

結合機器學習與再分析氣候資料之蒸發量推估 模型建構與區域應用探討

Development and Regional Application of a Machine Learning-Based Evaporation Estimation Model Using Reanalysis Climate Data

國立嘉義大學土木與水資源工程學系
研究生 賴淑芸 助理教授 林軒宇
Shu-Yun Lai Hsuan-Yu Lin

摘要

蒸發量為水文循環中關鍵參數，對灌溉管理與水資源配置具有高度應用潛力。然而蒸發皿觀測站分布稀疏，導致多數地區缺乏連續且可靠之資料，限制其於空間推估之應用潛力。為此，本研究結合臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）所提供之高時空解析度再分析氣候資料（TReAD），建構無需依賴地面觀測資料之蒸發量推估模型。模型核心採用極端梯度提升演算法（XGBoost），以日射量、風速、氣溫、濕度、氣壓與降雨等氣象變數及時間特徵為輸入，並採用保留法交叉驗證（Leave-One-Station-Out Cross Validation），每次保留一個測站作為測試樣本，以模擬無測站地區之推估情境。研究選取臺灣北、中、南、東部共 23 個中央氣象署測站進行全台訓練與單站測試；並於臺北、嘉義與臺東三站進行模型評估。結果顯示，模型於三站點之平均絕對誤差（MAE）分別為 0.86、0.77 與 0.95 mm/day，效率係數（CE）分別為 0.95、0.85 與 0.81，顯示模型具備良好空間泛化能力與穩定性。本研究驗證大氣再分析資料可作為地面觀測之有效替代資訊，對於偏遠或無測站區域之蒸發量推估具有高度實用潛力，亦有助於提升灌溉需水評估與水資源調度之準確性與效率。

關鍵詞：蒸發量推估，再分析氣候資料，機器學習，空間泛化，交叉驗證

Abstract

Evaporation is a fundamental component of the hydrological cycle and plays a critical role in irrigation management and water resource planning. However, the limited spatial coverage and discontinuity of Class A pan evaporation observations across Taiwan severely constrain the applicability of conventional spatial interpolation techniques, particularly in ungauged regions. To overcome this limitation, the present study proposes a station-independent evaporation estimation framework that leverages high-resolution reanalysis climate data from the Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform (TCCIP), specifically the Taiwan ReAnalysis Downscaling dataset (TReAD). The core modeling approach is based on the eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm, incorporating a suite of meteorological variables—including solar radiation, wind speed, temperature, relative humidity, atmospheric pressure, and precipitation—alongside temporal descriptors. A Leave-One-Station-Out Cross-Validation (LOSOCV) strategy is adopted to emulate ungauged conditions by iteratively reserving each station for testing while using the remaining stations for model training. The model is trained and validated using observational data from 23 Central Weather Administration (CWA) stations distributed across northern, central, southern, and eastern Taiwan, with detailed evaluation conducted at three representative sites: Taipei, Chiayi, and Taitung. The model yields mean absolute errors (MAE) of 0.86, 0.77, and 0.95 mm/day and coefficients of efficiency (CE) of 0.95, 0.85, and 0.81 for the respective sites, underscoring its robust spatial generalization capacity and predictive stability. These results demonstrate the viability of reanalysis datasets as reliable surrogates for in-situ observations and affirm the practical utility of the proposed model for evaporation estimation in data-sparse or ungauged regions, with significant implications for enhancing the precision and operational efficiency of irrigation scheduling and water resource management.

Keywords: Evaporation estimation , Reanalysis climate data , Machine learning , Spatial generalization , Cross-validation

一、前言

蒸發量為水文循環中關鍵參數，對灌溉管理及水資源調度等領域具有高度應用價值。傳統上，蒸發量多依賴蒸發皿進行直接觀測，臺灣氣象站普遍採用美國氣象局規範之 A 型蒸發皿作為觀測設備，雖能提供實測數據作為蒸散量與開放水面蒸發之依據 (Moghaddamnia et al., 2009; 葉信富等人, 2008)。然其建置與維護成本高，站點分布稀疏，且易受儀器故障與環境干擾影響，導致資料時間與空間不連續，限制其在區域尺度之應用潛力 (林軒宇, 2024)。

間接推估法如聯合國糧農組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 推薦之 Penman-Monteith (PM) 法，具理論基礎完整、應用廣泛等優勢，亦常被視為估算作物蒸散需求之標準方法 (Chung et al., 2012)，惟對氣象變數完整性要求高，且須根據地區特性進行參數校正，當觀測資料缺漏或未適當調整時，推估準確性易受影響 (高慧珊, 2007)。整體而言，無論是直接觀測或間接推估法，皆面臨觀測資料可得性不足與區域適用性不佳等挑戰。

近年來，機器學習方法廣泛應用於蒸發量推估，諸如人工神經網路、支援向量機、倒傳遞類神經網路、自組特徵映射網路及神經模糊推論系統等，皆展現出優於傳統經驗公式的預測性能，並能有效捕捉蒸發過程中的非線性關係 (Kisi, 2008; 林軒宇等人, 2015; 吳國儒等人, 2008)。然而，大多仍以傳統地面測站資料為訓練來源，對無測站區域或高比例缺測情境的適用性與穩定性仍有限。

鑑於此，本研究結合高時空解析度再分析氣候資料 (Taiwan ReAnalysis Downscaling data, TReAD) 與極端梯度提升演算法 (eXtreme Gradient Boosting, XGBoost)，建立一套不依賴地面觀測資料的蒸發量推估模式。研究以全臺測站資料建構單一模型，並透過保留法交叉驗證 (Leave-One-Station-Out Cross Validation, LOSOCV) 模擬無測站情境，以檢驗其在不同氣候與地形條件下的適用性。同時針對代表性測站進行極端事件分析，並搭配模型解釋方法探討主要控制因子之物理意義。研究成果可為偏遠或無測站地區提供可靠蒸發量資訊，支援灌溉需水評估與水資源調度，並具備科學價值與實務應用潛力。

二、研究資料與方法

2.1 研究區域與資料來源

本研究以臺灣地區設有 A 型蒸發皿 (Class A Pan) 的中央氣象署測站為研究對象，共計 23 站，分布涵蓋多樣地理與氣候條件 (圖 1)。蒸發量資料為 2019–2023 年逐日實測值；氣象因子則取自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) 之 TReAD (Taiwan ReAnalysis Downscaling) 再分析資料，包含日射量 (MJ/m^2)、平均風速 (m/s)、平均氣溫 ($^{\circ}\text{C}$)、地面氣壓 (hPa)、相對濕度 (%) 及降雨量 (mm) 等六項變數。

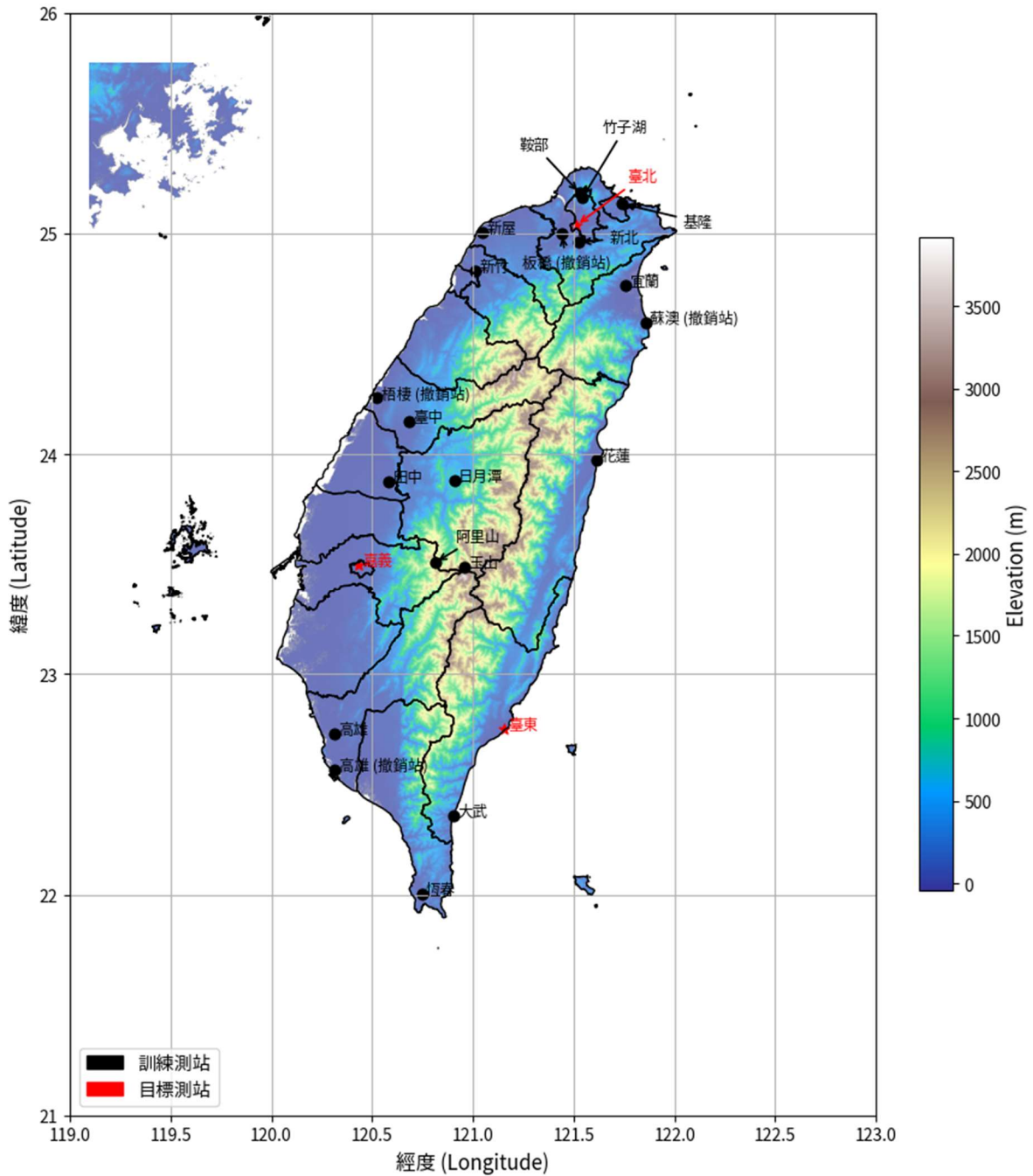


圖 1 臺灣地區氣象測站分布圖 (含目標站)

2.2 TReAD 資料特性

TReAD 資料由 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式對 ERA5 (ECMWF, 2017) 重分析資料進行動力降尺度，具備 2 公里空間解析度與日尺度時間解析度，並考量地形與土地利用等因子，能更精確反映微氣候特徵 (林秉毅等人, 2021)。與傳統測站資料相比，TReAD 具有以下優勢：

1. 完整性：避免因測站故障、維護或環境干擾造成的觀測缺測，確保資料時序連續。
2. 一致性：全域以相同數值模式與參數設定模擬，避免不同測站儀器精度或校正方式差異造成的偏差。
3. 高解析度：2 公里空間解析度可細緻呈現地形變化與微氣候特徵，尤其適合山地、沿海與盆地等地形複雜區域。
4. 多場域適用：特別適用於偏遠或無測站地區的蒸發量推估、長期氣候趨勢分析，以及氣候變遷情境模擬研究。

2.3 模型架構與特徵因子

本研究模型架構如圖 2 所示，主要包含三階段：資料前處理、模型訓練與率定、模型驗證與空間應用。

在資料前處理階段，將逐日 TReAD 六項氣象因子與蒸發皿觀測值整併，確保時間序列對齊並完成缺值處理，(Lin et al., 2013；林軒宇, 2024) 指出，時間特徵能有效捕捉蒸發的季節性與週期性變化，因此額外由日期欄位萃取月份 (1-12)、季度 (1-4)、年內日數 (1-365/366) 及年內週數 (1-52) 等四項時間特徵，與氣象因子共同構成 10 項輸入變數。

在模型建置方面，採用 XGBoost 建立氣象因子與蒸發量間之非線性關聯。超參數設定以 (林軒宇, 2024) 研究中之 Grid Search 優選組合作為參考 ($n_estimators=1000$ 、 $learning\ rate=0.01$ 、 $subsample=1.0$ 、 $max\ depth=6$)，並於本研究資料範圍內透過交叉驗證檢驗其適用性。結果顯示該組合於不同測站與時序下均能維持穩健表現，故採為最終參數設定。

在驗證階段，採 LOSOCV 模擬無測站情境，以檢驗模型在不同地理與氣候條件下的泛化能力。完成驗證後，進一步以全資料建立單一全臺通用模型，作為後續應用版本。為進一步檢視模型於極端條件下的適用性，選取研究期間蒸發量最高的兩日，繪製空間分布圖，藉以觀察氣象因子與蒸發量之對應關係，並驗證模式在極端高蒸發事件下的合理性與穩健性。

本研究使用XGBoost演算法建構迴歸模型

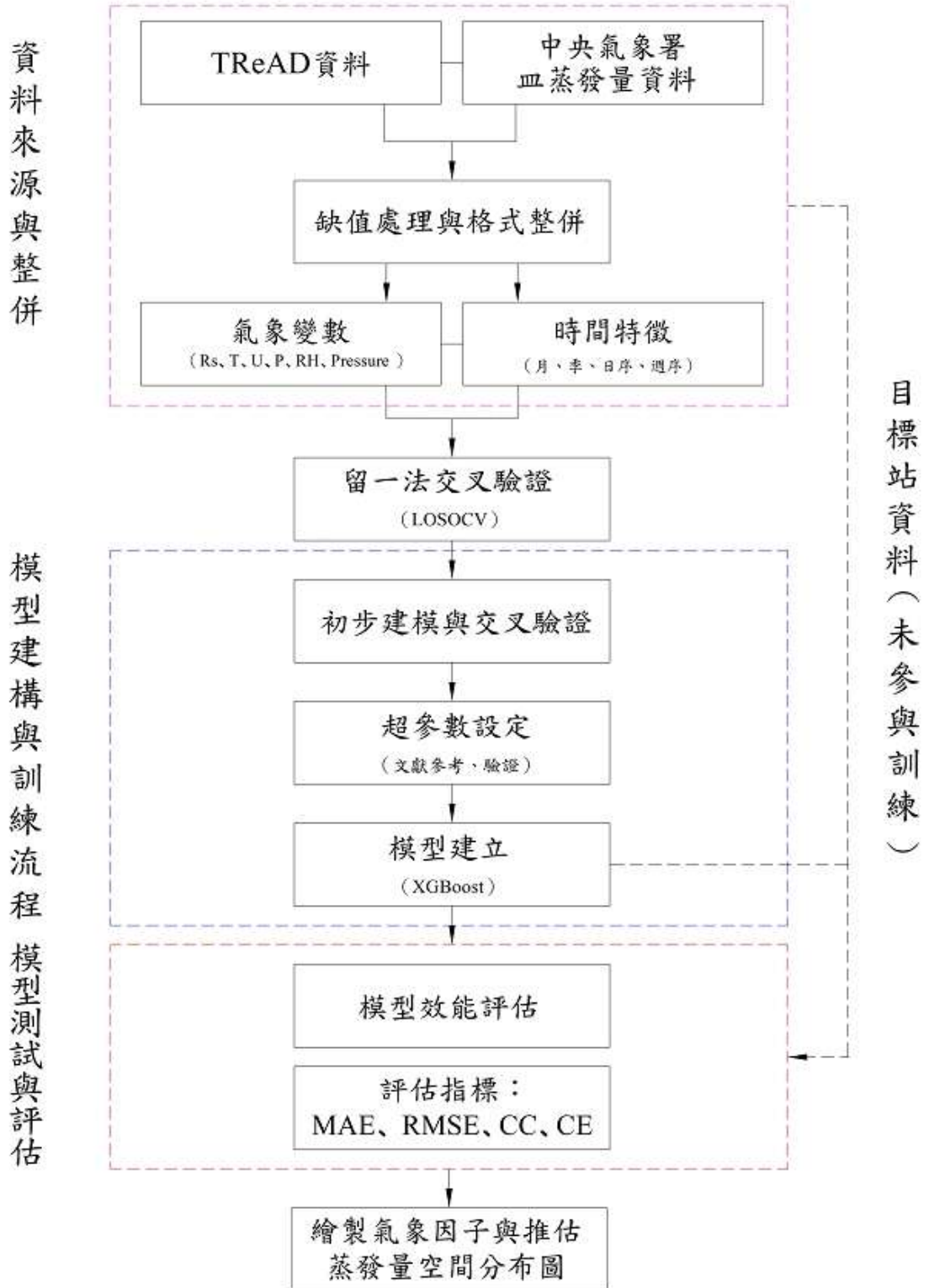


圖 2 研究流程

2.4 模型評估指標

為全面評估模型於蒸發量推估之準確性與穩定性，本研究採用四項常用且具代表性的評鑑指標，包括均值絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE)、相關係數 (Correlation Coefficient, CC) 以及效率係數 (Coefficient of Efficiency, CE)。這些指標可從不同面向評估模型效能，分別說明如下：

1. 均值絕對誤差 (MAE)

MAE 用來計算預測值與真實值之間的平均絕對差距，能直觀反映模型的準確性。數值越接近 0，代表模型的預測結果越精準。其計算公式如下：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |E_t - \hat{E}_t| \quad \text{式(1)}$$

其中， E_t 為第 t 筆樣本之觀測值， \hat{E}_t 為第 t 筆樣本之觀測值， n 為樣本數。

2. 均方根誤差 (RMSE)

RMSE 先將預測誤差平方後求平均，再開平方根，對於較大的誤差會給予更高權重。數值越小，表示模型在整體精度上表現越好，尤其在控制大誤差方面更具優勢。其計算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (E_t - \hat{E}_t)^2} \quad \text{式(2)}$$

3. 相關係數 (CC)

CC 衡量觀測值與預測值之間的線性相關程度，取值範圍為 $[-1,1]$ 。越接近 1，表示兩者變化趨勢越一致，模型對資料走向的掌握度越高。

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^n (E_t - \bar{E})(\hat{E}_t - \bar{\hat{E}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (E_t - \bar{E})^2 \sum_{t=1}^n (\hat{E}_t - \bar{\hat{E}})^2}} \quad \text{式(3)}$$

其中， \bar{E} 與 $\bar{\hat{E}}$ 分別為觀測值與推估值之平均值。

4. 效率係數 (CE)

CE 用來比較模型預測與簡單平均值預測的相對效能，範圍為 $(-\infty,1]$ 。當 $CE=1$ 時代表完美預測； $CE=0$ 表示與平均值預測相當； $CE<0$ 則表示模型表現不如平均值。

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (E_t - \hat{E}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (E_t - \bar{E})^2} \quad \text{式(4)}$$

三、結果與討論

3.1 模型整體表現

本研究採用 LOSOCV 以模擬目標測站缺乏觀測時的推估情境，各測站的驗證結果整理於表 1，並於圖 3~4 呈現。圖 3 顯示三個測試站（臺北、嘉義、臺東）在 LOSOCV 驗證下之散布圖，橫軸為實際蒸發量 (mm/day)、縱軸為推估蒸發量 (mm/day)，用以檢視模型在不同氣候區的整體擬合情形；圖 4 則分別繪出三測試站的單獨散布圖，進一步比較其推估差異。

結果顯示，模型於三測試站的日尺度蒸發量推估均具高精度與穩定性。嘉義站的誤差指標最佳，MAE 為 0.77mm/day、RMSE 為 0.98 mm/day，顯示模型在該區域能有效再現觀測值，推測與其位於西部平原、氣象因子季節性變化幅度較小有關。臺北站在 CC (0.97) 與 CE (0.95) 方面最高，顯示模型於日變化趨勢擬合及極值捕捉上具優勢；臺東站雖在高蒸發量區段略有低估，但 CC 仍達 0.96，CE 為 0.81，反映出模型在風速與降雨變化較劇烈的東部沿海地區仍能維持穩定表現。

表 1 模型各推估之評鑑指標

| | MAE(mm/day) | RMSE(mm/day) | CC | CE |
|-----|-------------|--------------|------|------|
| 臺北站 | 0.86 | 1.10 | 0.97 | 0.95 |
| 嘉義站 | 0.77 | 0.98 | 0.93 | 0.85 |
| 臺東站 | 0.95 | 1.20 | 0.96 | 0.81 |

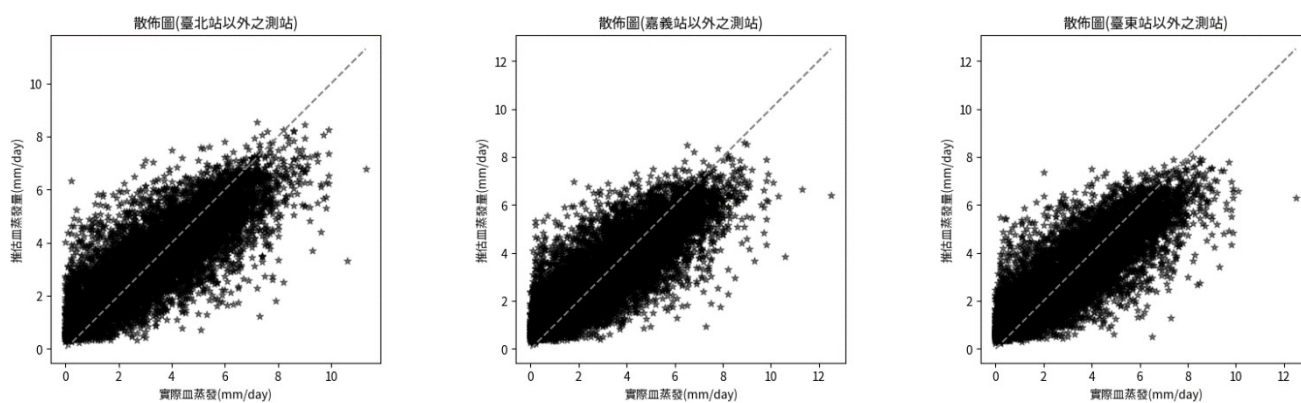


圖 3 全臺模型對各氣象站成果散布圖

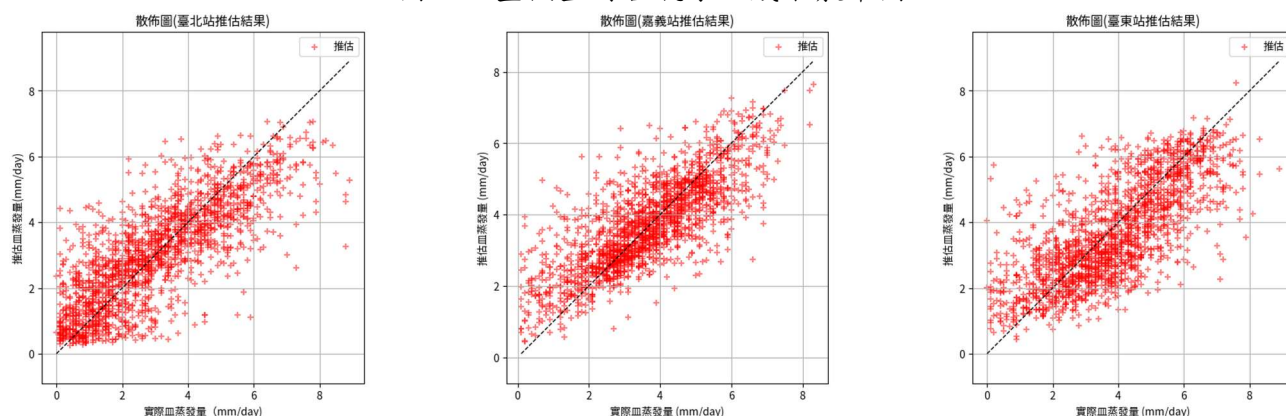


圖 4 各氣象站模型成果散布圖

3.2 因子重要性與 SHAP 分析

在 LOSOCV 驗證下，分別以臺北、嘉義及臺東三站作為測試案例，繪製其 SHAP 分析結果(圖 5)，用以檢視主要控制因子及其影響方向。日射量在三個測試站中均為影響蒸發量推估的主要控制因子，高日射條件對應正 SHAP 值，低日射條件則呈現負 SHAP 值，符合輻射能量為蒸發主要驅動來源的物理機制。風速在三站中均為第二重要因子，高風速條件下的 SHAP 值呈正向影響，顯示其在促進水汽交換過程中的關鍵作用。

第三重要因子則隨測試站的地理位置與氣候條件而有所差異：在臺北站，氣溫排序第三，顯示模型於該地應用時，溫度變化在蒸發推估中的影響相對提高；在嘉義與臺東站，降雨量則排名第三，顯示模型在這些情境下，降雨事件及伴隨的雲量變化對蒸發量短期變化的解釋作用更為顯著。相對濕度、氣壓及時間特徵(如年內日數、月份、季度)則普遍排序靠後，對日尺度蒸發量的直接影響有限，但可能透過與主要氣象因子的交互作用間接影響推估結果。

整體而言，雖然三測試站的主要控制因子排序大致一致，但次要因子的差異顯示，模型在不同地區進行推估時，會依據當地氣候與地形特徵調整各變數的重要性，展現其結果與區域氣候機制的合理一致性。

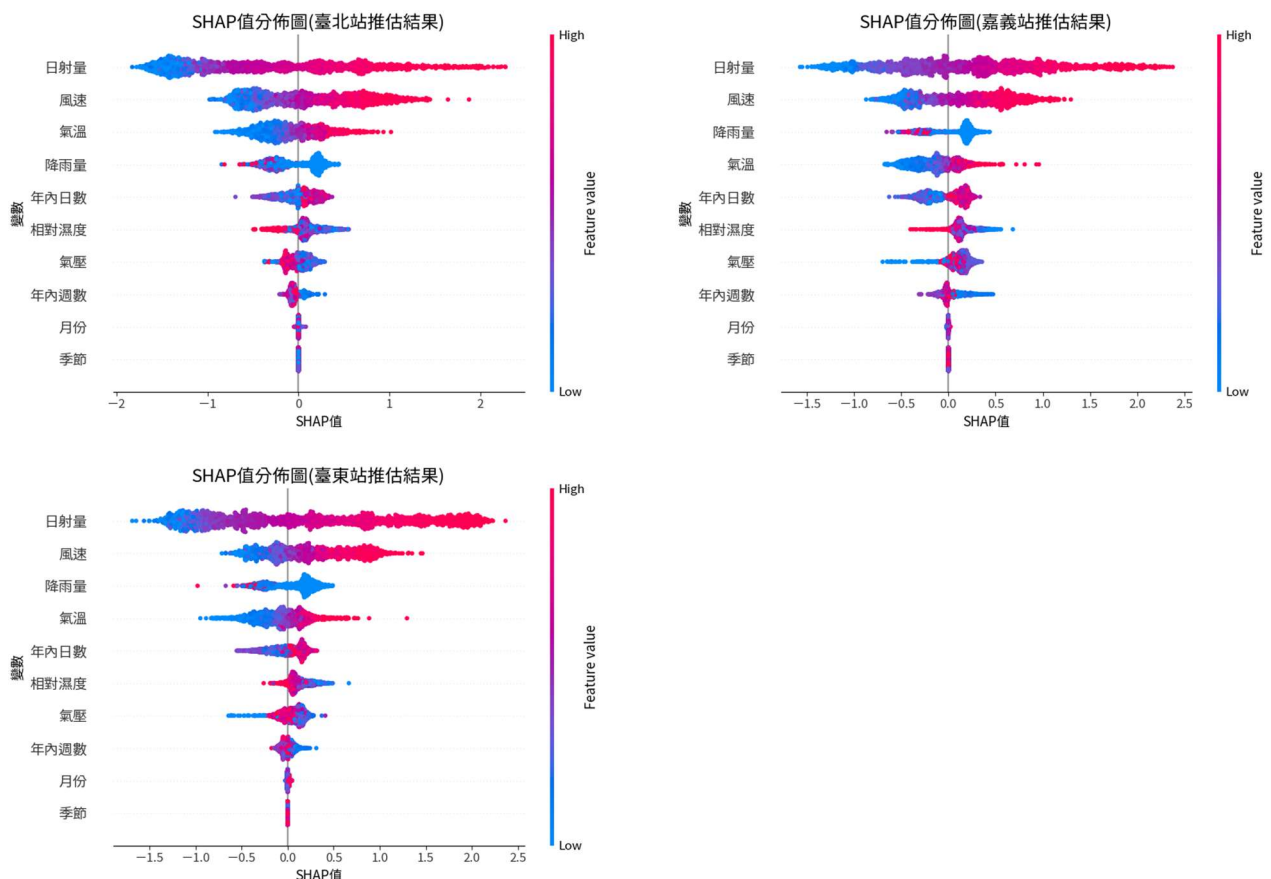


圖 5 各氣象站模型 SHAP 值分布圖

3.3 極端高蒸發日空間分布分析

為檢驗模式在極端事件下的表現，本研究選取 2019~2023 年間全臺蒸發量最高的兩日（2021 年 6 月 16 日、2023 年 7 月 5 日）作為分析案例，並以全臺完整資料訓練後之單一模式進行空間推估（圖 6~7）。

在 2021 年 6 月 16 日（圖 6），南部地區受鋒面降雨影響，降雨量偏高，對應的日射量顯著減弱，相對濕度上升，能量供給受到抑制，使得中南部地區蒸發量呈現低值。反之，北部與東部因日射充足、相對濕度較低，並伴隨適度風速，推估蒸發量維持相對高值，顯示模式能合理反映雲雨過程對蒸發抑制的物理作用。

在 2023 年 7 月 5 日（圖 7），全臺普遍晴朗少雨，降雨量極低，日射量廣泛偏高，相對濕度亦處於低值，加上西部與東部沿海的風速明顯偏強，使得低海拔平原與沿海地區蒸發量呈現大範圍高值。相較之下，中央山脈及高海拔地區因氣溫偏低、地形遮蔽造成日射減弱，蒸發量顯著偏低，呈現明顯的空間對比。

綜合比較可知，高蒸發區普遍出現在日射量強、氣溫較高且濕度偏低的地區，並進一步受到沿海風速增強的推升作用。相對地，低蒸發區則主要分布於降雨頻繁、濕度較高的區域，或是高山地帶因氣溫偏低及地形遮蔽造成日射減弱而形成的環境。整體而言，模型在兩種氣候背景下皆能合理再現蒸發過程的主要控制機制，顯示其具備穩健的再現能力與物理解釋性。

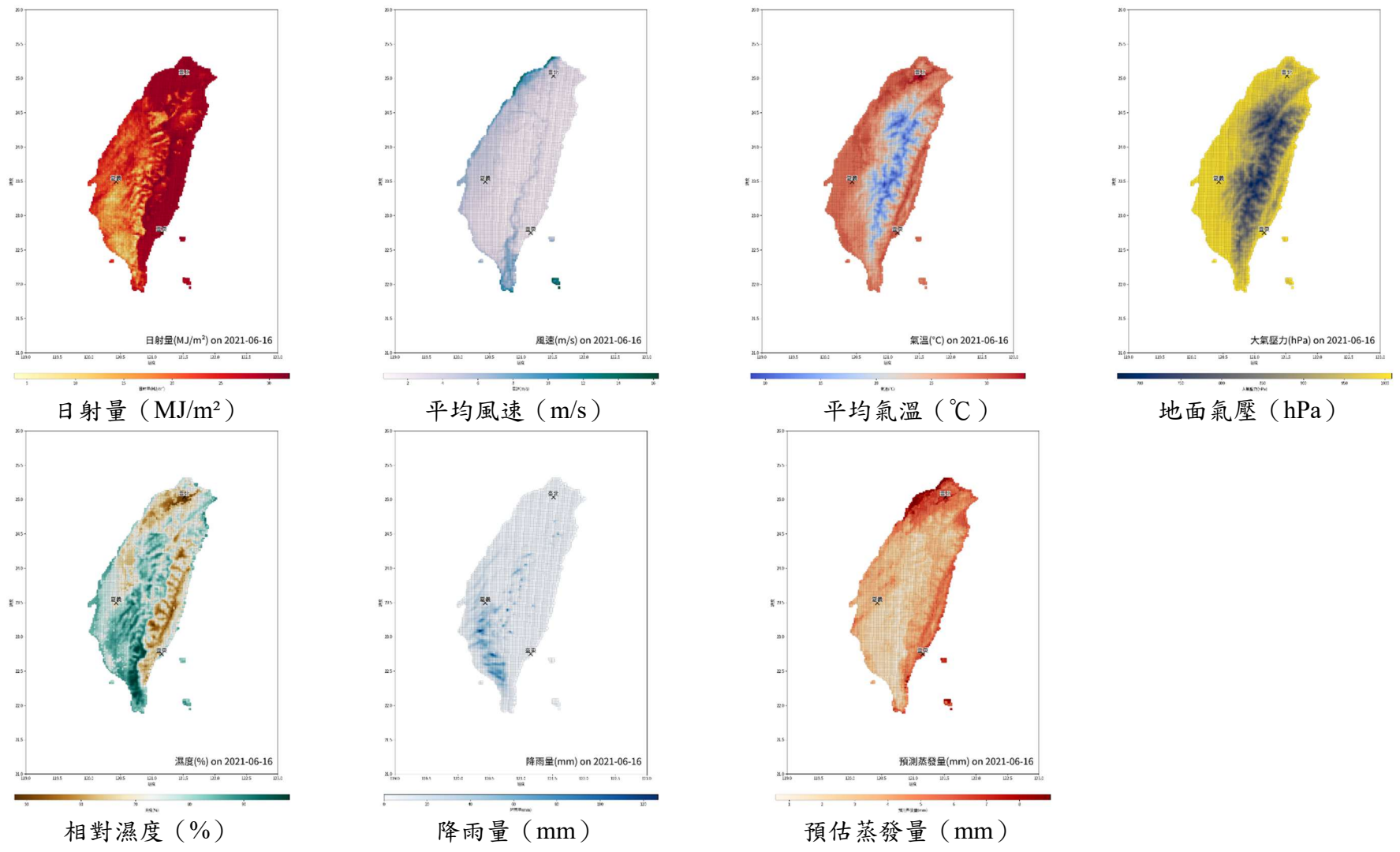


圖 6 氣象因子與推估蒸發量空間分布圖 (2021 年 6 月 16 日)

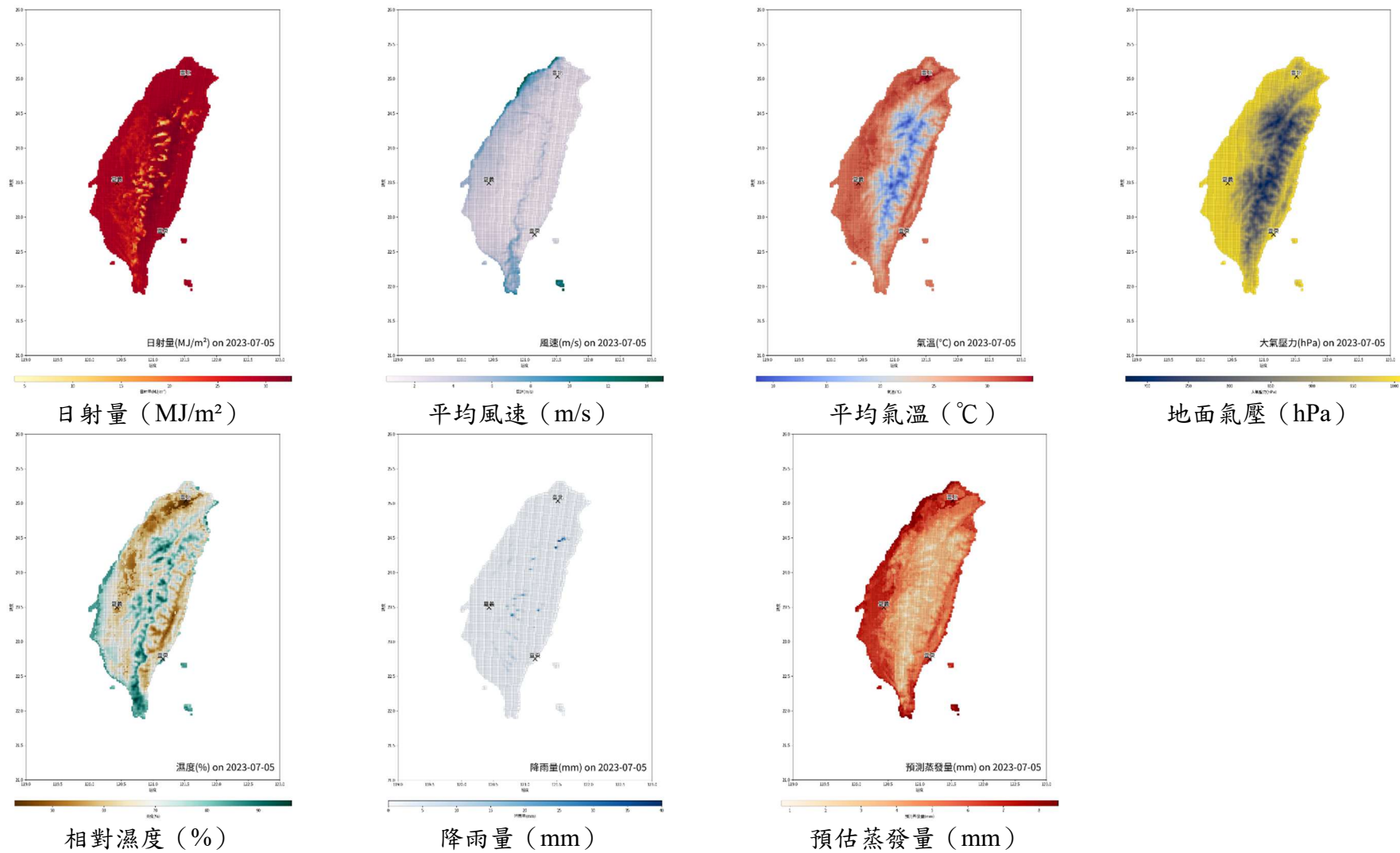


圖 7 氣象因子與推估蒸發量空間分布圖 (2023 年 7 月 5 日)

四、結論

本研究結合 TReAD 再分析氣象資料與 XGBoost，建立一套不依賴地面測站的蒸發量推估模式，並透過 LOSOCV 驗證其在不同氣候與地理條件下的泛化能力。結果顯示，模型能穩定再現日尺度蒸發量的變化，並捕捉極端高值事件，凸顯其在處理非線性與觀測稀疏條件下的優勢。

因子重要性分析確認日射量與風速為主要控制變數，影響方向符合蒸發的物理機制，顯示模式不僅具推估精度，也兼具可解釋性。極端事件檢驗則進一步驗證模型於不同氣候背景下的合理性與穩健性。

整體而言，本研究證實再分析資料可作為地面觀測的有效替代來源，所建模式能為偏遠或無測站區域提供連續且可信的蒸發量資訊，並支援灌溉需水評估與水資源調度。

致謝

本研究衷心感謝臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台提供之資料，並感謝國科會研究計畫（NSTC 113-2222-E-415-002 -）之支持。

參考文獻

1. Chung, C.H., Chiang, Y.M., and Chang, F.J., "A Spatial Neural Fuzzy Network for Estimating Pan Evaporation at Ungauged Sites," *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 255-266, 2012.
2. Kisi, O., "The Potential of Different ANN Techniques in Modeling Evapotranspiration," *Hydrological Processes*: Vol. 22, No. 14, pp. 2449-2460, 2008.
3. Lin, G.F., Lin, H.Y., and Wu, M.C., "Development of a Support-Vector-Machine-Based Model for Daily Pan Evaporation Estimation," *Hydrological Processes*, Vol. 27, pp. 3115-3127, 2013, doi:10.1002/hyp.9428.
4. Moghaddamia, A., Gousheh, M.G., Piri, J., Amin, S., and Han, D., "Evaporation Estimation Using Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Techniques," *Advances in Water Resources*, Vol. 32, No. 1, pp. 88-97, 2009.
5. 吳國儒、高慧珊、鍾昌翰、何宜樺、張斐章，「以類神經網路推估蒸發量」，*農業工程學報*，第 54 卷，第 3 期，頁 1-13，2008。
6. 林秉毅、鄭兆尊，「歷史觀測資料補遺救星——臺灣歷史氣候重建資料」，*臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台電子報*，第 46 期，2021。
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/user/km_newsletter_one.aspx?nid=2021032311041
7. 林軒宇，「結合 XGBoost 模型與 TReAD 數據建置蒸發量推估模型：從單點觀測到區域空間分布」，*中國土木水利工程學刊*，已接受。
8. 林軒宇、劉說安，「以支援向量機為基礎於有限氣象資料進行蒸發補遺」，*農業工程學報*，第 61 卷，頁 1-10，2015，doi:10.29974/JTAE.201512_61(4).0001。
9. 葉信富、李振誥、陳忠偉、張格綸，「評估蒸發皿係數以推估台灣南部地區蒸發散量之研究」，*農業工程學報*，第 54 卷，第 3 期，頁 27-35，2008。
10. 高慧珊，「以自組特徵映射網路推估蒸發量」，*國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文*，頁 1-74，2