

# 土木水利

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

February  
2023



ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 50, No. 1

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

2023  
50 周年慶

系列活動預告

公共工程施工階段  
BIM技術運用現況  
及與創新科技的結合

工程技術及發展

專 輯

氣候變遷下的  
都市衝擊、  
減緩與規畫



## 最新出版建築物耐震評估系列叢書

鋼筋混凝土建築物耐震能力  
初步評估 PSERCB — 理論背景與系統操作  
(2023 年 第三版)



會員價：**650** 元  
非會員價：**730** 元



PSERCB 網路購書

<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=6283>

鋼筋混凝土建築物耐震能力  
詳細評估 SERCB — 理論背景與系統操作  
(2023 年 第二版)



會員價：**750** 元  
非會員價：**850** 元



SERCB 網路購書

<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=5921>

PSERCB 弱層檢核  
— 理論背景與系統操作  
(2023 年 第三版)



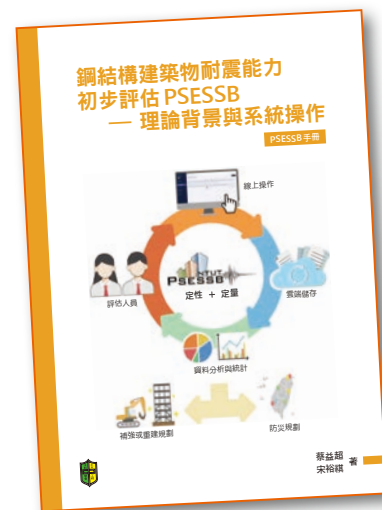
會員價：**450** 元  
非會員價：**500** 元



弱層檢核 網路購書

<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=9207>

鋼結構建築物耐震能力  
初步評估 PSESSB — 理論背景與系統操作  
(2022 年 第一版)



會員價：**520** 元  
非會員價：**600** 元



PSESSB 網路購書

<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=12374>



鳥瞰高雄星光水岸公園與高雄展覽館  
(攝影：黃義傑)

# 土木水利

社團法人中國土木水利工程學會會刊



發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木水利工程學會

主任委員：詹錢登 (國立成功大學水利系特聘教授兼工學院院長、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 社團法人中國土木水利工程學會

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

社團法人中國土木水利工程學會第二十五屆理監事 (依姓氏筆劃排序)

理事長：宋裕祺

常務理事：伍勝園 高宗正 楊偉甫 廖學瑞

理事：王宇睿 余信遠 李政安 林子剛 林聰利 胡宣德 高銘堂

張大鵬 張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃慧仁

壽克堅 歐善惠 賴建信 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：王藝峰 李建中 沈景鵬 林其璋 邱琳濱 劉國慶

## 先進工程

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

## 永續發展

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

## 國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

## 教育學習

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

## 學會活動

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

## 出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

## 分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水部分會
- 土水東部分會

## 中國土木水利工程學會任務

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。

中國土木水利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

### 「氣候變遷下的都市衝擊、減緩與規畫」專輯 (客座主編：吳治達副教授)

|                              |                 |    |
|------------------------------|-----------------|----|
| 專輯序言：氣候變遷下的都市衝擊、減緩與規畫        | 吳治達             | 3  |
| 都市街道變遷與都市熱島效應之關聯—以原臺中市八區為例   | 康亦陞／廖冠閔／徐逸祥     | 4  |
| 以高解析度大氣環流模式資料推估氣候變遷下北部水資源之衝擊 | 劉子明／鄧澤宇／許晃雄     | 10 |
| 氣候變遷下的空氣污染分布：地理人工智慧技術之應用     | 吳治達／曾于庭         | 16 |
| 熱島效應緩解策略之風廊系統的指認與應用          | 林子平／蔡沛淇／歐星好／張洲滄 | 24 |
| 台北盆地的高溫風險—自然有解？              | 石婉瑜／陳品瑜         | 30 |
| 從世界看臺灣：氣候變遷調適與國土空間規劃         | 林映辰／鄭喜恩         | 37 |

### 工程技術及發展

|                                |     |    |
|--------------------------------|-----|----|
| 國內公共工程施工階段 BIM 技術運用現況及與創新科技的結合 | 陳哲仲 | 43 |
|--------------------------------|-----|----|



### 2023 邁向 50 系列報導

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 中國土木水利工程學會 50 週年 Logo 設計及主題文字說明                                        | 封底  |
| 最新出版建築物耐震評估系列叢書：<br>PSERCB 初評手冊、SERCB 詳評手冊、PSERCB 弱層檢核手冊、PSERCB 鋼構初評手冊 | 封面裡 |
| 0428 施工遭遇歷史建築古蹟或其他文化資產因應策略研析座談會，歡迎報名                                   | 52  |
| 0512 捷運統包工程經驗分享發表會，歡迎報名                                                | 53  |
| 0713 第27屆營建工程與管理學術研討會，歡迎報名                                             | 54  |

### 廣告特搜

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌 | 封底裡 |
| 華光工程顧問股份有限公司 — 工程技術服務 材料試驗服務  | 15  |



# 氣候變遷下的 都市衝擊、 減緩與規畫

## 專輯序言

**專輯客座主編** 吳治達／國立成功大學測量及空間資訊學系 副教授  
國家衛生研究院國家環境醫學研究所 兼任副研究員

人類社會的急速發展增強了地球的暖化效應，導致氣候變遷議題的出現；與此同時，氣候變遷所造成的溫度、雨量及大氣環境的變化亦強烈反饋至全球人民賴以維生的都會微環境系統，進而衍生出熱島效應、水資源極端變化、空氣污染等環境災害子課題。聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於 2022 年釋出之最新版第六次評估報告（Assessment Report 6, AR6）亦指出，氣候變遷造成的衝擊風險正快速擴散至全球各地，並明顯危害陸地及水域等生態系統的完整性，威脅人類之存活與生計。

為呼應全球淨零碳排、以減緩氣候變遷之作為，我國亦由國家發展委員會領銜，於 2022 年 3 月公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，總共規畫「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」、「社會轉型」等四大轉型，搭配「科技研發」、「氣候法制」兩大治理基礎、以及「十二項關鍵戰略」之行動計畫，以推動並落實淨零轉型之整體目標，以達到實質減緩高溫熱島、極端水文災害及改善都市空品之效益。本會刊之目的旨在傳達會友當前重要之土木水利發展與應用資訊，氣候議題為當代、甚至下個世代最為重要

的環境議題之一，且上述這些淨零路徑與行動方案之落實，均與土木水利基礎建設及應用技術息息相關。築基於此，本次專輯亦因此應運而生。

「氣候變遷下的都市衝擊、減緩與規畫」專輯共邀請六位國內相關領域之專家學者，其中「都市街道變遷與都市熱島效應之關聯—以原臺中市八區為例」、「以高解析度大氣環流模式資料推估氣候變遷下北部水資源之衝擊」及「氣候變遷下的空氣污染分布：地理人工智慧技術之應用」三篇文章，分別從都市規畫、防災、空間資訊之角度，針對氣候變遷影響下引起之「熱島效應」、「水資源衝擊」以及「空氣污染」等環境問題進行剖析，進而分析其可能帶來的影響衝擊；「熱島效應緩解策略之風廊系統的指認與應用」與「台北盆地的高溫風險—自然有解？」二篇文章，則是透過良好的風廊系統與綠色基盤維護管理的作法，以提出緩解策略建議，達到改善暖化的目標；最後在「從世界看臺灣：氣候變遷調適與國土空間規劃」一文中，參照了世界各國的經驗，基於台灣因應氣候議題之國土空間規畫進行建言。本專輯之成果及論述，對於土木水利領域在因應氣候議題之影響與調適，必定能提供實值之參考價值。



# 都市街道變遷與 都市熱島效應之關聯 ——以原臺中市八區為例

康亦陞／逢甲大學都市計畫與空間資訊學系 學士

廖冠閔／逢甲大學營建及防災中心 專任助理

徐逸祥／逢甲大學都市計畫與空間資訊學系 副教授

在全球性的環境變遷與暖化影響下，高度都市化的城市因高度密集的建築物群，以及易吸熱而不易透水之街道鋪面，使都市熱島效應加遽，因此如何減緩、改善都市熱島，也成為重要議題之一。本研究以臺中市作為研究地區，透過不同年份夏季上午十時左右之影像資料，配合國土利用現況調查、人口密度、地表溫度（Land Surface Temperature, LST）反演、常態化差異建物指標（Normalized Difference Building Index, NDBI）、都市熱島（Urban Heat Island, UHI）影響區域進行相關性分析與迴歸分析，檢討大範圍都市街道空間結構的改變與都市熱島效應之關係，以此作為未來街道配置及都市街谷設計之參考。透過研究發現，以相關性分析而言，LST 與 NDBI 之相關性最高，與道路使用之相關性次之，與人口密度之相關性最後，但三項因子皆與 LST 具有一定程度之相關性。並且觀察重劃區及草悟道的熱島強度比較，也可得知都市內部之整體區域道路寬度充足、道路配置整齊或綠化空間完整，能有效使地區蓄熱能力降低。最後，在兩年 LST 與人口密度迴歸分析之標準化係數及非標準化係數部分，皆呈現人口密度增加而 LST 減少的狀況，推測可能與活動人口及戶籍人口之差異有關。後續也提出研究限制面、未來應如何加深此研究發展等研究建議。

關鍵詞：都市熱島效應、都市街道變遷、常態化差異建物指標、都市熱島影響區域

## 前言

19 世紀初，英國氣象學家 Luke Howard 於《倫敦的氣候》一書中提出都市熱島之概念，然而其所提出概念較為模糊；而都市熱島（Urban Heat Island）正式一詞則是於 1958 年 Gordon Manley 在英國皇家氣象學會所出版之學報中所提出；而評估都市內部熱島之強弱即為都市熱島強度，透過市中心最高溫度與市郊最低溫度之差成為一固定指標<sup>[1]</sup>。隨著國際間各大都市發展逐漸完備與飽和，環境變遷及全球暖化所造成之「都市熱島」議題成為國際間討論的重要議題，對於不同地區及不同大小之都市所面臨之熱島問題也不盡相同，而大部分的熱島多位於高密度、連續性、

大範圍、不透水的開發區<sup>[2]</sup>，換言之，20 世紀後全球科技、經濟、產業快速發展，連帶使各地區城市急遽擴張，都市化現象極為明顯，快速擴張的都市形成高度密集的建築物群，以及易吸熱而不易透水之街道鋪面，種種人為非自然形成之制式固定形體，成為阻礙都市空氣流通及蓄熱之一大因素，使都市熱島效應加遽。而對於可減緩都市熱島之各項永續發展指標，包括能源使用、交通運輸、空氣品質、水循環、綠覆率等等，在上述指標中尤以組成都市各街廓範圍的道路系統配置扮演著舉足輕重的角色，不同型態的道路配置可以對都市交通系統以及都市微氣候造成一定程度的影響，可以說，道路擔負著建立起整體都市輪廓

的重要身分。而現今都市面臨發展飽和、新舊規劃交雜、部分基盤建設缺乏更新，以及過去以效益為原則所發展之區域較缺乏整體美感規劃等問題，加之以前述提及都市熱島之議題、永續發展推動起步伊始，道路量體涵蓋到了都市整體規劃的基礎，因而本研究欲以都市內道路配置對都市熱島影響之觀點，針對不同年份夏季上午十時左右之影像資料，配合土地使用、人口統計等資料，檢討其大範圍都市街道空間結構的改變與都市熱島效應之關係，期望能以此作為未來街道配置及都市街谷設計之參考。

## 研究範圍概述

本次研究主要目標為原臺中市八區（舊八區），並參考研究年期內衛星影像拍攝品質較佳的區域，擇定研究範圍如圖 1 紅色虛線內所示，範圍東側為臺中市主要森林範圍（新社區、東勢區、和平區），西側為大肚山及臺中海岸線，南北兩側為臺中之建成區。因清末的建設省城計畫留下許多公有建築與土地，於是現今的中區於日治初期被選為中部行政中心，並將大墩街及省城街區一帶劃設為「臺中街」<sup>[3]</sup>；1896 年 8 月日本內務省工程顧問巴爾頓（W.K.Burton）提出「臺中市街區計畫設計報告書」，建立了臺中城市棋盤式街廓的雛形<sup>[3,4]</sup>；明治三十三年（1900）的「市區改正計畫」奠定了中區的棋盤式街道等空間樣態，也是日治

時期臺灣第一個較完備的市區計畫，可以說，臺中市都市計畫發展歷程早，於日治時期開始即有多區域之規劃設計，整體發展至今已一百餘年。然而早年之設計觀念相對缺乏永續環境與都市微氣候之概念，故在都市範圍內產生高密度建物開發、緊密整齊的街廓排列及混合土地使用等，形成近似緊湊都市、複合城市的樣態。

到了現今，除了日治時期的道路規劃為以臺中車站為中心之斜 45 度角棋盤放射狀外，主要規劃之區域為目前臺中市區中區全區及部分之西區、東區、南區，往後之都市規劃也以此基礎向外持續發展，使目前臺中市區出現眾多之環形道路（文心路、忠明路、環中路等）。而臺中市之軌道建設為臺鐵、高鐵、捷運，臺鐵與捷運形成環形之服務設計，除臺鐵臺中站為重要城際型轉運節點，其餘站點肩負起地區型之軌道運輸服務，而高鐵臺中站為國家級重要城際型轉運節點，透過串聯三鐵不同等級之服務類型，達成優質之大眾運輸服務網絡。

臺中市最早之綠色基盤為臺中公園，近年透過都市計畫及河川、鐵道高架化之多種整治方式，設計出獨特之環形園道（草悟道、美術園道、忠明園道、興大園道、東光園道、興進園道、育德園道）、綠空鐵道、綠川水岸綠帶及中央公園等重要綠色基盤，為臺中市區創造出眾多優質之綠帶風廊。

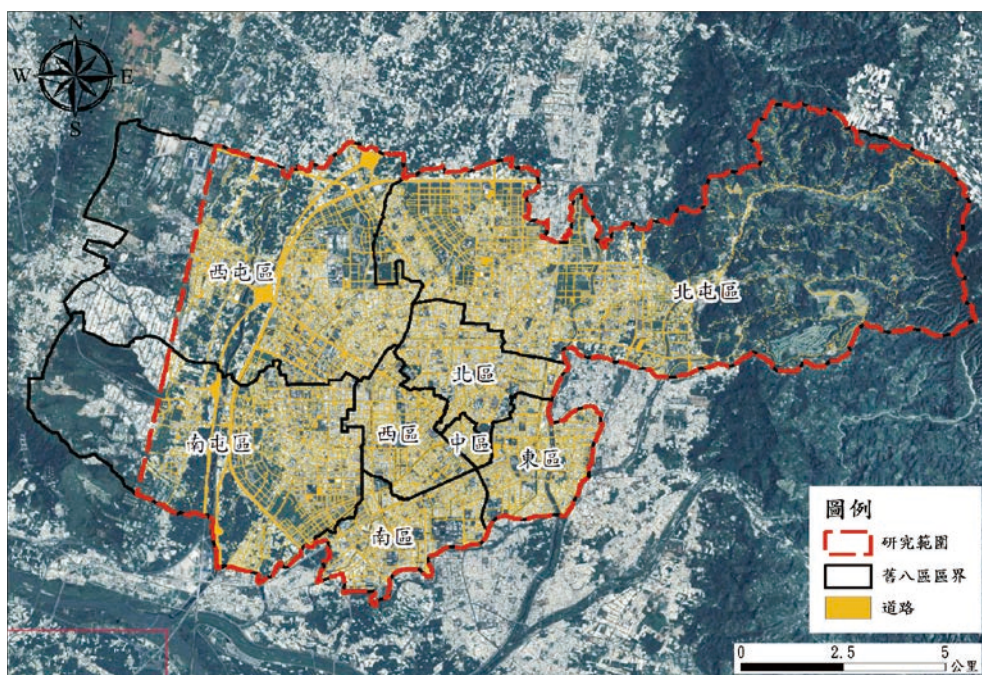


圖 1 研究範圍圖

## 研究方法及資料調整

### 氣溫

中央氣象局觀測資料查詢系統蒐集臺中測站 2013 年～2022 年各月之氣象資料，資料顯示臺中市夏季高溫月份為六至九月，月平均溫度皆為 28°C 以上，配合本次所挑選影像之日期，其測站日均溫為 2013/07/05 之 28.9°C、2022/07/22 之 30.6°C，皆高於月平均溫度。

### 衛星影像

本研究取用美國地質調查局 (U.S. Geological Survey, USGS) 所提供之 Landsat 8-9 OLI/TIRS Collection 2 Level-2 影像，其資料解析度為 30 m × 30 m 為避免雲層影響挑選雲量較低之影像，並依據中央氣象局所得之氣象資料挑選其氣溫較高之日期 (2013/07/05、2022/07/22)，且影像拍攝時間皆為當地時間上午十時左右之影像，並取 Level-2 本身具有之 Band 10 熱紅外光地表溫度 (Land Surface Temperature, LST) 產品，以此定義都市熱島 (Urban Heat Island, UHI) 影響區域，兩個研究時期的 LST 分布如圖 2 及圖 3 所示。接著，再以近紅外 (Near Infrared, NIR) 及短波紅外 (Short Wave Infrared, SWIR) 波段計算常態化差異建物指標 (Normalized Difference Building Index, NDBI)。NDBI 最早於 2013 年提出，此方法相較人工判釋能以更高準確性與客觀性繪製出建成區，可作為快速繪製城市土地之方法<sup>[5]</sup>，本次採用之 Landsat 8 影像之 NIR 波段為 Band5，SWIR 波段為 Band6，NDBI 主要為界定人工鋪面與自然植被之方法，其數值愈接近 1 則愈可能為建物，反之愈接近 -1 則愈可能為自然植被，其公式如下：

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (1)$$

都市熱島影響區域 (UHI area) 本研究則參考 Ma *et al.*<sup>[6]</sup> 提出之準則，定義為城市熱島地區平均氣溫與城市周邊地區平均氣溫之差<sup>[6]</sup>，透過整體研究區 LST 之平均加上其 0.5 倍之標準差，檢測其數值與該網格 LST 之關係，而算式中之 0.5 倍標準差，此數值可依研究區特性不同而進行調整，以確定及比較地區所適合之判定數值，其公式如下：

$$LST > \mu + 0.5 \times SD \quad (2)$$

其中  $\mu$  為研究範圍內之平均 LST，SD 為範圍內 LST 之標準差。

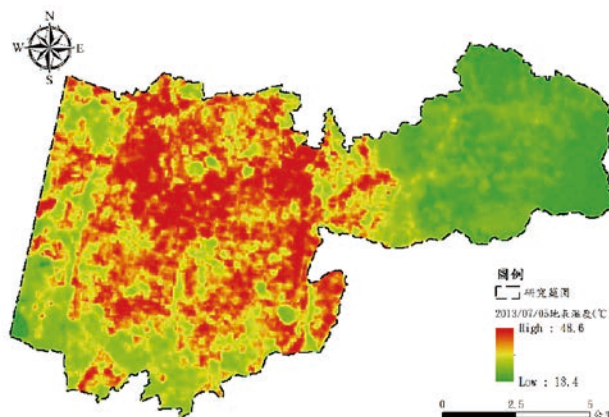


圖 2 2013 年 7 月 5 日 LST 圖

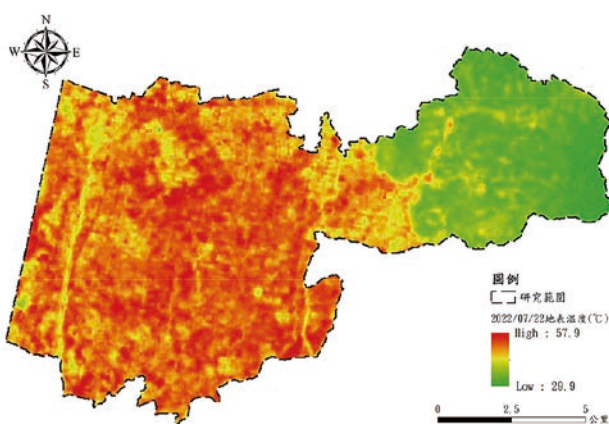


圖 3 2022 年 7 月 22 日 LST 圖

### 交通使用範圍

參考國土測繪圖資服務雲 WMTS 介接服務，確認此次國土利用現況調查之涵蓋原臺中八區之年份為 2013 年～2015 年以及 2021 年，再配合相對應年度，套疊由中央大學太空及遙測研究中心「SPOT 衛星影像介接服務平台」提供之 SPOT 影像 WMTS 介接服務，數化交通使用 (道路、軌道) 範圍以進行後續分析。

### 人口密度

本研究取用「社會經濟資料服務平台」之臺中市最小統計區人口，進而推算出人口密度，且由於本研究選用之衛星影像為 2013/07/05、2022/07/22，因此人口選用以該兩年度的 6 月人口數進行推算。

綜合以上資料，本研究分別以衛星影像原解析度 30 m × 30 m、以及降低解析度為 90 m × 90 m 後之不同統計單元，以 Pearson 相關分析討論 LST 和交通使用及人口密度之間的相關性，再以普通最小平方法 (Ordinary Least Squares, OLS) 迴歸分析討論同時考量交通使用及人口密度兩因子的變化時，LST 的變化為何。

## 結果與討論

### 相關性分析

將 30 m × 30 m 之 LST 反演資料與各項因子進行相關性分析，顯示 NDBI 對於 LST 之相關性最高，2013 年與 2022 年為 0.783 及 0.782（表 1 和表 2）；此次欲探討之交通因子（軌道使用、道路使用）中，以道路使用之相關性較高，2013 年為 0.355，2022 年則為 0.339。軌道使用因其覆蓋面積過小，計算出之相關性僅 0.047 及 0.026；而經標準化之人口相關性為 0.414。

表 1 2013 年 LST 30 m × 30 m 網格相關性表

| 2013 年數值相關性<br>(30 m × 30 m 網格) |                        | NDBI    | 軌道使用  | 道路使用  | 人口密度  |
|---------------------------------|------------------------|---------|-------|-------|-------|
|                                 |                        |         | 像元內比例 |       |       |
| LST                             | 皮爾森<br>(Pearson)<br>相關 | 0.783   | 0.047 | 0.355 | 0.414 |
|                                 | 顯著性<br>(雙尾)            | 0.000   | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|                                 | N                      | 155,533 |       |       |       |

表 2 2022 年 LST 30 m × 30 m 網格相關性表

| 2022 年數值相關性<br>(30 m × 30 m 網格) |                        | NDBI    | 軌道使用  | 道路使用  | 人口密度  |
|---------------------------------|------------------------|---------|-------|-------|-------|
|                                 |                        |         | 像元內比例 |       |       |
| LST                             | 皮爾森<br>(Pearson)<br>相關 | 0.782   | 0.026 | 0.339 | 0.401 |
|                                 | 顯著性<br>(雙尾)            | 0.000   | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|                                 | N                      | 155,533 |       |       |       |

而將網格大小由 30 m × 30 m 以平均的方式計算為 90 m × 90 m 之尺度時，可以看到計算出之相關性有明顯增加，2013 的 NDBI 為 0.874，2022 為 0.906，兩年度皆較 30 m × 30 m 的結果相關性高；其中以道路使用之相關性增加最顯著，2013 年為 0.567，2022 則為 0.591（表 3 和表 4）。由此可知統計單元由 30 m × 30 m 變為 90 m × 90 m，雖會簡化網格內所包含各因子之面積或數值，以及減少網格總數量，然而變數之間的相關性會有改變。

表 3 2013 年 LST 90 m × 90 m 網格相關性表

| 2013 年數值相關性<br>(90 m × 90 m 網格) |                        | NDBI   | 軌道使用  | 道路使用  | 人口密度  |
|---------------------------------|------------------------|--------|-------|-------|-------|
|                                 |                        |        | 像元內比例 |       |       |
| LST                             | 皮爾森<br>(Pearson)<br>相關 | 0.874  | 0.055 | 0.567 | 0.473 |
|                                 | 顯著性<br>(雙尾)            | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|                                 | N                      | 17,647 |       |       |       |

表 4 2022 年 LST 90 m × 90 m 網格相關性表

| 2022 年數值相關性<br>(90 m × 90 m 網格) |                        | NDBI   | 軌道使用  | 道路使用  | 人口密度  |
|---------------------------------|------------------------|--------|-------|-------|-------|
|                                 |                        |        | 像元內比例 |       |       |
| LST                             | 皮爾森<br>(Pearson)<br>相關 | 0.906  | 0.063 | 0.591 | 0.491 |
|                                 | 顯著性<br>(雙尾)            | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|                                 | N                      | 17,647 |       |       |       |

### 迴歸分析

將 2013 年及 2022 年之處理完成之 90 m × 90 m 網格資料進行多元線性迴歸分析，並選定因變數為兩年份之 LST，自變數為 NDBI、道路使用及人口密度（表 5），在決定係數 R 平方值與調整後 R 平方值，2013 年為 0.774、2022 年為 0.841，表示 2013 年之迴歸模型總變異數中有 77.4% 可被自變數解釋，2022 年之迴歸模型總變異數中有 84.1% 可被自變數解釋。

接著進行各項檢定之結果說明，顯著性檢定（F 檢定）其顯著性 p 值 < 0.001，拒絕虛無假說，且代表此預測模型顯著具有預測能力；在個別係數邊際檢定（t test），2013 年 NDBI 之計算統計值為 173.889、道路使用之計算統計值為 28.374、人口密度之計算統計值為 -3.823，2022 年 NDBI 之計算統計值為 210.409、道路使用之計算統計值為 41.954、人口密度之計算統計值為 -21.607，且兩年份所有項目之顯著性 p 值皆 < 0.001，代表 NDBI、道路使用與人口密度對 LST 有顯著之關聯；且為避免因自變數間相關性過高而產生的共線性問

表 5 迴歸分析結果表

|               | 自變數  | F         | 調整後 R 平方 | t       | 顯著性   | VIF   | 非標準化係數 B | 標準化係數 Beta |
|---------------|------|-----------|----------|---------|-------|-------|----------|------------|
| 2013 年<br>LST | NDBI | 20134.901 | 0.774    | 173.889 | 0.000 | 1.711 | 65.095   | 0.814      |
|               | 道路使用 |           |          | 28.374  | 0.000 | 1.493 | 4.998    | 0.124      |
|               | 人口密度 |           |          | -3.823  | 0.000 | 1.454 | -8.390   | -0.016     |
| 2022 年<br>LST | NDBI | 31029.720 | 0.841    | 210.409 | 0.000 | 1.910 | 69.243   | 0.874      |
|               | 道路使用 |           |          | 41.954  | 0.000 | 1.410 | 5.893    | 0.150      |
|               | 人口密度 |           |          | -21.607 | 0.000 | 1.549 | -43.466  | -0.081     |

題，採用共線性診斷來判斷自變數因子間的獨立性，當自變數與其他自變數關係密切時，自變數的允差大，因此 VIF 值亦大，當  $VIF \geq 10$  時，表示自變數幾乎是其他幾個自變數的線性組合，因此可以考慮將其迴歸模式中去除<sup>[7]</sup>，而本次兩年份各因子之 VIF 皆介於 1 至 2 間，皆無超過 10 證明不具明顯共線性問題。

非標準化係數 (B) 部分，2013 年之道路使用百分比上升一單位，則 LST 上升  $4.998^{\circ}\text{C}$ 、人口密度值上升一單位，則 LST 下降  $8.390^{\circ}\text{C}$ ，2022 年之道路使用百分比上升一單位，則 LST 上升  $5.893^{\circ}\text{C}$ 、人口密度值上升一單位，則 LST 下降  $43.466^{\circ}\text{C}$ ；標準化係數 (Beta) 部分，可去除原不同項目間的測量單位，以統一之標準相互比較其相關性，2013 年之 NDBI 增加一個標準差，則 LST 增加 0.814 個標準差、道路使用百分比增加一個標準差，則 LST 增加 0.124 個標準差、人口密度百分比增加一個標準差，則 LST 減少 0.016 個標準差，2022 年之 NDBI 增加一個標準差，則 LST 增加 0.874 個標準差、道路使用百分比增加一個標準差，則 LST 增加 0.150 個標準差、人口密度百分比增加一個標準差，則 LST 減少 0.081 個標準差。

由以上結果可知，兩年 LST 與人口密度迴歸分析之標準化係數及非標準化係數，皆呈現人口密度增加而 LST 減少的狀況，推測可能與活動人口及戶籍人口之差異有關，戶籍人口需仰賴民眾辦理登記，且為靜態資料較不具流動性，透過中華民國統計資訊網資料顯示，因就學、就業等因素遷徙頻繁，實際居住處所往往與戶籍所在地不同，戶籍人口數與常住人口數其差異程度平均每年約為 7%，未來可選擇採用電信信令人口資料或最新之人口普查資料進行分析，以降低此部分所造成之差異。

## 熱島道路比較

將 2013 年及 2022 年 UHI Area 範圍與本研究數化之道路使用兩者套疊 (圖 4)，計算出兩年份之熱島道路面積，而 2022 年因重劃區道路已完成規劃 (十三期重劃區、十四期重劃區、水湳機場原址南北側區段徵收、北屯捷運機廠區段徵收、單元五自辦重劃區)，道路面積明顯提升；而在 2013 年與 2022 年之熱島道路比較，2022 年之道路及熱島道路總量皆有上升，且在 UHI Area 前 (33%) 及 UHI Area 中 (33%~66%) 熱島道路與熱島道路面積總量之比例在 2022 年有明顯提升，說明整體都市熱島之問題在近年內並未得到改善，且有上升之趨勢。

比較圖 5 及圖 6 中 UHI Area 範圍可以明顯看到 2022 年在水湳經貿園區、北屯十四期重劃區、北屯捷運機廠區段徵收範圍之熱島範圍明顯減少，且其現況多為公園及道路設施已劃設完成之重劃區範圍，範圍地覆多以草本植物為主，而上述三地區在 2011 年至 2017 年先後完成重劃區之整地及各式管線建置工程，在此過程中因舊有地上物拆除、交通排水污水等整體工程，及地表主要之地覆為土石泥砂，造成部分重劃地區出現熱島效應。

都市範圍內除正進行之重劃區外還有兩區域有明顯之非熱島地區，草悟道以及七期重劃區，草悟道本身之規劃重點即為減碳與留綠，也成為臺中市區重要的風廊帶，而七期重劃區之設計為舒緩舊市區之發展及打造新市政中心，其規劃之道路及街廓方正，配合新建築開發留設一定程度之開放空間，及綠帶公共設施之設置，且地區內之街道除小部分巷道及河道溝渠周邊道路小於十米外，其於道路皆為十米以上之道路，說明都市內部之整體區域道路寬度充足、道路配置整齊或綠化空間完整，能有效使地區蓄熱能力降低。

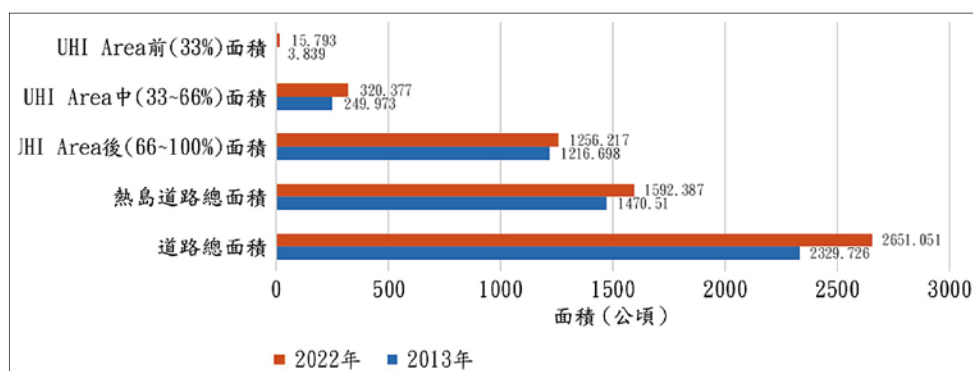


圖 4 2013 年、2022 年道路總面積及 UHI Area 道路面積長條圖

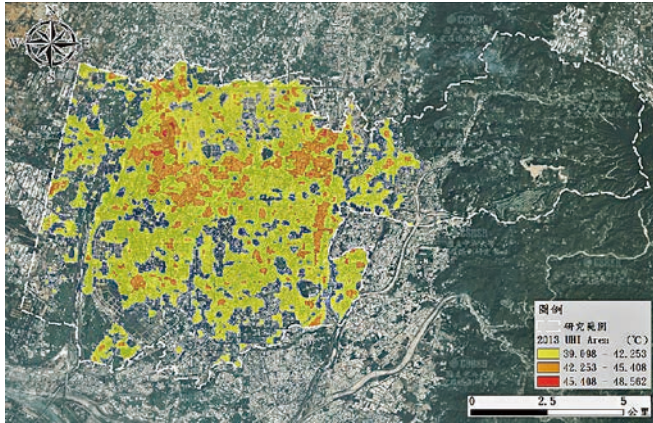


圖 5 2013 年研究範圍 UHI Area 圖

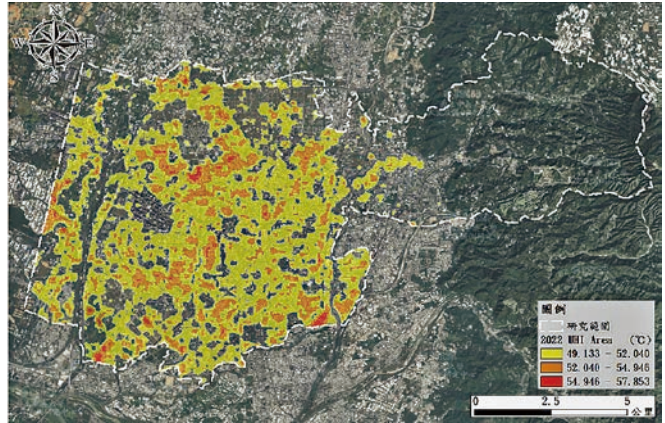


圖 6 2022 年研究範圍 UHI Area 圖

## 結論與建議

本研究僅針對原臺中市八區接近中午時段之都市熱島效應進行探討，並加入道路及人口因子進行相關性及迴歸分析，得出 LST 與 NDBI 之相關性最高，與道路使用之相關性次之，與人口密度之相關性最後，但三項因子皆與 LST 具有一定程度之相關性。從上述可以得知，都市內部之熱島可能受不同日期時間點、不同天候、不同都市尺度、不同地形地貌及不同都市街道配置等關聯，且利用不同計算方式所得出之熱島數值皆有所差異；本研究透過結果提出未來都市街道配置及整體空間配置之建議。

本次研究以原臺中市八區為研究尺度，過程中得出軌道與整體都市熱島相關性低，可以想見以本研究尺度而言，軌道基數相對較少，因此未來若須研究軌道對都市熱島效應之關聯，建議可以將尺度限縮至軌道周邊範圍為研究區，進行後續研究。

對未來都市內部之設計應以道路寬度充足、道路配置具規律及綠化空間完整為原則，利用整體空間之設計使都市之街谷提高連續性與串聯性，有效使地區蓄熱能力降低。

未來對於較小尺度之都市熱島研究，若需進行更精細之整體街谷熱環境模擬，可配合計算流體力學（computational fluid dynamics, CFD）軟體，輸入建置完成之模型資料並設定其相關參數進行環境模擬，以取得街道及周邊環境配置下之整體環境模型。

## 參考文獻

1. 林憲德、陳冠廷、郭曉青，「台灣中型都市熱島現象與土地利用之觀測解析」，規劃學報，第二十八期，第 47-64 頁（2001）。
2. 石婉瑜、Leslie Mabon，「臺北盆地的熱環境特徵與都市綠色基盤的影響」，都市與計劃，第四十五卷，第四期，第 283-300 頁（2018）。
3. 郭肇立、袁興言，「台中州廳的空間生產 1895-1945」，都市與計劃，第三十六卷，第三期，第 305-332 頁（2009）。
4. 賴志彰，「日據明治時期臺中地域的空間環境形式」，臺中文獻，第四期，第 85-99 頁（1994）。
5. Zha, Y., Gao, J., and Ni, S., "Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery," International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No. 3, pp. 583-594 (2003).
6. Ma, Y., Kuang, Y., and Huang, N., "Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol.12, pp. 110-118 (2010).
7. 陳順宇，迴歸分析四版，三民書局，臺北，第 8-10 ~ 8-11 頁（2009）。



## 土木水利 雙月刊 向您約稿

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

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



DOI: 10.26770/202302150130003

# 以高解析度大氣環流模式資料 推估氣候變遷下北部水資源之衝擊

劉子明／國家災害防救科技中心 助理研究員

鄧澤宇／國家災害防救科技中心 佐理研究員

許晃雄／中研院環境變遷研究中心 特聘研究員兼專題中心執行長

本研究主要目的在於利用高解析度大氣環流模式模擬降雨與氣溫資料，再統計降尺度偏差修正至集水區尺度後，透過水文模式模擬以及水資源供水模式模擬，探討氣候變遷下北部地區（臺北、板新、桃園）水資源供需情形，並探討已完工之板新地區供水改善計畫二期工程（簡稱：板二計畫），在氣候變遷影響下之效益與衝擊。北部地區四個主要集水區在未來氣候變遷情境下，雨量呈豐水期微增，枯水期減少，但總雨量呈現全年減少情形。流量模擬顯示未來豐水期與枯水期以及年總流量皆為減少的趨勢。透過水資源系統動力模式進行有無板二計畫的北部地區供需水情境模擬，無板二計畫條件下的臺北地區、板新地區供水能力尚足，桃園地區出現少許供水缺口。板二計畫完工之後，模擬顯示臺北地區無明顯缺水情形；板新地區於春季、冬季缺水率有下降情形；桃園地區於全年缺水情況皆有顯著下降。加入氣候變遷對北部水資源衝擊影響，結果顯示台北地區出現非常些微之缺水率；板新、桃園地區因豐枯水期雨量差距擴大，故於乾季（春季、冬季）缺水情形加劇，春季尤為明顯。

關鍵詞：氣候變遷、供水系統、系統動力模式

## 前言

近年來極端天氣事件頻傳，淹水災害及乾旱事件發生頻率也隨之增加，對人類生命財產造成嚴重災害。聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱 IPCC）研究報告指出，全球暖化趨勢若持續增加，恐增加缺水之頻率與強度，嚴重

衝擊水資源管理，並加劇水資源之跨部門競爭。氣候變遷對人類生活圈，特別是水資源之衝擊影響受到各界重視，國際間亦積極研擬因應氣候變遷之水資源相關研究與調適策略，以做為氣候變遷下水資源永續利用之決策參考。而海島型國家如臺灣，受氣候變遷之影響相較之下更為顯著，相關領域之研究與落實更是刻不容緩。

臺灣地區流量之豐枯差異於時間與空間皆明顯，然總用水量（民生、工業、農業）卻是逐年上升，偶遇供水吃緊時而乾旱事件多發生在冬、春兩季，主要原因是枯水期降雨減少以及豐水期的降雨不如預期（如颱風數量偏少）所造成。水資源為經濟與社會發展之基礎，隨著人口成長、都市化以及產業發展，用水量之總量需求與穩定性需求日益顯著，加重水資源供給面之挑戰。除現況面臨之問題外，近年極端氣候事件頻頻發生，降雨型態之變化趨勢傾向豐枯加劇，對於水資源供應之衝擊更趨嚴峻，而未來氣候變遷之影響，對於水資源究竟會造成何種影響，影響之程度如何，而現況硬體設施與軟性調配方案是否能因應未來水資源衝擊，尤其重要。

過去氣候變遷下水資源衝擊評估多使用 IPCC 所釋出的數十個大氣環流模式（General Circulation Models，簡稱 GCMs）結果，再透過統計降尺度至集水區進行應用與評估，由於 GCMs 的不確定性，各模式評估結果不一，雖然部分研究以 GCMs 在臺灣的降水模擬優劣程度，挑選與排序適合的 GCMs 結果進行衝擊評估，以此降低模擬的不確定性，但對於是否能夠合理模擬臺灣的降水，仍希望有更細緻的模擬結果進行評估。

近年來全球暖化影響，臺灣枯旱事件頻傳，未來在全球氣溫更高的情境下，臺灣水資源究竟會面臨怎麼樣的挑戰，現有水資源規劃方案是否能夠因應氣候變遷的衝擊，需要有能夠模擬解析台灣未來氣候變遷下降水變化的大氣環流模式進行評估。為此，本研究使用高解析度大氣環流模式之降雨與氣溫模擬結果透過統計降尺度偏差修正至集水區，再透過水文模式模擬未來集水區入流量，以供需求模式模擬與分析未來水資源供水可能遭受之衝擊。

## 文獻回顧

氣候變遷對台灣水資源衝擊評估的研究，多以 IPCC 第四次評估報告（IPCC Fourth Assessment Report，簡稱 IPCC-AR4）的情境進行分析為主，且多以統計降尺度的資料進行應用與探討。研究指出在 IPCC-AR4 的暖化情境下，以多模式成果推估世紀末（2080～2099）雨量變化狀況，北部地區模式推估冬季雨量減少情況較為一致，春季雨量偏向減少，而夏季雨量偏向增加，

秋季無明顯一致性，然而不降雨日數增加顯示高度一致性<sup>[1]</sup>；另有研究顯示北部地區 9～12 月雨量減少之一致性較高，5～8 月雨量稍微偏向增加，而 1～4 月則無明顯一致性<sup>[2]</sup>；北部地區年雨量呈現減少趨勢，最大不降雨日數全台狀況皆嚴重<sup>[3]</sup>；未來氣候變遷影響下，北部地區豐水期雨量增加 1.9%，枯水期減少約 0.8%<sup>[4]</sup>。

在 IPCC 第五次評估報告（IPCC 5th Assessment Report，簡稱 IPCC-AR5）出版與 GCMs 資料釋出之後，水利署<sup>[5]</sup>則以 IPCC-AR4 與 IPCC-AR5 豐枯水期均減少之 GCMs 比較差異，結果顯示 IPCC-AR5 枯水期雨量減少但減少幅度不大，而豐水期雨量則有增加情形。周佳等人<sup>[6]</sup>指出臺灣地區在 IPCC-AR5 世紀末（2080～2099）月雨量推估結果顯示，春季雨量以及冬季雨量呈現減少趨勢，而夏季雨量呈現增加趨勢，而秋季並無顯著趨勢。而陳宏宇等人<sup>[7]</sup>則以 IPCC-AR5 的世紀末（2081～2100）日雨量進行分析，多模式系集平均結果顯示年平均雨量增加 17.14%，年最大連續不降雨日數增加 12.46%，降雨日數減少 5.77%，而降雨強度增加 23.76%。總體而言，比較 AR4 與 AR5，北部地區未來雨量變化冬季雨量減少與不降雨日數增加之訊號具高度一致性，春季雨量減少與夏季雨量增加具中度一致性，秋季則無明顯一致性。而 AR5 在乾季減少與夏季增加幅度相較 AR4 更為明顯。

而在未來氣候變遷情境下集水區流量推估部分，多數研究與報告顯示豐枯差距相較於雨量將更為擴大，特別是乾季流量減少情形更為顯著。水利署<sup>[2]</sup>推估北部地區集水區流量成果，推估集水區在 1～4 月以及 9～12 月流量下降之模式數量較雨量更多，下降幅度更為顯著，但因為豐水期流量增加之故，北部地區整體供水缺口並無明顯擴大。然而林尉濤<sup>[8]</sup>指出，以現況農業用水而言，枯水期（冬末春初）因正值一期稻作插秧灌溉，水資源經常面臨供不應求之狀況，馬家齊<sup>[9]</sup>以 TCCIP 之 AR4 近未來（2020～2039）資料推估石門水庫供灌灌區之狀況，並用不同入流超越機率分析各種產期調配策略之成效，成果指出近未來枯水期流量僅現況之 88.4%，對農業供水造成嚴重影響，且隨入庫流量超越機率之降低，須採取相較現況更多或是更先期之節水因應措施。

本研究為國內首次使用高解析度大氣環流模式之結果，進行水資源衝擊評估之研究，雖然單以一個大氣環

流模式進行氣候變遷評估之結果較為主觀，但透過高解析度大氣環流模式推估的台灣地區降雨變化，較能以物理特性反應台灣地形特徵所影響之降雨，值得作為窺探未來氣候變遷可能衝擊之參考。

## 研究區域與資料

為探討氣候變遷對水資源乾旱風險之影響，乃以北部地區（臺北、板新、桃園供水區）為例，使用高解析度全球環流模式 GFDL-HiRAM<sup>[10]</sup>（以下簡稱 HiRAM）進行基期（1986～2005 年）與世紀中（2040～2060 年）的氣溫與降雨資料，暖化情境採用 IPCC-AR5 之 RCP8.5 情境<sup>[11]</sup>，並將氣象資料輸入水文模式模擬翡翠水庫集水區以及石門水庫集水區氣候變遷下之水文衝擊，接著使用所蒐集之北部地區水資源供水與需水資料，以 VENSIM 軟體建置北部地區水資源供水系統動力模式<sup>[12,13]</sup>，模擬北部地區之基期（1986～2005 年）、考量社會經濟發展（民國 120 年）情境以及世紀中（2040～2060 年）之氣候變遷情境下之水資源供需狀況。

研究區域供水系統如圖 1 所示，水資源供需水模擬主要為翡翠水庫與石門水庫之供水系統，主要水源來自北勢溪、南勢溪、三峽河以及大漢溪，生活用水供水涵蓋台北、板新以及桃園等地區，在 2019 年板二計畫（板新地區供水改善計畫二期工程）完工並啟用之後，板新地區可藉由輸送管引用翡翠水庫的原水，考量行政區域與供水管轄單位不同，本研究模擬中之翡翠水庫供水仍以台北地區優先供水，再分配給板新與桃園地區。

即使是高解析度環流模式，但模擬結果與實際測站資料比對，仍存在誤差，因此必須透過偏差校正來修正

現況與未來的氣溫與降雨資料。本研究使用之 HiRAM 降雨與氣溫資料，乃透過中央研究院永續科學研究計畫<sup>[14]</sup>經過偏差校正所提供，利用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP）整理的網格化觀測資料（簡稱 TCCIP 網格化觀測資料）作為偏差校正之基準，將模式資料依網格化觀測資料的座標內插，再以內差後的資料與 TCCIP 網格化觀測資料進行偏差校正。

## 水資源供需模擬與評估方法

本研究利用以 Vensim 系統動力學軟體所建置之臺灣北部水資源系統動力模式，更新修改後進行水資源供需模擬，模擬過程使用 TaiWAP<sup>[15]</sup>進行資料輸入、水文模式模擬、需水量時間序列資料產生以及水資源系統動力模式銜接模擬之整合模擬，以進一步模擬與探討水資源供水系統供水情形。水文模式使用 GWLF（Generalized Watershed Loading Function）模式<sup>[16]</sup>進行集水區流量模擬。

為了評估供水系統在現況與未來氣候變遷影響條件下，供水系統之供水能力是否能夠滿足系統之需水量，本研究使用旬平均缺水率，進行供水風險評估。

平均缺水率計算方式如下：

$$\text{平均缺水率}_{\text{第}i\text{旬}} = \sum_{j=1}^n (\text{缺水率}_{\text{第}i\text{旬}} / \text{旬需水量}_{\text{第}i\text{旬}}) / n \quad (1)$$

其中第  $i$  旬為一年中之第 1 至 36 旬， $n$  為模擬年數，TaiWAP<sup>[15]</sup>使用氣象合成模式產生日資料，因為氣象合成模式產生日資料為隨機過程，為了讓資料與實際資料統計特性一致，必須產生多年合成資料才能讓最後平均結果與實際值接近，一般建議至少 100 年以上，本研究也使用 100 年氣象合成資料進行模擬與分析。

## 集水區未來水量變化

北部地區主要依靠翡翠水庫與石門水庫供水，故於水文衝擊評估部分，分析翡翠水庫供水區水源相關之北勢溪、南勢溪，以及石門水庫供水區水源相關之大漢溪、三峽河。本研究分析上述四集水區雨量基期（1986～2005 年）與未來世紀中（2040～2060 年）推估之各月雨量，四個集水區未來變化趨勢相近，因此僅呈現北

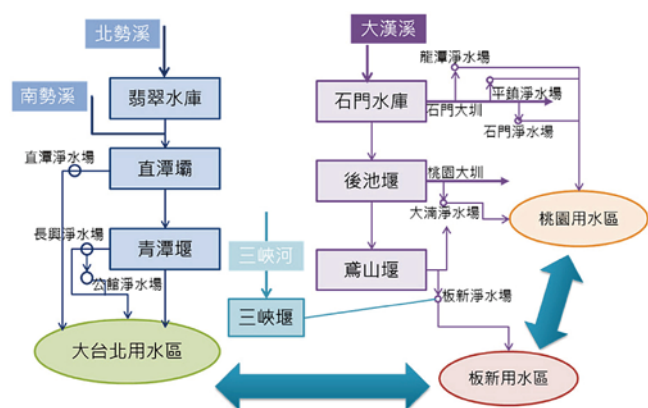


圖 1 研究區域供水系統示意圖

勢溪的結果來說明（如圖 2），並將四個集水區的豐水期（5～10 月）與枯水期（11～4 月）的雨量變化統計如表 1，結果顯示未來豐水期雨量微增，幅度從 +2%～+5% 不等，乾季（枯水季；11～4 月）減少，變化幅度從 -16%～-24% 不等，而總雨量部份皆呈現全年減少情形，變化幅度從 -2%～-5% 不等。但如果由各月的雨量變化來看（如圖 2），可以發現豐水期雨量的增加集中於 8 月，對於水資源管理將會增加困難與挑戰。

北部地區四個集水區流量未來呈現相同改變趨勢，如表 2，因此僅以北勢溪的結果來呈現與說明（如圖 3），豐水期流量為減少趨勢，變化幅度從 -0.3%～-5% 不等，枯水期流量為亦減少趨勢，變化幅度從 -22%～-47% 不等，而總流量部份皆為減少情形，變化幅度從 -9%～-18% 不等。同樣的，如果從各月的變化趨勢來看，跟雨量的趨勢結果相同，流量集中於 8 月，整體而言 8 月的流量增加可能可以解除從春季以來的水庫蓄水量持續下降的危機，但也可能多數增加的流量並無法蓄存於水庫，更可能因為過多的洩洪造成下游的淹水。

## 水資源未來缺水率分析

本研究利用水資源系統動力模式，模擬北部地區供水情形，分別以三種模擬情境進行模擬與分析，為了讓情境模擬有相同基準，皆以民國 120 年的水資源需求條件進行模擬，為了探討板二計畫的效益，第一個模

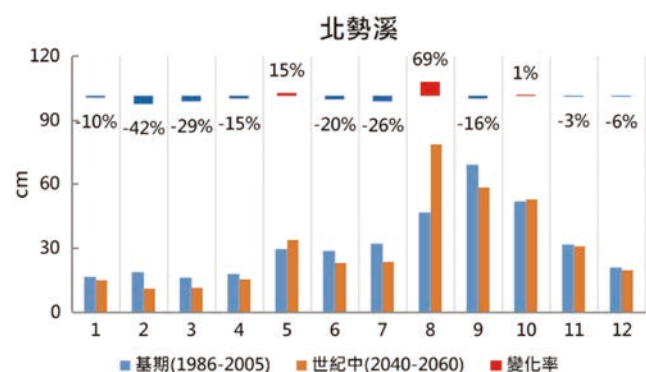


圖 2 基期月雨量與世紀中月雨量變化（以北勢溪流域為例）

表 1 集水區基期與未來豐枯水期雨量差異（RCP8.5 暖化情境）

| 集水區 | 雨量  |      |     |
|-----|-----|------|-----|
|     | 豐水期 | 枯水期  | 全年  |
| 北勢溪 | 5%  | -16% | -2% |
| 南勢溪 | 2%  | -16% | -4% |
| 大漢溪 | 4%  | -24% | -5% |
| 三峽河 | 3%  | -19% | -4% |

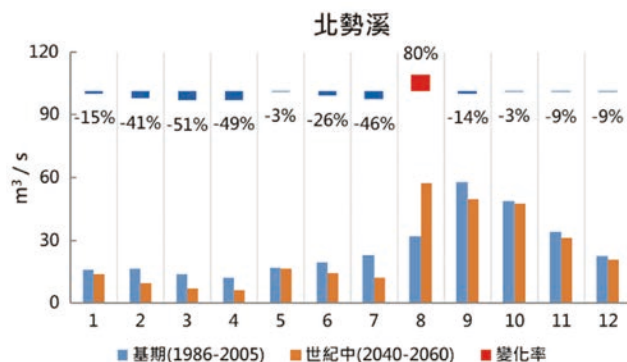


圖 3 基期月流量與世紀中月流量變化（以北勢溪為例）

表 2 集水區基期與未來豐枯水期流量差異（RCP8.5 暖化情境）

| 集水區 | 流量    |      |      |
|-----|-------|------|------|
|     | 豐水期   | 枯水期  | 全年   |
| 北勢溪 | -0.3% | -24% | -9%  |
| 南勢溪 | -4%   | -22% | -11% |
| 大漢溪 | -5%   | -44% | -16% |
| 三峽河 | -3%   | -47% | -18% |

擬情境為無板二計畫、第二個模擬情境為有板二計畫、第三個模擬情境則將氣候條件改為未來氣候變遷下的氣候，以高解析度大氣環流模式未來氣候變遷之結果（2020～2040 年 HiRAM-RCP8.5 情境），代入有板二計畫的水資源系統進行模擬，藉此探討北部地區的板二計畫所帶來的效益，同時也藉由情境式模擬了解氣候變遷下對於臺北、板新、以及桃園地區未來的風險。結果如圖 4 至圖 6。三個模擬情境在農業用水需水量上，皆為不耕耕條件，雖與實際情況有些差距，但卻能反映出水資源規畫上面臨的缺水風險。

首先探討無氣候變遷條件下的板二計畫效益，模擬結果顯示臺北地區無論是無板二計畫或是有板二計畫支援板新與桃園的條件下，皆無明顯缺水情形；板新、桃園地區無板二計畫條件下，於冬季呈現較高缺水情況，板新地區一月平均缺水率可達 14%，桃園地區一月平均缺水率可達 22%；而板二計畫的加入，即使本研究之探討情境以優先供給台北地區進行模擬，仍可明顯看出板二計畫對於板新與桃園地區缺水率的改善效益，板新地區在春季與冬季之平均缺水率有明顯下降，桃園地區於全年的缺水率皆有顯著下降；板新地區一月的平均缺水率降為 7% 左右，桃園地區一月平均缺水率則降為 10% 左右。臺北地區因部分水量供給板新桃園地區，原本不缺水的臺北地區則出現了非常些微的缺水。

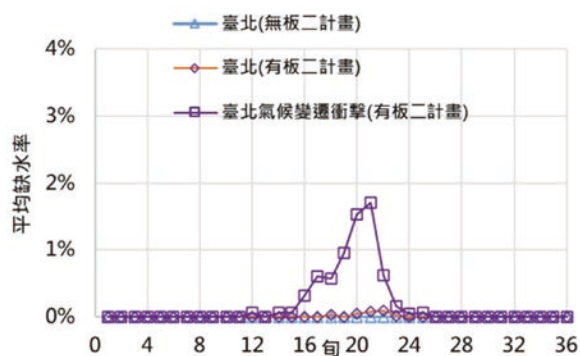


圖 4 臺北地區各種模擬情境下之各旬平均缺水率

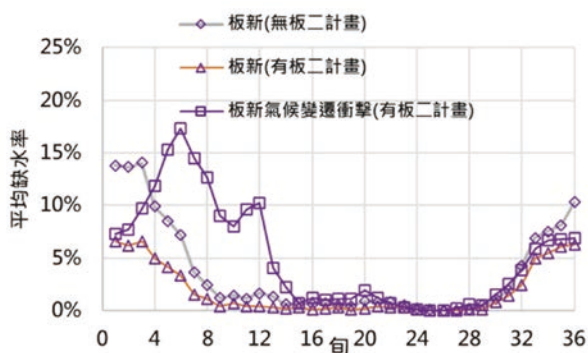


圖 5 板新地區各種模擬情境下之各旬平均缺水率

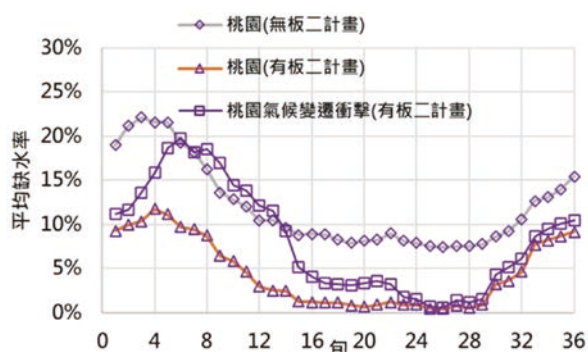


圖 6 桃園地區各種模擬情境下之各旬平均缺水率

而氣候變遷對於北部地區的水資源供水有何影響，可以從第三個模擬情境來探討，從圖 4 可以看出，氣候變遷影響下臺北地區平均缺水率非常些微的上升，不到 2%；板新、桃園地區因乾季濕季雨量差距擴大，故於乾季（春季、冬季）缺水情形加劇，春季尤為明顯，板新地區最大旬平均缺水率從 7% 上升至 17% 左右（圖 5），桃園地區最大旬缺水率從 12% 上升至 20% 左右（圖 6）。

## 結論與建議

本研究主要目的在於以 GFDL-HiRAM 高解析度大氣環流模式模擬結果，透過水文模式以及水資源供水模

式，探討氣候變遷下北部地區（臺北地區、板新地區、桃園地區）水資源供需情形與衝擊，並探討未來氣候變遷下之水資源風險。

北部地區四主要集水區（北勢溪、南勢溪、大漢溪、三峽河）在 RCP8.5 暖化情境下（基期：1986 ~ 2005 年）之推估（世紀中：2040 ~ 2060 年）結果，雨量在四集水區呈現相同趨勢，雨量呈豐水期（5 月 ~ 10 月）微增，枯水期（11 月 ~ 4 月）減少，而總雨量部份皆呈現全年減少情形。流量部分四集水區呈現相同趨勢，無論是豐水期、枯水期以及全年總流量皆為減少趨勢。

透過水資源系統模擬現況以及世紀中北部地區供需水狀況，顯示現況臺北地區、板新地區供水能力尚足，桃園地區出現少許供水缺口，現況由農業調度及北水處支援；臺北地區未來（民國 120 年）用水需求降低（民生用水降低、工業用水無成長），供水狀況無顯著影響，板新地區現況水源供給能力尚可滿足未來需求，而桃園地區因工業發展導致需水量增加，可能有更大供水缺口的發生。而考量新增水資源設施（板二計畫完工）之效益，臺北地區因部分水量供給板新桃園地區，缺水情形些微上升，但無明顯缺水情形；板新地區於春季、冬季缺水率有下降情形；桃園地區於全年缺水情況皆有顯著下降，最大旬平均缺水率從 10% ~ 20% 下降至 10% 以下。考量氣候變遷對水文情境影響後，臺北地區缺水情形些微上升；板新、桃園地區因豐枯水期雨量差距擴大，故於枯水期（春季、冬季）缺水情形加劇，春季尤為明顯，最大旬平均缺水率從 10% 以下上升至 20% 左右。

本研究目的在於呈現高解析度大氣環流模式應用於水資源供水衝擊評估之結果，未來應再增加其他統計降尺度 GCM 情境模擬或動力降尺度之結果輔以多種水文模式模擬，以呈現氣候變遷下水資源模擬之不確定性。

## 誌謝

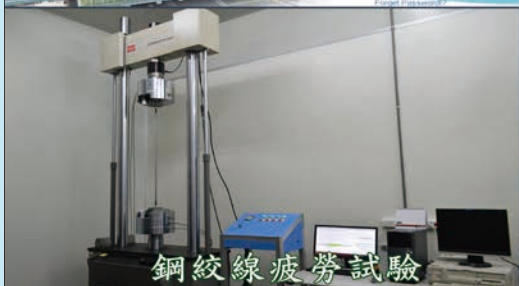
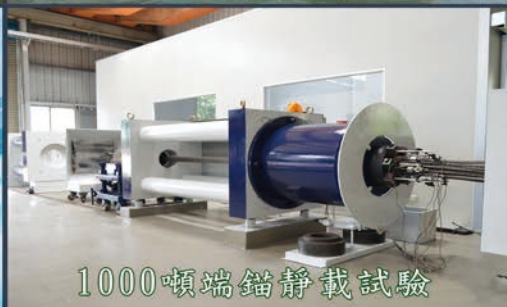
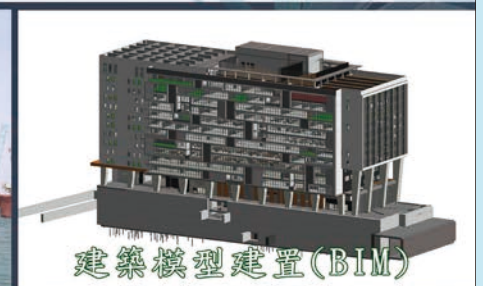
本研究承蒙中央研究院永續科學研究計畫（2016 ~ 2018 年）「台灣乾旱研究：變遷、水資源衝擊、風險認知與溝通計畫」（AS-105-SS-A02）之經費支持，水資源供水模擬模式採用臺灣大學生物環境系統工程學系童慶斌教授之永續發展研究室所發展之北部水資源系統動力模式進行修改，特此感謝。

## 參考文獻

1. 許見雄、吳宜昭、周佳、陳正達、陳永明、盧孟明 (2011),「臺灣氣候變遷科學報告 2011 (精簡版)」,國家災害防救科技中心。
2. 林裕彬 (2013),「臺灣地區各水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力綜合研究」,經濟部水利署。
3. 黃文政、吳彥樺、李俊韜 (2014),「氣候變遷對臺灣地區 2046-2065 年降雨之衝擊評估」,農業工程學報,第 60 卷第 1 期。
4. 經濟部水利署 (2017),「臺灣北部區域水資源經理基本研究」,經濟部水利署。
5. 財團法人成大研究發展基金會 (2017),「氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估 (2-2) (精簡)」,經濟部水利署。
6. 周佳、陳維婷、羅敏輝、李明安、許見雄、洪志誠、鄧治華、盧孟明、洪致文、陳正達、鄭兆尊 (2017),「臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制」,國家災害防救科技中心。
7. 陳宏宇、林李耀、陳永明、劉曉薇、童裕翔、林修立、陳正達 (2019),「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集」,國家災害防救科技中心。
8. 林尉濤 (2012),「因應氣候變遷缺水之灌溉營運調適措施」,2012 年推廣先進農業技術因應氣候變遷中日研討會。
9. 馬家齊 (2015),「氣候變遷下因應枯旱之水庫供灌區農業用水管理」,國立中央大學土木工程學系,博士論文。
10. Chen, J.H. and Lin, S.J. (2013), "Seasonal predictions of tropical cyclones using a 25-km-resolution general circulation model," Journal of Climate, 26(2), 380-398.
11. Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... and Rose, S.K. (2011), "The representative concentration pathways: an overview," Climatic Change, 109(1), 5-31.
12. 童慶斌 (2012),「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」,經濟部水利署水利規劃試驗所。
13. Tung, C.P., Liu, T.M., Chen, S.W., Ke, K.Y., and Li, M.H. (2014, Mar). Carrying Capacity and Sustainability Appraisals on Regional Water Supply Systems under Climate Change. British Journal of Environment and Climate Change, 4(1), 27-44.
14. 許見雄、林傳堯、鄭克聲、陳亮全 (2018),「台灣乾旱研究:變遷、水資源衝擊、風險認知與溝通計畫」,永續科學研究計畫執行成果報告書,中央研究院。
15. Liu, T.M., Tung, C.P., and Ke, K.Y. (2009), Application and development of a decision-support system for assessing water shortage and allocation with climate change. Paddy Water Environ 7, 301.
16. Haith, D.A., Mandel, R., and Wu, R. S. (1992), "GWLF, generalized watershed loading functions, version 2.0, user's manual," Dept. of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.

**NOVA**  **華光工程顧問股份有限公司**  
**CECI Nova Technology Co., Ltd.**  
[HTTP://WWW.CECI-NOVA.COM.TW](http://www.ceci-nova.com.tw)

公 共 工 程 規 設 檢 測  
 廠 商 施 工 技 術 服 務  
 環 境 監 測 分 析 改 善  
 營 建 材 料 試 驗 驗 驗





# 氣候變遷下的空氣污染分布： 地理人工智慧技術之應用

吳治達／國立成功大學測量及空間資訊學系 副教授

曾于庭／國立成功大學測量及空間資訊學系 研究助理

工業化的過程中所排放的溫室氣體不僅會增強全球暖化，石化燃料燃燒所產生的空氣污染亦會嚴重衝擊人類健康，因此正確的估計國人在氣候變遷影響下之空氣污染暴露情形，實為當前環保單位的重要挑戰。受限於現有空氣品質監測站空間分布不均、數量不足等問題，我們需要一個更有效、更快速、更準確的模擬方法，以正確評估都市居民每個人的空氣污染暴露程度。近年來結合衛星、航照、無人機影像及地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）等空間資訊技術（Geo-Spatial Technologies）以獲取環境監測樣本，並搭配機械學習（Machine Learning）及集成學習（Ensemble Learning）等人工智慧（Artificial Intelligence, AI）演算法進行高準確度推估模型擬合之「地理人工智慧（Geo-AI）」技術，已逐漸成為當代空氣污染模擬的主流方法學。基於此，本文綜整近年來有關 Geo-AI 在空氣污染模擬上的研究成果及應用案例，依據使用的空間推估模型方法學，分為：(1) 空間內插（Spatial Interpolation）；(2) 土地利用迴歸（Land-use Regression, LUR）；(3) 機械學習與集成學習；(4) 新興空間資訊科技之應用等四個面向進行介紹。本文之統整成果可做為未來在評估氣候變遷影響下都市防災與空氣污染影響之重要佐參。

## 前言

工業的快速發展燃燒大量化石燃料，除了會造成溫室氣體排放而增強氣候暖化、破壞地球氣候系統與生態系統平衡；同時排出的懸浮微粒（Particulate Matter,  $PM_{10}$ ）、細懸浮微粒（Fine Particulate Matter,  $PM_{2.5}$ ）、二氧化氮（Nitrogen Dioxide,  $NO_2$ ）、二氧化硫（Sulfur Dioxide,  $SO_2$ ），甚至是透過其它污染物與太陽光進行光化反應後產生的臭氧（Ozone,  $O_3$ ）等空氣污染物，亦會造成人類心血管、呼吸道等多重健康危害。同時，氣候的變化與空氣污染之間亦會產生交互作用影響，例如美國環保署指出，由於全球暖化導致都市溫度上升、改變區域氣象條件與地表輻射，進而可能造成臭氧與懸浮微粒的濃度提升。加上人類生存的每個時刻都需要空氣，並且只能呼吸當地當時的空氣，因此正確的估計每個國人在氣候變遷影響下之空氣污染暴露情形、進而分析其可能導致的健康效應，實為當前環保機關面臨的重要挑戰。

在行政院環境保護署的努力下，目前國內在台灣本島的部份已設置有約七十餘個固定的空氣品質監測站（簡稱空品站），這些座落於不同縣市的空品站可提供各個區域空氣污染的重要監測資訊，然而現存的空品測站系統仍有一些不足之處，例如以筆者所在的台南市之幅員面積約為 2,192  $km^2$ ，然而整個大台南地區當前僅有六個空品站；另一方面，現有的空品站多座落於西部都會區，台灣東部當前只有五個測站，東西部測站數目具有極大差異。受限於空間分布不均、數量不足等問題，直接以空品測站量測到的數據來代表都市居民每個人的空氣污染暴露程度，其代表性似乎仍有所不足。有鑑於此，築基於空品站的監測數據，搭配具有代表性的空污排放源環境因子發展預測模型，進而模擬全台灣每個角落的空污濃度梯度變化，並據以連結至個人在氣候變遷影響下的空氣污染暴露程度，實為都市防災與全民公共衛生當前所需面臨的重要挑戰。

近年來空間資訊技術 (Geo-Spatial Technologies) 被廣泛被應用在不同領域，衛星、航照、無人機影像及地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 圖層提供了快速獲取大範圍土地利用 / 土地覆蓋的有效方法；另一方面，由於電腦軟硬體及運算效能的快速演進，原本需要仰賴高規格計算資源方能運行的人工智慧 (Artificial Intelligence, AI)、機械學習 (Machine Learning) 及集成學習 (Ensemble Learning) 演算法，如今已可在個人電腦上流暢的運作，並且提供更良好解釋性 / 非線性複雜關係的模型建置方法學。有鑑於這二項先進技術幾為各自領域最佳且最先進方法之一，故有學者結合二者之優勢，提出創新的「地理人工智慧 (Geo-AI)」的概念，並將其應用在空氣污染模擬上，亦即透過空間資訊技術以快速取得地理空間排放源分布資料，再搭配測站量測的空污觀測數據，藉由機械學習及集成學習演算法進行高準確度推估模型擬合，最後再結合地理資訊系統平台，視覺化展示高時空解析度的空污濃度梯度分布模擬成果。這樣的方法與流程，已逐漸成為當代空氣污染模擬的主流方法學。

本文綜整近年來有關 Geo-AI 在空氣污染模擬上的研究成果及應用案例，依據使用的空間推估模型方法學，分為：(1) 空間內插 (Spatial Interpolation)；(2) 土地利用迴歸 (Land-use Regression, LUR)；(3) 機械學習與集成學習；(4) 新興空間資訊科技之應用等四個面向進行介紹。本文之統整成果可做為未來在評估氣候變遷影響下都市防災與空氣污染影響之重要佐參。

## 空間內差

空間內插法是一種空間統計方法學，主要透過已知點位的數據，以不同組成函數進行空間內插運算後獲得未知點可能數值的方法，過去多用來進行地理、氣候因子或是人口密度等資料的視覺化展現。時至今日發展出的空間內插方法學已有非常多種，常見者包含

距離反比加權法 (Inverse Distance Weighting, IDW)、自然鄰點內插法 (Natural Neighbor Interpolation, NNI)、不規則三角網 (Interpolation Based on a Triangulated Irregular Network, TIN)、樣條內插 (Spline Interpolation, Spline) 以及克利金內插法 (Kriging Interpolation, Kriging) 等。其中 IDW、NNI 與 TIN 等三項方法主要是在一般規則圖形 (包含正方形以及三角形等)、三角網以及沃羅諾伊圖 (Voronoi Diagram) 等限制距離下的幾何範圍內，進行反距離上的加權或是各圖形頂點平均而得出空間內插的可能資料數值分布；樣條內插係透過多項式函數，讓通過曲線之差值呈現平滑分布；克利金法在各種空間內插法中，被譽為最具貼近真實狀況的空間內插方法學，克利金係在變異函數理論及結構分析理論基礎上，考量已知點與估計點、估計點與鄰近估計點彼此的空間距離關係以及數值大小，進而推估數值在趨勢面上的可能變化狀況。根據內部參數以及分析類型的不同，又可再細分為一般克利金 (Ordinary Kriging, OK)、分層克利金 (Stratified Kriging)、普遍克利金 (Universal Kriging, UK)、非線性克利金 (Non-linear Kriging)、指標克利金 (Indicator Kriging, IK) 以及補克利金 (Co-Kriging) 等。圖 1 係利用不同空間內插方法進行區域二氧化氮分布推估之示意。

在研究應用上，我們蒐集了過去有關空間內插於空氣污染應用之相關研究如表 1。綜合而論，在各種空間內插法來說以 Kriging 為最被廣為使用之方法。例如 Pan *et al.*<sup>[1]</sup> 應用一般克利金推估 PM<sub>2.5</sub> 於澎湖以及台灣長期時空變異，並據以進一步探討 PM<sub>2.5</sub> 暴露與受試者罹患肝癌之間的關聯性；Shukla *et al.*<sup>[2]</sup> 的研究中分別使用了距離反比加權法以及一般克利金兩項空間內插法，以視覺化推估印度德里之 PM<sub>2.5</sub> 濃度分布，結果發現 OK 相較於距離反比加權法誤差較小，更適合用來預測 PM<sub>2.5</sub> 的空間變異。除了上述單純應用 Kriging 進行空間推估的研究之外，亦有研究基於 Kriging 以結

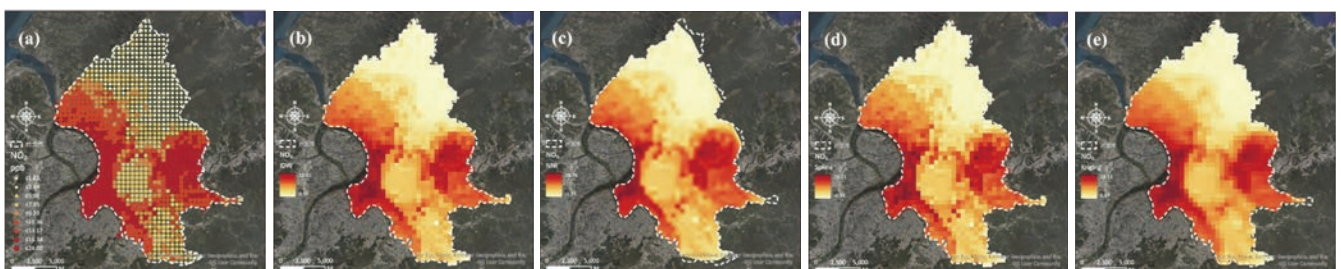


圖 1 空間內插成果示意：(a) 站點濃度分布圖；(b) IDW；(c) NNI；(d) Spline；(e) Kriging。

表 1 空間內插在空氣污染研究上之應用案例

| 研究文獻                     | 研究試區            | 研究方法       | 研究亮點                                                                                  |
|--------------------------|-----------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Pan <i>et al.</i> [1]    | 台灣全島<br>(含澎湖地區) | OK         | 長期暴露在 PM <sub>2.5</sub> 濃度下會增加罹患肝癌的風險。                                                |
| Zhan <i>et al.</i> [3]   | 中國地區            | RF-STK     | 結合機器學習、空間內插以及遙測影像資料，進而推算地面 NO <sub>2</sub> 濃度空間變異。                                    |
| Shukla <i>et al.</i> [2] | 印度德里            | OK 以及 IDW  | 除視覺化 PM <sub>2.5</sub> 在印度德里之時空變異外，經由交叉驗證比較兩項空間內插方法應用在印度德里 PM <sub>2.5</sub> 空間推估之成效。 |
| Rahman <i>et al.</i> [4] | 中國長沙            | LSTM 以及 OK | 即時且快速預測未來 PM <sub>2.5</sub> 濃度變化，視覺化 PM <sub>2.5</sub> 空間變異以達到更直覺的預警成效。               |

合其他方法學進行研究分析，例如 Zhan *et al.* [3] 發展了隨機森林時空克利金（Random-Forest-Spatiotemporal-Kriging, RF-STK）方法，結合遙測影像中的對流層 NO<sub>2</sub> 垂直柱密度以及其他環境地理因子，進一步視覺化反演地面 NO<sub>2</sub> 濃度的時空分布；Rahman *et al.* [4] 透過長短期記憶（Long Short-Term Memory, LSTM）機器學習演算法，針對部分測站過去 PM<sub>2.5</sub> 以及 PM<sub>10</sub> 觀測數據進行訓練，進一步預測未來 PM<sub>2.5</sub> 以及 PM<sub>10</sub> 之濃度變化後，再應用一般克利金視覺化推估兩者之空間變異，對於空污大範圍預警更可以達到即時的成效。

由以上結果可以發現，Kriging 等空間內插技術迄今仍被國際間廣泛使用以推估不同空氣污染物之空間變異。然而影響空污的生成來源種類繁多，空間內插僅仰賴測站點位間之空間位置關係，於推估過程中，未能考量諸如氣象、污染排放源分佈以及周邊土地利用型態等影響空污濃度變化之因子效應，基於此，後續亦發展出其他推估及模型方法學，以改良這些不足之處。

## 土地利用迴歸

LUR 的概念最早被提及可追溯到 Briggs *et al.* [5] 的研究，該研究在當時為歐洲聯盟（簡稱歐盟，European Union）於 1993 年所資助的 SAVIAH 研究中的一環，目的主要在透過模式模擬的方法，以提供受試者兒童二氧化氮的暴露濃度，以幫助健康風險評估團隊進一步探討兒童呼吸道疾病與二氧化氮暴露間的關聯。當時較常被用以進行空氣污染物空間推估之方法包含上文提到的空間內差、暴露指標（Indicator-based Methods）以及擴散模型（Dispersion Modelling）等，然而這些方法在估算多數人口之精細個人暴露濃度上仍有不足且困難之處，例如空間內差主要仰賴測站數量多寡以及點位間的分布位置進行模擬；暴露指標僅透過空污排放源資訊代表個人暴露濃度；而擴散模型則需要精確的大氣物

理、化學、氣象、汙染排放量等繁瑣的模型參數，但這些參數往往不易取得。而在當時，地理資訊系統技術已在不同領域的學術界越發嶄露頭角，基於此，Briggs *et al.* [5] 應用 GIS 技術裡的空間分析（Spatial Analyst）與環域分析（Buffer Analysis）功能，計算各個空品測站點周遭 300 m 內的土地排放源分布資訊，像是車流量、建物分布密度等，除此之外亦透過數值地形模型（Digital Terrain Model, DTM）以代表海拔高、坡度及坡向等地形因子後，透過多元線性迴歸，以建立 NO<sub>2</sub> 與上述土地排放源因子間的統計關係，並用以推估 NO<sub>2</sub> 之空間變異。LUR 模型計算公式如下：

$$\text{Air pollution} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{LU}_1 + \beta_2 \times \text{LU}_2 + \dots + \beta_n \times \text{LU}_n \quad (1)$$

式中：

Air pollution：測站量測的空污濃度； $\beta_0$ ：迴歸模型常數項； $\beta_{1-n}$ ：土地排放源因子之迴歸係數； $\text{LU}_1 \sim \text{LU}_n$ ：土地排放源因子。

時至今日，GIS 技術已臻非常成熟的地步，能夠使用的地理圖資亦更加多元且豐富，因此後續研究在進行 LUR 建模時，除了增加所分析的環域範圍（像是測站周遭 50 m、100 m、250 m 甚或 5,000 m 等）種類外，並透過多樣的 GIS 與衛星遙測圖資，以在模型中更完整考量土地排放因子之影響（圖 2）；同時進一步結合迴歸分析中如向前選擇法（Forward Selection）、向後刪除法（Backward Selection）或是逐步迴歸法（Stepwise Regression）等變數篩選方法，以找出最佳之土地排放解釋因子組合。相關成果對於釐清須優先關注之污染排放源、以及提供大範圍空氣污染空間濃度變異資訊來說，均具有重要的參考價值。由於 LUR 操作簡單、耗時短，且可以完成大尺度且精細的空氣污染空間濃度推估，因此亦為廣被使用的空氣污染模擬方法之一 [6-19]。

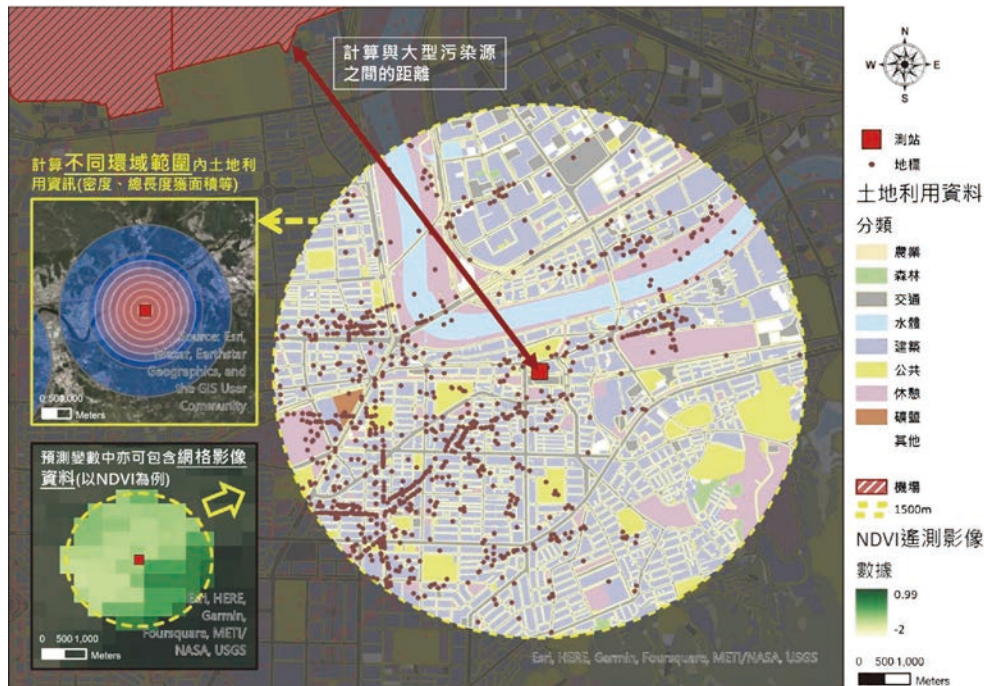


圖 2 利用 GIS 技術獲取 LUR 建模過程中之土地排放源資訊

筆者研究團隊長年一直專注於空間資訊在空氣污染模擬推估之應用，過去亦已發表多篇應用 LUR 模型之研究成果（表 2）。在 Wu *et al.* [20] 中，我們以大台北地區（包含台北市及新北市）為研究試區，探討細懸浮微粒之時空變異。考量到亞洲與歐美國家在文化以及生活習慣上的差異，故不同地區細懸浮微粒的污染源亦會有所差別，像是在亞洲地區，人們至寺廟中燒香拜拜及燒金紙、以及街坊間常見的中式餐飲大火快炒等，都是亞洲國家頻繁發生、與空污排放有關的日常活動，因此筆者團隊特別於模型中納入這兩項亞洲特有污染源；除此之外，植物綠地亦具有改善空品的

效益，因此本研究亦納入長期植生遙測影像資料進行分析，最後整體模型效能（ $R^2$ ）亦高達 0.9，代表透過本研究所建立的模型進行細懸浮微粒空間分布模擬的成果，具有九成的準確度。另一方面，本團隊亦嘗試在 LUR 模型中，加入經由留一克利金法（Leave-One-Out Kriging）模擬之空氣污染初步估值，做為模型中的一項解釋變數，以提高模型推估成效，複搭配其它土地利用排放源資訊，以完成發展混合式 Kriging-LUR 推估模型，並用以估計台灣本島月平均及年平均細懸浮微粒 [21] 及二氧化氮 [22] 的時空分布，結果亦獲得頗佳的成效。

表 2 LUR 空污模擬之研究成果

| 研究文獻                     | 研究試區                 | 空氣污染物                               | 研究價值                                                                                              |
|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 台灣地區研究成果                 |                      |                                     |                                                                                                   |
| Wu <i>et al.</i> [20]    | 台灣大台北地區<br>(新北市及台北市) | PM <sub>2.5</sub>                   | 國際首篇考量亞洲特有污染源之 LUR 模型，推估成果更符合「在地化」特性。                                                             |
| Wu <i>et al.</i> [21]    | 台灣全島                 | PM <sub>2.5</sub>                   | 首例結合空間內插與 LUR 發展混合式 Kriging-LUR 推估模型。                                                             |
| Hsu <i>et al.</i> [23]   | 台灣全島                 | PM <sub>2.5</sub> 組成物質              | 國內首例以台灣全島為研究試區，建置十餘種 PM <sub>2.5</sub> 組成物質之 LUR 推估模型。                                            |
| Hsu <i>et al.</i> [24]   | 台灣全島                 | O <sub>3</sub>                      | 國內首篇以台灣全島為研究試區，建置 O <sub>3</sub> 之 LUR 模型。                                                        |
| Chen <i>et al.</i> [22]  | 台灣全島                 | NO <sub>2</sub>                     | 國內首篇以台灣全島為研究試區，建置 NO <sub>2</sub> 之 LUR 模型。                                                       |
| 與國外研究團隊合作                |                      |                                     |                                                                                                   |
| Widya <i>et al.</i> [25] | 台灣台北市以及<br>印尼雅加達     | PM <sub>2.5</sub>                   | 釐清並比較不同生活型態城市之 PM <sub>2.5</sub> 空間熱點分布。                                                          |
| Widya <i>et al.</i> [26] | 印尼泗水地區               | PM <sub>10</sub> 以及 NO <sub>2</sub> | 以印尼泗水地區為研究試區，建置 PM <sub>10</sub> 以及 NO <sub>2</sub> 之 LUR 模型，並視覺化 PM <sub>10</sub> 以及 NO 之空間熱點分布。 |

逐基於上述研究經驗，筆者團隊亦陸續完成了台灣全島 PM<sub>2.5</sub> 組成物質<sup>[23]</sup> 及臭氧<sup>[24]</sup> 污染的 LUR 模型分析。此外，研究團隊亦與印尼學者（Department of Geomatics Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember）共同研究，透過 LUR 的方法學以比較台北、雅加達以及泗水地區細懸浮微粒、懸浮微粒以及二氧化氮等污染物質之重要排放源與空間熱點<sup>[25,26]</sup>。

## 機械學習與集成學習

機器學習（Machine Learning, ML）為人工智慧（Artificial Intelligence, AI）中的一種資料科學技術。機械學習著重於讓電腦透過大量的資料進行學習，同時藉由分析過程中的經驗進行模型改進，而不是僅依照已經寫好的程式碼逐行運作而已。過程中演算法經由反複學習並找到資料分布的趨式與規則，進而建置具準確度推估能力的預測模型，並根據所建立的機械學習模型做出推理和預測。有鑑於機械學習具有良好解釋自變數與解釋變數間線性 / 非線性複雜關係之優勢，故在近年亦廣泛被用以分析空氣污染濃度與周邊土地利用排放源間的關聯，例如 Ren *et al.*<sup>[27]</sup> 藉由多種機器學習模型與迴歸模型，模擬美國每日臭氧最高濃度，結果顯示，機器學習演算法比線性迴歸所建置之模型，具有有更好的空氣污染變異解釋性，其中又以強學習器如隨機森林（Random Forest）與極端梯度提

升（Extreme gradient boosting, XGBoost）兩項演算法的成果最佳。

筆者團隊近年亦嘗試基於環保署過去二十餘年每日空品監測站的空污濃度監測數據，透過土地利用迴歸中的逐步變數挑選法（Stepwise variable selection）進行重要解釋變數篩選後，再應用深度神經網路（Deep Neural Network）、隨機森林與 XGBoost 等演算法進行模型擬合，以推估過去二十年台灣本島每日的細懸浮微粒<sup>[28]</sup>、二氧化氮<sup>[29]</sup>、一氧化碳<sup>[30]</sup>，以及大高雄地區家戶內細懸浮微粒的室內濃度<sup>[31]</sup>之時空變化，相關研究成果及主要發現如表 3。整體來說在經過多項模型驗證，各項演算法中仍以 XGBoost 演算法之模型呈現最好的推估能力，其預測準確度幾乎都在 90% 上下不等。

更進一步者，亦有研究提出「集成學習（Ensemble Learning）」之概念，經由系統化的方式組合多個基礎模型或演算法，以產生一個效能更佳、更為強大的解釋模型，進而提升模型預測準確率。實際操作集成學習時，係先以各個單一機器學習演算法個別先行獨立擬合推估模型後，並做出各自的預測，之後再一次藉由演算法的運算，將這些單一演算法的預測結果進行再擬合，以結合各個演算法的優勢，進而獲得優於任何獨立機器學習演算法推估成果之「集成式預測」。在空氣污染的應用上，例如 Shahriar *et al.*<sup>[36]</sup> 基於孟加拉 2013 年 1 月至 2019 年 5 月懸浮微粒之觀測資

表 3 空氣污染機械學習 / 集成學習模型研究成果

| 方法學  | 研究成果                   |             |               |                                                                                                                | 主要成果                                                                |
|------|------------------------|-------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|      | 污染物                    | 研究地區        | 時間解析度         | 著作發表                                                                                                           |                                                                     |
| 機械學習 | PM <sub>2.5</sub>      | 台灣本島        | 日平均           | Wong and Wu* <i>et al.</i> <sup>[28]</sup><br>Environmental Pollution                                          | 主模型 R <sup>2</sup> =0.94<br>(驗證 R <sup>2</sup> =0.87~0.94)          |
|      | PM <sub>2.5</sub> (室內) | 高雄市         | 日平均           | Wong and Wu* <i>et al.</i> <sup>[31]</sup><br>Building and Environment                                         | 主模型 R <sup>2</sup> =0.85<br>(驗證 R <sup>2</sup> =0.38~0.85)          |
|      | NO <sub>2</sub>        | 台灣本島        | 日平均           | Wong and Wu* <i>et al.</i> <sup>[29]</sup><br>Journal of Cleaner Production                                    | 主模型 R <sup>2</sup> =0.84<br>(驗證 R <sup>2</sup> =0.80~0.84)          |
|      | CO                     | 台灣本島        | 日平均           | Wong and Wu* <i>et al.</i> <sup>[30]</sup><br>Environmental Modelling & Software                               | 主模型 R <sup>2</sup> =0.85<br>(驗證 R <sup>2</sup> =0.84~0.86)          |
|      | BTEX                   | 高雄林園臨海石化工業區 | 月平均           | Hsu and Wu* <i>et al.</i> <sup>[32]</sup><br>International Journal of Environmental Research and Public Health | 主模型 R <sup>2</sup> =0.61~0.79<br>(驗證 R <sup>2</sup> =0.50~0.77)     |
| 集成學習 | PM <sub>2.5</sub>      | 台灣本島        | 日平均 / 白天及晚上平均 | Wong and Wu* <i>et al.</i> <sup>[33]</sup><br>Science of the Total Environment                                 | 主模型 R <sup>2</sup> =0.88~0.90<br>(驗證結果與主模型 R <sup>2</sup> 差距少於 0.1) |
|      | O <sub>3</sub>         | 台灣本島        | 日平均 / 白天及晚上平均 | Babaan and Wu* <i>et al.</i> <sup>[34]</sup><br>Journal of Hazardous Materials                                 | 主模型 R <sup>2</sup> =0.88~0.91<br>(驗證結果與主模型 R <sup>2</sup> 差距少於 0.1) |
|      | 苯                      | 台灣本島        | 日平均           | Hsu and Wu* <i>et al.</i> <sup>[35]</sup><br>Chemosphere                                                       | 主模型 R <sup>2</sup> =0.92<br>(驗證 R <sup>2</sup> =0.44~0.91)          |

料，比較二大類統計—機械學習混合模型在空污模擬的成效，第一類是結合統計上時間序列分析常用的自迴歸模型（Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA）與類神經網路（Artificial Neural Network）以及支援向量機（Support Vector Machine, SVM）的混合模型；第二類則是以主成份迴歸（Principle Component Regression, PCR）為基礎，搭配決策樹（Decision Tree）與類別提升演算法（CatBoost）所發展的深度學習模型，結果指出，以類別提升演算法為基礎之混合建模方法具最佳的模型預測能力。

同樣的，筆者團隊亦已具有應用集成學習模型進行台灣空氣污染模擬之豐富成果。例如在 Hsu *et al.* [35] 的研究報告中結合本文所介紹的空間內插、土地利用迴歸、機械學習與集成學習演算法，以發展台灣本島苯（Benze）污染的集成混合空間模型（Ensemble Mixed Spatial Model），實務上係基於環保署全台十餘個光化測站過去十餘年每日的苯污染監測資料，除了遙測及 GIS 的土地排放源解釋變數外，首先亦導入克利金空間內插模擬的苯污染初步推估濃度，做為演算法解釋變數之一；其次如同先前機械學習方法一節所述，亦經由土地利用迴歸之逐步迴歸方式篩選重要變數後；利用 Python 中 AutoML 套件之隨機森林、梯度提升、XGboost、輕度梯度提升（Light Gradient Boosting Machine, LGBM）及 CatBoos 等五項演算法，分別進行模型超參數自動配適與模型擬合後；再次以上述演算法的空污模擬數據做為自變數，重新再進行一次模型擬合，以完成最後的集成混合空間模型，並據以估計苯污染在台灣本島的每日濃度空間分布狀況，相關推估成果如圖 3 之示意。本團隊所建模型會於研究期間的每一天均輸出一張全台空污模擬圖，並且其網格解析度為 50 m × 50 m，亦即當我們把台灣劃分成數百萬個 50 m × 50 m 大小的網格時，每個 50 m × 50 m 的格子都會有模型模擬之空污濃度模推估數值。

本團隊亦將相同方法學應用於推估細懸浮微粒 [33] 與臭氧 [34] 的日夜濃度分布。上述集成混合空間模型之準確度幾乎都到九成以上，並且經由多項模型驗證方法亦證明所建模型穩定可靠。最後利用本團隊發展的模型，以模擬台灣空氣污染的時空變化，雖然各別污染物受到其排放源及污染特性，使得其分布與熱區有些微不同，但整體來說，台灣空氣污染仍以南部最為嚴重、中部北部次之，東部相對來說空污對空氣品質的影響較

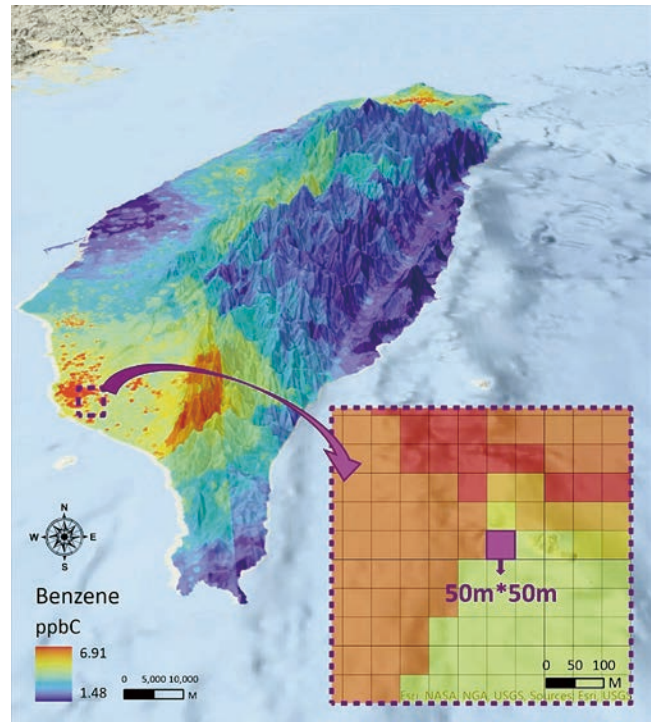


圖 3 應用集成混合空間模擬推估台灣本島苯污染之空間分布

小。上述研究成果可以模擬長期、大範圍且細緻網格解析度（50 m × 50 m）之空氣污染物空間變異。而在實務應用上，本團隊長期參與國科會及國家衛生研究院之研究計畫，以進行空污模擬研究，相關成果亦提供給國內許多大專院校及研究單位，以分析空污對國人健康之影響效應。同時，亦經由與國衛院的合作，進而得以將研究上的科學發現傳達給衛福部及環保署，做為有關單位在空污減量及空污法規調整等施政上之依據，對於國內空污防治政策之發展具實際影響力。

## 新興空間資訊技術於空氣污染之應用

除了上述介紹的 Geo-AI 建模技術的演進外，各種創新的空間資訊資料蒐集技術亦陸續被發展且實際應用於環境監測上，例如將環境感測器結合網路傳輸功能、使得監測所得的高時間解析度數據，可透過網路直接回傳至使用者之物聯網（Internet of Things, IoTs）；或者是更進一步，將物聯網感測器掛載於無人航空載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）或無人機上，以進行更機動性的大範圍、三維空間之環境數據蒐集等技術，當前均已被蓬勃運用於氣候變遷及空氣污染監測與模擬實務上（表 4），相信未來這些新興技術的導入，必能使氣候與空污研究更上一層樓。

表 4 新興空間資訊技術於空氣污染應用實例文獻整理

| 研究文獻                        | 研究試區  | 空氣汙染物                                                          | 新興監測技術                                                          | 研究亮點                                                                                                            |
|-----------------------------|-------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dhingra <i>et al.</i> [37]  | 印度    | 一氧化碳 (carbon monoxide, CO)、甲烷以及空氣品質指標 (air quality index, AQI) | IoT (Arduino Uno、MQ-7、MQ-2、MQ-135、Android、ESP8266 以及 Ubidots 等) | 開發 IoT-Mobair 應用軟體，可以即時得知 google 地圖上的污染濃度狀況，並且可預測未來的 AQI 變化。                                                    |
| Wonohardjo and Kusuma [38]  | 印尼雅加達 | 一氧化碳 (carbon monoxide, CO)                                     | IoT (Arduino Mega 2560、MQ-7、LCD、GSM 以及 GPS 等)                   | 在交通要道比較基於時間 (每 9 秒一筆) 以及距離為 (每 100 公尺一筆) 基礎的採樣方式，結果顯示，整體來看基於距離的採樣方式更符合此篇研究預期的成果。                                |
| Zheng <i>et al.</i> [39]    | 中國上海  | 懸浮微粒汙染物 (particulate matters, PM) 以及一氧化碳 (carbon monoxide, CO) | 無人機監測 (DJI Matrice M600)                                        | 探討都市交通要道空氣污染垂直以及水平濃度變化，提供後續減緩交通排放汙染物策略重要之參考。                                                                    |
| Pochwała <i>et al.</i> [40] | 波蘭    | 懸浮微粒汙染物                                                        | 無人機監測 (DJI Matrice 200)                                         | 透過較低成本空污感測器採集懸浮微粒汙染物樣本，發現 PM <sub>10</sub> 的最佳監測高度為 30 m，而粒徑較小的 PM <sub>1</sub> 以及 PM <sub>2.5</sub> 為 40~50 m。 |

## 結論及未來展望

氣候變遷的同時連帶亦造成許多環境負效應，空氣污染即是其中一項廣被重視的全球環境議題，Geo-AI 技術的發展與掘起為氣候變遷及空氣污染模擬研究提供了更多的可能性，結合各種地理空間與人工智慧之軟硬體技術，我們可以更準確、更快速、更有效的評估長時期大範圍居民的空氣污染暴露濃度，這樣的資訊對於未來在分析氣候變遷可能帶來的健康影響，將至為重要。

## 誌謝

筆者團隊承蒙行政院國家科學委員會、行政院環境保護署以及國家衛生研究院長期之研究經費補助，方得以發展文中介紹之空污模擬方法學，謹致謝忱。

## 參考文獻

- Pan, W.C., Wu, C.D., Chen, M.J., Huang, Y.T., Chen, C.J., Su, H.J., and Yang, H. I. (2016), Fine Particle Pollution, Alanine Transaminase, and Liver Cancer: A Taiwanese Prospective Cohort Study (REVEAL-HBV). JNCI: Journal of the National Cancer Institute, 108(3).
- Zhan, Y., Luo, Y., Deng, X., Zhang, K., Zhang, M., Grieneisen, M.L., and Di, B. (2018), Satellite-Based Estimates of Daily NO<sub>2</sub> Exposure in China Using Hybrid Random Forest and Spatiotemporal Kriging Model. Environmental Science & Technology, 52(7), 4180-4189.
- Rahman, M.H., Agarwal, S., Sharma, S., Suresh, R., Kundu, S., Vranckx, S., ... and Batra, S. (2022), High-Resolution Mapping of Air Pollution in Delhi Using Detrended Kriging Model. Environmental Modeling & Assessment, 1-16.
- Shukla, K., Kumar, P., Mann, G.S., and Khare, M. (2020), Mapping Spatial Distribution of Particulate Matter Using Kriging and Inverse Distance Weighting at Supersites of Megacity Delhi. Sustainable Cities and Society, 54, 101997.
- Briggs, D.J., Collins, S., Elliott, P., Fischer, P., Kingham, S., Lebre, E., ... and Van Der Veen, A. (1997), Mapping Urban Air Pollution Using GIS: A Regression-Based Approach. International Journal of Geographical Information Science, 11(7), 699-718.
- Beelen, R., Hoek, G., Vienneau, D., Eeftens, M., Dimakopoulou, K., Pedeli, X., ... and de Hoogh, K. (2013), Development of NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Land Use Regression Models for Estimating Air Pollution Exposure in 36 Study Areas in Europe—The ESCAPE Project. Atmospheric Environment, 72, 10-23.
- Bertazzon, S., Johnson, M., Eccles, K., and Kaplan, G.G. (2015), Accounting for Spatial Effects in Land Use Regression for Urban Air Pollution Modeling. Spatial and spatio-temporal epidemiology, 14, 9-21.
- Dons, E., Van Poppel, M., Kochan, B., Wets, G., and Panis, L.I. (2013), Modeling Temporal and Spatial Variability of Traffic-Related Air Pollution: Hourly Land Use Regression Models for Black Carbon. Atmospheric Environment, 74, 237-246.
- Eeftens, M., Beelen, R., De Hoogh, K., Bellander, T., Cesaroni, G., Cirach, M., ... and Hoek, G. (2012), Development of Land Use Regression Models for PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>2.5</sub> Absorbance, PM<sub>10</sub> and Pmcoarse in 20 European Study Areas; Results of The ESCAPE Project. Environmental science & technology, 46(20), 11195-11205.
- Kim, Y., and Guldman, J. M. (2015), Land-Use Regression Panel Models of NO<sub>2</sub> Concentrations in Seoul, Korea. Atmospheric Environment, 107, 364-373.
- Lee, J.H., Wu, C.F., Hoek, G., de Hoogh, K., Beelen, R., Brunekreef, B., and Chan, C.C. (2014), Land Use Regression Models for Estimating Individual NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> Exposures in a Metropolis with a High Density of Traffic Roads and Population. Science Of The Total Environment, 472, 1163-1171.
- Lee, J.H., Wu, C.F., Hoek, G., de Hoogh, K., Beelen, R., Brunekreef, B., and Chan, C.C. (2015), LUR Models for Particulate Matters in the Taipei Metropolis with High Densities of Roads and Strong Activities of Industry, Commerce and Construction. Science of the Total Environment, 514, 178-184.
- Liu, W., Li, X., Chen, Z., Zeng, G., León, T., Liang, J., ... and Lai, M. (2015), Land Use Regression Models Coupled with Meteorology to Model Spatial and Temporal Variability Of NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> in Changsha, China. Atmospheric Environment, 116, 272-280.

14. Liu, C., Henderson, B.H., Wang, D., Yang, X., and Peng, Z.R. (2016), A Land Use Regression Application into Assessing Spatial Variation of Intra-Urban Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) and Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) Concentrations in City of Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 565, 607-615.
15. Tunno, B.J., Michanowicz, D.R., Shmool, J.L., Kinnee, E., Cambal, L., Tripathy, S., ... and Clougherty, J.E. (2016), Spatial Variation in Inversion-Focused Vs 24-H Integrated Samples of PM<sub>2.5</sub> And Black Carbon Across Pittsburgh, PA. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 26(4), 365-376.
16. Wang, R., Henderson, S.B., Sbihi, H., Allen, R.W., and Brauer, M. (2013), Temporal Stability of Land Use Regression Models for Traffic-Related Air Pollution. *Atmospheric Environment*, 64, 312-319.
17. Wang, M., Beelen, R., Bellander, T., Birk, M., Cesaroni, G., Cirach, M., ... and Brunekreef, B. (2014), Performance of Multi-City Land Use Regression Models for Nitrogen Dioxide and Fine Particles. *Environmental Health Perspectives*, 122(8), 843-849.
18. Wang, M., Gehring, U., Hoek, G., Keuken, M., Jonkers, S., Beelen, R., ... and Brunekreef, B. (2015), Air Pollution and Lung Function in Dutch Children: A Comparison of Exposure Estimates and Associations Based on Land Use Regression and Dispersion Exposure Modeling Approaches. *Environmental health perspectives*, 123(8), 847-851.
19. Weichenthal, S., Van Ryswyk, K., Goldstein, A., Shekarzifard, M., and Hatzopoulou, M. (2016), Characterizing the Spatial Distribution of Ambient Ultrafine Particles in Toronto, Canada: a Land Use Regression Model. *Environmental pollution*, 208, 241-248.
20. Wu, C.D., Chen, Y.C., Pan, W.C., Zeng, Y.T., Chen, M. J., Guo, Y.L., and Lung, S.C.C. (2017), Land-Use Regression with Long-Term Satellite-Based Greenness Index and Culture-Specific Sources to Model PM<sub>2.5</sub> Spatial-Temporal Variability. *Environmental Pollution*, 224, 148-157.
21. Wu, C.D., Zeng, Y.T., and Lung, S.C.C. (2018), A Hybrid Kriging/Land-Use Regression Model to Assess PM<sub>2.5</sub> Spatial-Temporal Variability. *Science of the Total Environment*, 645, 1456-1464.
22. Hsu, C.Y., Wu, C.D., Hsiao, Y.P., Chen, Y.C., Chen, M.J., and Lung, S.C.C. (2018), Developing Land-Use Regression Model to Estimate PM<sub>2.5</sub>-bound Compound Concentrations. *Remote Sensing*, 10, 1971.
23. Hsu, C.Y., Wu, J.Y., Chen, M.J., Chen, Y.C., Pan, W.C., Lung, S.C.C., Guo, Y. L., and Wu, C. D. (2019), Asian Culturally-Specific Predictors in a Large-Scale Land Use Regression Model to Predict Spatial-Temporal Variability of Ozone Concentration. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 1300.
24. Widya, L.K., Wu, C.D., Zeng, Y.T., Handayani, H.H., and Jaelani, L.M. (2019), PM<sub>2.5</sub> Pollutant in Asia Metropolis Cities – A Comparison Between Indonesia and Taiwan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 4924.
25. Widya, L.K., Hsu, C.Y., Lee, H.Y., Jaelani, L.M., Lung, S.C.C., Su, H.J., and Wu, C.D. (2020). Comparison of Spatial Modelling Approaches on PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> Concentration Variations: A Case Study in Surabaya City, Indonesia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 8883.
26. Chen, T.H., Hsu, Y.C., Zeng, Y.T., Lung, S.C.C., Su, H.J., Chao, H.J., and Wu, C.D. (2020), A Hybrid Kriging/Land-use Regression Model with Asian Culture-Specific Sources to Assess NO<sub>2</sub> Spatial-Temporal Variations. *Environmental Pollution*, 259, 113875.
27. Ren, X., Mi, Z., and Georgopoulos, P.G. (2020), Comparison of Machine Learning and Land Use Regression for Fine Scale Spatiotemporal Estimation of Ambient Air Pollution: Modeling Ozone Concentrations Across the Contiguous United States. *Environment International*, 142, 105827.
28. Wong, P.Y., Lee, H.Y., Chen, Y.C., Zeng Y.T., Chern, Y.R., Chen, N.T., Lung, S.C.C., Su, H.J., and Wu, C.D.. (2021a), Using a Land Use Regression Model with Machine Learning to Estimate Ground Level PM<sub>2.5</sub>. *Environmental Pollution*, 277(15), 116846.
29. Wong, P.Y., Su, H.J., Lee, H.Y., Chen, Y.C., Hsiao, Y.P., Huang, J.W., ... and Spengler, J. D. (2021b). Using Land-Use Machine Learning Models to Estimate Daily NO<sub>2</sub> Concentration Variations in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128411.
30. Wong, P.Y., Hsu, C.Y., Wu, J.Y., Teo, T.A., Huang, J.W., Guo, H.R., ... and Spengler, J.D. (2021c). Incorporating Land-Use Regression into Machine Learning Algorithms in Estimating the Spatial-Temporal Variation of Carbon Monoxide in Taiwan. *Environmental Modelling & Software*, 139, 104996.
31. Wong, P.Y., Lee, H.Y., Chen, L.J., Chen, Y.C., Chen, N.T., Lung, S.C. C., ... and Spengler, J.D. (2022), An Alternative Approach for Estimating Large-Area Indoor PM<sub>2.5</sub> Concentration—A Case Study of Schools. *Building and Environment*, 109249.
32. Hsu, C.Y., Zeng, Y.T., Chen, Y.C., Chen, M.J., Lung, S.C.C., and Wu, C.D. (2020), Kriging-based Land-use Regression Models that Use Machine Learning Algorithms to Estimate the Monthly BTEX Concentration. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 6956.
33. Wong, P.Y., Su, H.J., Lung, S.C.C., and Wu, C.D. (2023), An Ensemble Mixed Spatial Model in Estimating Long-Term and Diurnal Variations of PM<sub>2.5</sub> in Taiwan. *Science of The Total Environment*, 161336.
34. Babaan, J., Hsu, F.T., Wong, P.Y., Chen, P.C., Guo, Y.L., Lung, S.C.C., Chen, Y.C., and Wu, C.D. (2023), A Geo-AI -based Ensemble Mixed Spatial Prediction Model with Fine Spatial-Temporal Resolution for Estimating Daytime/Nighttime/Daily Average Ozone Concentrations Variations in Taiwan. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130749.
35. Hsu, C.Y., Xie, H.X., Wong, P.Y., Chen, Y.C., Chen, P.C., and Wu, C.D. (2022), A Mixed Spatial Prediction Model in Estimating Spatiotemporal Variations in Benzene Concentrations in Taiwan. *Chemosphere*, 301, 134758.
36. Shahriar, S.A., Kayes, I., Hasan, K., Hasan, M., Islam, R., Awang, N.R., Hamzah, Z., Rak, A.E., and Salam, M.A. (2021), Potential of Arima-Ann, Arima-SVM, Dt and Catboost for Atmospheric PM<sub>2.5</sub> Forecasting in Bangladesh. *Atmosphere*, 12(1), 100.
37. Dhingra, S., Madda, R.B., Gandomi, A.H., Patan, R., and Daneshmand, M. (2019), Internet of Things Mobile–Air Pollution Monitoring System (IoT-Mobair). *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5577-5584.
38. Wonohardjo, E.P. and Kusuma, G.P. (2019), Air Pollution Mapping Using Mobile Sensor Based on Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 157, 638-645.
39. Zheng, T., Li, B., Li, X.B., Wang, Z., Li, S.Y., and Peng, Z.R. (2021), Vertical and Horizontal Distributions of Traffic-Related Pollutants Beside an Urban Arterial Road Based on Unmanned Aerial Vehicle Observations. *Building and Environment*, 187, 107401.
40. Pochwa a, S., Anweiler, S., Deptu a, A., Gardecki, A., Lewandowski, P., and Przysi niuk, D. (2021), Optimization of Air Pollution Measurements with Unmanned Aerial Vehicle Low-Cost Sensor Based on an Inductive Knowledge Management Method. *Optimization and Engineering*, 22(3), 1783-1805. 



# 熱島效應緩解策略之風廊系統的指認與應用

林子平／國立成功大學建築學系 特聘教授

蔡沛淇／國立成功大學建築學系 碩士班研究生

歐星妤／國立成功大學建築學系 研究助理

張洲滄／臺中市政府都市發展局 副總工程司

快速都市化發展下，高密度開發導致水域及綠地減少，引發都市熱島問題，而另一個重要的成因，則是建築物密集、間距小，導致通風散熱不良。為了有效減緩都市熱島效應的惡化，目前全球已有多個城市正在實行都市風廊的建設，甚至針對風廊指認與規範有明確的國家級標準。本文利用歷史氣候資料與土地使用現況資料，以臺中市為例，探討風廊系統在臺灣的城市規劃體系中可適用的實踐方式及政策路徑。為了探討行人活動的熱舒適環境，本文以建築物導致的地表粗糙特性作為戶外空氣流動時的潛在阻力，並以最低成本路徑法繪製出可能的流動路徑，藉此定義針對行人舒適度提供優化建議的都市風廊路徑。本計畫成果將有助於推動微氣候的改善，以增加都市風速並降低都市溫度。

## 前言

在快速經濟發展與都市化下，水泥建築物與不透水鋪面、各類經濟與高密度開發活動產生的熱源大量進入都市，而原有的自然水綠覆蓋範圍縮減，造成環境失去平衡與氣溫調節的功能，使都市地區氣溫明顯高於周圍郊區，都市熱島效應日益嚴重。

在同一時間下，最高溫區及最低溫區的氣溫差異，即為「都市熱島強度」。目前臺灣許多城市的都市熱島強度在夏季時普遍高於 2.5°C，已高於聯合國政府間氣候變化專門委員會（IPCC）對於世紀末的溫度預測，顯示其迫切需要改善。

## 臺灣的都市熱島強度

為了瞭解城市的熱島結構，國家災害防救科技中心（NCDR）氣候變遷專案組與臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫（TCCIP）透過 WRF 模式（Weather Research and Forecasting Model）將歐洲中期天氣預報中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）2017

年所產出的第 5 版再分析資料 ERA5（ECMWF Reanalysis version 5）進行動力降尺度（Dynamic Downscaling），其中在模擬近地表的地貌分布時，使用當時的土地利用以及雲量分布等資料，能夠統整全臺不同區域與縣市因監測點位密度及分布所產生的數據採量差異，以及統計分析不夠具表徵等問題。根據該案所建立之全臺 2011 年至 2018 年歷史重建氣候資料 TReAD（Taiwan ReAnalysis Downscaling data）之網格化氣候資料來觀察臺中市，於 7 月下午 2 點時臺中市平均最高溫 33.8°C 位於大里區，相較同一時間，位於沙鹿郊區之臺中都會公園僅 30.3°C，代表都市熱島強度達 3.5°C。

另一方面，根據國立成功大學建築與氣候研究室（BCLab）架設之高密度地面氣溫量測網 HiSAN（High-Density Street-Level Air Temperature Observation Network）資料顯示，2021 年 8 月 29 日下午 2 點，臺中市的最高溫度 34.6°C 亦出現在大里區，而平地的最低溫度 30.8°C 則位於大甲區，熱島強度為 3.8°C，由此可見臺中市已有極為明顯的都市熱島現象。

## 通風散熱緩解熱島效應

都市熱島主要是由於人為因素所造成，其原因眾多，而建築物密集、間距小導致通風散熱不良即是熱島成因之一。風是將都市蓄積熱量排除的重要管道。風可以有效帶走並降低材料的表面溫度，減少材料釋放的輻射熱；流動的氣流也可使空氣混合，避免密集街區中人工發熱導致的高溫。因此，依據都市的現況進行通風廊道系統的指認與建構是提升通風散熱品質的良方，亦是全球多個城市正在實行中的都市策略。

通風廊道一詞起源於德語單詞 Ventilationbahn。根據 Matzarakis, A. and Mayer, H. 的研究<sup>[1]</sup>，都市通風道是指在風速較低的天氣條件下，風由郊區吹向表面粗糙長度（Roughness Length）較高的城市之行經區域。其有效性作用於都市冠層之底層。德國國家指南《城市和地區環境氣象學之氣候和空氣污染地圖》<sup>[2]</sup> 將其命名為「風廊」，並給出了明確的定義：基於方位、地表性質和寬度等特性致使大量地表氣流行經的區域。其旨在通過低粗糙度、筆直或微幅彎曲、並且相對較寬（盡可能超過 50 公尺）的路徑，來促進水平空氣交換過程。

目前全球已有許多城市投入風廊系統的研究。例如：中國氣象局發布實施了《氣候可行性論證規範—城市通風廊道》<sup>[3]</sup>。當中說明通風廊道指認原則為：利用地理資訊系統疊加背景風況、通風潛力、通風量、城市熱島強度、綠地空間分布，以建構城市主要及次要通風廊。北京市政府根據上述規範頒布了《北京城市總體規劃（2016～2035 年）》<sup>[4]</sup>，將規劃 5 條寬度 500 公尺以上的一級通風廊道和多條寬度 80 公尺以上的二級通風廊道。劃入通風廊道的區域將限制建設規模，例如：風廊行經的區域禁止高密度的建設開發，一些風廊的關鍵節點將會隨著都市密度減壓政策的推進進行拆除。

臺灣過去也有都市通風性的相關研究，例如 Hsieh and Huang<sup>[5]</sup> 就曾採用鋒區指數（Frontal Area Index, FAI）與粗糙長度網格最低成本路徑法指認風廊。該研究發現都市降溫層主要由綠地與水域組成；升溫層則主要是道路、商業與工業區，因此建議在城市規劃時應考慮水綠間風流的連接。然而，要將風廊系統導入政策，仍需要系統性地考量層級架構、管制規範與實施效益。

## 風廊系統的層級架構

要建立都市中的風廊系統，首先應瞭解城市的地理氣候環境與建成狀況。本研究利用 TReAD 網格化

歷史重建氣候資料、高密度地面氣溫量測網 HiSAN 數據、以及中央氣象局開放之歷史監測資料三種氣候資料，並採用地籍圖資與 Landsat 衛星影像辨識作為土地使用現況資料，以探討風廊系統在臺灣的城市規劃體系中，可適用的層級結構。根據氣候資料顯示，都市存在長年的季節性風勢，因此本文將通風廊道系統分為「自然風廊」與「都市風廊」，如表 1 所示。

表 1 自然風廊與都市風廊之定義<sup>[6]</sup>

| 位置        | 名稱    | 風廊定義                                  |
|-----------|-------|---------------------------------------|
| 10 m 以上高空 | 自然風廊  | 因區域的季風、海陸風、或溫度而產生的氣流，且因地形圍塑而形成一條特定的路徑 |
| 2 m 人行層   | 都市風廊  |                                       |
|           | 全市型風廊 | 主要風廊（一級）<br>次要風廊（二級）<br>與風廊指定連續路徑     |
|           | 局部型風道 | 局部風道（三級）                              |

自然風廊係指在自然環境中因溫度差及壓力差，產生由低溫流向高溫處的氣流，且因地形圍塑而形成一條特定的路徑，通常發生於都市冠層（約 10 公尺以上高空），例如：季風、海陸風。其意義在於將觀測與演算的風向與風速資料轉化為易於閱讀的視覺化形式並予以命名，以利於降尺度分析時能夠明確描述地區的自然性質。

當自然風廊進入市區後會流經風阻較小的區域，例如：公園綠地、水域河川、廣場空地、低矮稀疏的建築群或道路等，如果這些區域在行人層高度（2 公尺）的路徑能夠彼此連結成為一條連續路徑，即可稱之為「都市風廊」。換言之，有自然風廊才有都市風廊的存在。而上述風阻將由建築量體之粗糙長度來表示。

根據臺灣的都市形態以及管制路徑，都市風廊被分為全市型風廊與局部型風道兩種，並將依等級進行不同程度的管制。全市型風廊可依行經的都市風阻特性定義出潛在風速的大小，其可能的散熱能力不同，因此全市型風廊又可細分為主要風廊（一級）、次要風廊（二級）；而當目標區間的尺度縮小至局部地區（如計畫區、都市更新範圍等）時，其風廊為局部風道（三級）。

主要風廊（一級）所參考的背景資料為自然風廊之風向，也就是觀測與演算之都市冠層的風的性質。其表示的意義為：在都市中，較高機率有高風速產生的一條連續路徑。此風廊的建立目標在於維持風廊路

徑的低粗糙特性，因此某地區一旦經指認具有主要風廊（一級）行經時，應透過管制手段維持該路段的低粗糙長度特性。

次要風廊（二級）之參考背景資料與一級相同，皆為自然風廊之風向。然而，由於判斷規則的差異會造成指認結果所屬區域與一級有所不同，其所代表的意義亦有所相異。它的意義為在建成區中，有機率產生微風且具備連貫通風潛能的路徑。此風廊的建立目標在於確保市區的通風連續性、維持該風廊路徑暢通並且減少在路徑上的風阻產生。因此，某地區一旦經指認具有次要風廊（二級）行經時，應首先判斷該區段粗糙長度是否高於預設之通風標準值（該值依都市開發規模而定，臺中市為粗糙長度 1 公尺），若超於標準，則應重點進行通風管制，以修補風廊上無法連貫的區域。

局部風道（三級）參考的背景資料為全市型都市風廊之風向。其存在目的是將研究規模縮小，以便更具體地實施減熱策略。此風道的建立目標在於確保地區通風的連續性，或是提升基地內、街廓內的熱舒適性。因此，它所代表的意義為引導風進入低風速的建成區巷道，其中亦包含了源自地表區域的涼風，例如：水域、公園。

在一地區內若某一道路被指認為局部風道（三級）時，其周邊建物應進行通風管制，以確保風流暢通並將風引入市區巷道中。其中，「平行於主要風向（參考鄰近之全市型風廊）」的主要道路將會影響下風處的風速，是確保上下風處的通風連續性的關鍵；而由該風道向外擴散、或由開放節點（如：水域、綠地、校園、廣場等）向外擴散的巷道將會影響建築基地的風速，是提升基地舒適性的關鍵。

值得一提的是，局部型風道的研究範圍較全市型風廊小，因此其指認過程可參考計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）之局部氣流實驗模擬結果，或亦可採用與全市型風廊相同之「粗糙長度網格最低成本路徑法」技術，唯單元格點邊長視研究範圍不同得使用更細緻的邊長。

## 以臺中為例建構風廊系統

### 臺中市自然風廊

從長期的氣候歷史資料來觀察，臺中市夏季之日間盛行風向主要為來自臺灣海峽之西向風，夜間則以南風為優勢。此市夏季之自然風廊詳見圖 1，具有以下

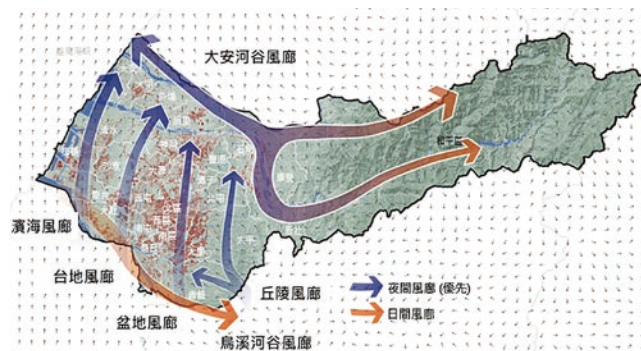


圖 1 臺中市自然風廊分布圖<sup>[6]</sup>

特徵：(1) 河谷風廊：其風向為大安溪與大甲溪上游往西至下游處交會合併，由陸地吹向海域，呈現 Y 字型的風廊；(2) 濱海風廊、台地風廊、盆地風廊：均為夜間由南向北吹的南北向風廊。

日間與夜間的盛行風向存在差異，其在都市熱環境中所代表的意義也不盡相同。一般而言，日間時氣流通過僅能略提升人體熱舒適；而夜間時郊區氣溫明顯降低，涼爽氣流進入市區有助於都市熱交換。

由於夜間的風較利於形成都市熱交換，且參考德國等城市的風廊規劃原則皆以夜間風向為優先，本文在進行氣候環境評估時，以夏季夜間的風向作為建構風廊時的優先考量。

### 指認全市型風廊

欲指認臺中市的都市風廊，首先將臺中市的建築面積及高度參數輸入地理資訊系統（GIS）中，並取建築投影面積及高度資料，以 500 公尺為網格單元計算粗糙長度  $R_0$ <sup>[7]</sup>。粗糙長度愈大，即表示該網格的風阻愈大，風愈不容易通過。本案計算方法經簡化後如下式 1：

$$R_0 = \mu_b \times \Sigma (A_b \times H_b) \div A_p \quad (1)$$

式中  $\mu_b$  為建物專用係數 0.25、 $A_b$  為建築面積（ $m^2$ ）、 $H_b$  為建築高度（m）、 $A_p$  為單位網格面積（ $m^2$ ）。

當粗糙長度小於 1 公尺時，本文定義其易於風通行，因此將粗糙長度以 0.5 公尺為區間，在 GIS 中進行資料視覺化，以色彩區分單位網格之粗糙長度數值大小，並與地理資訊圖層套疊。顏色愈深代表粗糙長度愈大，潛在的風阻愈大。

由於臺中市都市密集區位於盆地地區，本文設定都市風廊的主要研究範圍為市區密集建成區之  $20 \times 20$  平方公里（ $40 \times 40$  單位網格）範圍。在此範圍中使用最低成本路徑法（Least Cost Path, LCP），假設風會優先選擇進



西風，此外冬季全為北風。為紓解夏季高溫現象，本研究取夏季之長年風向南風作為後續指認風道的背景風向。

確認此區風向後，即可進行地表粗糙度的計算。如同全市型風廊之計算過程，透過將計畫區的土地利用等資料進行網格計算，得出計畫區的地表粗糙度圖，其中網格大小使用了更細緻的 100 公尺網格。接著依據地表粗糙度圖及背景風向南風，以最小路徑法為原則，輔以道路、綠地及水域系統等之規劃指認局部風道，指認成果如圖 4，風道主要分佈於主要道路及大型綠地或河道上。

此外，風道亦可透過 CFD 氣流模擬分析進行驗證，該計畫區的 CFD 模擬成果如圖 5 所示。圖中風速較強之區域即為可形成風道之區位，而其位置與粗糙度方法指認成果相近，在主要道路以及大型空地上皆有較高的風速能形成風道。

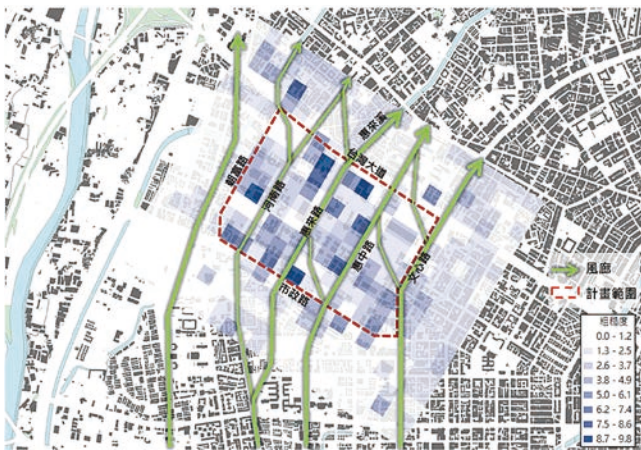


圖 4 新市政專用區局部風道圖<sup>[9]</sup>



圖 5 新市政中心專用區 CFD 氣流模擬分析成果<sup>[9]</sup>

## 指認結果導入管制策略

### 全市型風廊管制策略

全市型風廊的指認結果納入都市計畫將有利於制定更具體的都市開發規範，並提供有效的設計建議；而局部型風道得以針對特定細部計畫或都市更新區進行指認，以期改善區域的通風品質與舒適性。下文將針對臺中市全市型風廊簡述其建議的管制方針，並以臺中市新市政中心專用區為例，說明局部型風道的具體管制方法。

**主要風廊（一級）管制：**該風廊的建立目標在於維持風廊路徑的低粗糙特性，因此應管制其行經的區段之粗糙長度。其管制對象為風廊行經範圍內之建築基地，建議應規範其建蔽率與容積率上限，以避免該區段粗糙長度過高導致通風不順暢。

**次要風廊（二級）管制：**該風廊的建立目標在於確保市區的通風連續性，因此應維持該風廊路徑暢通並且減少在路徑上的風阻產生。當次要風廊（二級）行經區段之粗糙長度超於 1 公尺時，需進行通風管制，以修補風廊上不連貫的區域。其主要之管制對象為風廊範圍內，街道走向與主要風向平行或相近之周邊建物、以及開放節點（如：水域、綠地、校園、廣場等）之周邊建物。此外，為了確保通風效果，次要風廊（二級）上另劃定之「風廊指定連續路徑」區段，須提升其限制標準。可透過建物退縮、設置綠帶遮蔭、開闢閒置公有地、劃設公園綠地、限制建築物連續面寬與棟距或區段限制開發等方式，進行可行之管制。

### 局部型風道管制策略

上述說明係針對管制方法進行方針指引，詳細規範之項目與尺寸標準由於市區土地紋理複雜、密度性質不一，應依據各計畫區特徵另案啟動相關土地與氣候數據分析、檢討與制定專門規範，方可對症下藥。因此，以下以臺中市新市政中心專用區為例，說明局部風道（三級）具體的管制實施方案。

局部風道之管制策略可利用細部計畫區通盤檢討時納入規劃，如新市政中心專用區現正進行中的第五次通盤檢討案，為減緩熱島效應而研擬將局部風道納入土地管制規範中。依局部風道的指認成果可知，風道分佈於主要道路上。而為了擴大風道並將風道上的風引入基地內，本研究參考計畫區的街廓尺度，將道路兩側 60 m 範圍內的區域訂為引風策略區（圖 6）。在



圖 6 新市政中心專用區風道及引風策略區指認<sup>[9]</sup>

管制策略上，研訂此區建築基地如欲取得開放空間獎勵，需同時檢討其基地通風率（SVR），其 SVR 未達一定比例者，則開放空間獎勵容積將酌予折減。

基地通風率代表風能從目標基地流進其後側基地的比例，基地通風率愈大表示基地的建築型態更有助於將風引入街廓，並減少阻擋風而使下風處通風不良的情形。基地通風率目前已在臺中市都市更新建築容積獎勵辦法中做為評估基地量體通風性能的指標，其計算方式與相關規範詳圖 7。

## 結論與未來發展

都市風廊的建構可以為都市帶來良好的通風環境，減緩熱島效應，進而提升永續城市的宜居性與舒適性。本文展示了以臺中市為例，使用粗糙長度網格最低成本路徑法進行全市型與局部型的都市風廊指認，這種判斷風廊的方法具有快速、成本較低且具一定的準確率等優點，並且具備較高的修正彈性。指認的結果未來可透過建物退縮、設置綠帶遮蔭、開闢閒置公有地、劃設公園綠地、限制建築物連續面寬與棟距或區段限制開發等方式進行通風性的管制。然而，該方法仍然存在一些限制：由於建成區的風阻較崎嶇，風速一般較弱且風向凌亂，單一的起始風向設定會限制判讀結果。我國目前風廊規範是由地方政府各自建設，缺乏國家整體性且目標尺度不均，尚無定義全國適用的標準流程。未來若要將本研究作為全臺適用的標準化系統與指認方法之基礎，可利用搜尋演算法執行最低成本路徑法的判斷過程，以排除上文所述之限制。此外，後續亦可將上風與下風處的性質差異納入考量條件，例如：

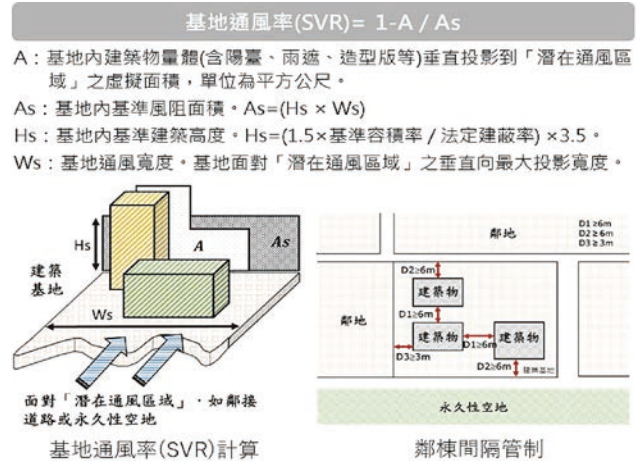


圖 7 「臺中市都市更新建築容積獎勵辦法」之基地通風檢討有關內容<sup>[9]</sup>

一級主要風廊之上風處不可行經大面積高粗糙長度之區域，否則定其為二級風廊、或設定水域綠地為風廊上風處，以為城市帶來涼爽的來風。

## 誌謝

感謝臺中市政府都市發展局計畫補助。本文部分內容為臺中市政府委託計畫「永續城鄉宜居環境－臺中市熱島效應空間策略計畫<sup>[8]</sup>」與「臺中市都市計畫新市政中心專用區通盤檢討規劃案<sup>[9]</sup>」之通風策略部分內容，亦為蔡沛淇於國立成功大學建築系碩士論文部分內容。

## 參考文獻

- Matzarakis, A. and Mayer, H., "Mapping of urban air paths for planning in Munich," Wiss. Ber. Inst. Meteor. Klimforsch. Univ. Karlsruhe, No. 16, pp. 13-22 (1992).
- VDI 2015, VDI-Guideline 3787, Part 1, Environmental meteorology-climate and air pollution maps for cities and regions, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Germany (2015).
- 中國氣象局，「氣候可行性論證規範—城市通風廊道」，中華人民共和國氣象行業標準，QX/T 437-2018，中國（2018）。
- 北京市規劃和自然資源委員會，「北京城市總體規劃（2016年～2035年）」，第二章，中國（2017）。
- Hsieh, C.M. and Huang, H.C., "Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation." Computers, Environment and Urban Systems. Vol. 57, pp. 130-143 (2016).
- 臺中市政府，「永續宜居環境－臺中市熱島效應空間策略計畫」，期末報告書（2022，執行中）。
- Kondo, J. and Yamazawa, H., "Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface." Boundary-Layer Meteorology, Vol. 35, pp. 331-348 (1986).
- 香港特別行政區政府規劃署，「香港城市設計指引」香港規劃標準與準則，第十一章，第 34 頁，香港（2015）。
- 臺中市政府，「臺中市都市計畫新市政中心專用區通盤檢討規劃案」，期中報告書（2021，執行中）。



# 台北盆地的高溫風險—自然有解？

石婉瑜／銘傳大學都市規劃與防災學系 副教授

陳品瑜／銘傳大學都市規劃與防災學系 研究助理

台北的升溫趨勢位居全台之冠，要如何在密集開發的建成環境中透過策略性的保留、規劃、創造各種水與綠的空間以優化氣候調節的機制、提升高溫韌性並促進社會公平，是面對夏季致災高溫的關鍵課題。本文嘗試彙整國際在高溫議題上的論述和過去在臺北盆地實證研究成果，透過衛星影像和氣象資料等空間資訊，呈現臺北盆地的綠基盤紋理、地表溫度分佈特徵和夏季盛行風風向，藉以闡述自然機制對於盆地內溫度差異的影響，並進一步檢討綠基盤的涼化效應與鄰里社會經濟特徵間的關係，從而指出在面臨極端高溫時可能會遭受到較高風險地區。據此，本文主張綠基盤的劃設應參考夏季盛行風的風向來進行系統性的空間調整，並參照高溫風險地區來決定改善的優先次序，其他幾項土地使用與規畫建議如下：

1. 新北市境內有許多相對熱區，應優先進行綠基盤的優化；
2. 臺北盆地的盛行風並非全為東風，風廊的畫設方向應依照各地盛行風的方向調整；
3. 蘆洲、三重、社子、關渡等地屬於風的幅合或幅散的關鍵地區，應針對此特徵進行進一步的探討與土地使用管制；以及
4. 加速盤點並改善環境涼化資源缺乏與社會經濟條件弱勢的高溫風險地區。

關鍵詞：綠基盤、自然解方、高溫、都市熱島效應、台北、新北、風廊、氣候變遷調適

## 前言

2021年在格拉斯哥舉辦的UNFCCC-COP26聯合國氣候變遷大會中，調適跟減緩的議題被列在同等重要的地位，而自然解方(Nature-based Solutions)更在會中被反覆提及，被視為減少溫室氣體排放與建構氣候韌性(climate resilience)的雙贏策略。在氣候變遷的議題上，自然解方強調透過對於自然生態系統的維護、管理、規劃來降低社群在面臨極端氣候的脆弱度，並藉以提升氣候韌性。事實上，多年來包括政府間氣候變化專門委員會(IPCC)(Revi *et al.* [1])等在內的許多國際組織，如WHO [2,3]、WMO [4]、UN-Habitat和IUCN [5]等均將綠地納入氣候相關的核心倡議中，尤其強調都市規劃應該結合綠地策略以優化城市的綠地系統與生態系統服務，從而促進社會的平等。

近代的生態規劃學者多主張在建成環境中透過保留或重新引入自然的方式來協助城市修復重要的自然過程(natural process)，如水循環、碳循環、風的流動…

等；並優化其所提供的生態系統服務功能 [6,7]，如逕流調節、高溫調節、空氣淨化、生物多樣性保全、災害衝擊減緩…等 [8]。其中綠基盤(Green Infrastructure)策略更是早在2000年初期就廣泛的被歐盟及聯合國所訂定的城市永續發展公約列為實踐自然解方(Nature-based Solutions)的土地規劃及管理工具 [5,7]。綠基盤這一個名詞在台灣常常被誤用或聯想成是生態工法、綠建築，甚或是人工的透水鋪面；又或是被不求甚解的當做是公園綠地的代名詞。事實上綠基盤是一種強調整體性與系統化的水與綠空間規劃，指得是「一個自然和半自然的網絡，透過各種空間尺度的策略規劃、設計與管理與其他環境特徵相互連結，用以支持健康的自然過程(Natural process)，提供多種使人群受益的功能」 [7,9,10]。這個由自然與半自然元素組成的網絡，廣泛的包含各種能提供環境功能的自然地表，特別是由植被(綠)與水體(藍)覆蓋的地區。近期，由政府間氣候變遷專門委員會發布的第六次評估報告(IPCC AR6)：衝擊、調適和

脆弱度 (Impacts, Adaptation and Vulnerability) 中，便呼籲各個城市都應該將綠基盤納入空間規劃，在建成環境中系統性、策略性地建構水與綠的網絡 (grey-green integration)，藉以協助城市因應各項因氣候變遷所帶來的環境與社會衝擊<sup>[11]</sup>。

## 綠基盤分布與都市高溫風險不均

Mora *et al.*<sup>[12]</sup> 指出，全球大約有 30% 的人口暴露在每年 20 日的致死高溫中，而全球暖化加上都市熱島效應的雙重夾擊，將使經濟損失的代價增加至 2.6 倍以上。2022 年致命熱浪頻傳，根據國際組織碳揭露 (Carbon Disclosure Project, CDP) 的評估，光是去年就有 46% 的城市已面臨極端高溫的威脅<sup>[13]</sup>。由於全球大部分的經濟發展與人口集中在城市中，因此減輕都市熱島效應已成為城市的重要課題。目前已知水體的蒸發機制及植物的蒸散作用都能帶走環境中的潛熱，因此都市中綠化量高、喬木多的地點或水域附近，往往呈現地表溫度較低的現象<sup>[14]</sup>。Giridharan and Emmanuel<sup>[15]</sup> 彙整各國的研究指出，溫熱氣候下的城鄉溫差與城市內部的溫差十分接近；而城市內部的溫差主要歸因於植被分佈的差異。這說明綠地在溫度調節與都市熱島效應減緩上扮演著至關重要的角色<sup>[16,17]</sup>。當前國際上興起的各種城市酷涼倡議中，綠基盤便是常被提及的自然解方，如新加坡的 Cooling Singapore、巴黎的冷島 (cool-islands) 網絡計畫 … 等。

此外，城市的綠基盤雖然具有調節局部氣候，降低都市熱島強度的功能，但它的空間分布與消長卻深受地理特徵與都市化程度的影響，而這也左右都市居民的居住品質、親近自然環境的機會以及社交互動的可能性。這個特徵在城市高溫化這個趨勢下由為顯著，許多研究均指出城市中的高溫分布與綠地缺乏有關<sup>[17-19]</sup>，而這些綠地缺稀的地點又往往與社會經濟狀況相對弱勢的社區重疊，致使弱勢族群在擁有較低社會、經濟等調適資源的境況中，還要面臨較高溫度的威脅與健康危害，呈現都市居民在面對極端氣候的空間不平等現象<sup>[20-22]</sup>。近期部分研究指出空間不平等 (spatial inequality) 的現象可能與都市發展有意或無意地透過土地規劃手段來對不同族群進行空間區隔有關<sup>[20,21]</sup>；而綠地環境品質提升所引起的綠縉紳化 (Green Gentrification) 現象也是可能的肇因<sup>[23,24]</sup>。Shih<sup>[25]</sup> 即提醒要重視因綠基盤分布特徵而引起或反映出的高溫暴露及調適能力不平等的現象，以及潛在的能源貧窮問題。在全球暖化與都市高溫化的趨勢下，

自然解方與氣候正義正逐漸受到學術界與地方政府的重視，成為新興的城市氣候公正議題，值得我們進一步思考何為符合社會公平的自然解方<sup>[26]</sup>。有鑑於此議題的重要性，本文初步摘要過去在台北盆地發展區的綠基盤分佈、地表溫度特徵與風環境 … 等研究成果；並探討這些空間特徵與鄰里社會經濟條件間的相關性，藉以從環境與社會經濟兩個面向綜合解析台北盆地可能面臨的高溫風險不平等問題。

## 台北盆地的都市發展與高溫分布特徵

台北市與新北市的主要城市發展地區位於台北盆地內，因彼此毗鄰、生活圈重疊、交通發達等因素，在都市化的過程中常相互影響，帶動兩地產業及人口的交流與移動。根據中央氣象局統計資料顯示，台灣北部地區在暖化速度、都市熱島強度、與夏季用電需求上均是全台之冠，這與人口和產業聚集、高密度發展、綠地缺乏、自然通風機制受阻 … 等現象息息相關<sup>[8]</sup>。新北市政府環境保護局在 2022 年的報告中指出，住商部門的碳排放量居新北市之冠<sup>[27]</sup>，主要與住宅及商業地區的高用電需求有關，其中又以夏季用電屢創高峰。是以都市夏季高溫的改善不但是調適課題，也會影響住商部門的用電需求及國家淨零目標的達成。

位處於盆地內的台北市與新北市都市發展區雖分屬不同行政單位，但因山脈、谷地、水系等自然地理特徵相連，在先環境與氣候上擁有相似的條件，一處土地的開發往往連帶造成盆地中另一處水文、風紋、氣候，甚或是風險上轉變。舉例來說，過去土地開發與防災工程的治理以行政區作為分界的作法，常因缺乏系統性的空間思維與對自然機制的了解，往往造成水災空間的轉移<sup>[28]</sup>，因而對部分社會經濟相對弱勢的族群帶來更多不對等的風險與傷害。因此，在制定自然為本的高溫調適策略時應該要對自然的運作機制與各地的社會經濟狀況有更為全面的了解，以下就台北盆地地區做為案例地點進行探討。

## 綠基盤分佈特徵

台北盆地周遭環山，具有許多森林保護區，而盆地地區因地勢平坦、開發較早，有很多地方的發展都始於政府頒布都市計畫之前，再加以早期對於都市計畫區外的土地使用疏於管控，導致都市發展失序，工廠蔓延至農地、建築占用公園綠地用地的狀況屢見不鮮，各種自然與半自然的綠基盤元素也急遽地消失在都市化的過程

中。自 90 年代開始，台北市便因都市發展區的開發趨於飽和，將公園綠地系統的開闢重點放在河濱或是近山地帶的公園，然而此種做法僅為增加可及的遊憩空間，卻未能實質增加綠基盤的面積和相關環境效益<sup>[29]</sup>。在市場機制與開發利益掛帥的土地發展模式下，綠地的重要性常受到忽視，往往是開發剩餘空間的填充。在這樣的思維底下，盆地內充斥著大量小而零碎的公園綠地，如萬華地區的「兩棵樹公園」便是一例。以 2010 年台北市都市計畫內的公園綠地來說，數量雖多達七百餘個，但卻有高達八成以上小於 1 公頃，這與都市計畫長期鼓勵建置小型閭鄰公園，又對於公園綠地的最小面積及綠覆率又未能給與有效的規範有關<sup>[29]</sup>。

為了能更清楚界定除了公園綠地之外的綠基盤元素，本文以 Sentinel 2 衛星於 2022 年 3 月 21 日所拍攝的影像計算常態化差值植生指標（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI），並結合數值地形圖中的公園綠地與水利用地兩項分類來進行綠基盤的分布分析。由圖 1 可知盆地內較大的綠基盤元素（elements）有關渡平原、河川、疏洪道、濱溪綠帶、溼地及由雜木林所覆蓋的小山丘 … 等。在台北市市中心區內較大型的綠地塊區有大安森林公園、青年公園、植物園、中正紀念堂、台大校園 … 等，而線型的綠帶則有仁愛路、敦化南北路的綠廊等。而在新北市一側，除了水圳、大排與

工廠周遭等零星農地與雜木林之外，在板橋與新莊的重劃區內亦可觀察到較多小型的綠地及開放空間，未來塹仔圳地區的重劃，也有可能釋出更多綠地。

## 地表溫度分布特徵

先前的實證研究發現台北盆地內的夏季溫差甚大，造成溫差的原因與綠基盤分布的位置有高度的正相關<sup>[8,18,19,30]</sup>。盆地內的最低溫區通常落在河川、濕地等兼具水與綠的空間<sup>[8,18,19]</sup>。本文利用美國大地衛星 LANDSAT 8 於 2020 年 8 月 25 日上午所拍攝的熱紅外線影來進行地表溫度衍算（圖 2），結果發現台北盆地內的低溫區除了河川之外，主要出現在關渡平原一帶，日間的地表溫度約介於 25°C 至 26°C 之間，而最高溫則落在新北境內的三重崁頂工業區，溫度高達 31°C。其他高溫區則分布在萬華局部、中永和地區、泰山、五股 … 等地。整體說來台北市境內的日間地表溫度普遍較新北地區為低，這個現象除了與台北市境內擁有較多的都市綠地有關之外，與都市規畫相對完善、建築密度較低，且較少有鐵皮工廠等熱源分布 … 等特徵有關。值得注意的是，市區中雖有許多綠化道路，但從影像看來卻僅有少數綠化街道呈現較為顯著且穩定的涼化現象。涼化效應較為清楚可見的綠廊有台北市仁愛路與敦化南路一帶，較周圍建城地區低約 1°C 左右。



圖 1 利用 Sentinel 2 衛星影像計算 NDVI 值所產生的綠基盤分佈圖

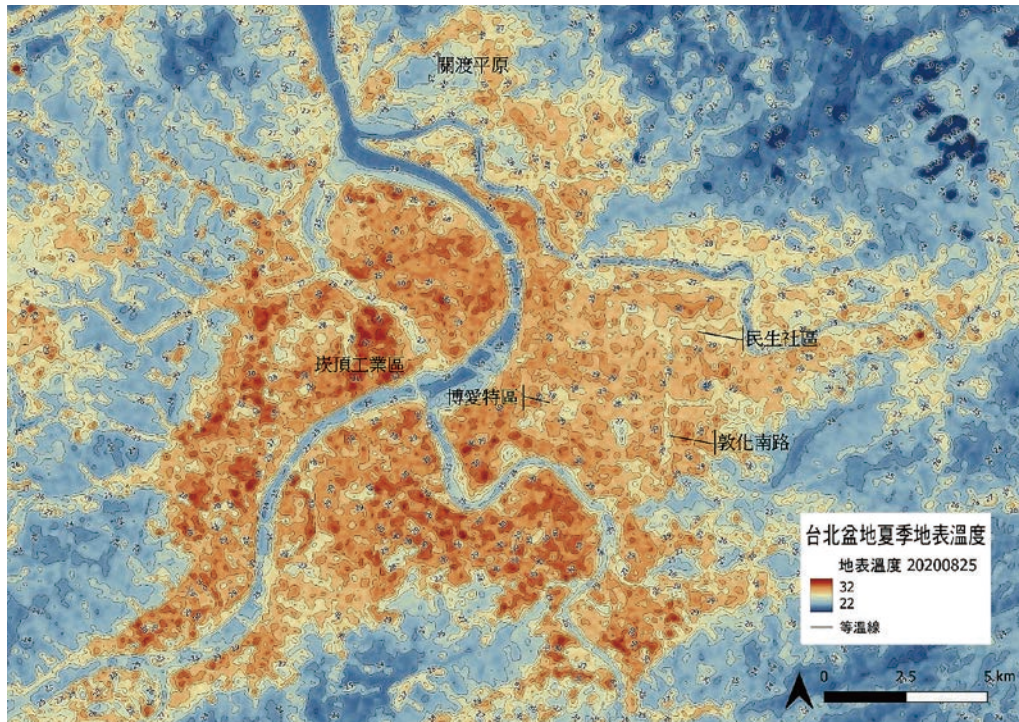


圖 2 由 LANDSAT 8 衛星演算的台北盆地夏季地表溫度分布情形（2020 年 8 月 25 日）

Shih and Mabon<sup>[30]</sup> 於 2018 年的研究顯示，新北市的盆地雖然有零星的綠地或水圳分布，但因為面積相對較小又接近鐵皮工廠或高密度發展區等高溫地區，涼化效果並不顯著，有可能是被周遭的熱源所抑制。以中永和一帶的中和溝、瓦窯溝（圖 1）與新店溪支流來說，若非緊鄰綠地，則很難觀察到河川的降溫效果（圖 2），這可能與這些水域的橫向面積小、河川溝渠化、濱溪綠帶有限，以及周圍多為高密度發展地區有關。先前的研究便指出，綠基盤的涼化效果隨距離遞減，當距離超過綠地或水體範圍 100 公尺之後便很難再觀測到降溫效果，倘若綠地或水體的面積過小且緊鄰高溫地區，則涼化距離可能進一步受限甚至無法觀察<sup>[18,19]</sup>。因此一個地區若擁有較大面積的綠地及水體，則較容易形成穩定的冷島來降低周遭的溫度。然而，透過增加大型水體或綠地來協助降溫這樣的作法對於高密度發展的建成區而言並不實際。有不少研究指出，小型水體和綠地雖然在涼化強度與距離上較為有限，但若增加彼此之間的密度，將有助於涼化效果的加乘與延伸<sup>[18,19]</sup>。舉例來說，台北市的博愛特區內，因為有植物園、二二八公園、台北賓館…等又緊鄰中正紀念堂等多處開放空間與綠地，全區溫度較低；而民生社區一帶雖然公園偏小，但社區內零碎的綠化空間多，因此整體溫度相對較低。

## 夏季風環境

系統性、策略性地配置水與綠的空間能有效的提供涼化效益，然而這需要有各項科學知識的挹注。其中對於風環境的了解能夠協助城市對通風敏感區的土地進行使用管制，協助指認通風敏感區，並在最適區位留設開放空間與綠基盤。城市的通風條件與空氣品質取決於城市風環境與綠基盤和開放空間的分佈特徵，而風更是影響綠基盤涼化效應能否進一步延伸至建成地區的重要因素。因而早期進行城市氣候規劃的城市，如德國斯圖加特、日本東京…等，以及後起之秀，如香港與新加坡…等，均投入城市地形與盛行風風向的調查，用以規範不同開發地點的建蔽率、容積率；調整開放空間與綠地系統；為城市留設風廊並且重建自然通風機制…等<sup>[31,32]</sup>。一個城市的風紋除了受到所處氣候帶的影響，也會因城市的立地條件與地理型態，如高地、丘陵、山谷、盆地…等，以及山、海的相對位置，如臨海、濱湖、傍山…等而有差異。如臨海城市因海陸的氣流循環而有海陸風現象<sup>[33]</sup>；而位於谷地、丘陵的城市則更容易觀測到山風等特徵。

以台北盆地的都市發展區而言，雖然並未臨海，但因距海不遠，因此仍受海陸氣流循環的影響。Lin 等人於 2008 年的研究即指出台北盆地存在著海陸風的現象，

夏季日間海風會沿著淡水河由北至南進到盆地<sup>[34]</sup>。由本文作者所主持的台北綠基盤研究室(Taipei GI Lab)根據中央氣象局於台北盆地內設置的29個氣象站資料進行分析，結果發現自2011到2020年間夏季(6到9月)的盛行風向向確實呈現海陸風的特徵。夏季日間北側的海風順著淡水河進入盆地，在社子、蘆洲一帶與基隆河谷的盛行東風以及來自於南側的陸風會合，產生水平輻合的現象；而到了夜間，盆地則轉為陸風為主，多由盆地周遭的丘陵吹向盆地。若忽略日夜主要風向的差異，盆地西半部的台北市境內多盛行東風，其中以基隆河谷與景美溪谷為重要的天然風廊。然而受到南側山谷與淡水河、新店溪等河道帶來的南風所影響，盆地中心區的盛行風轉為南南東方向，逐漸順著淡水河口方向往北吹拂(圖3)。至於盆地東側的新北市地區，則呈現更為複雜的風紋。大漢溪中段以南的地區仍盛行東風，沿著大漢溪河谷往桃園方向吹。然而在新莊、五股、泰山一代或許是受到西側山脈的阻擋以及啞口坑、大窠坑等谷道風的影響，風向有往北轉的趨勢，在蘆洲、三重一帶因有多個方向而來的河道風在此相遇，有氣流輻合的現象；而社子跟關渡地區則有氣流輻散的現象。

總得說來，無論是國外所做的實證研究或是國內氣象站的觀測數據均顯示，河道、谷道等地勢低窪的地點是天然風道，深刻的影響一個城市的自然通風機制。因此，這些地區的土地使用與開發都需要有更為審慎的評估與考量，避免通風機制受阻。同時，本分析的結果強調台北盆地內各地區的風紋會因山水的特徵和相對位置不同而有所差異，有些地方盛行東風，有些地方則盛行南南東風，更有些地區屬於風的水平輻合或輻散地區。是以，在進行風廊劃定的時候應根據各地盛行風的特徵加以調整，特別是在有輻合或輻散現象的地區，如社子、關渡、蘆洲、三重等地，有針對風紋及開發影響進行進一步探討的必要，才能指導適合的土地發展類別與開發強度，並配置配合地區通風特性的綠基盤體系。

### 高溫風險不均的現象

由上述的分析可知，即便我們居住在同一個城市中，因為先天地理與後天土地使用等因素，會造就出不同的綠基盤紋理與通風條件，導致不同地區的居民所感受到的夏季高溫強度不盡相同。當前國際上有許多研究發現，經濟條件越是優渥的社區往往在綠化程度與綠地

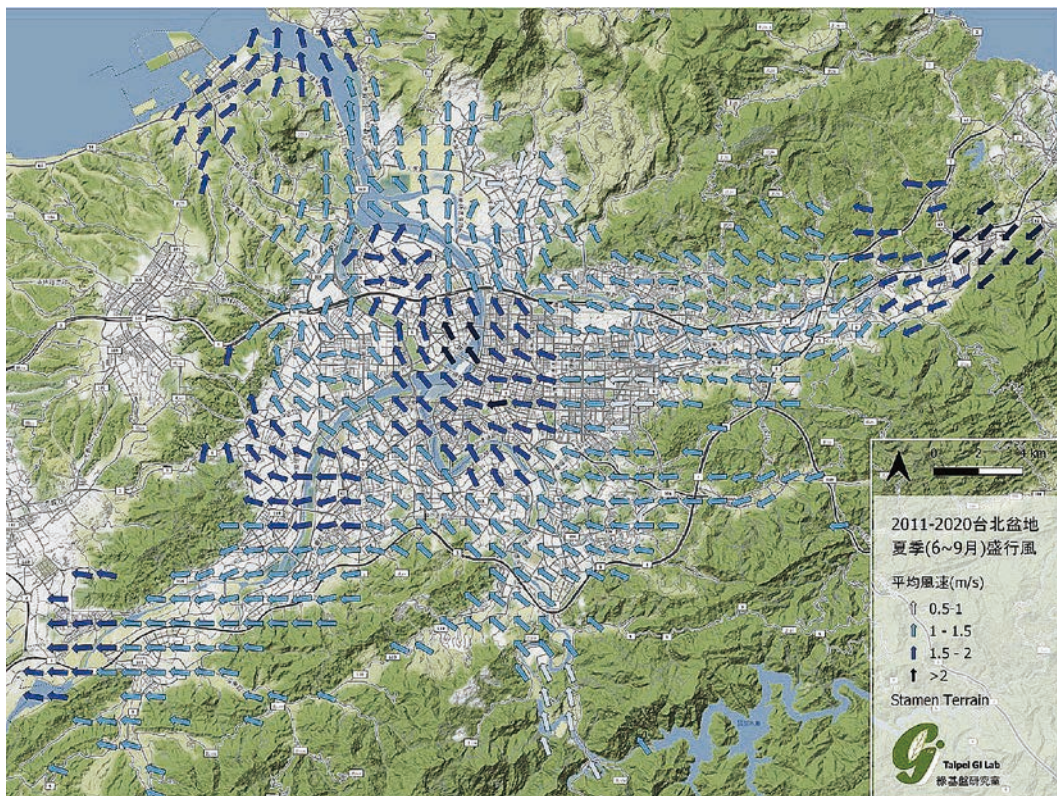


圖3 台北盆地夏季盛行風風向

品質的條件上越好；鄰里間的生物多樣性越高；擁有更多環境改善的資源，因而造就綠覆率與經濟條件正相關的「奢侈效應（Luxury Effect）」<sup>[35]</sup>。這個現象也可能與綠縉紳化（Green Gentrification）有關，亦即綠地政策促使一地區的環境品質提升，造就房價上漲，連帶吸引社會經濟能力較佳的居民入住，這個過程相對的排擠了社會經濟弱勢的原居民，使他們被迫或不得已而移往環境品質較差，但房價較為低廉的易致災空間<sup>[23,24]</sup>。

Shih<sup>[25]</sup>根據2019年夏季台北盆地的高溫、綠基盤分佈與鄰里社會經濟特徵之間的關係進行分析。結果顯示鄰里的綠化程度、綠覆率與家戶薪水三項因子之間呈現低至中度的顯著正相關；但與綠地平均距離及地表溫度則呈現中度顯著負相關。換言之，收入越是優渥的鄰里有綠化程度越高且越涼快的傾向。但同一篇研究也指出，收入與綠地之間的相關性並不是線性，反而是有兩極化的現象。也就是除了富人之外，經濟相對弱勢族群也有可能居住在綠基盤相對豐富的地區，因而享有較多綠意以及更為涼爽的夏日。根據空間資訊進一步檢視盆地區的社會經濟特徵可以發現，原住民人口與社會經濟相對弱勢的鄰里多分布在盆地的邊陲地帶，特別是新北市樹林地區的鹿角溪周遭與台北市社子島一帶，但該地區因都市化程度較低、鄰近山水等特徵而擁有較多綠地跟較低的夏季地表溫度（圖2）。相反的，台北市萬華區的華中、興德里一帶以及新北的頂崁工業區一帶則屬於高溫區，當地不僅綠地較少，又有社會經濟弱勢、老年化指數高…等特徵，屬於環境資源與社會經濟條件雙重弱勢的地區，相關地點在面對夏季高溫熱浪時恐怕會面臨較高的風險。

## 結論與建議

台灣的土地規劃甚少考量城市的氣候特徵，以至於城鄉發展往往缺乏對於立地的氣候條件有足夠詳細的認識，難以在空間體系上做出全盤性、系統性的因應，常造成局部的高溫或加劇易感族群的風險。近期雖訂定氣候變遷因應法以及地方氣候變遷調適策略，然在土地利用此一面向上的著墨甚少。而在都市規劃上亦未能系統性的將氣候變遷減緩與調適目標納入土地使用的管制規則之中，故難以在都市發展的初期就針對城市高溫與風險不均的現象提出策略規劃，致使都市的發展持續阻礙或弱化自然調節機制，加深都市

熱島效應與氣候不公正。考量全球暖化所帶來的夏季高溫熱浪問題日益頻繁，已經為夏季空調用電、大眾健康、勞動力生產、居住品質、水資源安全…等帶來連鎖性的負面衝擊。本文就綠基盤策略這個自然解方提出各個面向的概要探討與描述，依照上述各節的分析與摘要，以下歸納幾點建議，希望有助於雙北地區制定有效且公正的自然解方來降低高溫風險：

綠基盤網絡中的水體與綠地具有降低周遭溫度的涼化效果，而風的吹拂又能讓這個機制進一步得到擴散與延伸。在進行開放空間規劃的時候，若能綜合考量地形與自然和半自然綠地及水體的分布特徵，再配合夏季盛行風的方向來進行配置，將能讓綠基盤這項自然解方達到更佳的效果。

其次，淡水河沿岸的關渡、社子島、蘆洲、三重一帶，受到河道地形與海陸風特徵的影響，四周的風多在此相遇，產生幅合或幅散的現象，建議在這些地區進行土地開發與都市更新時應該要參照盆地整體的風紋與綠基盤特徵來做更為審慎的科學評估並制定土地使用管制規則。

另外，新北市的地表溫度有普遍高於台北市的現象，有許多相對高溫的分布，尤其在鐵皮屋工廠眾多的工業區以及高密度發展的中、永和一帶最為嚴重，與當地綠化量少，且鄰近熱源有關。由於新北市境內有多處街道的空間紋理甚為密集且紊亂，開放及綠地空間狹小又未能與夏季盛行風方向保持一致，有可能抑制了自然通風機制的運作，未來如有都市更新計畫，應針對這幾處的開放空間進行結構性的調整來增加綠地、留設風廊。

最後，依照本文初步盤點的結果顯示，萬華及三重一帶有幾處社會經濟相對弱勢的鄰里，因環境中缺乏水與綠的空間來進行溫度調節，在高溫熱浪的衝擊下，恐怕會有較高的健康風險，未來在擬定綠化以及高溫調適策略時，應該進一步界定這類高溫風險地區，並將其列為優先進行改善的鄰里空間。

## 參考文獻

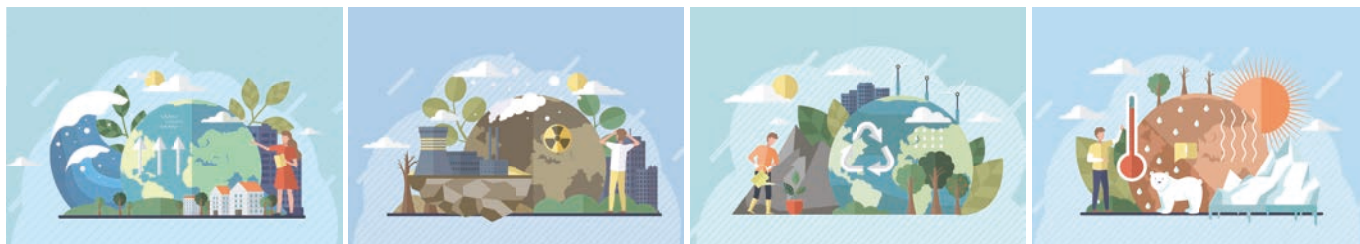
1. Revi, A., D.E. Satterthwaite, F. Aragón-Durand, J. Corfee-Morlot, R.B.R. Kiunsi, M. Pelling, D.C. Roberts, and W. Solecki. (2014). Urban areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L.

- Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535-612.
2. World Health Organization (2017), Urban green space interventions and health: A review of impacts and effectiveness. WHO: Geneva, Switzerland.
3. World Health Organization (2020), Integrating health in urban and territorial planning: a sourcebook. <https://www.who.int/publications/item/9789240003170>
4. World Meteorological Organization (WMO). (2019), Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services - Volume I: Concept and Methodology. WMO- No. 1234
5. IUCN (2020), *Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions*. First edition. Gland, Switzerland: IUCN.
6. Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., and Bonn, A. (2017), Nature based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. *Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Springer.
7. European Commission (2013), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Green Infrastructure (GI) - Enhancing Europe's Natural Capital. COM/2013/0249 final, Brussels. Available at (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0249>). Accessed: 10 August 2021.
8. Shih, W-Y. and Mabon, L. (2021), Green Infrastructure as a Planning Response to Urban Warming A Case Study of Taipei Metropolis. In: Ito, K. (ed), *Urban Biodiversity and Ecological Design for Future Cities*, pp. 335-352. Springer: Tokyo.
9. Benedict, M.A. and McMahon, E.T. (2012), *Green infrastructure: linking landscapes and communities*. Island press.
10. Hansen, R. and Pauleit, S. (2014), From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *Ambio*, 43(4), 516-529.
11. IPCC (2022), *Sixth Assessment Report Working Group 2*. IPCC: Geneva
12. Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I.R., Powell, F.E., Geronimo, R.C., Bielecki, C. R., ... and Trauernicht, C. (2017), Global risk of deadly heat. *Nature climate change*, 7(7), 501-506.
13. Carbon Disclosure Project (2022), Stories of Change 2022 - Accelerating action towards a sustainable future. CDP Worldwide.
14. Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., and Pullin, A.S. (2010), Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3), 147-155.
15. Giridharan, R. and Emmanuel, R. (2018), The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: a review. *Sustainable cities and society*, 40, 677-687.
16. Fan, H., Yu, Z., Yang, G., Liu, T.Y., Liu, T.Y., Hung, C.H., and Vejre, H. (2019), How to cool hot-humid (Asian) cities with urban trees? An optimal landscape size perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 338-348.
17. Shih, W-Y., Ahmad, S., Chen, Y-C., Lin, T-P., and Mabon, L. (2020), Spatial Relationship between Land Development Pattern and Intra-Urban Thermal Variations in Taipei, *Sustainable Cities and Society*, V62, Elsevier. doi:10.1016/j.scs.2020.102415
18. Shih, W.Y. (2017a), The cooling effect of green infrastructure on surrounding built environments in a sub-tropical climate: a case study in Taipei metropolis. *Landscape research*, 42(5), 558-573.
19. Shih, W-Y. (2017b), Greenspace patterns and the mitigation of land surface temperature in Taipei metropolis. *Habitat International*, 60, 69-80, Elsevier. doi:10.1016/j.habitatint.2016.12.006
20. Garrison, J.D. (2017), Seeing the park for the trees: New York's "Million Trees" campaign vs. the deep roots of environmental inequality. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(5), 914-930. doi:10.1177/2399808317737071
21. Wilson, B. (2020), Urban Heat Management and the Legacy of Redlining. *Journal of the American Planning Association*, 86(4), 443-457. doi:10.1080/01944363.2020.1759127
22. Klinenberg, E. (2015), *Heat wave: A social autopsy of disaster in Chicago*. University of Chicago Press.
23. Anguelovski, I., Connolly, J.J., Pearsall, H., Shokry, G., Checker, M., Maantay, J., ... and Roberts, J.T. (2019), Opinion: Why green "climate gentrification" threatens poor and vulnerable populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(52), 26139-26143.
24. Amorim Maia, A.T., Calcagni, F., Connolly, J.J.T., Anguelovski, I., and Langemeyer, J. (2020), Hidden drivers of social injustice: uncovering unequal cultural ecosystem services behind green gentrification. *Environmental Science & Policy*, 112, 254-263. doi:10.1016/j.envsci.2020.05.021
25. Shih, W-Y. (2022). Socio-ecological inequality in heat: The role of green infrastructure in a subtropical city context. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104506, Elsevier.
26. Mabon, L. and Shih, W-Y. (2018), What might 'just green enough' urban development mean in the context of climate change adaptation? The case of urban greenspace planning in Taipei Metropolis, Taiwan. *World Development*, 107, 224-238.
27. 新北市政府環境保護局 (2022), 新北市 2050 淨零路徑暨氣候行動白皮書, 新北市政府 (<https://www.epd.ntpc.gov.tw/Article/Info?ID=9620>)
28. 陳亮全、陳海立 (2007), 易致災都市空間發展之探討：以臺北盆地都市水災形成為例, *都市與計劃*, 34(2), 293-315。
29. Shih, W.Y. (2010), Optimising urban green networks in Taipei City: *linking ecological and social functions in urban green space systems*. The University of Manchester (United Kingdom).
30. Shih, W-Y. and Mabon, L. (2018), Thermal environments of Taipei Basin and influence from urban green infrastructure, *City and Planning*, 45(4): 283-300. doi:10.6128/CP.201812\_45(4).0002
31. 鍵屋浩司、足永靖信 (2013), 「ヒートアイランド対策に資する「風の道」を活用した都市づくりガイドライン」, 國總研資料, 第 730 號, 國土交通省国土技術政策総合研究所, 日本。
32. Ng, E. and Ren, C. (Eds.). (2015), *The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning*. Routledge.
33. Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
34. Lin, C.Y., Chen, F., Huang, J.C., Chen, W.C., Liou, Y.A., Chen, W. N., and Liu, S.C. (2008), Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. *Atmospheric Environment*, 42(22), 5635-5649.
35. Schell, C.J., Dyson, K., Fuentes, T.L., Des Roches, S., Harris, N.C., Miller, D.S., ... and Lambert, M.R. (2020), The ecological and evolutionary consequences of systemic racism in urban environments. *Science*, 369(6510).





# 從世界看臺灣： 氣候變遷調適與國土空間規劃



林映辰／逢甲大學都市計畫與空間資訊學系 助理教授

鄭喜恩／國立臺北大學都市計畫研究所 碩士班研究生

氣候變遷及其影響已成為近廿年來，最受到全球重視之議題，且在氣候變遷相關研究上，主要可分為「減緩（Mitigation）」與「調適（Adaptation）」二層面。相較於減緩，包括聯合國在內，世界多國所共同推動之淨零碳排（Net-Zero）政策較著重於不同碳排放路徑之減碳策略；而調適層面，已有多國嘗試透過國土空間規劃手段結合永續發展目標，以因應氣候變遷對於居民生活所帶來之影響。雖臺灣近十年來已陸續頒布溫室氣體減量與管理法（2015 年施行，惟已於 2023 年 1 月 10 日三讀通過預告修正為氣候變遷因應法）、國土計畫法（2016 年施行）等重要法案，但全球仍有許多國家在國土空間規劃體制及因應氣候變遷調適層面較臺灣為成熟，爰本文將綜整介紹世界上不同國家近 5 年內（2018～2023 年）最新實施之相關政策及法案，期可納供臺灣後續研議氣候變遷調適與國土空間規劃之借鏡。

關鍵詞：氣候變遷、調適、國土計畫、空間規劃

## 前言

「氣候變遷」一詞始出現於臺灣空間規劃法系內，為國土計畫法之第一條立法目的：「為因應氣候變遷，確保國土安全，保育自然環境與人文資產，促進資源與產業合理配置，強化國土整合管理機制，並復育環境敏感與國土破壞地區，追求國家永續發展，特制定本法」。國土計畫法自 2015 年底三讀通過後，於 2016 年 5 月 1 日正式施行，分為三階段啟動，第一階段之全國國土計畫已於 2018 年 4 月底完成，而其後第二階段之各直轄市、縣（市）國土計畫亦已於 2021 年 4 月底公

告，目前（2023 年）正值第三階段之國土功能分區劃設作業，預期於 2025 年 4 月底發布實施，屆時，臺灣將正式廢止區域計畫法並轉為國土計畫法系，此乃自 1974 年區域計畫法公布後，半世紀以來臺灣在空間規劃體系上之重大轉變。為瞭解世界其他國家如何於空間規劃中將氣候變遷調適納入考量，本文旨在綜整介紹包括英國、美國、新加坡、日本、及荷蘭等五國，近 5 年（2018～2023 年）來所制訂有關因應氣候變遷調適與國土空間規劃之最新相關政策及法案，希冀可作為臺灣後續研議氣候變遷調適國土規劃之重要考量。



## 英國

「倫敦計畫 2021 (The London Plan 2021)」<sup>[1]</sup> 是英國大倫敦地區未來 20 至 25 年之空間發展戰略，具法定計畫性質，其嘗試解決倫敦所正面臨之幾項重大議題，包括解決住房危機、因應氣候緊急情況、打造更綠更健康之都市、保護城市特色與遺產、以及協助恢復新冠疫情所造成之影響<sup>[1]</sup>。其中，針對氣候緊急情況，該計畫提到倫敦市區內未來之新建築，將需要按照「零碳 (zero-carbon)」標準建造，而大規模之開發計畫更應遵照循環經濟原則研擬，即盡量減少拆除垃圾，及設計在拆除時建材（如木材）可重新再利用之新建築。此外，計畫除強調保護綠色和開放空間，亦提倡打造健康街道，將有助於改善倫敦市區空氣品質不良問題，並鼓勵市民多利用步行、自行車等較永續之交通方式。有關氣候緩解政策，倫敦計畫內載明開發須符合淨零碳目標、遵循能源等級、重大發展均要求附有詳細之能源評估報告及全生命週期碳評估等，並要求最大限度減少工地碳排放，同時規範地方規劃機構必須設立碳抵換基金 (carbon offset funds)，向開發商收取碳抵換費用，藉以彌補新開發專案所產生之碳排放。迄今為止，倫敦新建築開發案若使用 95 英鎊 / 每噸 CO<sub>2</sub> 之碳抵換價格，預期可使倫敦之碳抵換資金每年收益達到 3000 萬至 4000 萬英鎊。

而倫敦於 2018 年發布了「倫敦環境策略 (London Environment Strategy)」<sup>[2]</sup>，以及「零碳倫敦：1.5°C 相容計畫 (Zero Carbon London: A 1.5°C Compatible Plan)」<sup>[3]</sup>，為 2050 年淨零碳排目標提出相關之能源系統情境。此二計畫均顯示，需有正確目標、領導力、權力和資金，方可加快行動並從根本上減少碳排放；而除可避免災難性之氣候變遷外，實現淨零排放將可維持數以萬計之工作崗位、提升空氣質量與改善健康、減少不平等並改善生活品質等；惟計畫亦指出倫敦後續仍須針對超過 200 萬戶家庭和 25 萬戶非住宅建築進行適當隔熱，至 2030 年規劃 220 萬台熱泵投入運行、460,000 座建築物連通區域供熱網絡、總自用車行駛公里數減少 27%、以及屆時將不再銷售使用汽油為燃料之汽車與貨車。倫敦市政府亦持續監測當地之溫室氣體排放，並於每年之「倫敦能源和溫室氣體排放清單 (London energy and greenhouse gas emissions inventory)」<sup>[4]</sup> 中公佈結果。



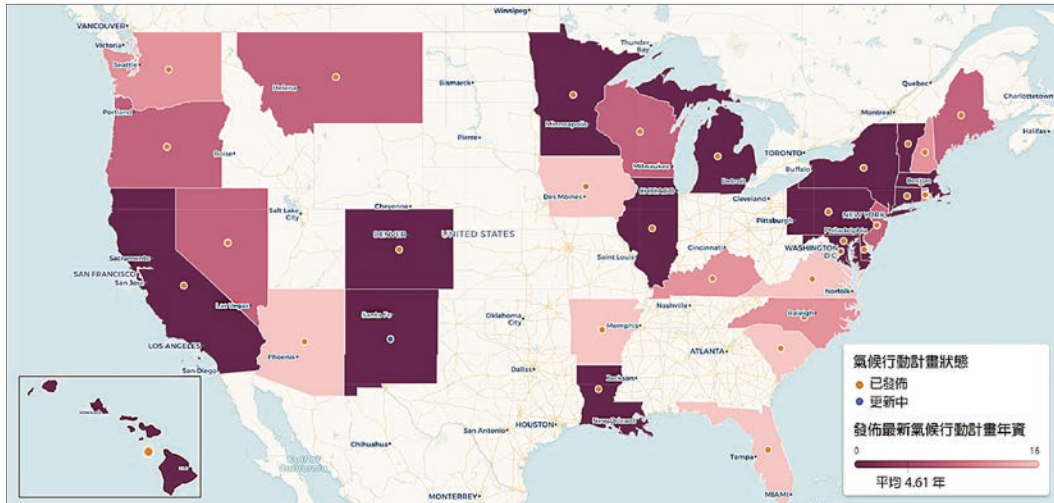
## 美國

美國之國土規劃體系係基於部門計畫或區域計畫，以整合協調各州之發展，以紐約州的紐約市為例，城市規劃部 (Department of City Planning, DCP) 為主要之土地使用規劃機構，其目標為使紐約成為一個更美好之居住地。2022 年 10 月紐約推動新政策「City of Yes」<sup>[5]</sup>，該計畫對紐約市之分區法規進行現代化與更新，進而支援小型企業、建造經濟可負擔住宅 (Economically affordable Housing) 與提升永續性，打造更具包容性、更公平之「City of Yes」。該計畫有三大目標：(1) 實現碳中和，擴大脫碳計畫；(2) 提供經濟機會，通過更具彈性之土地使用分區以增加就業機會；(3) 增加住房機會，確保所有社區都滿足住屋之需求。

此外，因應氣候變遷以及新冠疫情影響，建立「辦公室調適性再利用工作組 (Office Adaptive Reuse Task Force)」<sup>[6]</sup> 以主導老舊辦公樓之再利用，由市長、市會議議長和專家學者組成，確保紐約市中心商業區可保持活力；另外，因應先前新冠疫情餐廳內用造成傳染擴散風險，紐約市議會於 2022 年 2 月通過「永久開放餐廳文字修正案 (Permanent Open Restaurants Text Amendment)」<sup>[7]</sup>，解除人行道咖啡館位置之區位條件限制，僅需要滿足暢通道路、確保桌椅與消防栓保持適當距離等基本準則即可設置，為餐館老闆減少申請程序上之繁文縟節。

而美國作為全球第一大的經濟體，也是僅次於中國的第二大碳排放國，雖在川普政府時期一度做出氣候變遷政策「大倒車」之舉，如欲加速開發化石能源、重振煤炭工業等傳統能源行業、退出巴黎協定等，然而在拜登總統於 2021 年初上任美國總統後，即宣佈重返巴黎協定，更簽署「保護公共健康與環境及恢復科學應對氣候危機 (Protecting Public Health and the Environment and Restoring Science To Tackle the Climate Crisis, E.O. 13990)」之行政命令，重新展現美國對氣候變遷議題之重視。前述行政命令除承諾美國在 2050 年前，將實現淨零排放目標，及 2030 年溫室氣體排放量需比 2005 年水準減少 50% 至 52% 之外，並針對川普政府時期之 104 項環保相關政策與行動重新進行審查、修訂、中止或廢除，如美國環保署即重新檢討並在 2022 年 4 月重新發佈白皮書<sup>[8]</sup>，檢討減少固定式燃氣輪機溫室氣體排放之控制技術和措施等。

另，根據氣候與能源解決方案中心 (Center for

圖 1 美國各州氣候行動計畫狀態示意圖<sup>[9]</sup>

Climate and Energy Solution, C2ES) 的調查 (截至 2022 年 2 月)<sup>[9]</sup>，美國有 33 個州已發佈或正在修訂氣候行動計畫 (Climate Action Plan)，其中多數州均在近五年更新過計畫 (詳圖 1)。以美國紐約州為例，其在 2019 年通過《紐約州氣候領導力和社區保護法 (New York State Climate Leadership and Community Protection Act)<sup>[10]</sup>，簡稱氣候法》，該法為全球主要經濟體中規範最嚴格者，為紐約州在減少溫室氣體排放、新增可再生能源發電量、以及提高紐約社區抗災能力層面奠定基礎，並在 2020 年 11 月新增四項指導原則：(1) 以自然措施降低洪水和侵蝕風險、(2) 紐約州洪水風險管理指南、(3) 估算洪水影響高程指南、以及 (4) 智慧型成長之公共基礎設施評估指南，並續於今 (2023) 年初，發佈「範疇界定計畫 (Scoping Plan)」，研議行動計畫與策略，包括 2025 年紐約州須提供 6,000 兆瓦太陽能發電量、2030 年自用小客車銷售量須近 100% 為零排放汽車等，期可實現 2030 年溫室氣體排放量比 1990 年水準減少 40%，以及到 2050 年減少 85%，進而走上碳中和之發展目標。



## 新加坡

新加坡 2019 年總體規劃 (Singapore's Master Plan 2019)<sup>[11]</sup> 為引導新加坡未來 10 至 15 年中期發展之法定土地使用計畫，該計畫每五年進行一次通盤檢討。新加坡 2019 年總體規劃之重點為規劃具包容性、永續發展和綠色之社區、為所有市民提供社區空間和便利之公共設施、以及地方再生和滿足未來需求之相關策略。民眾參與在計畫過程中亦帶來更好的結果，在規劃審查過程

中，納入了包括當地社區、專業人士、基層組織和學術機構等多個利害關係人 (Stakeholder) 群體，使利害關係人與規劃機構共同參與及討論，有助於建立社區意識。

由於新加坡為缺乏天然資源之小國，更需要依靠科技和政策來推動永續發展，因此新加坡府於 2021 年 2 月 10 日公佈「2030 年新加坡綠色計畫 (Singapore Green Plan 2030)」<sup>[12]</sup>，透過國家發展部、教育部、永續發展與環境部、貿易與產業部和交通部之跨部會合作，為城市綠化、永續生活和綠色經濟等方面制定明確目標，旨在推動新加坡永續發展之全民運動，並得以實現長期淨零碳排目標。該計畫訂定六項主軸，包括自然城市 (City in nature)、永續生活 (Sustainable living)、能源重製 (Energy reset)、綠色經濟 (Green economy)、韌性未來 (Resilient future) 以及綠色政府 (Green government)，主要目標則包括再種植 100 萬棵樹、到 2025 年，太陽能發電量增加 4 倍、到 2030 年送往垃圾掩埋場之垃圾減量 30%、20% 學校實現碳中和、新註冊汽車必須為使用乾淨能源之車種等 (如圖 2)。



## 日本

日本國土交通省於 2022 年表示，日本自 2013 年 9 月開始規劃之「國土形成計畫 (National Spatial Strategy (National Plan))」<sup>[13]</sup>，將預計於 2023 年下半年完成。而該計畫中，將聚焦於因新冠疫情而導致生活與經濟層面之轉變、數位化發展、人口減少、高齡少子化、巨大災害風險等國土發展關鍵課題，其中重點包括發揮「公私協力、官民共創」、擴大利用數位科技、提升使用者



圖 2 2030 年新加坡綠色計畫主要目標<sup>[12]</sup>

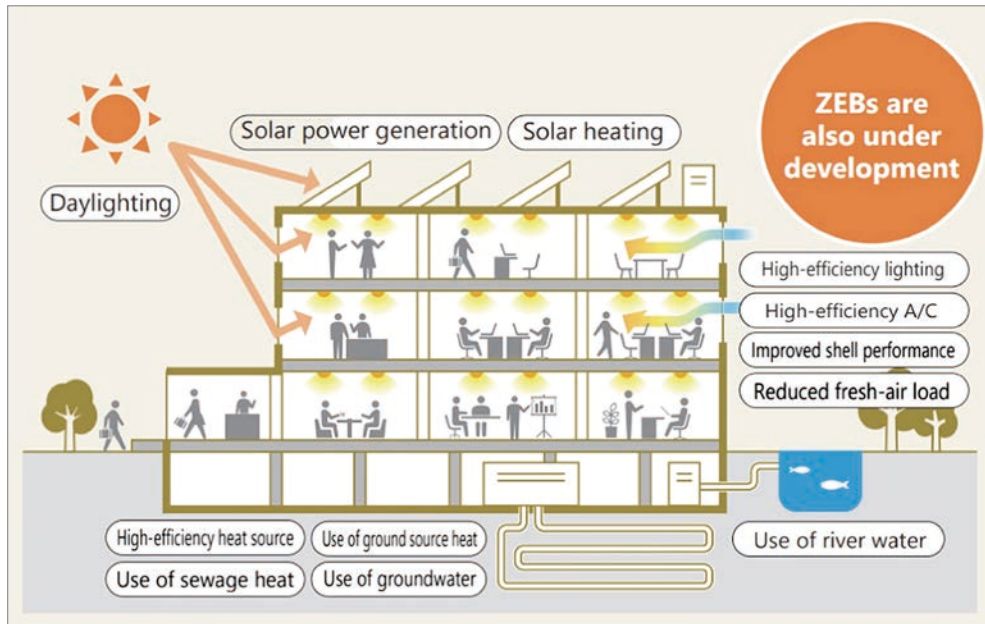
及企業便利性，以及橫向之跨域合作。而為因應全球氣候變遷可能產生之危機，日本東京都政府於 2022 年啟動「東京零排放戰略（Tokyo's Zero-Emissions Strategy）」，預期在 2050 年前將東京轉型為零碳排都市，並聚焦於七項層面，包括可再生能源、零碳排建築、節能家電、節能運輸和零碳排運具、有效利用自然資源和淨零碳塑膠、零食品浪費，以及減少氟碳排放。東京都政府認為解決二氧化碳排放問題之方法，在於紀錄與追蹤排放源，須將都市內部產生的排放和都市外部產生的排放均納入計算<sup>[14]</sup>；且為實現東京都零排放，日本東京都政府進一步制定「東京淨零碳排執行計畫（Tokyo's Net Zero Emissions Execution Plan）」，針對產業和消費者、能源、建築以及運輸部門等各別提出相關零碳排策略<sup>[15]</sup>，如運輸部門中，交通建設為連繫與維持東京商業活動和居民生活之重要基盤設施，其二氧化碳排放量約占總排放量之 20%，爰除持續推廣公共運輸外，私人運具之減/脫碳亦扮演重要腳色，而鼓勵零碳排運具（zero emission vehicles, ZEVs）即為重要策略之一。ZEVs 除可作為運具使用外，亦可作為「移動蓄電池」使用，當有緊急災難發生，由電力及蓄電池所驅動 ZEVs 即可作為電力供應設備充當緊急電源，為家庭和疏散中心提供電力，一輛裝有 V2H（Vehicle-to-home，車輛至家庭）之電動汽車，可以為東京一戶普通家庭提供 2~4 天之電力需求；而一輛燃料電池公車，則可供給緊急疏散中心（如體育館）約 4.5 天之電力耗用，顯見推動 ZEVs 除對提升環境永續性上，更可作為作為高效之應急能源供應站。<sup>[16]</sup> 另

外在建築部門，由於東京都內建築物十分密集，住宅和辦公樓等建物即為主要排放源，其二氧化碳排放量占總排放量之 70%，因此推廣零碳排建築（如圖 3），通過減少建築中使用之能源、促進可再生能源使用（如太陽能和使用高效照明、自然照明和空調）、充分利用二氧化碳排放量較低之建材、從防災和熱對策角度確保有效隔熱效能等，均為東京實現零碳排之重要關鍵。

## 荷蘭

荷蘭自 2008 年修訂《空間規劃法（Spatial Planning Act）》後，逐步由中央集權轉變為地方分權<sup>[17]</sup>，而最新修訂之《環境與規劃法（The Environment and Planning Act）》將於今（2023）年 7 月開始生效，將取代原《空間規劃法》在內之近 15 項與環境相關現行法案，包括《環境許可通用法》、《水資源法》、《住房法》和《危機與復原法》等，一共容納了 26 部現行法律<sup>[18]</sup>。而通過《環境與規劃法》後，荷蘭政府希望強調空間規劃、環境和自然領域之和諧，以減少現行法規之方式整合更廣泛之部門利益，強調各級政府和民間社會間之合作，並為民間私部門之倡議提供了更多彈性空間；且新法旨在使現行有關土地使用規劃、環境保護、自然保護、建築物建造、文化遺產保護、水資源管理、城鄉重建、主要公共和私人工程開發以及採礦和土方等法令簡化，並可與時俱進加以整合<sup>[19]</sup>。

在氣候變遷方面，荷蘭政府於 2019 年中公佈新版之國家氣候協議（The Dutch Climate Agreement），針對電力、產業、建成環境、交通運輸及農業等五大部門擬定了

圖 3 日本零碳排建築概念圖<sup>[13]</sup>

減碳措施，期望能在 2030 年再生能源發電達 70%，並落實 2030 年溫室氣體排放比 1990 年減少 49% 之目標，進而於 2050 年達成零碳之發電系統<sup>[20,21]</sup>。另外，荷蘭主張依據部門之碳排與減碳成本效益分配各部門之減碳配額，效益越高之部門（較少費用可獲得較多效果者），其減碳目標額越高（如能源和產業部門）；同時亦與民間相關團體共同研議如課徵碳稅、發展電動車產業、關閉燃煤電廠、發展離岸風電等對抗氣候變遷之行動方案，基於可行且可負擔之原則，積極尋求高成本效益之轉型，並控制限縮對於一般居民家庭財務之影響，採取公民和企業間之公平分配財務負擔，預估至 2030 年，荷蘭與氣候協議相關之年度額外成本僅不足全荷蘭 GDP 之 0.5%。

## 結論與反思

臺灣於 2012 年 6 月頒布國家氣候變遷調適政策綱領後，於 2012 ~ 2013 年間由國家發展委員會補助各地方政府研議第一期氣候變遷調適計畫，2015 年廣續推動脆弱度較高之行政區辦理氣候變遷調適行動計畫；惟溫室氣體減量及管理法（溫管法）於同年 7 月公布施行後，始轉由環境保護署擬定國家因應氣候變遷行動綱領，並續於 2017 年通過核定，而自 2018 年起，國家氣候變遷調適行動方案即由環境保護署主責至今，雖有成立「同舟共濟—臺灣氣候變遷調適平台（Taiwan Adaptation Platform, TAP）」，各有關政府機關

均須依法研議氣候變遷調適策略、或提交優先調適計畫，但僅以環境保護署為主要綜整機關，其機關間之橫向鏈結強度恐較不易與國家發展委員會相比。

此外，臺灣之國土計畫法自 2015 年底三讀通過、2016 年 5 月正式施行至今，仍尚未完成完整計畫法程序，第三階段之各縣市國土功能分區劃設作業多於 2022 年底始辦理公開展覽，依法將於 2025 年 5 月正式發布；雖國土計畫法第 10 條中明訂，直轄市、縣（市）國土計畫內容應載明氣候變遷調適計畫，惟相較於英國倫敦規範新建物須全生命週期碳評估及要求地方政府設立碳抵換基金、美國紐約因應疫情及氣候變遷調整更具彈性之土地使用管制內容、新加坡明訂植樹數量、可再生能源比例、日本提倡零碳運具及零碳建築、以及荷蘭修訂環境及規劃法以簡化與整合不同法規等，當前國土計畫中有關氣候變遷調適之內容，仍多屬概念性或原則性之指導方針。

本文主要彙整全球包括英國、美國、新加坡、日本及荷蘭等不同國家，近 5 年來所頒佈或實施有關氣候變遷調適、國土空間相關之最新內容（如表 1），其中針對氣候變遷調適計畫與國土空間規劃相關內容之資料彙整尺度層面，英國為倫敦地區、美國為紐約市及紐約州、新加坡為全國、日本為東京都、荷蘭則為國家尺度。透過不同國家與不同尺度之最新資料評析，成果將可納供臺灣後續研議氣候變遷調適相關國土空間規劃時之重要參考。

表 1 本文所彙整之近 5 年不同國家之氣候變遷調適與國土空間規劃內容

| 國家  | 氣候變遷調適                                                                                                                                                                        | 國土空間規劃                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 英國  | London Environment Strategy<br>Zero Carbon London: A 1.5°C Compatible Plan                                                                                                    | The London Plan 2021                                                                         |
| 美國  | Protecting Public Health and the Environment and Restoring Science To Tackle the Climate Crisis, E.O. 13990<br>New York State Climate Leadership and Community Protection Act | City of Yes<br>Office Adaptive Reuse Task Force<br>Permanent Open Restaurants Text Amendment |
| 新加坡 | The Singapore Green Plan 2030                                                                                                                                                 | Singapore's Master Plan 2019                                                                 |
| 日本  | Tokyo's Zero-Emissions Strategy<br>Tokyo's Net Zero Emissions Execution Plan                                                                                                  | National Spatial Strategy (National Plan)                                                    |
| 荷蘭  | The Dutch Climate Agreement                                                                                                                                                   | The Environment and Planning Act                                                             |

## 參考文獻

- Mayor of London, The London Plan 2021, Greater London Authority, UK: London (2020). Retrieved from <https://www.london.gov.uk/programmes-strategies/planning/london-plan/new-london-plan/london-plan-2021> (last visited 2022/11/15)
- Mayor of London, London Environment Strategy, Greater London Authority, UK: London, pp. 1-451 (2018). Retrieved from [https://www.london.gov.uk/sites/default/files/london\\_environment\\_strategy\\_0.pdf](https://www.london.gov.uk/sites/default/files/london_environment_strategy_0.pdf) (last visited 2023/01/07)
- Mayor of London, 1.5C Compatible Climate Action Plan, Greater London Authority, UK: London, pp. 1-35 (2018). Retrieved from <https://www.london.gov.uk/programmes-and-strategies/environment-and-climate-change/climate-change/climate-action-plan> (last visited 2022/11/15)
- Environment Team, Greater London Authority, London Energy and Greenhouse Gas Inventory (LEGGI) 2020 (2023). Retrieved from <https://data.london.gov.uk/download/leggi/4c94150a-9b7c-495b-aea1-15ae449b3208/LEGGI%202020.xlsx> (last visited 2023/01/07)
- Department of City Planning, "City of Yes: Zoning for a more equitable and sustainable city" (2022). Retrieved from <https://www.nyc.gov/site/planning/plans/city-of-yes/city-of-yes-overview.page> (last visited 2022/11/29)
- Department of City Planning, "Office Adaptive Reuse Task Force" (2022). Retrieved from <https://www.nyc.gov/site/planning/plans/office-reuse-task-force/office-resue-task-force.page> (last visited 2022/11/29)
- Department of City Planning, "Permanent Open Restaurants Text Amendment" (2022). Retrieved from <https://www.nyc.gov/site/planning/plans/open-restaurants/open-restaurants-overview.page> (last visited 2022/11/29)
- United States Environmental Protection Agency, "Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Combustion Turbine Electric Generating Units" Draft White Paper, Sector Policies and Programs Division Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, US: North Carolina (2022). Retrieved from [https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/epa\\_ghg-controls-for-combustion-turbine-egus\\_draft-april-2022.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/epa_ghg-controls-for-combustion-turbine-egus_draft-april-2022.pdf) (last visited 2023/01/07)
- Center for climate and energy solutions, "U.S. State Climate Action Plans" (2022). Retrieved from <https://www.c2es.org/document/climate-action-plans/> (last visited 2023/01/09)
- The New York State Senate, "New York State Climate Leadership and Community Protection Act(SB S6599)" (2019). Retrieved from <https://www.nysenate.gov/legislation/bills/2019/s6599> (last visited 2023/01/09)
- Urban Redevelopment Authority, "Master Plan" (no date). Retrieved from <https://www.urau.gov.sg/Corporate/Planning/Master-Plan> (last visited 2022/11/24)
- Singapore Green Plan 2030 (2021). Retrieved from <https://www.greenplan.gov.sg/> (last visited 2022/11/24)
- 日本国土交通省・「国土形成計画（全国計画）中間とりまとめを公表します『国家空間規劃（国家規劃）中期報告發布』」（2022）。  
<https://www.gov-base.info/2022/07/15/163745>（存取日期 2022/11/24）
- Bureau of Environment, TMG, Zero Emission Tokyo Strategy, Tokyo Metropolitan Government of Japan, Tokyo (2020). Retrieved from [https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/about\\_us/zero\\_emission\\_tokyo/strategy.files/Outline-of-Zero-Emission-Tokyo-Strategy.pdf](https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/about_us/zero_emission_tokyo/strategy.files/Outline-of-Zero-Emission-Tokyo-Strategy.pdf) (last visited 2022/11/24)
- Toh, C.K., "Tokyo's city sustainability: strategy and plans for net zero emissions by 2050", IET Smart Cities, Vol. 4(2), pp. 81-91 (2022). doi.org/10.1049/smc2.12033
- Bureau of Environment, TMG, Tokyo ZEV Promotion Strategy, Tokyo Metropolitan Government of Japan, Tokyo (2019). Retrieved from [https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/about\\_us/zero\\_emission\\_tokyo/strategy.files/Full-ver.ZEV-strategy.pdf](https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/about_us/zero_emission_tokyo/strategy.files/Full-ver.ZEV-strategy.pdf) (last visited 2022/11/24)
- De Graaf K.J., Platjouw F.M., Tolsma H.D., The future Dutch environment and planning act in light of the ecosystem approach, Ecosystem services, Vol. 29, pp. 306-315 (2018). doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.12.018
- Netherlands Enterprise Agency, "Introduction of the Environment and Planning Act (Omgevingswet)" (no date). Retrieved from <https://business.gov.nl/amendment/introduction-environmental-and-planning-act-omgevingswet/#:~:text=The%20Environment%20and%20Planning%20Act%20is%20made%20up%20of%2026,farming%2C%20will%20no%20longer%20exist> (last visited 2023/01/09)
- Government of the Netherlands, "Environment and Planning Act – Explanatory Memorandum" (2017). Retrieved from <https://www.government.nl/topics/spatial-planning-and-infrastructure/documents/reports/2017/02/28/environment-and-planning-act-%E2%80%93-explanatory-memorandum> (last visited 2023/01/09)
- Lin, Y., and Karperien A., "Highlights of the Dutch Climate Agreement", Baker McKenzie (2019). Retrieved from <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=f67da51d-2dd8-4367-b425-3334b03895a9%202/2> (last visited 2023/01/07)
- Government of the Netherlands, "Climate policy" (no date). Retrieved from <https://www.government.nl/topics/climate-change/climate-policy> (last visited 2023/01/09) 



# 國內公共工程施工階段 BIM技術運用現況 及與創新科技的結合

陳哲仲／泛亞工程建設股份有限公司BIM中心 經理

BIM 技術在施工端甚至竣工結束交付業主之過程，多半是以統包商為主要之角色。而真正 BIM 技術的核心價值在於資訊的提取與應用。否則 BIM 模型就與一般 3D 建模軟體所刻劃出來的模型沒什麼兩樣。

而施工中又該如何應用 BIM 技術來提前防範未來施工過程無謂重工甚至成本浪費之可能？BIM 技術除了施工中一般常規應用外；若與科技產品結合是否又能創造出更多價值？本文撰寫之目的在於將過往執行公共工程 BIM 技術時所遭遇到的問題與經驗，甚至是大家所經常面對的痛點提出個人看法與建議。

此外；這一、兩年來營建產業似乎已開始關注到「淨零減排」及企業永續與社會責任等議題；且該話題持續發酵中。藉由本文的介紹談談目前國內公共工程在施工階段的 BIM 執行現況，並引入創新科技結合的經驗，提出與營建同業共同研析與探討。

## 前言

目前國內公共工程依標案規模或性質的不同會有不同程度導入 BIM 技術的需求。早在多年前行政院公共工程委員會就已將 BIM 技術的應用納入「金質獎」競賽的評分佔比中。近幾年來公共工程發包多半採最有利標辦理招標，而 BIM 技術在承包商所提出的「服務建議書」裡，已看得出來競標廠商在備標初期就已將工進、風險評估與 BIM 技術緊密結合。更有甚者；廠商自主無償性的導入到未來整個專案裡，以吸引主辦機關青睞獲得標的可能，間接提昇國內公共工程招標另一全新形態。而採用與否與應用深入情況 … 也往往是評選委員在意的項目之一，因此成就了 BIM 技術在備標階段就已導入的優點，無形也提昇國內公共工程在競標階段的良性競爭，更有助於營建產業數位轉型的另一項契機。

近十年來國內除公共工程導入 BIM 技術外，軍事單位所屬工程也有局部導入之態勢，且應用情況不亞於公共工程統包案件之相關應用。唯因軍事工程相關保密要求等特性，在後期竣工模型移交或維運管理等應用，較

民間公共工程保守許多。但值得肯定的是國防單位對於營建新技術的引用及導入，確實令人印象深刻。

再來談談目前國內 BIM 發展現況；多半以中央部會單位或少部分縣、市政府在契約中會主動導入 BIM 技術於契約項目內，且因地域性或地方政府經費、預算問題造成台灣中、南部甚至東部公共工程導入 BIM 技術與北部產生極大落差之現象。縱使機關編有此預算，現今公共工程多半委由專案管理或設計單位進行 BIM 執行方式之規劃並納入契約文件中；日後得標廠商面對的主要對象就是業方代表人；也就是專案管理或監造單位。而業主真正對契約內執行 BIM 技術後所獲得實質效益為何？這或許會是大家比較關心的問題？但此話題牽涉到機關預算執行成效，本文就不多做評論。但必須強調的是不同性質或不同業主或許都會有不同的要求與規定；或許過程更嚴格、更簡易都不一定？但也藉由這個機會提出筆者多年觀察的結果，供大家有更多思考空間。也與同為台灣 BIM 業界的從業人員共同探究未來。

文章一開始，會在後面一再重覆提及兩個專有名詞，就在此稍做定義：

「委任方」：這邊泛指的是契約中所稱的業主或受其委託的專案管理單位（PCM, Professional Construction Management）或監造。

「受委任方」：通常指總承攬商或統包商（本文指營造廠）或其複委託廠商稱之。

接下來針對兩者間在契約執行過程經常所發生的一些認知上的問題或差異提出個人看法，也藉由此議題的提出與營造同業就未來執行契約 BIM 業務過程時提供參考。

## 現今 BIM 模型在施工階段的應用

十一年來筆者擔任公司專案契約中包含 BIM 項目的工地督導、管理等工作，一旦工地 BIM 工程師執行業務受委任方質疑、指責甚至不滿意時，筆者經常被委任方叫去工地說明解釋或提解決方案的機會司空見慣。就曾接觸過的專案會議中，委任方特別在意的問題或原因，在此整理歸納下面幾項 BIM 在契約執行過程較易發生彼此認知落差的議題：

### 過度細緻化模型（含假設工程）

目前台灣 BIM 軟體多以 Autodesk Revit 為主流，事實上該軟體確實有其優勢。唯獨建模後檔案大小及圖顯問題，亦會隨著案件規模、發展等級（LoD, Level of Development）提昇、細緻程度等級（LoD, Level of Detail）變細 … 都可能讓你在疊加一堆東西後，再來就很難操作這顆模型，除非電腦效能再往上提昇一個檔次；再不然就是切割模型（分區域、系統、棟別、層別 .. 等），或許還可以繼續建模下去。過去 BIM 技術應用過程多年來似乎充斥著 LOD 魔咒？很多委任方對 LOD 情有所鍾；對 LOD 的解釋常以模型的複雜程度主觀來斷定 LOD 300、400 …。總覺得一扇窗戶沒把窗簾（甚至連鏈條）畫進去根本就沒有達到 LOD 400，甚至房間標示牌、門把型式或是沙發、桌椅、床舖都沒擺進去（圖 1），根本未達合約規定。但事實上；翻遍契約統包需求書裡似乎也沒談到這麼細？縱使有寫到，難倒真要每一棟、每一戶通通給它畫進去？或許委任方會說；我們編的 BIM 費用那麼高，為什麼不能這樣要求？

勞動部職安署在民國 108 年起主動提供勞安設施 61 項元件庫（圖 2）供業界無償使用。其出發點是為提昇施工場域風險評估使用，雖然元件多數可參數化調整，但無形間卻增加了模型的檔案負載，若用在丁類危評僅在「特定」區域進行風險評估使用，可增進勞安人員有效辨識危害因子所在進行施工前風險防護與排除，確實是提升勞工安全科技往前的一帖良方。只不過有些委任方卻因為參賽或特殊需求會要求把所有的鷹架全畫進去（圖 3），甚至每個樓層滅火器、防護設施 … 通通給擺進去，倘若日後軟體技術再提昇、電腦效能再進化 … 這些或許都不成問題，只不過放了那麼多元件在一個巨大的模型裡，確實有幫到自已決解很多問題嗎？

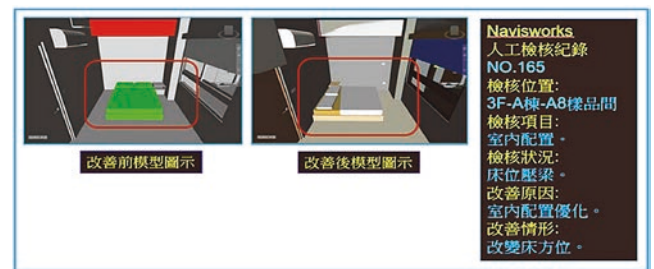


圖 1 樓層內傢俱全數建置，並用以做「風水」考量之用途



圖 2 勞動部職安署 BIM 元件庫<sup>[1]</sup>

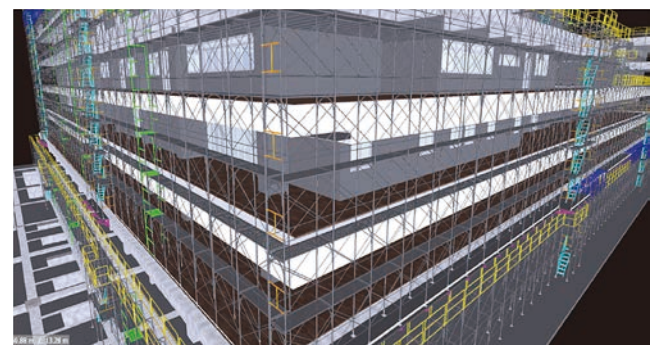


圖 3 鷹架全數建置，且鷹架各部細節過於細緻

前面談過 Autodesk Revit 一直以來就有模型檔愈畫愈大的困擾，有時候甚至大到連顯卡都已是最高端的電腦都難以負荷而變得顯示模型卡頓現象，這或許有賴軟體公司發展更新、更快模型處理技術；再不然就是有比這套更先進、更優秀的替代軟體出現。否則施工上確實有必要建置更精細的模型，都還是建議點到為止，建你有需要的模型。

筆者一直以來認為；BIM 技術就是要讓我們有未卜先知的能力，才能真正做到施工前把未來可能遇到的問題提前在電腦中預做處理或改善，避免日後重工或成本浪費的可能。至於想追求模型細緻美觀的委任方，像 Sketchup、3D Max … 這類的建模軟體會較適合。至於軟體的選用？則可以思考一下自己所需要的模型是屬於那一類的應用？

### 過度美化 4D 施工模擬

約莫十年前，筆者負責某一軍事工程的 BIM 項目，依契約規定須提供 4D 施工模擬於定期會議中展示，當時依契約規定採用的是 Autodesk Navisworks 軟體進行施工進度模擬，頂多加個旋轉特效，大致已滿足業主對工程進行方式的認知，也較傳統 2D 簡報方式來得栩栩如生。隨著近幾年來一些時時彩現（Real Time Render）軟體的出現（例如：Enscape、Lumion、Twinmotion、Fuzor …）過往那種灰暗的背景，粗糙模型不帶材質的 BIM 模型已不再吸引委任方的目光。取而代之的是場景瞬間太陽拔地而起，悠揚的蟲鳴鳥叫伴隨著人物進入模型本體，大廳亮麗的燈光效果，窗外庭院流水飛瀑，外加道路車水馬龍的熱鬧景像，著實吸引業方的目光 … 自此以後這種「標準」的工程模擬（圖 4）就與「4D 施工模擬」漸行漸遠。

而真正的 4D 施工模擬不就是要看施工網圖每一工項對應模型相對位置慢慢成長的過程，藉以分析模型元件組合流程是否會干擾到下一個工項進行？工序過程會不會有不合理的施工排程情況？哪一區塊進度超前或是落後？我想這才是真正想藉由 BIM 技術在電腦模擬蓋一次房子的真正目的（圖 5）。

### 模型干涉碰撞的調整

BIM 軟體自帶的干涉碰撞檢測功能，一直以來就是協助工程師早期發現設計與施工性相互干擾或與法規面有所抵觸之自動查找的最佳利器。由於建模初期人為製



圖 4 模型經專用軟體時時彩現後成果案例<sup>[2]</sup>

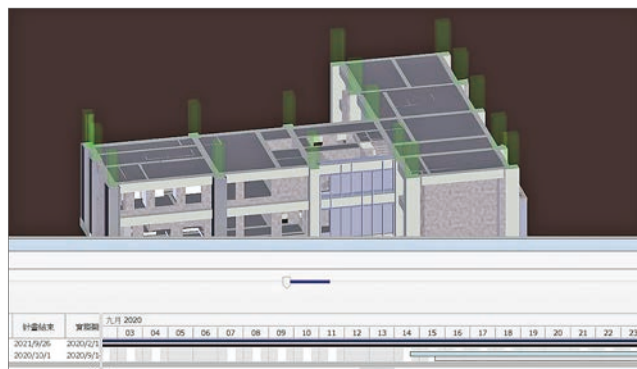


圖 5 藉由模型與網圖對應鏈結所進行工進追蹤管制的「4D 施工模擬」

圖因素經常會有梁、柱接合不佳、斜角接觸等小瑕疵出現，這種小瑕疵在軟體碰撞功能運行時就會是一處所謂的「碰撞」點，當然連同真正與別的構造物產生的碰撞積累下來，往往一次碰撞報告免不了會有數百甚至上千處的碰撞情況發生。但事實上；排除這些屬人為製圖疏失所造成的「碰撞」以後，所剩真正碰撞點數量應不致太多。而這些碰撞點經調整後，接下來可能就剩工程師無法處理而必須發疑義澄清給委任方協助釋疑的問題。但值得一提的是：碰撞點產出多寡，不代表現地 BIM 團隊成員認真與否的依據。這也是經常在工地碰到許多委任方在意甚至質疑的奇特現象。

談到干涉碰撞一詞，常見多半以機電與建築專業所產生的碰撞情況佔比最高。而機電設備（管線）更是筆者接觸 BIM 在施工階段整合以來最頭痛的工項。因為機電的專業分類甚多、甚廣（例如：消防、空調、給排水 …），就以水系統管線又分為重力與壓力管兩種，時常遇到機電整合工程師可能現場實務經驗不足，會有把重力排水管遇衝突管線直接往上繞的現象！殊不知這樣一繞根本無法排水？或是空調壓力水管遇幾處衝突，就索性呈“□”字型跨繞過衝突管線，但繞個一、兩次或許勉強可以，但連續多繞個幾次，我想管尾可能也就出不了水了？因為管壓力折損跟氣塞（air plug）等問題，

讓泵浦的出力給這些阻礙給削減掉；這也許資淺的機電整合工程師根本就沒經歷過！

再以消防系統來說，經常看到消防灑水管沒注意到下方有風管阻擋（或夾於兩風管之間），殊不知這在消防法規叫「灑水障礙」？必須降管或調整位置，否則真按此施工，日後消防檢查勢必得走改管一途。

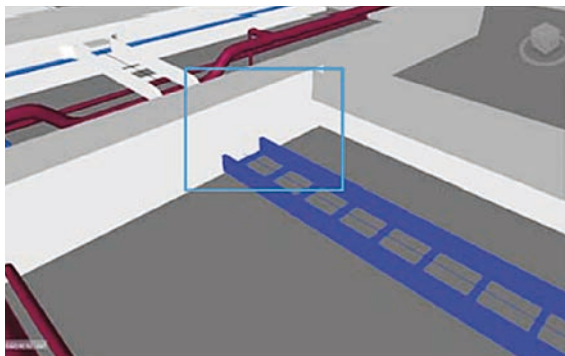
比較糟糕的是管線與建築結構衝突，經常發現梁、牆（如剪力牆）開口或套管設置位置根本影響到結構安全，例如在梁的底部開口或設套管，或是在梁靠柱邊開孔（口）等…情況（圖 6）。

上面這些問題往往可能需要各專業工程師（或技師）的協助下進行移位調整甚至結構補強，但在套繪整合會議中，BIM 協調員根本不知道問題在哪裡？機電工班甚至專業工程師根本也沒辦法對症下藥！所以培養現場實務經驗豐富的 BIM 工程師是我認為現今 BIM 界當務之急。

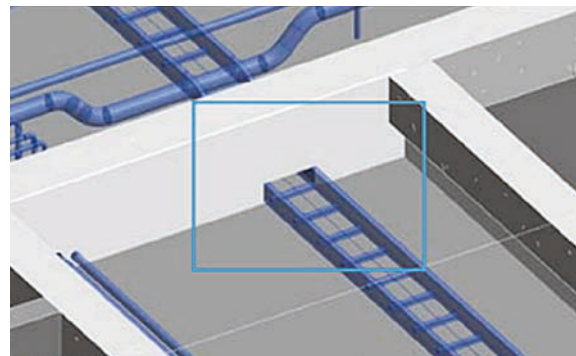
## 模型的數量「統計」或「計算」

藉由 BIM 模型產出數量表，這通常是針對有元件可清點的數量的構件；夠清楚也夠明確（例如：建築的門、窗數量；機電的配電盤、泵浦、閥件…等）。但若若要產出鋼筋、混凝土、模板、粉刷或機電管線長度…等數量，理論上沒問題；但前提是在參數化元件相關公式設置必須夠明確；柱、梁、牆、版重疊數量扣減也必須完整考量，否則市場已有很多 3D 的算量軟體會比你算的結果來得更快且精準。哪你還有需要在 BIM 軟體搞這些耗時且準確度不甚滿意的工作嗎？（圖 7）

經常看到契約書上寫道「數量產出」等相關字眼，所以施工中委任方就會毫不客氣的請 BIM 工程師算粉刷、算內/外牆磁磚、算天花板…數量。這時苦命的 BIM 工程師就得去思考用什麼方式來產出？又怎麼去計算？而往往算出的數量跟實際施作數量產生很大差異時？這時候的反查才是真正惡夢的開始。



改善前



改善後

圖 6 干涉碰撞檢討忽視結構安全於梁下層筋部截斷開口（孔）之錯誤案例

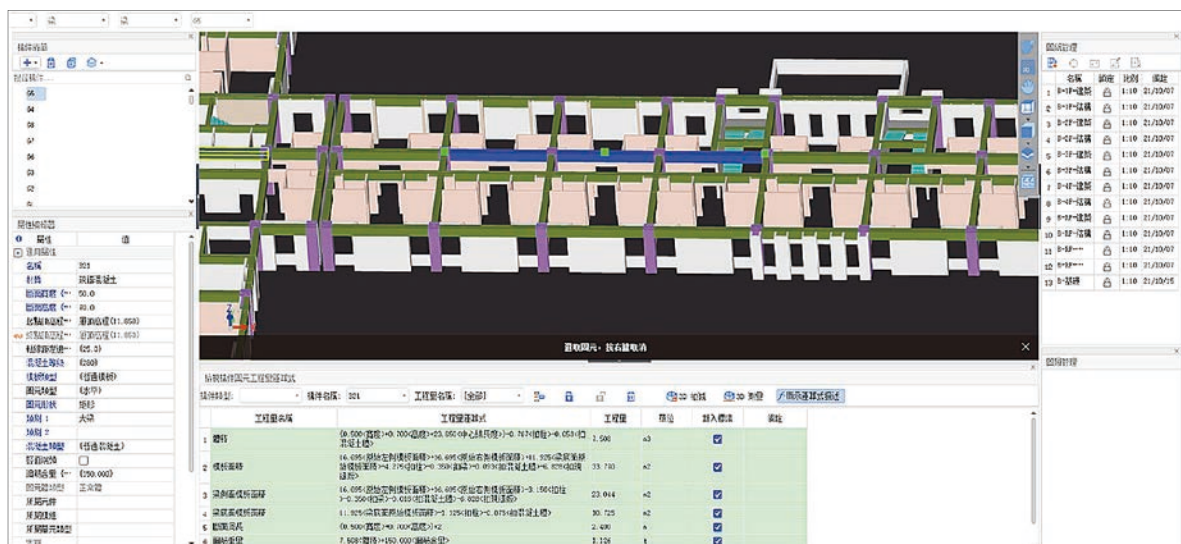


圖 7 3D 建築算量軟體

有些鋼結構建模軟體確實可產出相對精準的數量及 BOM 表，但這些數量最終還是以鋼構廠實際操作建模產出的數量的準確性會大於自己瞎子摸象所導出來的數量精準許多。秘訣無他，就在「經驗」二字而已。

至於機電部分；因為專業性的問題，例如：風管。不同番號數的鐵皮換算張數這還單純，但如果風管配合現場上繞、轉折、壓扁等狀況，除非專業風管廠商在一開始規劃時已非常明確完成套圖，主要的管件都在工廠生產妥當（不必主管接完再去量支管尺寸，然後請工廠做料）到場安裝，或許可以降低許多損料情況。

但事實上台灣又有幾家專業廠商能這樣配合？而風管情況如此，像其他大型水管、電纜線槽 … 等管線廠商也是相同情況，因此；要確切得到機電管線數量依目前台灣機電工程生態環境，實屬難度較高的一環。除非國內大型機電廠商都俱備各專業的規劃能力（可搞定各分項專業廠商，不致施工前分包商的一句話就又手足無措），或許之後要從機電 BIM 模型中提取較可靠的數量指日可待。

## 模型與施工查核

驗證模型與現場施作成果進行比對是工程查核所必須的。若現場完成現況與模型比對不符，是要修改模型還是修改現場？我想多數人會為避免麻煩而選擇修改模型。今天換一個角度思考，倘若監造人員現場施工查核發現施工圖與現地施作情況不符，會是請廠商改施工圖就好嗎？

BIM 技術的核心價值就在於 I（Information）資訊的提取，往往接近完工階段打開模型中的元件屬性欄位一看；除了元件本身自帶的資訊外，其他空無一物？而統包契約書或規範所制定的模型元件屬性應填項目，又有多少元件被正確記載實際物件的產品資訊？COBie（Construction Operations Building Information Exchange）資訊導出後又有多少資料可在日後維護管理階段派上用場？所以個人認為組織專業 IPD（Integration Project Delivery）團隊會是解決這些問題的最佳解答，只不過現今台灣營建產業分工情況以及法規面配套措施確實有其窒礙難行之處。如何解決？這在 BIM 國際標準 ISO 19650 中似乎可以用做參考。只不過每個專案 BIM 團隊會照本宣科去執行嗎？這或許就是成功與否的關鍵。

圖 8 之「組織資訊需求」（OIR）就如同業主在招標文件裡所提出的統包需求書，而「專案資訊需求」

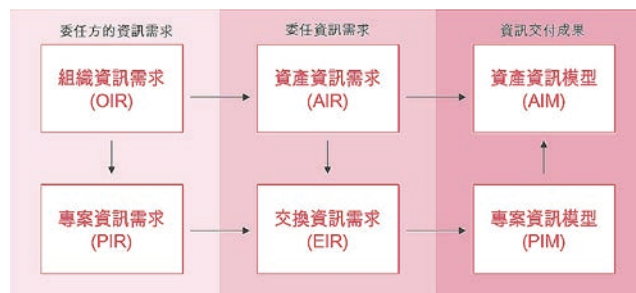


圖 8 ISO 19650-1：2018 資訊需求的層次結構圖<sup>[3]</sup>

（PIR）則是我們依據需求書所編訂的服務建議書或 BIM 執行計畫書（BEP）明確說明在該專案裡的執行計劃，藉由原需求書裡所訂定的產品規格之「資產資訊需求」（AIR）我們在共通資料環境（CDE）中進行各專業的資訊交換與 BIM 模型的整合，以達到施工前期即已完整整併各專業模型並可提供施工圖或相關資訊予施工端進行施工，減少施工前未經整合而所造成的重工或不必要的變更與工期停滯等現象。而前面這些過程可以在同一個組織（即由建築師、結構、機電技師 … 甚至設備商等關係人所組成的臨時組織）內完成，減少文件往返、釋疑停滯等不必要的時間浪費，加快整個規劃時程，俾利儘早交付成果供現場施工使用。這就是 IPD 整合專案交付較積極實務的做法。

## 談談 IPD 專案整合交付在施工階段的應用

同前述 IPD（Integration Project Delivery）整合專案交付：是一種將人、各系統、商業架構和實踐活動集成為一種流程的專案交付模式，在這種方式下，專案參與各方能夠在專案全生命週期內，包括設計、製造、施工等階段，充分利用自身的技能與知識，通過合作使得專案期間的工作效率提升，為業主創造價值，減少浪費，獲得最優的專案結果。IPD 模式的典型特徵：專案參與方在全生命週期的協作與配合，多方契約關係，風險和利益共用，由專案團隊合作進行專案決策，重要參與方提早介入專案，一定的資訊技術工具使用基礎等。

基於前述組織概念下，目前國內各專業在施工模型整合階段共同投入的狀況不甚理想。普遍契約訂有相關進度或整合會議例如：雙週進度會議、月進度會議、界面檢討會議、系統整合會議；但事實上落實度又如何？各系統商（尤其機電廠商）介入整合會議的情況又如何？機電廠商（這裡通稱機電大包比較貼切）底下各系統包商（例如所謂的水包：泛指給水、排水、消防水、

空調水 …，例如電包：泛指電力、電器安裝、弱電工程、監控工程、消防電 …。還有所謂的風系統包；例如：風管、風機、風門 … 等設備安裝廠商）這麼多的系統專業，台灣的機電大包都有辦法百分之百控管他們現場專業工班怎麼做？套筆者十多年前在工地常聽工班師傅嘴邊不時常講的一句不雅、不負責任的台語口頭禪：「先做先贏，晚做就 XXX」。各系統有各系統的專業，有規模有一定品質的機電大包或許還能控管各系統的小包，若礙於契約來價過低找到不好的分包商，則大包就更難掌控他的小包愛怎麼做。

## 竣工模型的移交與 FM（物業管理）

早期 BIM 模型到了最後竣工階段，竣工模型最後的歸處多淪落到光碟片儲存移交。而光碟片裡的模型資訊未來會怎麼運用？這恐怕就更難去探究。

近幾年來；部分縣市（例如桃園、台北市 …）已有部分政府單位將竣工模型與傳統 SCADA 自動化監控系統做整合的趨勢，以取代傳統物業管理公司委外或自行開發的 2D 圖控管理系統。此一趨勢對於提昇 BIM 在營運管理階段又將是一個全新的里程碑。BIM 在施工期間完整紀錄每項元件的過程履歷（例如：生產商、製造或安裝日期、出廠證明文件、操作維護手冊 … 等資訊）對於未來營運管理單位維護保養人員線上調閱設備完整資訊，會更加迅速確實且提昇系統維護之妥善率，藉由 3D 圖台模型的檢視，會比傳統 2D 流程圖或單線圖來得更直觀且平易近人。有利於初到任管理或維護人員更輕易地去瞭解維護過程及方法提昇 BIM 在管理端的最大效益（圖 9）。

## BIM 技術與科技結合應用

「活用 BIM 技術優於擅建 BIM 模型」，是筆者一直以來對 BIM 在施工階段應用持續努力的方向。也是一直以來要求部門同仁擅用 BIM 技術資訊提取與應用以提昇施工效率與品質，降低現場重工的可能。更希望在施工的一開始，就已把未來可能發生的問題都提前解決。而模型不再只是模型，它可以讓一個對建築外行的人，也都能輕易地經由 3D 模型直觀的視覺感受、體驗認識未來建築物完成後的樣態及施工中的各項環境現況，若導入施工中環安衛的應用，更有機會降低職災發生的可能。結合先進虛擬影像與 BIM 技術的結合，導引工程創新的未來。這就是我們一直以來想做的，而且不間斷的往這條道路邁進的主因。在此就 BIM 衍生性的創新應用，提出幾項我們的做法，也藉此與同業分享。

### 「智慧工地」應用

就跟物業管理的道理相同。模型在施工過程所做的一連串的應用；就如干涉碰撞檢討、4D 施工模擬、數量統計 … 等。而模型也可以藉由 3D 圖像的展現更能清楚明確的告知事件（EVENT）發生位置，相對於施工期間勞安或品保等方面的應用更可積極有效。

營造業界目前所稱「智慧工地」一詞的認定非常廣泛，但在我們所定義的「智慧工地」的機制是要將傳統必須由人員到場才能獲知的資訊轉變由現場 IoT 感測元件主動告知，也就是「化被動為主動」概念。再利用目前人手一機的個人手持行動裝置的助力下，實現「一機在手，彈指間掌握工地大小事」的境界（圖 10 至圖 12）。簡單地說；過去現場工程師都要去工地



圖 9 BIM 物業管理平台（天智智能科技公司提供）

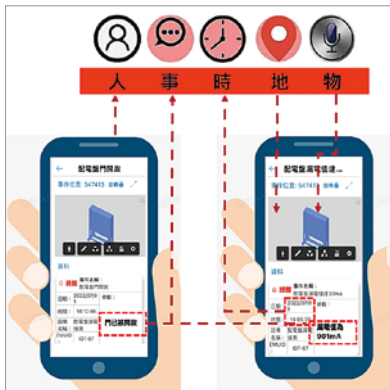


圖 10 結合 BIM 圖資並利用手機即時接收現場感測器告警訊息



圖 12 泛亞工程公司「IoT 與 BIM 模型元件模組化預警系統」架構圖

實地巡檢才能獲知的現場狀況，如今都可藉由現場智慧裝置主動告訴你；它在做什麼？什麼事情發生？發生的地點在哪？狀況如何？處理結果又如何？一來可以立即有效控管風險、二來可有效遏止人為疏乎所造成的意外，降低人力成本的支出，一舉數得。

藉由 BIM 模型輕量化後上傳至雲端平台，再利用 BIM 模型感測器元件與通訊模組進行綁定，一旦感測器探知事件發生，會經由雲端伺服器呼叫 BIM 雲平台的全模型圖資裡的該對應元件，做相對應位置的顯示，以利施工人員可直覺地在 3D 模型中確認實際發生事件的所在位置（圖 13）。而不像傳統做法僅文字或概略平面圖示意，無法立即掌握或阻止事件的持續發生。

## MR（Mixed Reality）技術的整合與應用

模型建置完成，如何判斷模型與現場是否吻合？傳統現場施工查核多半是由委任方帶著 2D 施工圖到現場與受委任方進行尺寸丈量或數量清點，而比較常見的是建築物施工過程中沒什麼變更需求，所以拿到的施工圖或許沒問題。但比較糟糕的是現場查核的構造物已變更許久，但手上所拿的版次施工圖還停留在某年某月某一核定的版次。假使圖說與現況變化不大，這時改改或許還來得及。怕的是模板工都準備封模了，這時才急急忙忙的請工班暫停施作，等搞清楚了！該改的、該拆的都已處理完，這時才又回到原點，再請監造過來查核。這麼一個折騰，可能又三、四個工作天過去。這種無謂的時間浪費，難道沒辦法解決？

BIM 雲端平台確實可以解決這類問題，但前提還是要照其審批程序執行，就可確保資訊的一致性。誤用版次圖紙的機會就會相對降低許多。2D 圖紙如此，3D 同樣道理。而且這種 3D 雲端平台不但可以讓圖資（模型）

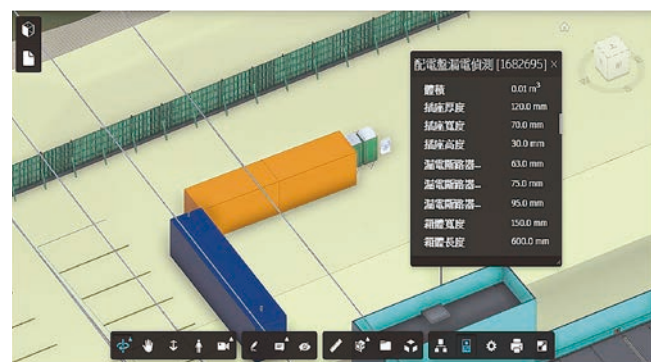


圖 13 藉由事件觸發即時連動到 BIM 模型以確認事件發生所在位置

永保最新版次，而且它還有更新的科技用法；就是 MR（Mixed Reality）技術。當然 BIM 用在 VR 甚至 AR 的應用案例很多，但這裡所要探討的是 MR 技術，因為它相較於 AR 與 VR 的技術，又會是另一項全新的體驗。

目前 MR 技術用的比較成熟的產品就屬微軟公司的 HOLOLENS。而 HOLOLENS 其相對支援性高，因此國外就有業者將其與工地安全帽、BIM 雲端平台做結合，開發出電子頭盔的應用。筆者公司購置數頂該型頭盔進行 BIM 模型與現地建築物疊合比對，確實可幫助工程在施工中的輔助查核，或施工後疊合驗收比對。如此圖模一致的驗收，相信是很多業主更想看到的結果。

此外；利用透地雷達與 MR 電子頭盔進行技術整合也能做到災害預警防護功能。以往道路開挖多半採傳統試挖方式，其相對複雜與成本性較高。而道路開挖又通常必須事前向縣、市政府道路養護單位申請「道路挖掘許可」（俗稱：路證）；而申請過程曠日廢時，要是於交通要道挖掘更是得提出交通維持計劃供主管機關道安會報審查同意後方可挖掘。管線調查後臨時

鋪面又得該路段全面銑刨加鋪 … 如此複雜程序下依舊無法保證一定不會挖到高風險之地下管線（例如：自來水分支管 / 入戶管、電力 / 電信 / 瓦斯入戶管）。難道沒有更好的方法可以化解此一多年來施工過程一再令人詬病的傳統作法？

早期就有使用透地雷達的案例，但礙於判讀雷達迴波等技術上問題，一般營造廠多半望而卻步。近年來拜科技日新月異，國外開發出之透地雷達搭配其輔助分析軟體，可讓一般人更輕易地操作與判讀（圖 14）。就筆者在南部某電廠實際應用經驗，確實達預期效果，且準確性高。藉由透地雷達本身自帶 GPS 大地座標的資料讀取，再經由 BIM 視覺化程式的輔助，可把未來施作的地下管線與現地探測所得管線的 BIM 模型進行套疊。再將整合後的 BIM 模型導入電子頭盔，於地下正式開挖之同時佩戴頭盔可時時監看機具開挖之過程，避免大型挖掘機具不慎挖斷管線之意外事故發生（圖 15）。換言之；就像自己戴上頭盔後就俱備透視眼的特異功能，可看穿地下管線所在位置之科幻般的電影情節。

憑藉著這項技術的開發整合，更可有效將 BIM 技術與虛擬影像結合，免除高成本、耗時又不一定準確

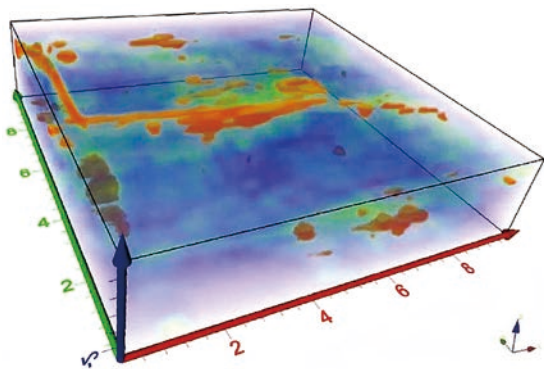


圖 14 利用透地雷達設備軟體自帶濾波功能呈現地下管線影像



圖 15 利用 MR 混合實境技術輔助道路挖掘施工

的傳統管線試挖方式。除提昇施工品質又可將 BIM 技術延伸再利用。這將是提昇國內公共工程品質更積極有效做法。

## 點雲技術的結合

點雲（Point Cloud）技術可為 BIM 建模提供另一項快速且直接的數據化分析工具。對於設計初期以至工程投備標階段，為省去漫長的建模分析等待時間，利用光達掃描技術所產生的點雲模型可做前期施工規劃參考或風險評估使用（圖 16）。

點雲必須透過專用儀器或以 UAV（無人機）影像拼接技術，再導入專用軟體形成點雲模型。惟採用光達鐳射掃描儀與空拍機拍攝影像所製作點雲模型兩者間的精度差距甚大，前者精度可控制在 1 ~ 5 mm 左右，而後者之精度卻有可能大於 1 m 以上。（但若採空載光達進行地形、地貌掃描，同樣精度有機會控制在公分以下等級）以功能性來做分類，空拍影像進行點雲模型建置之用途多應用於備標初期或僅須約略地景樣貌進行工程施工規劃使用。而採光達建置點雲模型其所獲得相對精度較高，對輔助 BIM 建模可省去相當多時間進行現場測繪之時間，優化施工流程規劃。

點雲模型亦是施工初期規劃或設計階段圖資不完整時，最佳輔助建置 BIM 模型的利器。以舊有的建築物與橋梁等基礎設施為例；在舊圖資因年代久遠或使用過程中因故修繕調整等因素下，在摒除重新收測人力與時間浪費以外的最佳解決方案，且可與新設構造物完美接合。藉由點雲模型的產出亦可經由專用軟體的輔助繪製精準可靠的 BIM 模型，無論機電管線、建築物甚至機械設備等 … 都可獲得最快速且精準的模型。

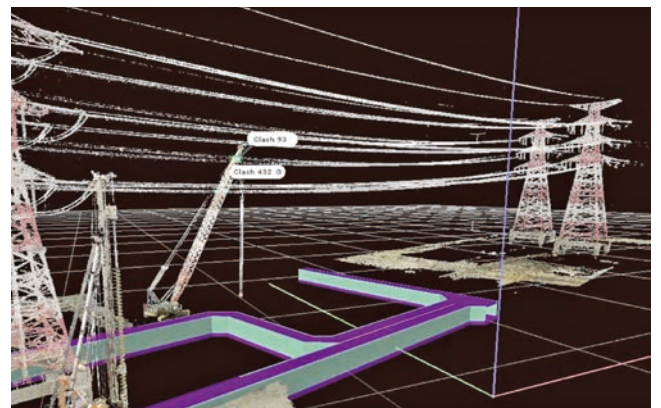


圖 16 利用點雲與 BIM 模型結合進行施工前風險評估

## 預鑄工法與模組化施工

隨著 3D 列印技術的興起，國外已有利用 3D 列印技術進行房屋「印製」生成之案例（圖 17）。只不過對比國內，此相關技術因國情不同或法規制訂等種種因素，並不太適合引進。取而代之的預鑄工法卻是一個不錯的選項。雖然國內已有大型營建商多項實際案例，但在台灣建築業畢竟還算少數，惟有靠政府在日後公共工程或獎勵興建下，或許較有可能全面發展。尤其面對台灣近幾年來營建產業缺工缺料等大環境不景氣下，預鑄工法不失是一項解決此一困境的最佳良方。對於近年倡議「淨零減排」的議題，更是一大助力。

至於模組化工法（圖 18）；多用於機水電方面較有實際之成效。例如整體式衛浴模組、預製模組化管線…等。都可有效減少現場勞動力的付出，更可減少材料的浪費，此部份更期待未來營建產業朝此永續發展的目標前進。



圖 17 利用 3D 列印技術進行房屋「印製」<sup>[4]</sup>



圖 18 機水電管線模組化預製組裝情況<sup>[4]</sup>

## BIM 與「淨零減排」的未來

或許大家都知道 BIM 在設計階段的應用不是很多嗎？確實！事實上前面所談到的多僅侷限於「施工階段」的應用，但設計階段不是更應該拿出來討論？其實我們在公共工程經常扮演的角色是統包商，理當在設計階段就應全程參與才是。但事實上營造廠的專業還是在施工領域，對於設計階段的參與還是多少有些陌生。畢竟多年來國內營建分工就是如此，縱使有 BIM 技術的介入，還是需要各專業多方磨合與嘗試，方能找出適合於營建產業數位轉型的全新作業模式，提昇營建產業再昇級。

回到 BIM 與環境永續的議題；國發會於 2022 年 3 月正式公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，提供至 2050 年淨零之軌跡與行動路徑，以促進關鍵領域之技術、研究與創新，引導產業綠色轉型。而「2050 淨零排放」的策略方針更是以「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」、「社會轉型」等四大轉型，及「科技研發」、「氣候法制」兩大治理基礎為發展藍圖。而營建產業一直以來更是眾所周知的排碳大戶；從水泥產製、產品運輸、施工以至於大量營建廢棄物的產出，再再凸顯出營建業在近幾個世紀以來對地球環境所造成的傷害，因此從根本的節能減碳做起才能有效達成與環境共存共榮。

BIM 是一項技術，不是口號。就從「能源轉型」議題來說；BIM 在設計初期就必須導入節能概念；例如太陽能轉化電能再利用，而不是傳統利用遮陽外飾板材來阻隔太陽光。室內空調設計不是以製冷來遏制溫昇，而是減少冷房能量不致外溢或回收，就如空調全熱交換器的使用。建築物雨水不是排往公共排水系統，而是有效回收再利用…。諸如前述各項能源有效回收利用都可借助於 BIM 軟體或是其相關衍生性第三方軟體的介入，都是最有效利用 BIM 技術輔助「淨零減排」的一項利器。也期待營建產業的未來能減少更多的能耗損失，為下一代人居環境貢獻一己之力。

## 參考文獻

1. 勞動部職安署網站 <https://coshms.osha.gov.tw/BIM/Model.aspx>
2. Twinmotion | 4D Construction Simulation 網址：<https://www.youtube.com/watch?v=GujXwg9F8hQ&t=50s>
3. <http://www.taiwanbim.com.tw/news/news-20190917/iso-19650-1-2018-v1-0-2.pdf> 圖 2 資訊需求的層次結構；ISO19650-1：2018 p. 20
4. <https://www.geospatialworld.net/videos/construction-technology-trends-2021/>

# 施工遭遇歷史建築古蹟或 其他文化資產 因應策略研析座談會

2023  
04-28

14:00-  
17:00

台北市南京東路5段  
171號10樓大會議室  
(中興工程顧問大樓)

工程施工中發現文化資產其相關法令規定、程序與爭議

中國科技大學建築系/文化資產保存中心  
閻亞寧 教授/主任

臺中新站施工過程遇磚造遺構之處理歷程

中興工程顧問 馮文龍 經理/大地技師

引言人

立法院法制局 陳世超 律師/土木、結構技師

報名網址：<https://reurl.cc/b7mZyM>

活動人數：達80人即停止報名

報名費用：免費參加



主辦單位：台灣工程法學會

協辦單位：中國工程師學會、中國土木水利工程學會



中國工程師學會  
Chinese Institute of Engineers  
工程永續 百年彌堅





# 捷運統包工程經驗分享發表會

時間：2023年5月12日(五)09:00~17:30

地點：新北市政府507會議室

| 時間          | 議程（分享主題）                      | 主講者                          | 主持人                |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 09:00~09:30 | 報 到                           |                              |                    |
| 09:30~09:45 | 主辦單位致詞                        | 莫仁維 董事<br>朱惕之 副市長<br>宋裕祺 理事長 |                    |
| 09:45~10:15 | 新北市捷運工程統包契約變更經驗分享             | 新北市政府捷運工程局<br>涂貫迪 科長         | 林耀長 副局長            |
| 10:15~10:45 | 三鶯線統包工程施工經驗分享                 | 台灣世曦工程顧問股份有限公司<br>謝國楠 計畫經理   |                    |
| 10:45~11:00 | 中場休息                          |                              |                    |
| 11:00~11:30 | 新北市輕軌系統專案管理特色議題經驗分享           | 中興工程顧問股份有限公司<br>蘇啟鑫 專案經理     | 鄭書恆 副總經理           |
| 11:30~12:00 | 監造單位在執行三鶯線捷運統包工程與傳統發包模式之差異及經驗 | 中興工程顧問股份有限公司<br>林冠成 工程處經理    |                    |
| 12:00~13:00 | 午餐交流（地點：招標室）                  |                              |                    |
| 13:00~13:30 | 捷運統包工程之監造經驗回饋與檢討－以安坑輕軌為例      | 亞新工程顧問股份有限公司<br>駱漢鼎 專案經理     | 林建華 副總經理           |
| 13:30~14:00 | 安坑輕軌工程設計與施工案例分享               | 新亞建設開發股份有限公司<br>劉泰儀 總工程師     |                    |
| 14:00~14:30 | 淡海輕軌統包工程經驗分享（暫定）              | 淡海統包團隊（暫定）                   | 蘇鼎鈞 副總經理           |
| 14:30~15:00 | 營造廠以三鶯捷運看統包工程之執行              | 榮工工程股份有限公司<br>林建勳 總工程師       |                    |
| 15:00~15:30 | 三鶯捷運設計經驗分享                    | 亞新工程顧問股份有限公司<br>林照順 專案經理     |                    |
| 15:30~16:00 | 中場休息                          |                              |                    |
| 16:30~17:30 | 座談會與 Q&A                      | 8 位講師與分享人                    | 李政安 局長<br>高宗正 副董事長 |

主辦單位：財團法人土木科技研究發展文教基金會、新北市政府捷運工程局、中國土木水利工程學會

協辦單位：交通部軌道局、台北市政府捷運工程局、桃園市政府捷運工程局、高雄市政府捷運工程局、

臺中市政府交通局公共運輸及捷運工程處、臺南市政府交通局捷運工程處

活動網頁：<https://sites.google.com/view/civiltechfoundation-seminar1/%E9%A6%96%E9%A0%81>

（可掃描右側QR code前往活動網頁）





# 第27屆營建工程與管理學術研討會

The 27<sup>th</sup> Symposium on Construction Engineering and Management

## 重 要 日 期

- 2023/02/13 會議線上報名及繳費開始
- 2023/02/13 論文長摘要徵稿
- 2023/05/25 論文長摘要截止
- 2023/06/01 會議線上報名及繳費截止
- 2023/06/13 論文長摘要審稿結果通知
- 2023/07/13 營建管理研討會DAY1
- 2023/07/14 營建管理研討會DAY2

## 活 動 資 訊

— 7/13 —

現場有就業博覽會的活動喔

## 投 稿 領 域

1. 人工智慧與大數據 (Artificial intelligence and big data)
2. 永續營建與智慧城市 (Sustainable construction and smart cities)
3. 設計與施工管理 (Plan, design, and construction management)
4. 營建材料與品質管制 (Construction materials and quality control)
5. 工程法律與爭議處理 (Construction laws and dispute resolution)
6. 營建資訊科技 (Information technology in construction)
7. BIM建築資訊模型 (Building information modeling)
8. 工程進度與成本管理 (Project schedule and cost management)
9. 防救災與風險管理 (Disaster prevention and risk management)
10. 工程採購與民間參與 (Construction procurement and public private partnerships)
11. 其他營建工程與管理相關課題等相關研究 (Others)

| 會議地點：國立陽明交通大學光復校區

| 報名方式：請至官網 (QR code) 線上報名

| 主辦單位：國立陽明交通大學土木工程學系、中國土木水利工程學會

| 聯絡人：

教授 高明秀：03-5712121 #54998 | mtcao@nycu.edu.tw

學生 黃柏睿：0981508837 | yc311612113.en11@nycu.edu.tw



2023營建工程與管理學術研討會



2023scem



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  
社團法人中國土木水利工程學會

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

刊登月份：

○ 50.2 ○ 50.3 ○ 50.4 ○ 50.5 ○ 50.6 ○ 51.1 共 次  
(4月) (6月) (8月) (10月) (12月) (2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：社團法人中國土木水利工程學會 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<br>帳號 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 6 | 7 | 8 | 金 額<br>新台幣<br>(小寫) | 仟萬 | 佰萬 | 拾萬 | 萬 | 仟 | 佰 | 拾 | 元 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|--------------------|----|----|----|---|---|---|---|---|

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

繳納會費

- ☐ 常年會員年費 1,200 元  
☐ 初級會員年費 300 元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

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

訂閱中國土木水利工程學刊，一年八期

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

|          |                |  |
|----------|----------------|--|
| 收款<br>戶名 | 社團法人中國土木水利工程學會 |  |
| 寄 款 人    | 主管：            |  |
| 姓 名      |                |  |
| 地 址      | □□□—□□         |  |
| 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<br>帳號戶名 |  |
| 存款<br>金額   |  |
| 電腦<br>紀錄   |  |
| 經辦<br>局收款戳 |  |

# 社團法人中國土木工程學會

## 信用卡繳納通知書

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

# 夢想和幸福

## 零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，  
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，  
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，  
戮力建設出每一項希望的工程。



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](mailto:pr@ceci.com.tw)



## 土開五域 水創十方

中國土木工程學會為國內代表性工程學術單位，結合土木及水利兩大工程專業，為國內工程技術不斷開創新局五十載。

「土開五域 水創十方」以土木及水利兩大領域的開創精神為發想，「土開五域」代表土木工程以專業開拓東、南、西、北、中五大區域的設施與建設，奠定台灣民生與經濟發展的基石；「水創十方」則象徵水利工程如泱泱大河創建文明於十方土地之上的軌跡。

若將此兩段上下排列結合，則可解讀出「土木水利工程開創五十」，象徵透過 1973 年土木、水利兩大工程學會的合併，五十年間兩大領域攜手開創台灣工程新局面的卓越精神。

## 中國土木工程學會沿革

1970 年，中國土木工程學會及中國水利工程學會舉行聯合年會，會員多人因鑒於土木、水利工程性質相似，兩學會之宗旨亦復相同，會員中多具有雙重會籍身份，為避免會員顧此失彼，集中力量，加強組織，乃提議改組合併，當獲通過。為慎重起見，復經兩學會理事長分別以通訊方式，請全體正、仲會員投票複決，亦獲多數通過。乃成立籌備委員會草擬會章，登記會員，於 1973 年 11 月 17 日在臺北市舉行聯合年會後，召開中國土木水利工程學會會員大會，通過章程，選舉第一屆理監事，正式合併。

在歷屆理事長、理監事會、主任委員們的共同努力下，學會除延續優良傳統，從事各項學術活動，編印各種出版物，增設多項獎學金外，將合併後之「土木水利」會刊提升為雙月刊，出版「中國土木水利工程學刊」與其英文版。1997 年因應網路時代來臨，設立學會官方網站，發行電子半月刊。國際活動方面，加入國際土木及建築計算學會、與美、日、韓、菲共同創建亞洲土木工程聯盟、先後與 ASCE 等 11 個國際專業組織簽署合作協議書。2007 年成功爭取亞洲土木工程聯盟第四屆亞洲土木工程大會在台北舉辦。此外，推動我國加入亞太工程師組織等。配合國際工程環境改變及推動永續發展，增設多個教育及技術委員會，又為在職工程師知識學習需要成立東部、南部、中部分會，輪流於北中南區舉行年會；以及，辦理多種專業工程研討與講座，編輯土木史等，均反映出本學會長期以來因應工程產業需求不斷進步，與產官學研各界共謀土木水利技術及環境進步之服務宗旨，始終不變。