農業工程學報 | 第 70 卷 - 第 4 期 |
中華民國 113 年 12 月出版

自由水面蒸發公式研發及台灣水庫蒸發水量估計

ESTABLISHING FREE-WATER EVAPORATION FORMULA AND ESTIMATING RESERVOIR EVAPORATION IN TAIWAN

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授
陳 憲 宗*
Shien-Tsung Chen

國立成功大學
水利及海洋工程學系
碩士
陳 姵 蓁
Pei-Chen Chen

國立成功大學
水利及海洋工程學系
碩士
潘 詠 瑄
Yung-Hsuan Pan

摘　要

本研究以 PenPan V2 模式與 PenPan V3 模式的空氣動力與輻射能量平衡理論，探討臺灣十個氣象站的 A 型及 20 公分蒸發皿的蒸發量成因與比例。由分析結果得知，A 型蒸發皿的邊壁效應占 27%，自由水面蒸發量為皿蒸發量的 73%；20 公分蒸發皿的邊壁效應占 58%，自由水面蒸發量為皿蒸發量的 42%。本研究結合兩蒸發皿的月蒸發量及邊壁效應影響比例資料，推估無邊壁效應下的自由水面蒸發量，並建立利用皿蒸發量推估自由水面蒸發量的簡便回歸公式，亦即將 A 型皿蒸發量乘以 0.74、將 20 公分皿蒸發量乘以 0.54，可得到自由水面蒸發量估計值。為推估未有皿蒸發觀測之地點的自由水面蒸發量，本研究採用全天空日射量及氣溫資料，建立區域化自由水面蒸發推估公式。本研究進而利用區域化公式，估算臺灣水庫的自由水面蒸發深度及蒸發體積，對於水庫水資源及水平衡的掌握，提供簡便且精確的水庫蒸發量估計值。

關鍵詞：自由水面蒸發、蒸發皿、邊壁效應、區域化公式、水庫蒸發量。

* 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
701 臺南市東區大學路 1 號，chen@gs.ncku.edu.tw

ESTABLISHING FREE-WATER EVAPORATION FORMULA AND ESTIMATING RESERVOIR EVAPORATION IN TAIWAN

Shien-Tsung Chen*
Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

Pei-Chen Chen
Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

Yung-Hsuan Pan
Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

This study used the aerodynamics and energy balance theories to investigate the pan evaporation. PenPan V2 Model and PenPan V3 Model were applied to estimate the evaporation from the Class A evaporation pan and the 20-cm evaporation pan, respectively, at 10 stations in Taiwan. Analysis results revealed that for the Class A evaporation pan, the aerodynamics and radiation contribute 22% and 78% of the evaporation rate, respectively; for the 20-cm evaporation pan, the aerodynamics and radiation contribute 25% and 75%, respectively. The study estimated the influence of side wall effect on the evaporation and inferred that the free-water evaporation accounts for 73% of total evaporation measured by the Class A evaporation pan and 42% by the 20-cm evaporation pan, with side wall effect contributing 27% and 58%, respectively. This study used monthly pan evaporation data and side wall effect ratios from both evaporation pans to estimate the free-water evaporation without side wall effect. A simple method to estimate the free-water evaporation is to multiply the observations of the Class A evaporation pan by 0.74, and to multiply the observations of the 20-cm evaporation pan by 0.54. This study further developed three regional free-water evaporation formulae by utilizing the solar radiation and air temperature. These regional formulae were applied to estimate the free-water evaporation from major reservoirs in Taiwan.

Keywords: Free-water evaporation, Evaporation pan, Side wall effect, Regional formula, Reservoir evaporation.

Chen, S.T.*, Chen, P.C., & Pan, Y.H. (2024). “Establishing free-water evaporation formula and estimating reservoir evaporation in Taiwan.” *Journal of Taiwan Agricultural Engineering,* 70(4), 17-30.
https://doi.org/10.29974/JTAE.202412_70(4).0002

一、前言

水資源為生物生存及人類經濟發展的重要自然資源，臺灣四面環海，橫跨熱帶及副熱帶季風氣候，多元的氣候特性為臺灣帶來豐沛的降雨量。但臺灣天然地形陡峭、河川短急及降雨時空分布不均，各地豐枯水期之水資源差異顯著，中南部地區於枯水期時，需高度依賴水庫的水資源蓄存量；加上極端氣候及全球暖化的衝擊，臺灣面臨極大的乾旱風險，水庫能蓄豐濟枯，若能有效估計水庫蒸發水量，並藉由水資源的調度及合理分配提高對水資源的運用效益，可降低乾旱對社會經濟及生活的影響。

地球上的水文循環為水於大氣、海洋及陸地三大系統間，以不同的形式移動以維持平衡，其動力來源為太陽輸出的輻射能量，此能量將水從地表或水體以蒸發作用形式，將液體水轉變成水蒸氣進入到大氣中，為水文循環的主要驅動力，顯見蒸發現象之重要性。蒸發資料通常藉由量測蒸發皿的蒸發量而得，但由於蒸發皿邊壁為金屬材質，金屬邊壁吸收太陽的短波輻射及環境的長波輻射能量後，會造成蒸發量增加的影響，此現象稱之為「邊壁效應」，因此蒸發皿的蒸發量不能代表實際的自由水面蒸發量。

中央氣象署早期以 20 公分蒸發皿觀測蒸發量，於 1973 年起各氣象站改用世界氣象組織建議規格的 A 型蒸發皿進行量測，逐漸淘汰 20 公分蒸發皿。本研究應用 PenPan V2 模式 (Lim *et al*., 2016) 分析 A 型皿蒸發量、應用 PenPan V3 模式 (Wang *et al*., 2018) 分析 20 公分皿蒸發量，以物理方法推估作用於皿蒸發量的輻射效應與空氣動力效應，並推估蒸發皿邊壁效應占蒸發量的比例，進而得到蒸發皿的實際自由水面蒸發量。本研究進一步利用推估的自由水面蒸發量，配合臺灣氣候變遷推估資訊與知識調適平台 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 的全天空日射量及氣溫資料，建立實用的區域化自由水面蒸發推估公式，可在無蒸發皿觀測資料時，利用氣溫及日射量即可推估自由水面蒸發量。本研究再利用自由水面蒸發推估公式，估算臺灣多座水庫的自由水面蒸發量 (蒸發深度)，配合各水庫庫容曲線，推估各水庫的逐月蒸發水量 (體積)。

二、文獻回顧

2.1 自由水面蒸發公式

根據 Dingman (2015) 之定義，當開放水域表面在當時氣象條件下且無水流能 (water-advected energy) 效應及蓄熱效應時，此時的蒸發速率即為潛勢蒸發量 (potential evaporation)，亦稱為自由水面蒸發量 (free-water evaporation)。自由水面蒸發量 (潛勢蒸發量) 的推估會受到氣象條件、水體特性及環境因素等影響，許多學者發展模型並予以改進以推估自由水面蒸發量。以下將常見的潛勢蒸發 (或蒸發散) 公式作簡要介紹：Penman 公式 (Penman, 1948) 為英國氣象學家 Howard Penman 於 1948 年所提出，Penman 發展輻射能量與空氣動力組合方程式，廣泛應用於估計開放水域、草地及裸露土壤的蒸發量。Penman–Monteith 公式 (Monteith, 1981) 為 John Monteith 於 1981 年修改 Penman 公式後提出，Monteith 考量到植物體的內在阻力及環境的外在阻力，能更準確地估計植物及土壤的蒸發及蒸散過程。Priestley–Taylor 公式 (Priestley and Taylor, 1972) 為 Charles Priestley 與 R.J. Taylor 於 1972 年提出，此法將 Penman 公式簡化，以能量平衡方法估計蒸發量，將平衡蒸發速率乘上經驗常數，以解釋即使在最小平流條件下依然存在蒸氣壓差的情況。Thornthwaite 公式 (Thornthwaite, 1948) 為 Charles Thornthwaite 於 1948 年提出，Thornthwaite 公式以月平均溫度估算潛勢蒸發散量，但於不同氣候條件下時需要進行調整；Hamon 公式 (Hamon, 1961) 為 W.R. Hamon 於 1961 年提出，同樣以平均溫度估算潛勢蒸發散量，使用上極為簡便。

2.2 PenPan 模式發展

為了計算潛勢蒸發或潛勢蒸發散，許多學者建立不同的物理模型；Penman (1948) 提出自由水面蒸發量推估方程式，其需要參數包括氣溫、氣壓、風速及太陽輻射等。Thom *et al*. (1981) 針對蒸發皿的空氣動力學，研究自由對流及強制對流的作用。Rotstayn *et al*. (2006) 結合 Thom *et al*. (1981) 的空氣動力學理論與 Linacre (1994) 的輻射理論，發展出簡易的蒸發皿模型－PenPan 模式，以輻射能量交換與空氣動力學理論對蒸發皿的物理特性進行探討，進而估計皿蒸發量。Lim *et al*. (2016) 對 PenPan 模式進行修正，並將時間尺度放大，以月為單位進行分析，發展新的模型稱為 PenPan V2 模式，於皿蒸發量的估計上，仍以輻射能量交換與空氣動力學理論計算之。由於 PenPan V2 模式只模擬蒸發皿水體及側邊壁的輻射能量交換，忽略蒸發皿內緣及底部的

輻射能量交換，因此 Wang *et al*.(2018) 對 PenPan V2 模式進行修改，針對蒸發皿的不同區塊進行輻射分量的計算，發展 PenPan V3 模式以應用於蒸發皿內緣及底部受輻射量影響較大的蒸發皿。

三、研究資料

3.1 研究測站與蒸發資料

中央氣象署採用蒸發皿來觀測蒸發量，早期自 1934 年開始採用 20 公分蒸發皿，其規格為直徑 20 公分，深為約 10 公分，蓄水深度約 2 公分；自 1973 年起逐步改用世界氣象組織建議規格的 A 型蒸發皿進行量測，其規格為內徑 120 公分，深約 25 公分，蓄水深度約 18 至 20 公分，兩種蒸發皿的外觀型式如圖 1 及圖 2 所示。中央氣象署自 1973 年起開始有 A 型蒸發皿觀測資料，而大部分氣象站於 1994 年年底停止 20 公分蒸發皿之觀測，兩種蒸發皿同時觀測之期間約有 20 餘年；然各氣象站的觀測期間不一，且部分氣象站或時段未有完整連續的長期觀測資料，因此本研究考慮氣象站資料完整度、觀測年限，

圖 1　20 公分蒸發皿 (圖片來源：中央氣象署網頁)

圖 2　台北氣象站 A 型蒸發皿

以及臺灣氣候變遷推估資訊與知識調適平台 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 的日射量及氣溫資料年份 (詳如第 3.2 節)，篩選後共整理出 10 個氣象站之資料進行分析，氣象站分別為臺北、宜蘭、梧棲、臺中、花蓮、嘉義、臺南、臺東、高雄及恆春，資料年限為由 1980 年到 1994 年，共 15 年。

由於 20 公分蒸發皿的邊壁體積與水體的比例，較 A 型蒸發皿來得大，因此 20 公分蒸發皿的邊壁效應也較大，在相同的氣象條件及環境下，20 公分蒸發皿的觀測值也會大於 A 型蒸發皿的觀測值。依方貽萱 (2017) 之研究，台灣各氣象站 20 公分皿蒸發量相對於 A 型蒸發皿蒸發量的比值，介於 1.19 至 1.64 之間，平均比值為 1.42。

3.2 全天空日射量及氣溫

本研究採用的全天空日射量及氣溫資料，為臺灣氣候變遷推估資訊與知識調適平台 (TCCIP) 的網格化逐日資料，全天空日射量單位為 MJ/m^2，資料年份為 1980 年至 2022 年；氣溫單位為℃，資料年份為 1960 年至 2022 年。本研究選取兩項資料共同年份，並配合蒸發皿觀測資料，將 1980 年至 1994 年的全天空日射量及氣溫的日資料整理為月資料，運用於後續分析。

3.3 相關氣象因子

大氣中能量的輸入、輸出及水氣壓差等因素會影響蒸發現象，本研究於中央氣象署氣象站的觀測資料中，統整相關氣象因子，包括氣溫、全天空日射量、測站氣壓、水氣壓、相對溼度、平均風速等，應用於 PenPan V2 模式與 PenPan V3 模式，進行輻射與空氣動力分量計算，進而推估蒸發皿蒸發量。

3.4 水庫庫容曲線

為估計水庫之自由水面蒸發體積，本研究收集臺灣水庫的庫容曲線，亦稱水位–面積–容量曲線，由水庫之觀測水位，即可推算蓄水面積，配合自由水面蒸發深度，即可估計水庫之自由水面蒸發體積。本研究統整之水庫庫容曲線資料，北部區域有：新山、翡翠、石門、寶山第二水庫；中部區域有：永和山、明德、鯉魚潭、德基、霧社、日月潭、湖山水庫；南部區域有：仁義潭、曾文、烏山頭、南化、牡丹水庫，

共 16 座水庫。各水庫蓄水量資料年份不同，採用之資料年份為 2004 年至 2021 年。

四、PenPan 模式

本研究分別應用 PenPan V2 模式估計 A 型皿蒸發量、PenPan V3 模式估計 20 公分皿蒸發量。本研究參考潘詠瑄 (2022) 的碩士論文，簡要介紹 PenPan V2 模式及 PenPan V3 模式的原理，以及淨輻射分量與空氣動力分量的計算；詳細理論及方程式推導，可參考潘詠瑄 (2022) 及陳姵蓁 (2024) 的碩士論文。

4.1 PenPan V2 模式

Rotstayn *et al.* (2006) 發展 PenPan 模式對於蒸發皿的物理特性進行探討，以輻射能量交換與空氣動力學理論估計皿蒸發量。輻射能量交換分為短波輻射及長波輻射的計算，其中短波輻射能量源自於太陽，長波輻射主要源自於環境物質，包括地表、大氣及蒸發皿邊壁等，而輻射能量的損失部分則須考慮到地面、水面及邊壁的反射率。

Lim *et al.* (2016) 將時間尺度放大，視蒸發皿於穩態條件下，其蓄熱量變化為零，因此對 PenPan 模式進行修正，所發展的新模型稱為 PenPan V2 模式。PenPan V2 模式將影響蒸發皿蒸發量的能量區分為空氣動力分量與輻射分量，如圖 3，空氣動力分量僅作用於水體，而輻射分量會影響水體及蒸發皿邊壁的能量平衡。水體接受空氣動力及輻射能量造成的蒸發量，即為自由水面蒸發量；自由水面蒸發量與蒸發皿量測到的蒸發量不同，皿蒸發量還受到邊壁效應的額外能量影響，因此皿蒸發量會大於實際的自由水面蒸發量。皿蒸發量的估計，以輻射能量交換與空氣動力學理論計算，分別簡要敘述如下：

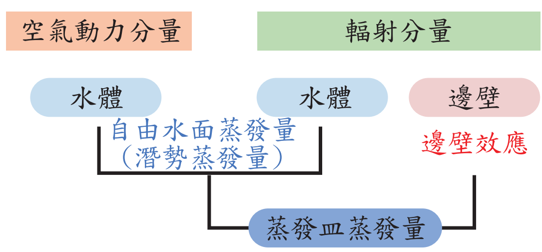

圖 3　PenPan V2 模式之空氣動力及輻射分量組成架構

4.1.1 輻射分量

輻射分量的計算參考自 Lim *et al.* (2013) 對 A 型蒸發皿的能量平衡方式，與 PenPan 模式的主要差異為蒸發皿邊壁與水面接收短波輻射後的反射率不同，太陽照射蒸發皿的角度會隨著季節變化而改變，蒸發皿邊壁遮住太陽輻射的陰影面積也會隨之改變，其影響水面接收短波輻射的面積大小；為了調整太陽角度變化對蒸發量的影響，PenPan V2 模式於此部分區分為水面接收直達輻射的有效反射率以及水面接收直達輻射的有效面積，且蒸發皿邊壁與水面皆會發生長波輻射的能量交換。

4.1.2 空氣動力分量

空氣動力分量的計算參考自 Lim *et al.* (2012) 關於空氣動力學對蒸發皿之蒸發影響的研究，並以實驗結果所得的邊界層理論方法計算。

整合輻射分量及空氣動力分量的計算，可得 PenPan V2 模式的皿蒸發量估計方程式為

$$E_{pan} = \frac{s}{s+\beta\gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda \cdot \rho_w} + \frac{\beta \cdot \gamma}{s+\beta \cdot \gamma} \cdot VPD \cdot f_V \quad \text{.......(1)}$$

式中，E_{pan} 為蒸發皿蒸發量（$m \cdot s^{-1}$）；s 為飽和水氣壓與溫度關係曲線的斜率（$Pa \cdot K^{-1}$），β 為一係數，其考慮水蒸氣於空氣中的擴散、熱於空氣中的擴散、發生顯熱交換的面積，β 值於不同狀況下的差異不大，本研究參考 Lim *et al.* (2016) 將 β 視為固定值，以 $\beta = 1.8$ 代入計算；γ 為濕度常數（$\gamma \cong 67\ Pa \cdot K^{-1}$）；$\lambda$ 為液態水的汽化潛熱（$\lambda \cong 2.45\ MJ \cdot kg^{-1}$）；$\rho_w$ 為液態水的密度($\rho_w = 1000\ kg \cdot m^{-3}$)；$VPD$ 為飽和蒸氣壓差 (Pa)；蒸發皿淨輻射量 R_n 及空氣動力學函數 f_v 的詳細計算方法，可參考潘詠瑄 (2022) 及陳姵蓁 (2024) 的碩士論文。

4.2 PenPan V3 模式

本研究採用 Wang *et al.* (2018) 等人發展的 PenPan V3 模式推估 20 公分蒸發皿的自由水面蒸發量，其基本理論架構與 PenPan V2 模式相同，PenPan V3 模式也將皿蒸發量的估計分為輻射分量及空氣動力分量。PenPan V2 模式將蒸發皿分為水體與邊壁兩項，而 PenPan V3 模式與 PenPan V2 模式不同之處為，PenPan V3 模式針對蒸發皿的皿體區塊分為五項，分別為水體、內邊壁、皿底、水位以上的外邊壁以及水位以下的外邊壁，其中兩種外邊壁的計算方

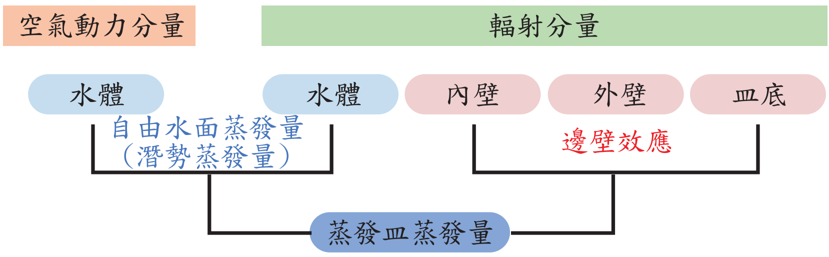

圖 4　PenPan V3 模式之空氣動力及輻射分量組成架構

式僅有接收輻射的面積不同，本研究參考潘詠瑄 (2022) 的計算方法，將兩者面積合併以計算外邊壁輻射分量，如圖 4 所示。

五、邊壁效應與自由水面蒸發量分析

5.1 邊壁效應分析

蒸發皿用於觀測蒸發量會受環境因素影響，包括全天空日射量、氣溫、相對溼度、氣壓及風速等，而蒸發量亦會因蒸發皿邊壁接受輻射能量而提升，因此蒸發皿的觀測值為水體及邊壁兩者吸收能量加總的蒸發量，如圖 3 及圖 4 所示。若將皿蒸發量排除邊壁效應的影響，即可估計蒸發皿的實際水體蒸發量，即為蒸發皿的自由水面蒸發量。

本研究分別以 PenPan V2 模式及 PenPan V3 模式估計臺灣十個氣象站的 A 型及 20 公分蒸發皿的蒸發量，探討 A 型及 20 公分蒸發皿的蒸發量組成比例。本研究採用月資料進行分析，並將歷年各月的分析資料予以平均，得到各氣象站的蒸發量組成比例。表 1 列出 A 型蒸發皿的蒸發量組成比例 (%)，包含空氣動力分量 (水體) 及輻射分量 (水體、邊壁)，可對照圖 3 之組成架構；表 2 列出 20 公分蒸發皿的蒸發量組成比例，包含空氣動力分量 (水體) 及輻射分量 (水體、內壁、外壁、皿底)，可對照圖 4 之組成架構；由於表中各分量比例為四捨五入後之數值，因此直接將表中數據加總，部分測站之總和與 100%稍有差異。

綜整分析結果得知，各氣象站 A 型蒸發皿的空氣動力效應組成比例介於 15%至 29%，輻射能量組成比例介於 71%至 85%，如圖 5 所示，取各測站之平均，整體而言，A 型蒸發皿的空氣動力及輻射對蒸發的影響占比分別為 22%與 78%。20 公分蒸發皿空氣動力效應組成比例介於 18%至 32%，輻射能量組成比例介於 68%至 82%，如圖 6 所示，取各測站之平均，整體而言，20 公分蒸發皿的空氣動力及輻射對蒸發的影響占比分別為 25%與 75%。比較兩蒸發皿的估計結果，可知空氣動力及輻射分量的組

表 1　A 型蒸發皿之蒸發量組成比例

	空氣動力分量	輻射分量	
測站	水體 (%)	水體 (%)	邊壁 (%)
台北	27	45	28
宜蘭	15	54	32
梧棲	29	47	24
台中	16	56	28
花蓮	23	47	29
嘉義	19	53	28
台南	22	53	26
台東	19	56	25
高雄	24	50	26
恆春	25	51	24

表 2　20 公分蒸發皿之蒸發量組成比例

	空氣動力分量	輻射分量			
測站	水體	水體	內壁	外壁	皿底
台北	30	16	24	25	5
宜蘭	18	19	28	29	5
梧棲	32	14	25	25	5
台中	21	17	28	28	5
花蓮	27	16	26	26	5
嘉義	22	17	28	28	5
台南	25	17	27	26	5
台東	24	17	28	26	5
高雄	27	16	26	26	5
恆春	28	16	26	25	5

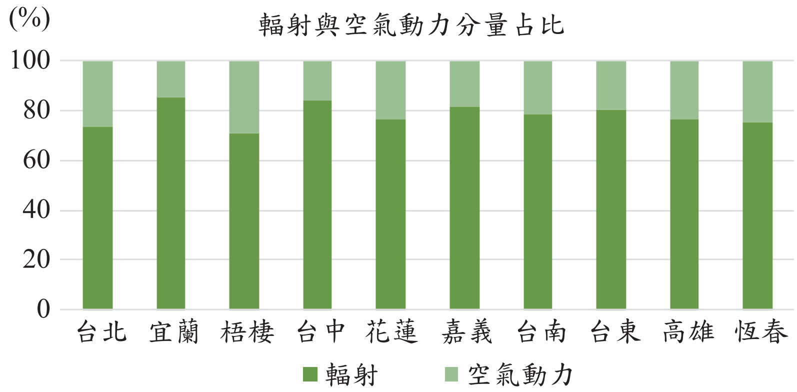

圖 5　A 型蒸發皿輻射與空氣動力分量占比

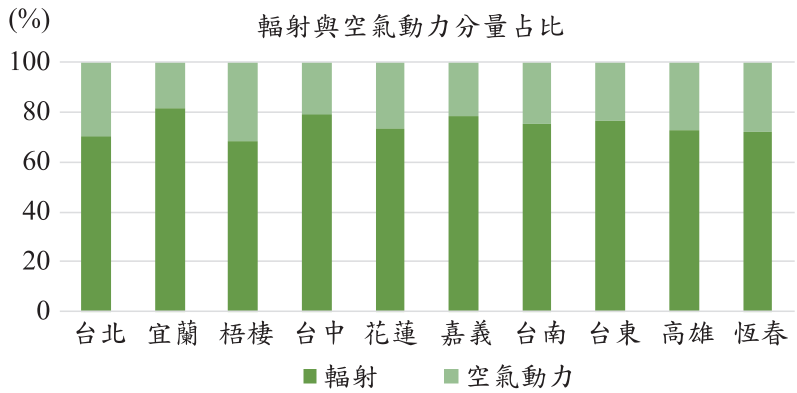

圖 6　20 公分蒸發皿輻射與空氣動力分量占比

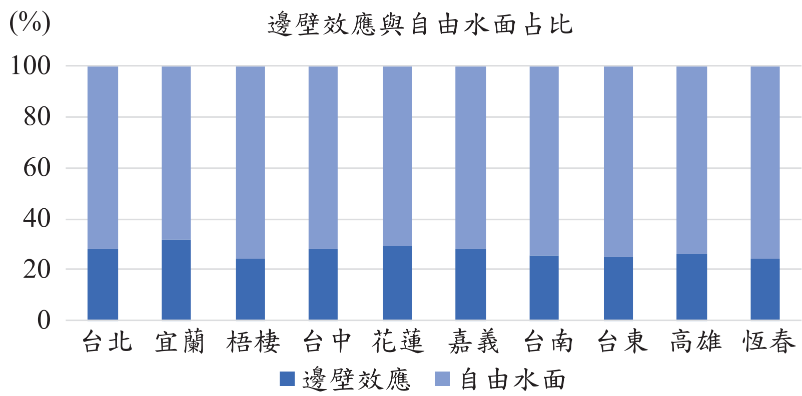

圖 7　A 型蒸發皿邊壁效應及自由水面占比

成比例接近；因兩蒸發皿位於同處觀測，處於相同大氣環境下，因此空氣動力及輻射能量特性極為相同，由此亦可驗證 PenPan V2 模式及 PenPan V3 模式推估結果的合理性。

至於邊壁效應及水體相對於皿蒸發量的占比，以 A 型蒸發皿來看 (如圖 7)，各氣象站蒸發量之邊壁效應的比例介於 24%至 32%，自由水面蒸發量的比例介於 68%至 76%；所有測站之平均結果，邊壁效應的比例為 27%，自由水面蒸發量的比例為 73%。20 公分蒸發皿的邊壁效應的比例介於 54%至 63%，自由水面蒸發量的比例介於 37%至 46%，如圖 8 所示；整體平均而言，邊壁效應的比例為 58%，自由水面蒸發量的比例為 42%。

比較兩蒸發皿邊壁效應影響皿蒸發量的比例，A 型蒸發皿的邊壁效應為 27%，20 公分蒸發皿的邊壁效應為 58%；20 公分蒸發皿的邊壁效應 (58%) 明

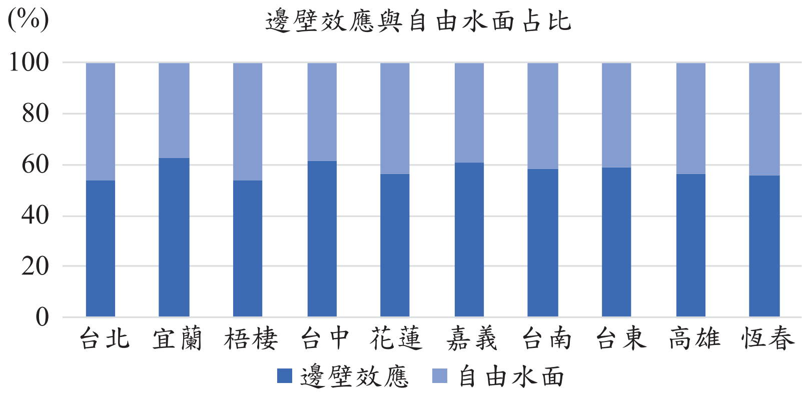

圖 8　20 公分蒸發皿邊壁效應及自由水面占比

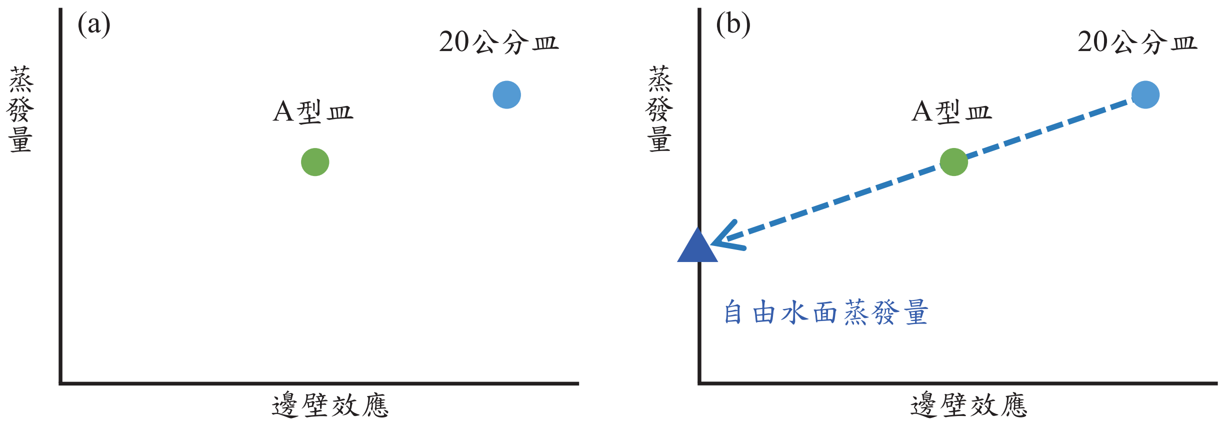

圖 9　自由水面蒸發量推估方法示意圖

顯較 A 型蒸發皿的邊壁效應 (27%) 來得大。若以兩型皿的邊壁及水體面積（或體積） 相比，20 公分蒸發皿的邊壁面積比例較 A 型蒸發皿大（可參照第 3.1 節針對蒸發皿的規格描述），因此在較大邊壁面積比例下所接收到的輻射能量相對較多，因而邊壁效應影響蒸發量的占比也隨之增加。

5.2 自由水面蒸發量估計

當邊壁效應為零的情況下所對應的蒸發量，即為自由水面蒸發量。本研究分析兩蒸發皿的邊壁效應，得到兩蒸發皿於 1980 年至 1994 年各月份的邊壁效應比例資料。本研究進一步利用兩蒸發皿的皿蒸發量及邊壁效應比例，推估當邊壁效應為零的自由水面蒸發量，推估方法說明如下。參考圖 9(a)所示，橫軸表示邊壁效應比例，縱軸為蒸發量，20 公分蒸發皿具有較高的邊壁效應及皿蒸發量，資料點位於右上方；A 型蒸發皿之邊壁效應及皿蒸發量較小，資料點位於左下方；此二點資料代表某氣象站在某月份的邊壁效應與皿蒸發量關係。以此二點資料為基礎，進行線性回歸分析，如圖 9(b)所示；將此二點的連線在橫坐標方向上往左向原點趨近，即可得到當邊壁效應為零的自由水面蒸發量。

本研究利用推得的各月份自由水面蒸發量，分別與 A 型皿及 20 公分皿的皿蒸發量資料建立截距為零的線性回歸關係式。A 型皿蒸發量與自由水面蒸發量之資料散布圖與回歸結果如圖 10 所示，決定係數 (R^2) 為 0.95；20 公分皿蒸發量與自由水面蒸發量之資料散布圖與回歸結果如圖 11 所示，決定係數為 0.52；由回歸結果可得到利用皿蒸發量推估自由水面蒸發量的簡便公式：

$$E_{fw} = 0.74 \times E_A \quad (2)$$

$$E_{fw} = 0.54 \times E_{20} \quad (3)$$

式中，E_{fw} 為自由水面蒸發量，E_A 為 A 型皿蒸發量，

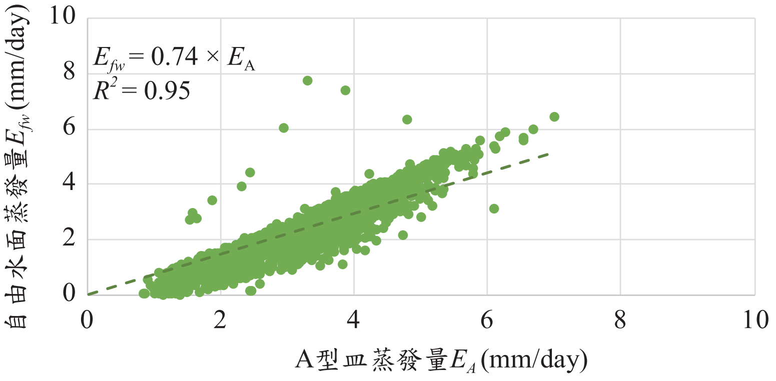

圖 10　A 型皿蒸發量與自由水面蒸發量回歸結果

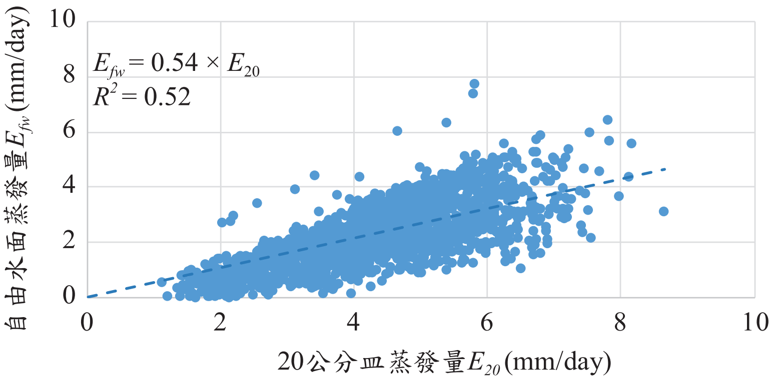

圖 11　20 公分蒸發量與自由水面蒸發量回歸結果

E_{20} 為 20 公分蒸發皿蒸發量，自由水面蒸發量與皿蒸發量採用相同單位；雖然本回歸分析採用月資料建立，此自由水面蒸發量的簡易推估公式，可應用於日資料或其它時間尺度，例如圖 10 及圖 11 未免數字過大，採用之單位為 mm/day，亦可與一般蒸發觀測實務上量測每日蒸發深度之單位一致。

六、區域化自由水面蒸發公式建立及水庫蒸發水量估計

本研究於第 5.2 節建立之簡易型自由水面蒸發公式，可於具有皿蒸發觀測資料時，簡便推求自由水面蒸發量；惟大多數區域並無設置蒸發皿來觀測皿蒸發資料，簡易型自由水面蒸發公式在使用上的實用性因而受限。據此，本研究進一步發展區域化自由水面蒸發公式，採用臺灣氣候變遷推估資訊與知識調適平台 (TCCIP) 的網格化全天空日射量及氣溫資料，建立區域化回歸公式，如此在未有皿蒸發觀測之地點，亦可利用當地之日射量及氣溫資料，推估自由水面蒸發量。本研究進而利用區域化自由水面蒸發推估公式，估算臺灣多座水庫的自由水面蒸發量 (蒸發深度) ，配合各水庫的水位觀測資料及庫容曲線，有效推估逐月水庫蒸發水量 (體積)。

6.1 區域化自由水面蒸發公式建立

由於 TCCIP 網格化資料包含全天空日射量及氣溫，為測試最適合推估自由水面蒸發量的回歸公式，本研究將輸入變量組合分為三組，第一組為氣溫 (T)；第二組為全天空日射量 (R)；第三組同時包含氣溫及全天空日射量，採用資料為所有氣象站位置的自由水面蒸發量推估值、氣溫、全天空日射量，資料時間尺度為月，亦即回歸公式所使用的各變量資料為歷年各月的平均值。三組變量組合之回歸公式如下，回歸結果之評鑑指標如表 3 所列。

$$E_{fw} = 5.3 \times T - 54.8 \quad (4)$$

$$E_{fw} = 5.7 \times R - 20.7 \quad (5)$$

$$E_{fw} = 2.3 \times T + 3.8 \times R - 45.4 \quad (6)$$

式中，E_{fw} 為自由水面蒸發 (mm/month)，T 為氣溫 (°C)，R 為全天空日射量 (MJ/m^2)。由評鑑結果得知，自由水面蒸發公式同時加入全天空日射量及氣溫資料，具有最小的均方根誤差及最高的決定係數，其估計效果為最佳，因此本研究則採用此組合應用於後續區域化公式的建立。

表 3 各變量組合回歸結果之評鑑指標

輸入變量組合	均方根誤差 (mm/month)	決定係數 (R^2)
氣溫	28.0	0.40
日射量	26.9	0.45
氣溫、日射量	26.2	0.48

為建立區域化自由水面蒸發公式，本研究考量氣象站距離遠近、氣候特性、地理區位等因素，將十個氣象站進行排列組合，共建立十七組區域組合進行分析與測試，以均方根誤差做為評鑑指標並考慮分區的整體性，進行最佳分區之選擇；因本文之篇幅限制，詳細過程請參考陳姵蓁 (2024) 碩士論文。本文直接呈現最佳分區結果為三區，分別為北部、南部、恆春，北部之區域化公式採用之氣象站為：臺北、宜蘭、臺中、花蓮四站，南部區域之區域化公式採用之氣象站為：嘉義、臺南、高雄、臺東，並將恆春站獨立出來以降低推估公式的誤差。三個區域之自由水面蒸發推估公式如下：

北區： $E_{fw} = 2.6 \times T + 2.1 \times R - 39.0$ ....(7)

南區： $E_{fw} = 3.7 \times T + 2.2 \times R - 55.9$ ....(8)

恆春： $E_{fw} = 1.5 \times T + 2.3 \times R + 36.7$ ....(9)

式中，E_{fw} 為自由水面蒸發 (mm/month)，T 為氣溫 (°C)，R 為全天空日射量 (MJ/m^2)；三個分區公式之決定係數 (R^2) 分別為：北區 0.53，南區 0.53，恆春 0.28。將自由水面蒸發分區公式，依據氣象站所在縣市及整體地理區位予以分區，呈現於臺灣行政區域上如圖 12 所示，可發現此分區以地理條件來看，約略與北回歸線呈現對應，北回歸線以北的副熱帶地區或縣市，可採用北區公式進行自由水面蒸發量的推估；北回歸線以南的熱帶地區或縣市，可採用南區公式進行自由水面蒸發量的推估；鄰近恆春氣象站的區域，可另外採用恆春氣象站的自由水面蒸發推估公式。

6.2 水庫蒸發水量估計

本研究將三組區域化自由水面蒸發分區公式，應用於估算臺灣水庫的自由水面蒸發量 (蒸發深度)，並配合各水庫的庫容曲線，推估逐月水庫蒸發水量 (體積)。應用北區公式之水庫有：新山、翡翠、石門、寶山第二、永和山、明德、鯉魚潭、德基、霧社、日月潭、湖山水庫；應用南區公式之水庫有：仁義潭、曾文、烏山頭、南化水庫；而牡丹水庫採用恆春之區域公式，如圖 13 所示。

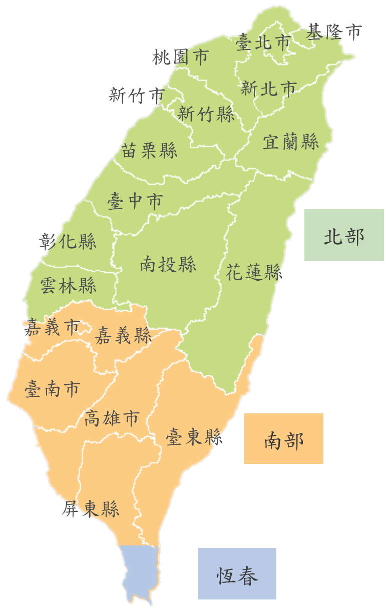

圖 12 區域化自由水面蒸發公式之分區

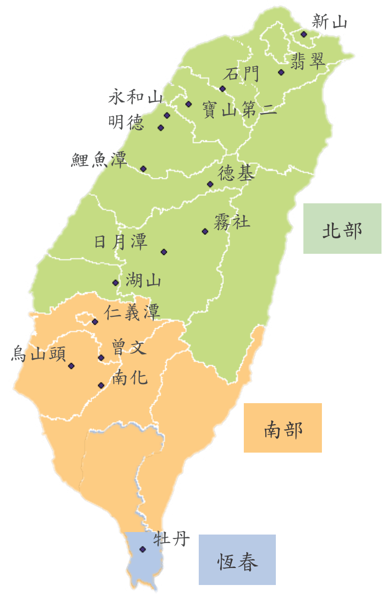

圖 13 各水庫使用之區域化公式分區圖

首先於 TCCIP 提供的網格化全天空日射量及氣溫資料中，選取各水庫位置的日射量及氣溫的逐日資料，並依照各水庫所在的行政區域位置，代入區域化自由水面蒸發公式，經單位換算後，即可求得各水庫的逐日自由水面蒸發深度，並可再彙整得到月及年的蒸發深度。圖 14 展示各水庫的年平均蒸發深度，圖中各水庫之排序原則為由北至南，由結果得知，水庫的自由水面蒸發量 (蒸發深度) 以牡丹水庫為最高、以德基水庫為最低，整體而言，自由水面蒸發量呈現北低南高的趨勢；而位於中部山區的德基、霧社及日月潭水庫的自由水面蒸發量有相對較低的現象。圖 15 展示各水庫的平均氣溫及全天空日射量，比較後可看出全天空日射量呈現北低南高的現象，但差異不大；而就氣溫來看，德基、霧社及日月潭水庫的氣溫相較於其它水庫來得低，這三座水庫因氣溫較低的緣故，自由水面蒸發量低於其它水庫。

本研究將各水庫的逐日蓄水位資料，配合水庫庫容曲線，進行線性內插求得各水庫的逐日蓄水面積，並將自由水面蒸發深度乘上蓄水面積，即可求得各水庫的逐日蒸發體積，再進一步推求各水庫之年平均蒸發體積，如圖 16 所示。

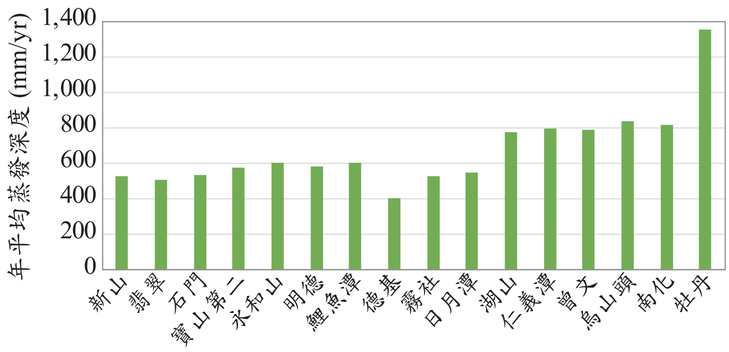

圖 14　各水庫年平均蒸發深度

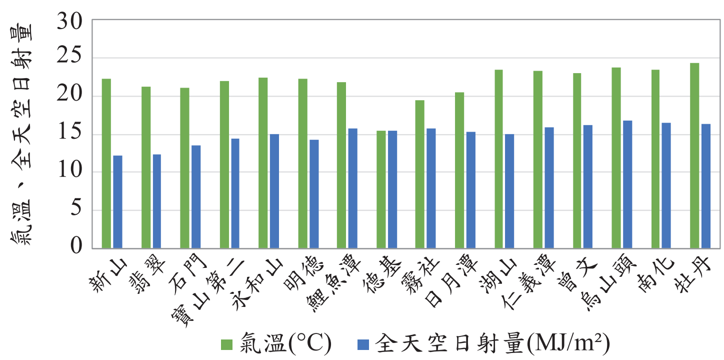

圖 15　各水庫平均氣溫及全天空日射量

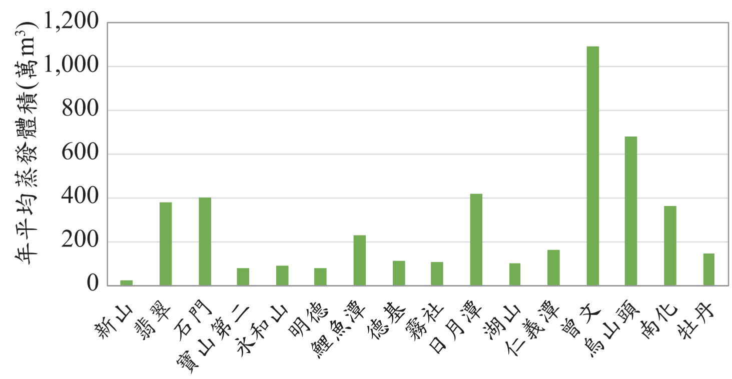

圖 16　各水庫年平均蒸發體積

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 70, NO. 4, DECEMBER 2024
DOI - 10.29974/JTAE.202412_70(4).0002

由結果得知，水庫的蒸發體積以曾文、烏山頭水庫為最高，日月潭、石門、翡翠水庫次之。此結果可從水庫蓄水面積來探討，如圖 17 所示，水庫的蒸發體積與蓄水面積具有高度相關性，因各水庫的自由水面蒸發深度未具有顯著差異 (牡丹水庫除外)，故水庫蓄水面積愈大，所蒸發的水量就愈大。針對大型水庫如：曾文、烏山頭、日月潭、石門、翡翠水庫等，其庫容量大，長期平均而言能有較大的蓄水量與保有較大的蓄水面積，因此具有較高的自由水面蒸發體積。本研究針對各水庫估算之蒸發深度及蒸發體積，繪製各月之歷線圖如圖 18 所示，水庫之自由水面蒸發深度主要受氣候及環境的自然因素影響，水庫蓄水量之蒸發體積還會受到蓄水量 (蓄水面積) 多寡的影響，包含人為用水的水資源操作所影響；惟整體而言，蒸發深度與蒸發體積均呈現夏季高、冬季低之情況。

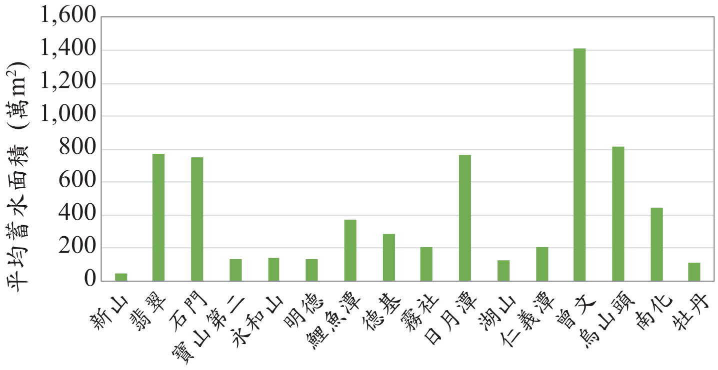

圖 17　各水庫平均蓄水面積

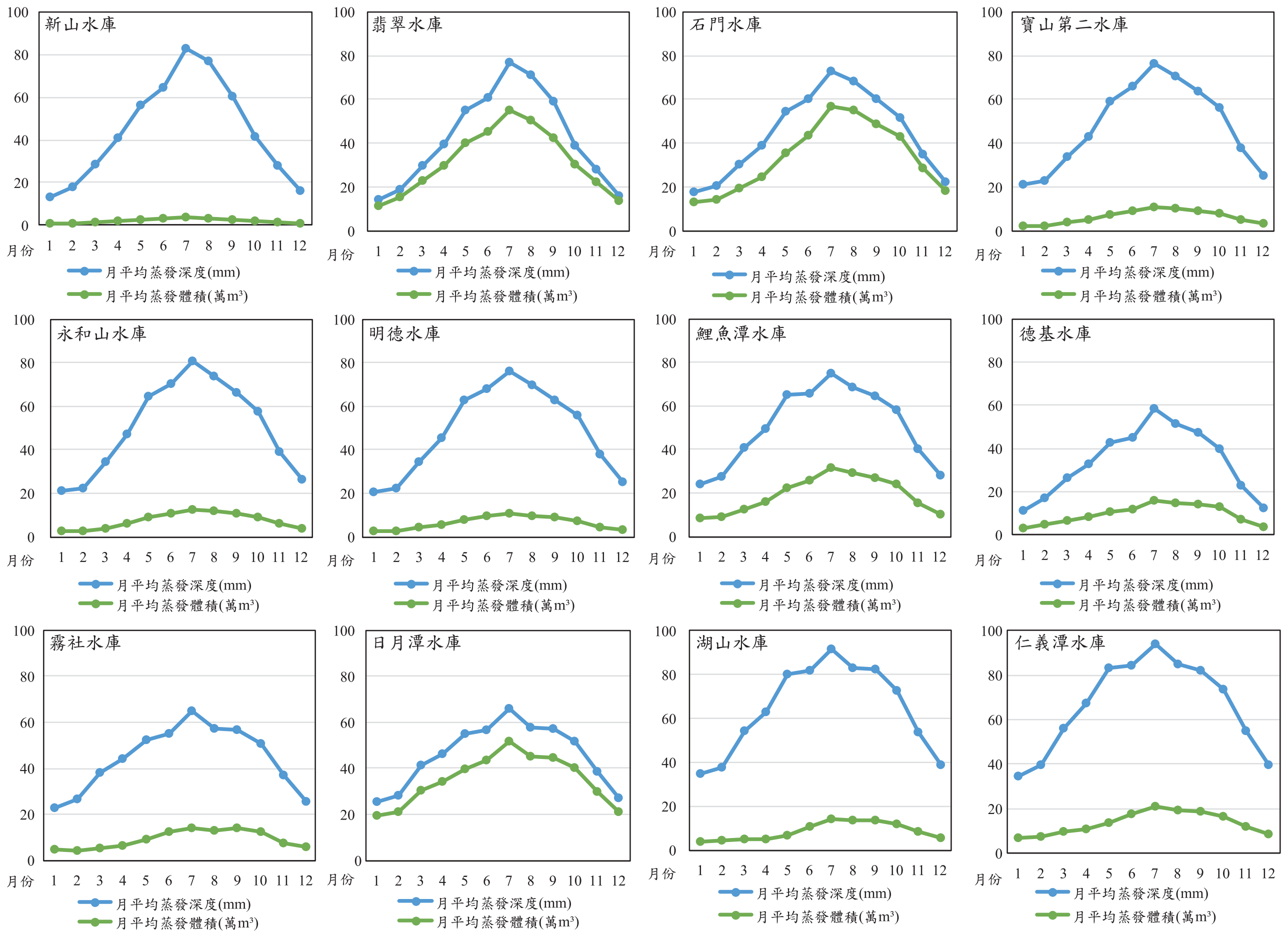

圖 18　各水庫月平均蒸發深度及體積

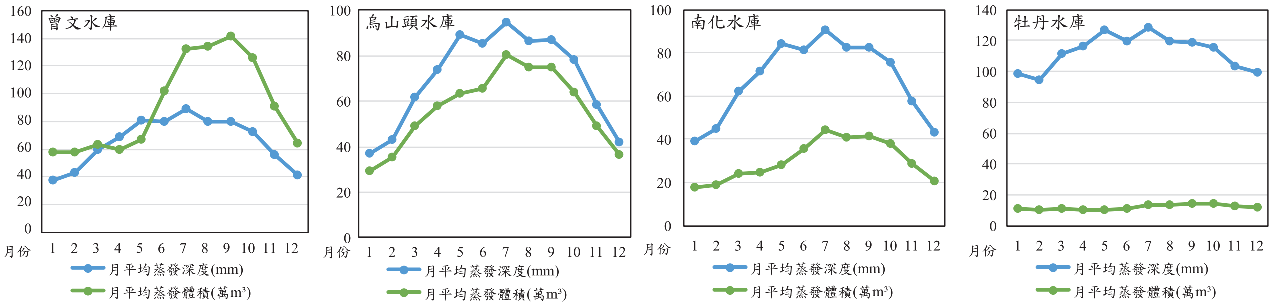

圖 18　各水庫月平均蒸發深度及體積（續）

七、結論

1. 本研究以 PenPan V2 模式與 PenPan V3 模式分析臺灣十個氣象站的 A 型及 20 公分蒸發皿的蒸發量，探討空氣動力及輻射能量對蒸發的影響，並進而推估邊壁效應與自由水面蒸發的比例，得到 A 型蒸發皿的邊壁效應占 27%，自由水面蒸發量比例為 73%；20 公分蒸發皿的邊壁效應占 58%，自由水面蒸發量比例為 42%。
2. 本研究將推估得到的自由水面蒸發量，分別與 A 型及 20 公分皿的蒸發量資料建立截距為零的線性回歸關係式，得到利用皿蒸發量推估自由水面蒸發量的簡便公式，亦即將 A 型皿蒸發量乘以 0.74、將 20 公分皿蒸發量乘以 0.54，可得到自由水面蒸發量估計值。
3. 為能推估未設蒸發皿觀測之地點的自由水面蒸發量，本研究採用全天空日射量及氣溫資料，建立適用於北區、南區以及恆春的區域化回歸公式。本研究進而利用區域化自由水面蒸發推估公式，估算臺灣水庫的自由水面蒸發量 (蒸發深度)，並配合各水庫的水位及庫容曲線，有效推估水庫蒸發水量 (體積)。

參考文獻

1. 方貽萱 (2017)「20 公分蒸發皿及 A 型蒸發皿蒸發量之差異分析」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士論文。
2. 潘詠瑄 (2022)「以空氣動力學與能量平衡理論探討台灣 A 型及 20 公分蒸發皿邊壁效應」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
3. 陳姵蓁 (2024)「自由水面蒸發公式建立及水庫蒸發水量估計」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
4. Dingman, S.L. (2015) Physical Hydrology, 3rd ed., Waveland Press.
5. Hamon, W.R. (1961) Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(3), 107-120.
6. Lim, W.H., Roderick, M.L., Farquhar, G.D. (2016) A Mathematical Model of Pan Evaporation Under Steady State Conditions. *Journal of Hydrology*, 540, 641-658.
7. Lim, W.H., Roderick, M.L., Hobbins, M.T., Wong, S.C., Farquhar, G.D. (2013) The Energy Balance of a US Class A Evaporation Pan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182, 314-331.
8. Lim, W.H., Roderick, M.L., Hobbins, M.T., Wong, S.C., Groeneveld, P.J., Sun, F., Farquhar, G.D. (2012) The Aerodynamics of Pan Evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 31-43.
9. Linacre, E.T. (1994) Estimating US Class A Pan Evaporation from Few Climate Data. *Water International*, 19(1), 5-14.
10. Monteith, J. L. (1981). Evaporation and Surface Temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(451), 1-27.
11. Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145.
12. Rotstayn, L.D., Roderick, M.L., Farquhar, G.D. (2006) A Simple Pan-evaporation Model for Analysis of Climate Simulations: Evaluation Over Australia. *Geophysical Research Letters*, 33, L17715.
13. Thom, A.S., Thony, J.L., Vauclin, M. (1981) On the Proper Employment of Evaporation Pans and

Atmometers in Estimating Potential Transpiration. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(453), 711-736.

14. Wang, K., Liu, X., Li, Y., Liu, C., Yang, X. (2018) A Generalized Evaporation Model for Chinese Pans. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(19), 10,943-10,966.

收稿日期：民國 113 年 09 月 05 日
修改日期：民國 113 年 09 月 28 日
接受日期：民國 113 年 10 月 17 日