA) 1996,「新道路橋示方書.同解說」, V耐震設計篇。
10. 內政部營建署 (1997),「建築物耐震設計規範及解說」, 台內營字第 86725 號函。
11. 內政部營建署 (1999),「建築物耐震設計規範及解說」, 台內營字第 8878473 號函。
12. 交通部 (1999),「鐵路橋梁耐震設計規範」, 交技 (88) 字第 06344 號函。
13. 陳銘鴻 (2002),「土壤液化成因、災害及復健」, 國家地震工程研究中心。
14. 內政部營建署 (2011),「建築物耐震設計規範及解說」, 台內營字第 0990810250 號函。
15. 經濟部中央地質調查所 (2011), 臺灣世曦工程顧問股份有限公司,「三維都市防災地質資訊整合分析與建置 (2/4)」。
16. 黃俊鴻、陳正興、莊長賢 (2012),「本土 HBF 土壤液化評估法之不確定性」, 土工技術, 第 133 期, 第 77~86 頁。

### 學術活動 — 高樓 TMD/TSD 設計及施工實務研討會 107.5.17

本研討會共計約 150 位學員及學生參加，介紹最新高樓阻尼技術及南山大樓施工經驗。



李建生博士



黃治政協理



王理事長親臨會場開幕致詞



甘錫滢總工程師

### 工程參訪 — 淡海輕軌捷運工程 @ 淡水 107.6.29

打造淡海新市鎮大眾運輸系統建設是攸關淡海新市鎮未來發展及解決淡水地區交通擁擠之重點政策，淡海輕軌預定於 107 年年底通車，目前積極試車中。本次參訪由軌道及道旁工程委員會舉辦。



溫代欣主任秘書 (右) 代表致贈紀念品予  
新北市政府捷運工程局 游澄發副總工程師 (左)



# 桃園國際機場 第三航廈流標與工程市場 「僧少粥多」的新形勢

高銘堂／前榮工處海外部估價組 組長、前泛亞工程公司 總經理

## 跳電、漏水、淹水，時有天花板空襲的一、二航廈

因旅客量大幅成長，桃園機場現有第一、二航廈，這幾年已沒什麼旺季、淡季之分，天天都是擠滿人潮的尖峰日。因為空間不夠，加上老舊不堪的供電系統、水電管線與設施裝潢等，每隔一陣子就要出現跳電、漏水、天花板塌落、淹水等狀況，服務品質令人失望，國家顏面也為之蒙羞，因此大家對籌劃已久的第三航廈望穿秋水，期盼它能早日動工興建。

但原定 2020 年完工啟用的第三航廈在稍前規劃設計階段又有延宕，啟用營運的日期要往後延到 2022 年，而在理當追分趕秒，討回進度之際，金額 390 餘億主體工程的施工標卻又連續流標兩次，讓人擔心這個重要的工程是不是會像桃園機場捷運，不知要多少年才能完工？

稍早的淡江大橋招標，也是歷經多次流標後，吞下大幅度調整預算與工期的苦果在第八次招標才有一家廠商投標。前幾年的金門大橋、最近的台電台中電廠煤倉、台北表演藝術中心後續工程也是經歷多次流標，更改招標條件後，才找到廠商願意承接。相較前幾年的投

標，不管施工難易，預算高低，合約條件寬嚴，廠商下標總是勇猛，現在的營建市場似乎有了些改變。

## 從「僧多粥少」到「僧少粥多」的公共工程競爭

別於以往，公共工程市場現在呈現的是僧少粥多的狀態，這對業主或是設計監造單位是一個警訊。其實「僧」，不只是夠實力、負責任的營造公司，還有拘謹、認命、溫馴聽命，願以耐性和時間，在這個溽暑受驕陽炙晒，嚴冬忍刺骨寒風，無法規律休息的辛苦行業，換取不是豐厚薪酬的施工人員。這幾年因年紀與挫折感退出行業的很多，年輕新血加入的不多，而公共工程嚴格執行各項作業規定下，甲、乙雙方卻需要派更多人參與，因此白領工程師的缺口越來越大。

就藍領勞工而言，長久以來，土木、建築工程最基本的模板、鋼筋甚至裝修工人，在外勞填補下，缺工的情形或許不是那麼可怕；但需要長期養成，在一個國家大致完成基礎建設，進入較上層經濟建設才會大量用到的燒焊、機電、管線等技工，卻很難在勞工出口國找到足夠的員額。這類工人在第三航廈主體工



桃園機場捷運第三航廈的工地（維基百科）

程後半段施工每天要用到數千人，而台灣的現況，水電工常常兼水電行老闆，工程工地並不是天天去的，這種行業分工習慣，主承包商無法掌控，當然會把這部分工作當成燙嘴的熱粥，不敢大口吞下。

### 「再摘使瓜稀。三摘猶自可，摘絕抱蔓歸」的工程界實力

台灣工程業者原來是有一定實力的，根據這幾年的國外營建組織統計，工程造價只有先進國家的一半還不到，施工速度如果不計非工程因素障礙，在世界上也是名列前茅。大家回想，不過幾年間，國人在隧道、橋梁、捷運、大型建築或場館的設計、施工，就能夠由依賴國外技術，變成幾乎百分之百自辦。這驚人的成就，其實是千千百百具有「愛拼才會贏」中小企業精神的營造商、基層工程師、小包、小型機械廠、技師、工人，因他們的創意與特殊的分配酬勞方式，組成精密、有效率的分工網後達成的。

可惜，我國的公共建設投資這十幾年，起伏不定，帶給工程界人士嚴重的焦慮感，加上招標制度多年來都傾向最低標決標，標價每況愈下；就算是特殊工程預算和工期，也要依便利政府官員作業的「平均化」、「常態化」與「市價化」的原則而訂定，和普通工程沒什麼區隔。廠商如要維持營運，常被迫在搶標與關門之間做攸關身家的選擇；繼續撐下去的也只能以少投資、保守的經營方式準備挨過最壞的時刻，有進取心的人才失去了耐性，漸漸流失，工程界就這樣的弱化。

### 公共工程實行有利標招標，漸漸看出成效，或是出現後遺症？

在來價偏低，施工資源卻又緊蹙的形勢下，坦白說，就非大型，潛規則還很有作用的一般性工程，廠商多想些辦法，還是有機會圓滿履行合約的；但遇到淡江大橋或第三航廈這種特殊的大工程，要用類似提高預付款比例或簽約後再伺機辦理追加變更這些老梗，「誘使」廠商投標是有困難的。誠如桃園機場公司發言人於第二次招標流標後所承認的，國內現有不少公共工程執行中，廠商可能選擇風險較低者，意思是如果有其他好吃的，大、小和尚就不會來搶這碗滾燙的熱粥。

最近的一年，許多大型公共工程採用最有利標評選方式招標，還留點實力的承包商手上都承接了不少的大型工程，並不像前兩年是處於飢餓的狀態。另一方面，

這些有利標的簽約價，雖未經大砍大殺，通常是接近業主編列的預算，但預算長久以來都是根據前一陣子搶標的結果，編得很低；工期又是考慮業主政策需要大於工程合理性而訂定出來的，相當緊張。所以承包商要完成現有的工程，還是承受一定的壓力。所以要他們去承接千鈞萬擔重的超大工程，這些只能再負荷幾根稻草重量的瘦駱駝，怕被壓垮，選擇觀望是很正常的。

### 公共工程這塊餅，要做大，也要做得好吃

長久以來，社會大眾在政客宣傳、官僚矯飾，媒體渲染下，以為只要看牢預算、盯緊進度，公共工程可以路邊攤的價錢，得到米其林餐廳的佳餚和服務，這種否定專業的民粹做法，不但使國家工程建設普遍達不到預期的效率、效果與經濟性，很多工程會成為錢坑或爛尾樓，也因此導致下一波的獵巫，造成可怕的二次傷害。於是公務員不敢用腦筋，專業噤聲，營建產業進一步傾頹、弱化；政府、產業、人民「三輸」，但卻無人願承認「要馬兒好，又要馬兒不吃草的做法」，是台灣公共工程的亂源。

歷任政府也知道基礎工程建設的執行，可迅速的提供大量就業機會，改善工商經營環境，吸引更多進一步的投資，所以努力的要把公共工程這塊餅做大，但在無法超越「七年之病，求三日之艾」的思維模式下，做出來的餅卻是難以下咽。尤其是現在，又增添了一個營造產業已經弱化的變數，一線廠商在知道吃了大餅很可能會壞肚子，寧可選擇餓肚子。淡江大橋或桃園機場第三航廈只是首先遇到這種局面的公共工程，各工程單位後續還會碰到這些問題，不能以這幾個工程是特例，繼續從前的做法。

但廠商既有能力選擇接或不接工程，政府在財務上的壓力就會增加，因應的辦法不是一直增加經費，而是主管單位要多花心思，尤其從工程或計劃概念形成時，就要會同未來使用單位確立需求目標，不能一廂情願；規劃設計階段就要請真正懂施工的專家參與，不能大而化之，製造工作進度的障礙而不自知。做餅做得好吃、乾淨衛生，歷經滄桑的廠商才敢碰觸。

### 提早面對問題，否則會步德國柏林布蘭登堡國際機場錢坑、爛尾的後塵？

回到第三航廈的問題，2022年啟用營運的目標還是桃園機場公司執事諸公的管考目標，當然希望它能順利發包。但從這個工程的量體、施工困難、複雜程度以及合約條件，對照台灣營造產業目前的整體資源動員能



柏林布蘭登堡國際機場十幾年還蓋不好（維基百科）

力，就會發現兩者有很大的落差。我們希望的是營建管理與設計團隊能認真檢視設計與施工的細節，剔除或修正會遲滯施工，增加經費的過度裝飾與白象設備。但如果規劃設計經檢討後還是不能動，就要誠實、主動的面對工期與經費的問題，換句話說，必須向社會大眾報告第三航廈啟用營運日期要向後延，經費需要調整。

然而，主管機關面對管考績效、選舉、輿論與公眾壓力，可能還是不敢修正 2022 年的完工目標日期，他們可能做的是利用預算不足流標後標準作業之一的減項發包，先把主承包商認為經費嚴重不足，工期不夠的設備、機電、管線等工作排除於第三次的招標。如此，金額龐大的結構工程發包成功後，就可馬上施工，產生進度，累積預算執行率，向管考單位以及公眾交代；同時也為這階段切割出去，暫未發包的工程爭取到一些找財源、理由的時間。這鋸箭法有個「好處」，就是完工目標日期到最後一刻都可設定為 2022 年不變，因為介面增加，協調不易，必定造成的錯誤或遲延，是還未發生的事。

以德國柏林布蘭登堡國際機場長達十幾年的施工遲延為例，原因就是因為分標分得太細，而且開放讓實力較差，較小廠商承接，專案管理單位也缺乏大型航廈經驗，以致處處出錯。所以桃園國際機場第三航廈 390 餘億元的工程設定為一大標發包，這個決定是對的。但如果因為經費與工期的錯估，或市場資源供需形勢有了變化，以致當下發包不順，就應該檢討設計，直接面對增加預算或調整工期的現實，而不是以回到當初評估為不適當的發包方式，作為緩解。第三次招標主管機關真的選擇把大標拆開發包，只是把問題引爆點往後延，且

會導致遲延會更長，甚至無法完工的悲劇，因為機場工程，增加介面是進度最大的威脅。

## 民眾對公共工程成見，政府應妥善處理

政府和民眾都認為營建工程是自然科學，對土木工程師的專業判斷總要求如機械、資訊、電機一樣的精確、完美。但營建工程的實踐過程，從需求的醞釀、概念的孕育、資源的徵調、硬體的完工與使用，都牽涉到不同時代，社群或個人的想法，沒有固定的答案，所以建設推動常會因時異事殊而遭到困難。這時政府領袖應以數字、邏輯與事實，耐心向民眾解釋。最忌諱的是一有問題發生，就急著要求交代，帶頭查弊，尋找替罪羔羊；或為了選票，鼓勵所謂的公眾非專業監督，讓產業與工程行政體系忍受無謂的干擾。

以第三航廈現在發生的尷尬情形為例，要真正的解決問題，政府高層必須表態，鼓勵專管與規畫設計團隊，配合工程專家，找出真正的成本和工期，不是讓他們為求自保或盼望奇蹟出現，而提出某些可能導致更多金錢與時間損失的建議。如果說找出來的答案政治上會令人痛苦，實務上令人不堪，那也是多年來不同執政黨的共業，現任者應該視之為一個其能解決多年陳疴能力的表現機會。

桃園機場第三航廈工程關係民眾福祉與國家觀瞻，也牽涉到工程產業發展，政府高層應該出來做些決定了！



本文轉載自高銘堂部落格  
<http://mtkaoforum31.blogspot.com>  
 風傳媒於 107.8.13 轉載





# 莫蘭迪斷橋啟示：基礎建設維修時代來臨

拱祥生／土木技師、前技師報社長

義大利莫蘭迪大橋（Morandi Bridge）日前發生崩塌，造成多人傷亡，引起國內外一陣驚訝，究竟國內類似的橋梁是否會發生類似破壞？何時會發生？但不論橋梁或是公共工程，都有設計服務年限（初步年限約 50 年），若以民國 60 年代推動十大建設時間來看，國內基礎建設已步入維修時代，才能讓這些基礎建設安全無慮的延長服務年限，確保國家永續發展。

## 莫蘭迪橋場受矚

莫蘭迪大橋崩塌至今，討論最多的可能原因包括設計瑕疵及維修工程進展不佳兩大因素。其中設計瑕疵部分，莫蘭迪大橋是在斜張橋剛開始發展的年代設計施工（距全世界第一座斜張橋 1956 年通車僅 10 餘年），當時包括材料（鋼纜、混凝土）、結構系統及防蝕系統都比現代差，例如其鋼纜錨碇集中在橋塔頂部（類似放射狀配置），造成應力集中及結構系統安全度不足，台灣斜張橋大多採分散固定的扇狀鋼纜式系統，結構系統穩定度較高。另外台灣因地形陡峭、河川流速較快，以往主要橋梁破壞案例，除地震造成外，以橋墩沖蝕為主要因素，如高屏大橋及后豐大橋。若採斜張橋設計施工，河中落墩較少，可避開河床沖蝕及土石流，應為較先進的設計橋型。

莫蘭迪大橋即使設計有瑕疵，仍能藉由適度的維修補強來避免崩塌，但是維修工程從 1990 年代推展至今一直多所爭論，維修工程進展不順利主因就是經費不足，事實上，維修工程如同下水道、共同管道工程一樣，都是屬於看不到的建設，並不容易受到民眾矚目與掌聲，但是其重要性絕對不亞於新建工程，妥善考量基礎建設從規劃、設計、施工到使用維護各個生命週期的效益與經費需求，才能避免義大利莫蘭迪斷橋憾事再度發生。

一般電子 3C 產品，大多壞了就丟棄換新，但基礎建設可無法輕易換新，而是要藉由不斷的巡檢、材料替換及適度補強，才能延續其使用壽命。目前世界各國對於基礎建設的維修費用應該如何編列，並沒有一致性

的規範或是標準，更遑論在提出工程興建計畫的階段，就預估工程使用維修費用與長期計畫，以至於遇到工程維修需要經費，就是看運氣了，這應該是工程界和全民應該審慎面對的課題。

再看看最近攸關永續能源發展的離岸風機建設，一般離岸風機服役年限僅 20 年，台灣目前規劃在 2035 年累計裝置容量將達 8~10 GW（2017 年全歐洲僅 15.8 GW），超過千座風機將在台灣海峽運轉，當達除役年限時將要拆除風機及水下基礎，但根據《再生能源發展條例》第 9 條規定略以：「再生能源躉購費率綜合考量各類別再生能源發電設備之平均裝置成本、運轉年限、運轉維護費、年發電量及相關因素」，其中並未明確考量廠商應將除役風機移除的費用，如果在風機運轉 20 年後，再由全民埋單移除海上風機，恐怕不是任何人能夠承擔的後果！

## 分年提列維修費用

一個重大建設的完工，即開啟當代建設工藝服務社會的功能。當大家在享受便捷建設的同時，是否應考慮公共建設應分年提列維修費用，如同全民健保，預做保險來分散風險，讓建設永續。當然，在評估選擇重大建設開發方案時，將維修補強費用列入成本效益考量，將是基礎建設永續營運的重要課題。

本文轉載自 107.8.21 蘋果日報  
<https://tw.news.appledaily.com/headline/daily/20180821/38103869/>





# 台電公司大潭電廠 增建燃氣複循環機組發電計畫 工程參訪花絮

能源委員會、台電大潭工作隊

107年7月5日上午8:40分從台電大樓出發，由學會祕書長領隊參觀人員共60人，其中4位學員自行開車前往大潭發電廠，東道主大潭工作隊及電廠之長官皆於大潭電廠電力展示館前歡迎參訪貴賓。

陳主任委員於蒞臨會場致詞表示，台電公司為因應未來台灣電力系統整體需求，除配合政府計畫擴大使用天然氣發電之政策，也進行提升大潭電廠營運績

效及競爭力。

陳主任委員特別以「大潭燃氣單循環緊急發電計畫」實際案例說明，指出106年夏季面臨缺電的嚴峻挑戰，提前啟動「大潭電廠增建燃氣複循環機組發電計畫之第7號機組第一階段燃氣單循環機組」新建工程（60萬瓩），該工程在克服多重困難及挑戰已於107年3月28日商轉。



能源委員會主任委員陳慰慈副總經理致詞



台電前專總黃樹培先生細數大潭電廠興建過程



中國土木水利工程學會為表示感謝台電公司積極配合辦理使本次活動順利成功，由陳主任委員協同倪祕書長惠姝代表學會頒贈錦旗，台電公司則由大潭工作隊李經理張堃代表接受。

本次參訪活動行程安排如下列：

上午專題報告開場由曾萬生計畫工程師介紹 — 「大潭電廠增建燃氣複循環機組發電計畫現況介紹」，內容包含「大潭電廠增建燃氣複循環機組廠址及機組配置」、「複循環機組簡介」、「計畫基本資料」、「計畫時程執行現況」等。



曾萬生計畫工程師簡報



大潭工作隊李張堃經理簡報

專題報告第二場則由大潭工作隊李張堃經理進行「大潭燃氣單循環緊急發電計畫簡報」，內容包含「大潭燃氣單循環緊急發電計畫第7號機組第1階段燃氣單循環機組基本資料」、「發電機組簡介」、「計畫執行情形」、「現場作業紀錄」等。

專題報告三由大潭工作隊林文森課長進行「大潭燃氣單循環緊急發電計畫土木作業執行簡報」，內容包含「大潭燃氣單循環緊急發電計畫地理位置」、「廠區設備布置」、「土木作業介紹」、「環保作為」、「經驗回饋」等。



大潭工作隊林文森課長簡報

土水會能源委員會委員及與會學員於中午用餐休息後至7號機燃氣單循環機組現場參訪，學員共分成10組，每組均安排一位大潭工作隊工程師陪同現場說明及問題解答。



下午室內經驗分享活動係於電力展示館會議室進行觀摩座談，由黃計畫經理彥斌及李經理張堃引導與會學員與簡報講師進行問題與討論。



學員簽退、領取參訓證明

土水學會幹事及主辦單位台電大潭工作隊最後感謝與會委員及所有學員的參訪指導，使得本次工程觀摩能夠順利圓滿落幕。



# 國家會展中心 南港展覽館擴建 工程參訪活動

資訊委員會

南港展覽館擴建工程是由亞新工程顧問公司負責專案管理，潘冀聯合建築師事務所與德國 GMP 建築師事務所負責設計監造，並由榮工工程公司、大陸工程公司、安倉營造公司與靖宜工程公司施工。本學會資訊委員會參訪團於 107 年 7 月 5 日前往參訪此工程，目前進度已超過 99%，計畫在 107 年 8 月驗收移交，並於 108 年 3 月舉辦第一次大型活動－工具機展。

擴建之展覽館建築屋頂造型鋼構為此建築與施工的一大亮點，以水文意象作為屋頂造型設計，此屋頂造型使鋼構桁架與鋼構接頭組裝過程，要特別考慮施工順序，並在組裝時因應施工精度需求，於鋼構組裝至最末區域時，丈量現場尺寸提供鋼構廠加工後再運

至工地組裝；另外屋頂的特殊稜角形狀與反光特性，使屋頂施工環境在太陽照射下會達到攝氏 60 度，因此更需要注意施工人員的身體健康狀況，在天熱必要時暫停施工，待施工環境溫度下降再繼續施工，這些困難使屋頂施工成為一大挑戰。

此外，特殊造型屋頂的排水問題，是以虹吸排水與六吋溢水管作為排水雙重保障，並透過電腦模擬確認可行性，在未來汛期時的豪雨事件能觀察屋頂哪些部位需做細部排水改善。此次參訪除了本會資訊委員外，亦有許多學生一同前往參訪，讓產官學界對於特殊造型結構施工上，有互相交流與經驗分享的機會。



康任仲主委以錦旗向亞新工程顧問股份有限公司致謝，由徐健鈞專案經理代表接受





# 出席 加拿大土木工程學會 2018 年年會 (CSCE 2018) 紀實

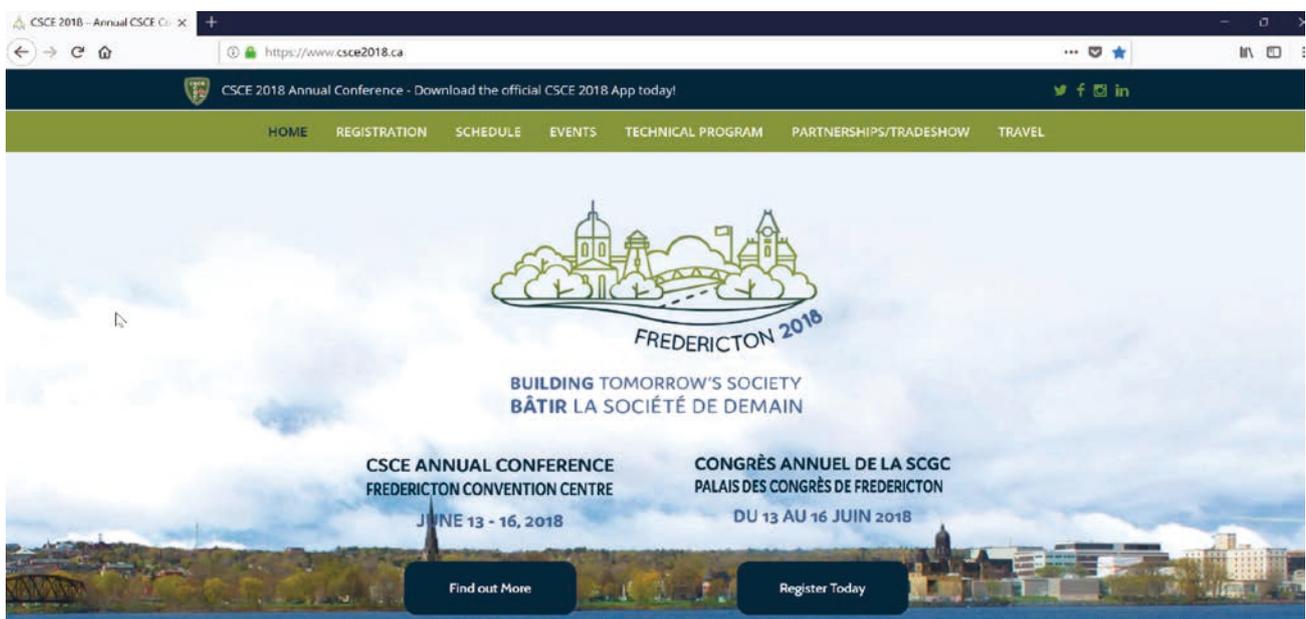
張家瑞／資訊委員會委員、鋪面工程委員會委員、國立宜蘭大學建築與永續規劃研究所教授

陳世晃／鋪面工程委員會委員、國立中央大學土木工程學系教授兼副系主任

本會議為加拿大土木工程學會 (Canadian Society for Civil Engineering, CSCE) 2018 年年會 (會議網站 <https://www.csce2018.ca/>, 2018 年 6 月 13 ~ 16 日), 會議地點位於加拿大 New Brunswick 省首府 Fredericton 市內的 Fredericton Convention Centre (FCC), 包含加拿大總理 Justin Trudeau 及加拿大 Fredericton 省國會議員 Matt Decourcey 皆致大會賀詞歡迎各界蒞臨。本屆會議主題為「建立明日的社會 (Building Tomorrow's Society)」, 分享有關明日社會中基礎建設的設計、建造和修復等課題的最新技術與研究成果, 包含土木工程、建築、環境、材料、自然災害、結構和運輸等主題, 提供與會者擴大專業技術知識的機會, 並能與來自世界各國的專業人士建立社群網絡。

本屆會議除年會本身的 General Conference 外, 按往例與 6th International Structural Specialty、6th

International Disaster Mitigation Specialty、7th International Materials Specialty、12th International Transportation Specialty、16th International Environmental Specialty 共五大研討會聯合舉辦, 大會另於 6 月 13 日安排整天的 Envision 軟體 (應用於包含機場、橋梁、水壩、綠色基礎建設、碼頭、發電廠、道路、水資源處理設施等所有類型基礎建設的永續及韌性評估) 付費教育訓練及認證課程。除正規的議程規劃外, 大會更精心安排學生的競賽及授獎活動, 包含 National Civil Engineering Design CAPSTONE Competition、National Student Chapter Leaders Workshop、Student Paper Competitions、Student Awards Luncheon 等。本屆會議收錄來自 783 位作者的 365 篇論文, 安排於 87 個口頭簡報場次 (Technical Sessions) 進行發表:



會議網站 (<https://www.csce2018.ca/>)

- General Conference : 26 個場次, 共發表 109 篇論文
- 6th International Structural Specialty : 23 個場次, 共發表 94 篇論文
- 6th International Disaster Mitigation Specialty : 7 個場次, 共發表 32 篇論文
- 7th International Materials Specialty : 16 個場次, 共發表 63 篇論文
- 12th International Transportation Specialty : 8 個場次, 共發表 35 篇論文
- 16th International Environmental Specialty : 7 個場次, 共發表 32 篇論文

大會邀請多位學有專精的教授和產業專家, 針對基礎建設相關課題進行深入且精闢的專題演講, 年會部分邀請到的四位專題講者及講題如下:

- Alan Perks  
Past President of the CSCE and leader of the CSCE President's Task Force on Accessibility  
講題: Interactive Panel Discussion – “What Lies Ahead?”
- Don Rusnak MP  
Parliamentary Secretary to the Minister of Indigenous Services  
講題: Infrastructure Challenges Facing Indigenous Communities
- B.F. Spencer, Jr.  
Nathan M. and Anne M. Newmark Endowed Chair of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign  
講題: State-of-the-Art and Practice for Monitoring of Bridge Infrastructure in the USA



於 Fredericton International Airport 機場與抵達貴賓合影 (右四為 Prof. Susan L. Tighe, President of CSCE)

- Gaëtan Thomas  
President and Chief Executive Officer of NB Power  
講題: NB Power Commitment to First Nations' Engagement: Key to Future Successful Projects and Economic Development

此外, 7th International Materials Specialty 邀請到的四位專題講者及講題如下:

- Michael Thomas, Ph.D., P.Eng., F.ACI, F.I.C.T.  
Professor at Department of Civil Engineering, University of New Brunswick  
講題: Achieving 100-Year Design Life for Reinforced Concrete in Aggressive Marine Conditions
- Mansour Solaimanian, Ph.D., P.E.  
Senior Research Associate, Geotechnical and Materials Engineering Director of the Northeast Center of Excellence for Pavement Technology, Pennsylvania State University  
講題: A Look into Thin Asphalt as a Tool for Pavement Preservation
- Shamim A. Sheikh, Ph.D., P.Eng, F.ACI, F.CSCE, FEIC, F.CAE  
Professor, Department of Civil and Mineral Engineering, University of Toronto  
講題: Seismic Upgrade of Concrete Structures with External FRP
- Sina Varamini, Ph.D., P.Eng  
McAsphalt Industries Limited, Toronto, ON  
講題: Effect of Asphalt Binder on the Long-Term Pavement Performance



開幕典禮: Prof. Susan L. Tighe 致詞 (President of CSCE (2017-2018))

大會亦提供展覽攤位，以下為 15 個參展的學研機構及廠商：

- CHI (<https://www.chiwater.com/Home>)
- CPCI (<http://www.cpci.ca/>)
- CSCE (<https://csce.ca/>)
- CSCE 2019 (<http://csce2019.ca>)
- Kryton (<https://www.kryton.com/>)
- Mageba (<http://www.mageba-group.com/en/>)
- McMaster University (<https://www.eng.mcmaster.ca/civil>)
- Measurand (<http://www.measurand.com/>)
- OSCO Construction (<http://www.oceansteel.com/>)
- Reinforced Earth ([http://www.reinforcedearth.ca/ta/wRE-CO\\_en.nsf](http://www.reinforcedearth.ca/ta/wRE-CO_en.nsf))
- S-Frame (<https://s-frame.com/>)
- SNC Lavalin (<http://www.snclavalin.com/en/index.aspx>)
- Soleno (<https://soleno.com/>)
- T2 Utility Engineers (<http://www.t2ue.com/>)
- V-Rod (<http://www.vrodcanada.com/>)

大會安排兩處工程參觀，一為 Mactaquac Dam，另一為 Kings Landing。Mactaquac Dam 是加拿大大西洋沿岸第二大水力發電廠，發電量為 653 MW，約佔 New Brunswick 省電力需求的 15%，80 年代早期大壩的混凝土發生鹼矽反應 (alkali-silica reaction, ASR) 開始破壞，迄今每年花費數百萬美元減緩膨脹並延長結構使用壽命。Kings Landing 則是加拿大有名的遺址景點，該遺址保存 1820 ~ 1920 年間 300 英畝原始的博物館房屋、超過 70,000 件工藝品及超過 40 個各式展品，遺址內還包括一個花費 380 萬美元翻修的 19 世紀大壩。



Kings Landing 工程參觀，圖為經翻修後的 19 世紀大壩

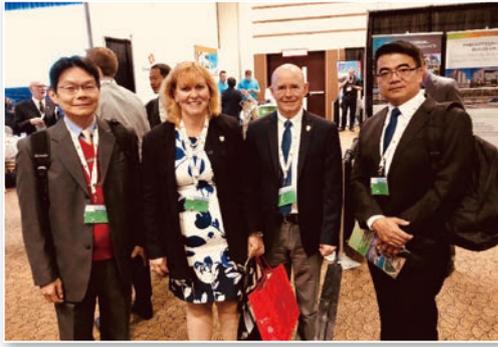


大會展場

加拿大土木工程學會現任理事長為 Prof. Susan L. Tighe (2017 ~ 2018)，Prof. Tighe 為 Department of Civil & Environmental Engineering, University of Waterloo 教授，也擔任該校 Deputy Provost and Associate Vice-President，負責 Integrated Planning and Budgeting，並擔任校級研究中心 Centre for Pavement and Transportation Technology (CPATT) 的 Norman W. McLeod Chair。Prof. Tighe 的學術及專業領域包含 Sustainable pavement engineering and management、Long life infrastructure、Application of asset management to highway and airport operations、Designing and building safer roads and airfields、Life cycle economic analysis as a tool for infrastructure management and evaluating materials、Solar technology in roads and pavement infrastructure 等。國內社團法人中華鋪面工程學會 (Chinese Society of Pavement Engineering, CSPE) 與 Prof. Tighe 有多年的研究合作及友情，其也曾多次來臺提供專題演講及實務經驗的交流指導，此次很榮幸獲其邀請，投稿 “Unsaturated Polyester (UP) Resin Mixed with Aggregates as the Surface Course for Permeable Pavements” (安排於 Bituminous, Pavement and Geotechnical Materials 場次發表) 及 “The Influence of Asphalt Rheological Behavior and Durability of Recycled Asphalt Concrete under High Viscosity RAP and High Addition” (安排於 Panel Discussion: Building Tomorrow’s Society through Improving the Quality of our Roads 場次發表) 兩篇論文並親赴參與 CSCE 2018 盛會。本學會王焯烈理事長特委託攜帶親筆簽名之信箋及賀禮，祝賀 Prof. Tighe 及 CSCE 2018 大會順利成功，Prof. Tighe 接獲信箋及賀禮立即表達由衷感謝之意，並特別於專題演講前向所有貴賓及與會者宣達本學會祝賀之意，順利完成兩學會間的友誼交流。



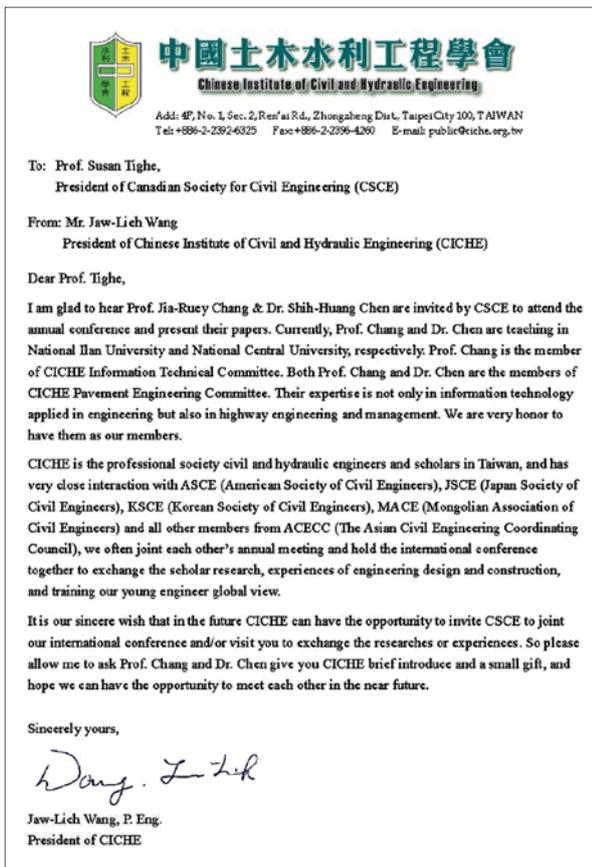
與專題講者之一 Dr. B.F. Spencer, Jr. (Nathan M. and Anne M. Newmark Endowed Chair of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign) 合影



兩位作者代表學會王焯烈理事長致贈 Prof. Susan L. Tighe 祝賀信箋及茶葉禮盒



專題演講：Alan Perks (Past President of the CSCE)



本學會王焯烈理事長祝賀信箋

本屆會議主題為「建立明日的社會 (Building Tomorrow's Society)」，首位專題演講講者、也是 CSCE 前理事長 Alan Perks (1998-1999) 主持的 Interactive Panel Discussion 中，對於明日的社會提出「What Lies Ahead?」的討論議題，引發許多與會者不同的迴響，包含「Sustainability, Social Justice, & Accessibility (永續性、社會正義、可及性)」、「Sustainability, Resilience, & Avoidance (永續性、韌性、災害及風險規避力)」等皆是與談人提出的思考方向，而此正符合國內積極推動之「前瞻基礎建設計畫」，包含建構安全便捷的「軌道建

設」、因應氣候變遷的「水環境建設」、促進環境永續的「綠能建設」、營造智慧國土的「數位建設」、加強區域均衡的「城鄉建設」、「因應少子化友善育兒空間建設」、「食品安全建設」、和「人才培育促進就業建設」共八項建設的方向，亦與本學會民國 106 年年會暨 2017 土水國際論壇 (民國 106 年 12 月 1、2 日) 之「建構永續工程、培養永續工程師 (Sustainability of Civil Engineering in Practice and Professional Development)」的年會主題相吻合。此外，本屆會議亦揭示土木工程應逐步聚焦於跨領域、跨專業、跨規模之連結性 (connectivity) 課題，並應正視明日的社會對土木工程帶來如下之挑戰，提供國內土木水利工程先進參考。

Paradigm	Old	New
Problem	<ul style="list-style-type: none"> <li>Few, big, urgent</li> <li>Common to majority</li> <li>Clear</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plethora, small-scale, distant in time</li> <li>Differ by societal segment</li> <li>Connectivity</li> </ul>
Solution	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technical</li> <li>Single, robust investment</li> <li>Simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Change institutions, behaviours, culture</li> <li>Distributed investments, experiment</li> <li>Complex</li> </ul>

下屆 CSCE 2019 (會議網站 <http://csce2019.ca/>，民國 108 年 6 月 12-15 日) 將於 Montréal 的 Sheraton Laval and Convention Centre 舉辦，與會人員相約 CSCE 2019 見！



相約 CSCE 2019 於 Montréal 見！





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：

45.5  45.6  46.1  46.2  46.3  46.4 共 次  
(10月) (12月) (2月) (4月) (6月) (8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： (請蓋公司印)  
商號

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)

報名費  
 繳納 研討會  
報名費 元

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·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，一年四期  
 國內·會員 新台幣 800 元  
 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800 元  
 國外·個人 美金 40 元  
 國外·機關團體 美金 100 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		<b>款 別</b> 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，入會費一人僅需繳交一次	<b>報名費</b> <input type="checkbox"/> 繳納_____研討會 報名費_____元
會員證號碼			<b>繳納會費</b> <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
身分證號碼			<b>訂閱土木水利雙月刊，一年六期</b> <input type="checkbox"/> 國內·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
卡 別	<input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB		<b>訂閱中國土木水利工程學刊，一年四期</b> <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 800元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 40元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 100元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
信用卡卡號			白天聯絡電話
信用卡簽名欄最後三碼			通信地址
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/m<sup>2</sup> 模) 保管五年 (拾大)



行動水情APP



南區水資源局官網



南水局FB粉絲團

請留意水庫洩洪資訊

防颱準備好 災損自會少



# 分毫不差

## 才足以教人驚豔

搏得滿堂喝采的每一場演出，廣為客戶信賴的每一回肯定，  
台灣世曦連番榮耀背後的，永遠都只是「專業」的累積，  
以及「用心」的執著。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

CECI



台灣世曦  
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號  
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568  
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw