

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

台灣地區區域化蒸發散量參數之評估 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 96-2221-E-041-016-
執行期間：96年08月01日至97年07月31日
執行單位：嘉南藥理科技大學休閒保健管理系

計畫主持人：陳尉平

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理人員：葉信富

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年10月29日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

台灣地區區域化蒸發散量參數之評估

計畫編號：NSC96-2221-E-041-016

執行期限：96年08月01日至97年07月31日

主持人：陳尉平 嘉南藥理科技大學休閒保健管理系助理教授
計畫參與人員：葉信富 國立成功大學資源工程學系研究生

摘要

蒸發散量之估計，目前已發展出許多的方法，一般可大致分為五種類型：(1)彭門-蒙地斯組合法；(2)溫度估計法；(3)輻射能法；(4)質量傳遞法；(5)水平衡法等。若將上述方法應用於研究上，不同經驗公式具有其不同之適用性，部分公式需大量的基本資料及實驗，因適當條件而選定適當之方法進行推估。本研究以台灣地區為研究案例，探討不同理論基礎之潛勢蒸發散經驗公式，與國際上廣泛應用之彭門-蒙地斯組合法作一比較，以建立本土化參數。本研究選用溫度估計法中的Blancy-Criddle法、Hargreaves and Samani法及Kharrufa法；與輻射能法中的Makkink法、Priestley and Taylor法及Hargreaves法，應用於台灣地區之台北、台中、台南及台東等四個測站來分別探討現地參數之最佳化。

關鍵詞：蒸發散，Penman-Monteith，溫度估計法，輻射能估計法。

ABSTRACT

The purpose of this study is to apply the Penman-Monteith equation to estimate evapotranspiration occurred in Taiwan, an equation not only widely used in the world but also officially recommended by FAO. In addition, the Penman-Monteith equation is considerably more complex than other equations, which has been also used extensively in water budget. In this study, various empirical equations from different theoretical models for calculating evapotranspiration are compared with the Penman-Monteith equation based on daily meteorological data from four meteorological stations in Taiwan. Monthly evapotranspiration was estimated using equations developed by Blancy-Criddle (1950), Hargreaves-Samani (1985), Kharrufa (1985), Makkink (1957), Priestley-Taylor (1972), and Hargreaves (1975). Finally, three statistical criteria are used to establish the optimal parameter suitable to the local hydrological condition of Taiwan.

Key Words: evapotranspiration, Penman-Monteith, Temperature-based, Radiation-based.

一、前言

蒸發散(evapotranspiration)是構成水圈及大氣圈中水分流動中一個很重要的因子，地球表面約有70%的水分透過蒸發而散失，它是一種水分與能量流動之間非常複雜而相互影響過程的結果，其受著大氣、土壤及植生情況影響著(Moges et al., 2002)。由於氣候、地形特徵及植生覆蓋等複雜因素區域性尺度蒸發散量之量化更為困難。實際的蒸發

散量與其他水文過程例如降雨、逕流及入滲等，在水文循環中均扮演著非常重要的角色。在大區域廣泛的空間尺度上，蒸發散量的推估前人亦有利用間接的方法來做合理的估算，例如水收支方法(water budget method)及滲透計法(lysimeter method)，其中包括土壤與植生問題的探討；或者是直接利用較微觀的氣象資料做一詳盡的探討(Wilson et al., 2001)。

蒸發散量為水面蒸發、土壤蒸發葉面蒸發截留蒸發等所有蒸發量之總和(total evaporation)，亦可視為流域水份損失之總和。水氣蒸散於大氣中，空氣能容納水分子之多寡，主要視當時之氣象條件而定。如氣象條件一定時，流域必須能供給水源，蒸發散才能持續發生。某種氣象條件下，時時有充分水供應下之最大蒸發量，稱為潛勢蒸發散(potential evapotranspiration)。滿足潛勢蒸發散之條件在實際之流域難存在，因此流域實際蒸發散皆小於潛勢蒸發散。實際氣象條件及地表水分條件下之蒸發散量，稱之為實際蒸發散(actual evapotranspiration)。在潮濕多雨地區，實際蒸發散與潛勢蒸發散之差極小，如前述潛勢蒸發散為某種氣象條件下之最大蒸發散量，其在水文上具重大之意義，列舉如下(徐義人，2003)：

1. 潛勢蒸發散可用以表示氣象之參數：潛勢蒸發散可以用來反應某地區之氣象情形，如溫度高，則潛勢蒸發散必大。
2. 潛勢蒸發散與雨量之關係：潛勢蒸發散可以用來訂定出旱地之意義，因一地區是否乾燥完全視雨量與潛勢蒸發散而定。差數大表示表示濕潤地，小即為乾燥地。就實用觀點言之，潛勢蒸發散小於雨量，則該地區水源充足，無須灌溉；若潛勢蒸發散大於雨量，則水源不足缺乏用水。
3. 潛勢蒸發散與直接水的損失：就水方面而言，潛勢蒸發散表示水分損失情形，完全視潛勢蒸發散與實際之蒸發散之差而定。若其差數甚小或為零時，潛勢蒸發散即為實際之蒸發散。因之於雨量充沛地區，土壤水分充足可達田間容水量(field capacity)，潛勢蒸發散即為實際之蒸發散量。
4. 水資源規劃利用方面，可以探討作物需水量，藉此提升水資源之有效利用。

關於蒸發散量(evapotranspiration)之估計，目前已發展出許多的方法，一般可大致分為五種類型：(1)彭門-蒙地斯組合法(Penman-Monteith combination)；(2)溫度估計法(temperature-based)；(3)輻射能法(radiation)；(4)質量傳遞法(mass-transfer)；(5)水平衡法(water budget)。若將上述方法應用於研究上，不同經驗公式具有其不同之適用性，部分公式需大量的基本資料及實驗，因適當條件而選定適當之方法進行推估(陳進發，2002)。而其中 Penman-Monteith 方程式係經過全世界 11 個乾濕地區、20 個國際著名蒸發散量經驗式加以檢測評估後，1990 後獲美國土木工程師學會(American Society of Civil Engineer, ASCE)推薦，1994 年國際灌溉排水委員會(International Committee of Irrigation and Drainage, ICID)頒佈，及聯合國糧食與農業組織(Food and Agriculture Organization, FAO)不斷應用與驗證，相繼從 1977 年建議、1984 年更新，在結合作物冠層阻力(crop canopy resistance)及空氣動力阻力(aerodynamic resistance)觀念，於 1998 年改版推薦(Allen et al., 1998)，受世界著名專業學術及國際性機構，唯一認可推薦之蒸發散量估算模型，包含有提供蒸發散熱量來源之輻射項，與驅動蒸發散力量來源之空氣動力項(黃振昌等，2003)。

本研究以台灣地區為研究案例，探討不同理論基礎之蒸發散經驗公式，與國際上廣泛應用之 Penman-Monteith 方程式作一比較，以建立本土化參數。本研究選用溫度估計法(temperature-based model)中的 Blaney-Criddle 法、Hargreaves and Samani 法及 Kharrufa 法；與輻射能法(radiation-based model)中的 Makkink 法、Priestley and Taylor 法及 Hargreaves 法，應用於台灣地區來分別探討現地參數之最佳化。

二、理論模式

2.1 彭門蒙地斯法(Penman-Monteith Method)

Penman-Monteith 法以用下式來表示(Allen et al., 1998)：

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

其中 ET ：蒸發散率[mm/day]；

Δ ：汽壓曲線斜率[kPa/°C]；

R_n ：淨輻射量[MJ m⁻² day⁻¹]；

G ：土壤熱通量[MJ m⁻² day⁻¹]；

γ ：溼度常數[kPa/°C]；

T ：溫度[°C]；

u_2 ：2 公尺高所量測到之風速[m/sec]；

$(e_s - e_a)$ ：飽和水汽壓與露點水汽壓差[kPa]；

在現地應用上，式(1)需要有每天、每週、十天週期或每個月的空氣溫度、溼度、輻射能及風速資料來計算，在潛勢蒸發散率的推估中，本研究所有資料則以 Allen et al. (1998)所建議的方法來推估。

2.2 溫度估計法(temperature-based)

在此所探討的蒸發散率 ET 僅需考量溫度之變數，是以溫度為主的估計方式。對於估計 ET 而言，溫度估計法是最早被提出的方式，在 1920 年已提出過 ET 與空氣溫度之關係(Jensen et al., 1990)，大部份之溫度估計法方程式型式如下：

$$ET = cT^n \quad \text{或} \quad ET = c_1 d_1 T (c_2 - c_3 h) \quad (2)$$

其中： T 為空氣溫度[°C]； h 為濕度項； c_1, c_2, c_3 與 c 為常數[-]； d_1 為時間項。

由於氣象資料之範圍廣泛，在資料收集過程有一定的困難度。目前已有許多的學者提出不同的蒸發散方程式，但其經驗公式的適用性通常因地區而異。Jensen et al. (1990) 曾提出用比較的方法，來推斷 Blaney - Criddle 法和 Hargreaves 法在潮濕地區的適用性。近來研究上，Xu and Singh (2001) 亦提出利用七種常用的蒸發散方程式做推估及比較，推估比較結果發現 Blaney-Criddle 法、Hargreaves and Samani 法較優於其它方法。故本研究則利用 Blaney-Criddle 法、Hargreaves and Samani 法及 Kharrufa 法來進行推估比較。

(1) Blaney-Criddle 法：

$$ET = p(0.46T + 8.13) \quad (3)$$

其中： p 為一年中每月之年日照百分率。

(2) Hargreaves and Samani 法：

$$ET = aR_a T D^{1/2} (T + 17.8) \quad (4)$$

其中： a 為一參數($a = 0.0023$)； TD 為每天中最大和最小溫度之差[°C]； R_a 為大氣圈外的輻射能[MJ m⁻² day⁻¹]。

(3) Kharrufa 法：

Kharrufa(1985)推導出蒸發散與現地日照百分率及溫度之關係如下：

$$ET = 0.34pT^{1.3} \quad (5)$$

2.3 輻射能法(radiation-based)

輻射能法主要是以能量平衡(energy-balance)的原理

來推估蒸發散率(Jensen et al., 1990), Jensen et al. (1990)曾研究利用不同的輻射能方程式, 對蒸發散進行推估, 其研究顯示在不同區域及各種氣象條件下, Turc 法、Priestley and Taylor 法及 FAO-24 法(修正 Makkink, 1957)能做有效的推估。近來研究上, Xu and Singh(2000)亦利用瑞士的 Changins 氣象測站資料, 將八種前人所提出的輻射能方程式做推估及比較, 相互比較之結果顯示, 發現 Makkink 法和 Priestley and Taylor 法之結果較符合現場資料, 而本研究則利用 Makkink 法、Priestley and Taylor 法及 Hargreaves 法推估結果做一比較。

(1) Makkink 法:

Makkink(1957)於荷蘭寒冷氣候下推導出草原地區的蒸發散經驗式:

$$ET = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} \quad (6)$$

其中: R_s 為總日照輻射能 [$\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$]; Δ 為飽和汽壓曲線之斜率 [mb°C]; γ 為濕度常數 [mb°C]; λ 為蒸發作用的潛熱 [cal/g]。

(2) Priestley and Taylor 法:

Priestley and Taylor(1972)提出簡化 Penman(1948)首先提出的以空氣動力學和能量平衡聯立的綜合法, 因 Penman 公式產生於歐洲低海拔的濕潤地區, 由於世界各地的自然地理情況相差很大, 因此, 許多學者在應用 Penman 公式計算自由水面蒸發量或估計蒸發能力時, 常常結合本地區情況對 Penman 公式做些修正, 其簡化公式如下:

$$ET = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} \quad (7)$$

(3) Hargreaves 法:

Hargreaves(1975)和 Hargreaves and Samani(1982, 1985)曾提出許多推估蒸發散經驗式, 下式為 Hargreaves 於加州地區利用入滲儀所推導之蒸發散經驗式:

$$ET = 0.0135(T + 17.8) \frac{R_s}{\lambda} \quad (8)$$

三、統計指標

本研究欲利用 Penman-Monteith 方程式與不同理論基礎之蒸發散經驗式進行最佳化擬合以建立本土最佳化參數, 故採用以下三種統計指標來進行評估:

1. 皮爾森最佳擬合指數 (Pearson type goodness of fit index, R^2)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad 0.0 \leq R^2 \leq 1.0 \quad (9)$$

其中: E_i 為經驗式推估值; \bar{E} 為經驗式推估值之平均值; P_i 為 Penman-Monteith 法推估值; \bar{P} 為 Penman-Monteith 法推估值之平均值; n 為觀測總數。皮爾森最佳擬合指數代表兩種估算法的相關程度指標, 皮爾森最佳擬合指數最佳擬合情況為 $R^2=1$ 。

2. 誤差均方根 (Root Mean Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - P_i)^2}{n}} \quad 0.0 \leq RMSE \quad (10)$$

誤差均方根代表兩種估算值的變異程度指標, 誤差均方根最佳擬合情況為 $RMSE=0$ 。

3. 平均絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - P_i|}{n} \quad 0.0 \leq MAE \quad (11)$$

平均絕對誤差代表兩種估算值的平均偏差指標, 平均絕對誤差最佳擬合情況為 $MAE=0$ 。

四、結果與討論

本研究以台灣地區為研究案例, 探討不同理論基礎之蒸發散經驗公式, 與國際上廣泛應用之彭門-蒙地斯組合法作一比較, 以建立本土化參數。首先收集中央氣象局台灣地區之台北、台中、台南及台東等氣象站所紀錄之相關氣象項資料, 根據 Penman-Monteith 方程式如式(1)及其他不同理論基礎之經驗式包括式(3)、(4)、(5)、(6)、(7)及(8)等, 進行台灣地區的蒸發散量之推估。表 1 為所選用之蒸發散經驗式分別與 Penman-Monteith 方程式做比較後之校正前後參數值。其中顯示在台灣地區氣象資料下, 溫度估計法中 Hargreaves and Samani 法有明顯高估的現象; Blaney-Criddle 法及 Kharrufa 法則有低估的現象。而輻射能估計法中 Priestley and Taylor 法有高估的現象; Makkink 法及 Hargreaves 法則有低估的現象。

所以本研究採用三種統計指標(皮爾森最佳擬合指數、誤差均方根及平均絕對誤差)來進行 Penman-Monteith 方程式與其他不同理論基礎經驗式之最佳化擬合。溫度估計法中 Hargreaves and Samani 法因有高估的現象, 本研究將原訂參數 ($a=0.0023$, $b=17.8$) 向下修正 ($a=0.00115$, $b=14.8$); Blaney-Criddle 法及 Kharrufa 法原訂參數 ($a=0.46$, $b=8.13$; $a=0.34$) 有低估的現象分別向上修正 ($a=2.00$, $b=8.50$; $a=0.70$) 則可與 Penman-Monteith 方程式達最佳擬合。而輻射能估計法中 Priestley and Taylor 法有高估的現象, 本研究將原訂參數 ($a=1.26$) 向下修正 ($a=1.00$); Makkink 法及 Hargreaves 法原訂參數 ($a=0.7$; $a=0.0135$, $b=17.8$) 有低估的現象, 分別向上修正 ($a=0.9$; $a=0.0145$, $b=17.8$) 則可與 Penman-Monteith 方程式達最佳擬合。

表 2 及表 3 顯示 Penman-Monteith 法與不同理論基礎潛勢蒸發散經驗式之校正前後相關程度、變異程度及平均偏差情況, 其經過指針指標修正擬合後, 所達最佳化之擬合結果。另外, 圖 1、2、3 及 4 分別為台北、台中、台南及高雄測站利用不同潛勢蒸發散經驗式分別與 Penman-Monteith 方程式校正前後推估值。

五、結論

本研究應用國際廣泛利用之 Penman-Monteith 方程式探討台灣地區 1998 年至 2002 年蒸發散量, 並透過三種統計指標來與其它不同理論基礎之潛勢蒸發散經驗式做一最佳化參數校正, 以建立本土化參數。本研究選用溫度估計法中的 Blaney-Criddle 法、Hargreaves and Samani 法及

Kharrufa 法；與輻射能法中的 Makkink 法、Priestley and Taylor 法及 Hargreaves 法，應用於台灣地區之台北、台中、台南及台東等四個測站來分別探討現地參數之最佳化。結果顯示，台灣地區蒸發散隨季節變化而有所改變，其值介於 2.0mm/day 至 6.0mm/day 之間，夏季偏高而冬季則較為偏低。溫度估計法中，Blancy-Criddle 和 Kharrufa method 有低估的現象；而 Hargreaves and Samani method 則有明顯高估的現象。另外，輻射能估計法中 Makkink 及 Hargreaves method 有低估的現象；而 Priestley and Taylor method 則有高估的現象。本研究以 Penman-Monteith 方程式為主，探討不同理論基礎下蒸發散經驗公式進行現地參數最佳化擬合，經過參數校正後均能達到最佳擬合狀態，期以提供較簡便而有用的模式來推估台灣地區之潛勢蒸發散量。

六、參考文獻

- 中央氣象局，氣候年報-地面資料，(1998-2002)。
- 徐義人，應用水文學，國立編譯館出版，大中國圖書公司，(2003)。
- 陳進發，未飽和層土壤水平衡模式解析及其應用之研究，國立成功大學，資源工程學系博士論文，(2002)。
- 黃振昌、宋易倫，Penman-Monteith 方程式蒸氣壓力差最佳計算式之探討，氣象學報，45，第 53-70 頁，(2003)。
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Rase, D., and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration Guidedelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome (1998).
- Hargreaves, G. H., and Samni, Z. A., Reference crop evapotranspiration from temperature. *TRANSACTION of the ASAE* (1985).
- Hargreaves, G. H., and Samni, Z. A., Estimation of potential evapotranspiration. *J. of Irrg. Drainage Div.*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 108, 223-230 (1982).
- Hargreaves, G. H., Moisture availability and crop production. *TRANSACTION of the ASAE*, 18, 980-984 (1975).
- Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G., *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE, 332 (1990).
- Kharrufa, N. S., Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beitrag zur Hydrologie*, Sonderheft 5.1, 39-47 (1985).
- Makkink, G. F., Testing the Penman formula by means of lysimeters, *J. Instit. Water Engineers*, 11, 277-288 (1957).
- Moges, S. A., Katambara, Z., and Bashar, K., Decision support system for estimation of potential evapotranspiration in Pangani basin. *3rd WaterNet/Warfa Symposium 'Water Demand Management for Sustainable Development'*, Dar es Salaam (2002).
- Priestley, C. H. B., and Taylor, R. J., On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-92 (1972).
- Penman, H. L., Natural evaporation from open water bare soil and grass. *Proc., Royal Soc.*, London, 193, 120-145 (1948).
- Wilson, K. B., Habson, P. J., Mulholland, P. J., Baldocchi, D. D., Wullschlenger, S. D., A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sapflow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 153-168 (2001).
- Xu, C. Y., and Singh, V. P., Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 15, 305-319 (2001).
- Xu, C. Y., and Singh, V. P., Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 14, 339-349 (2000).

表 1. 不同蒸發散經驗公式參數值校正前後比較表

Method	Equation form	Original	Recalibrated
Blancy-Criddle method	$ET = kp(aT + b)$	$a=0.46$ $b=8.13$	$a=2.00$ $b=8.50$
Hargreaves-Samani method	$ET = aR_aTD^{1/2}(T + b)$	$a=0.0023$ $b=17.8$	$a=0.00115$ $b=14.8$
Kharrufa method	$ET = apT^{1.3}$	$a=0.34$	$a=0.70$
Makkink method	$ET = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda}$	$a=0.7$	$a=0.9$
Priestley-Taylor method	$ET = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda}$	$a=1.26$	$a=1.00$
Hargreaves method	$ET = a(T + b) \frac{R_s}{\lambda}$	$a=0.0135$ $b=17.8$	$a=0.0145$ $b=17.8$

Table 2 台灣地區各測站利用不同蒸發散經驗公式校正前之統計指標

Method	台北	台中	台南	台東
Blancy-Criddle				
R^2	0.893	0.892	0.853	0.912
RMSE	2.360	2.883	2.984	2.873
MAE	2.160	2.774	2.890	2.651
Hargreaves-Samani				
R^2	0.889	0.903	0.878	0.863
RMSE	5.023	5.126	4.877	4.418
MAE	4.674	4.981	4.774	4.337
Kharrufa				
R^2	0.908	0.908	0.864	0.930
RMSE	1.889	2.408	2.475	2.351
MAE	1.759	2.347	2.420	2.177
Makkink				
R^2	0.989	0.983	0.972	0.995
RMSE	0.830	0.837	0.950	0.879
MAE	0.765	0.775	0.863	0.833
Priestley-Taylor				
R^2	0.995	0.993	0.993	0.996
RMSE	0.954	1.092	1.177	1.141
MAE	0.866	1.024	1.088	1.037
Hargreaves				
R^2	0.996	0.994	0.993	0.997
RMSE	0.460	0.405	0.407	0.428
MAE	0.436	0.388	0.396	0.420

Table 2 台灣地區各測站利用不同蒸發散經驗公式校正後之統計指標

Method	台北	台中	台南	台東
Blancy-Criddle				
R^2	0.902	0.902	0.861	0.923
RMSE	0.619	0.343	0.388	0.616
MAE	0.516	0.288	0.313	0.524
Hargreaves-Samani				
R^2	0.894	0.908	0.885	0.870
RMSE	0.549	0.325	0.333	0.586
MAE	0.432	0.239	0.262	0.443
Kharrufa				
R^2	0.908	0.908	0.864	0.930
RMSE	0.375	0.553	0.597	0.531
MAE	0.350	0.481	0.511	0.407
Makkink				
R^2	0.992	0.983	0.976	0.996
RMSE	0.117	0.242	0.222	0.123
MAE	0.093	0.194	0.174	0.105
Priestley-Taylor				
R^2	0.995	0.993	0.993	0.997
RMSE	0.103	0.128	0.149	0.121
MAE	0.085	0.100	0.119	0.104
Hargreaves				
R^2	0.997	0.994	0.993	0.998
RMSE	0.205	0.138	0.135	0.167
MAE	0.193	0.118	0.115	0.150

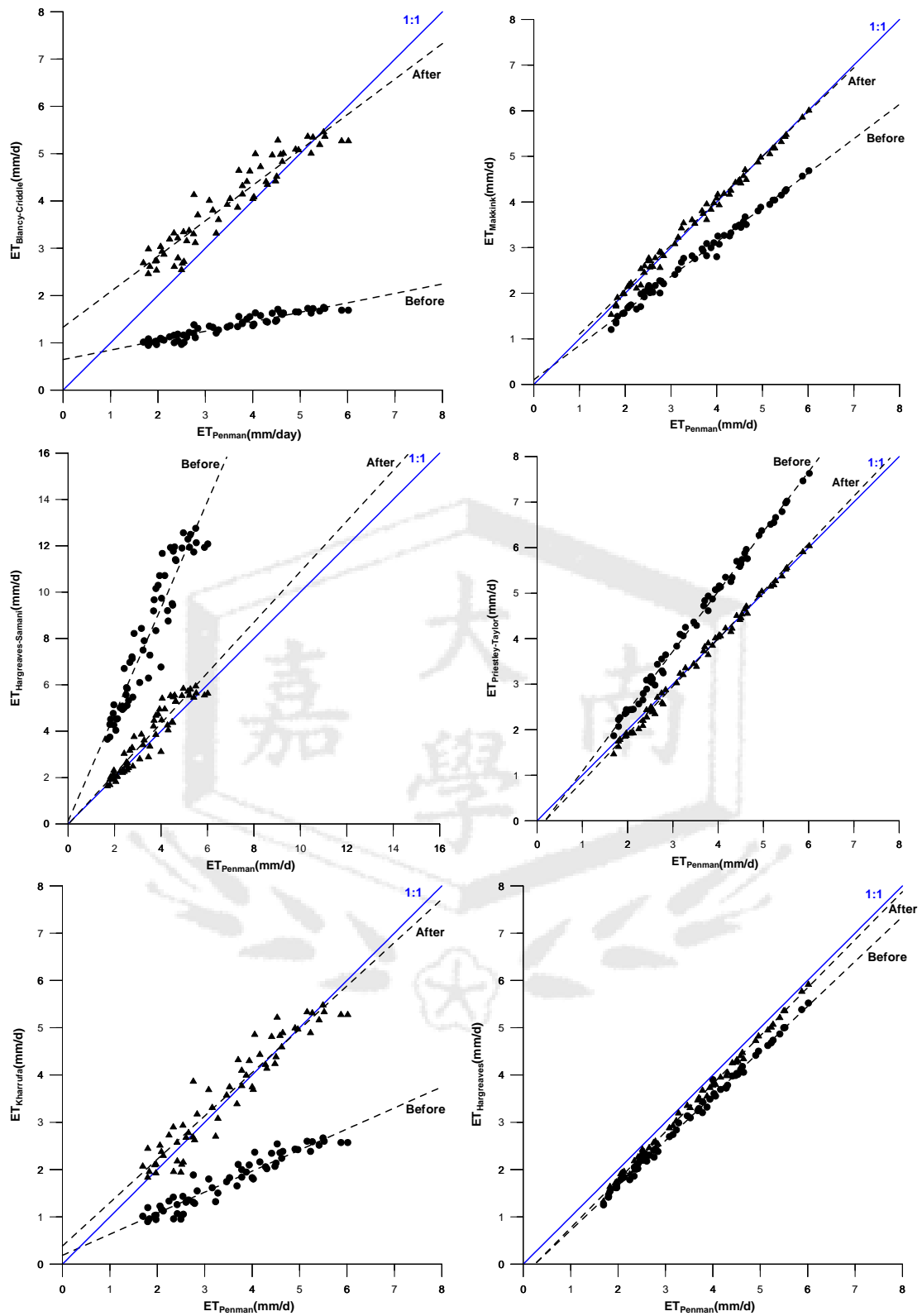


圖 1. 台北測站之 Penman-Monteith 方程式與不同蒸發散經驗公式校正前後比較圖

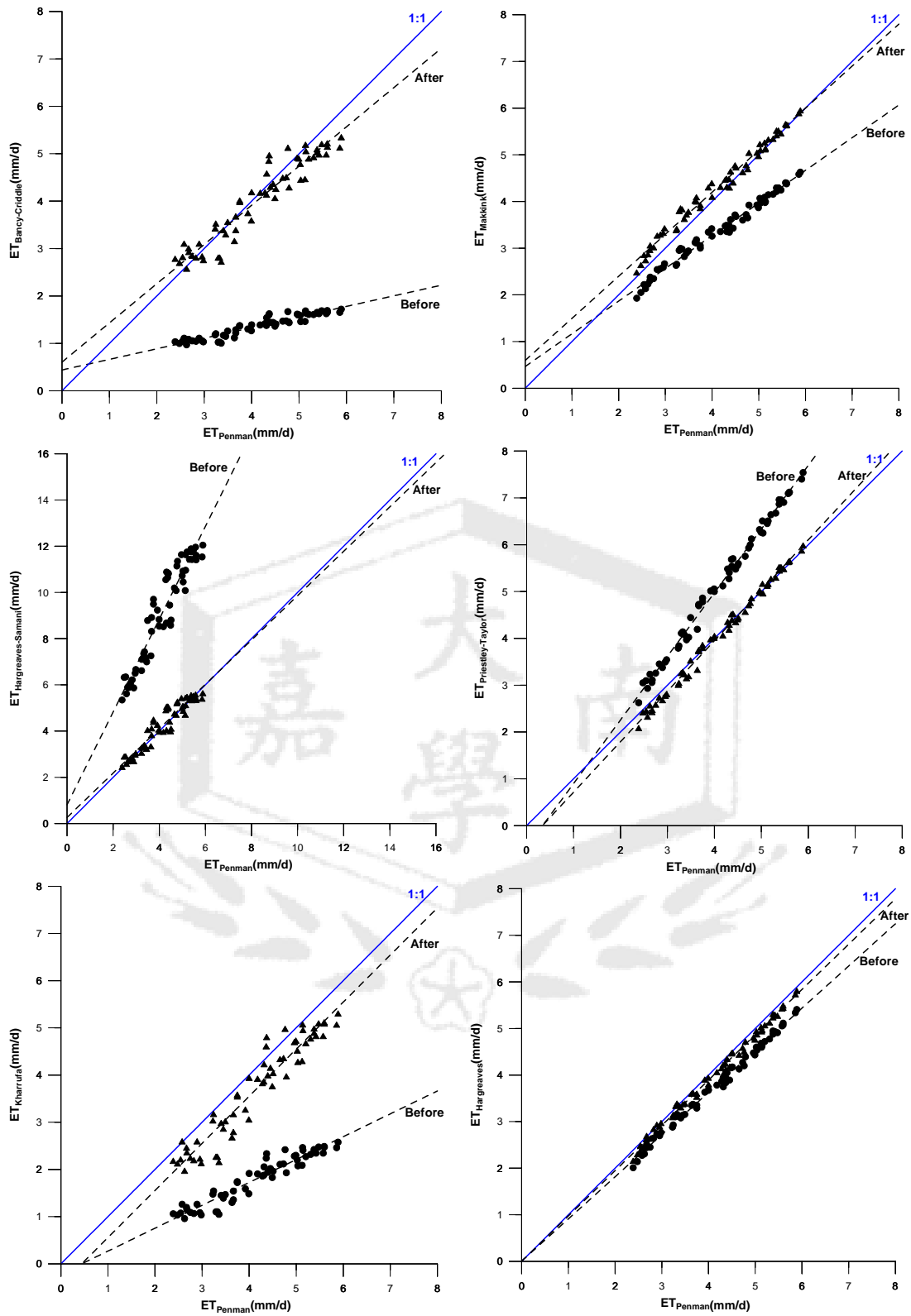


圖 2. 台中測站之 Penman-Monteith 方程式與不同蒸發散經驗公式校正前後比較圖

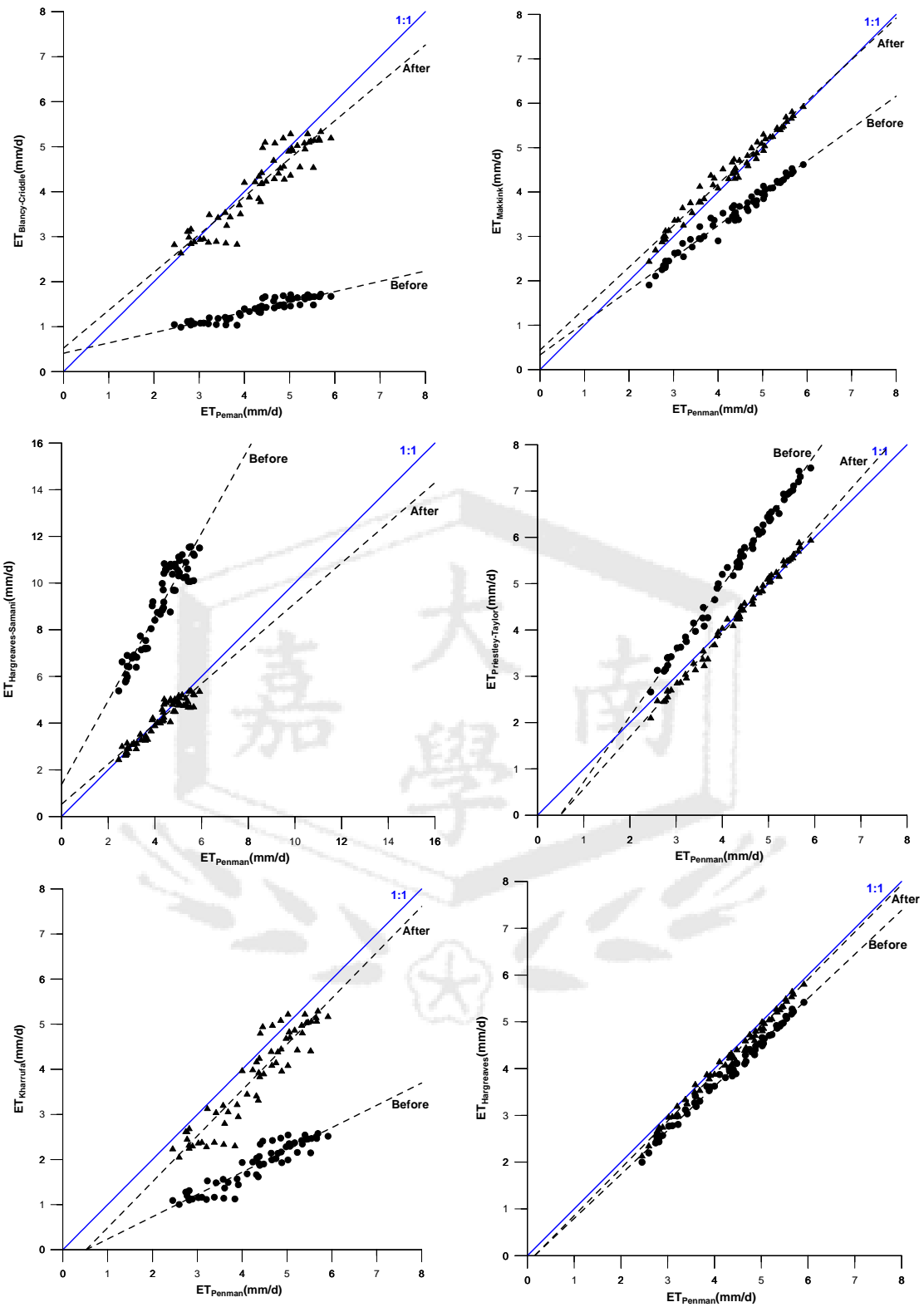


圖 3. 台南測站之 Penman-Monteith 方程式與不同蒸發散經驗公式校正前後比較圖

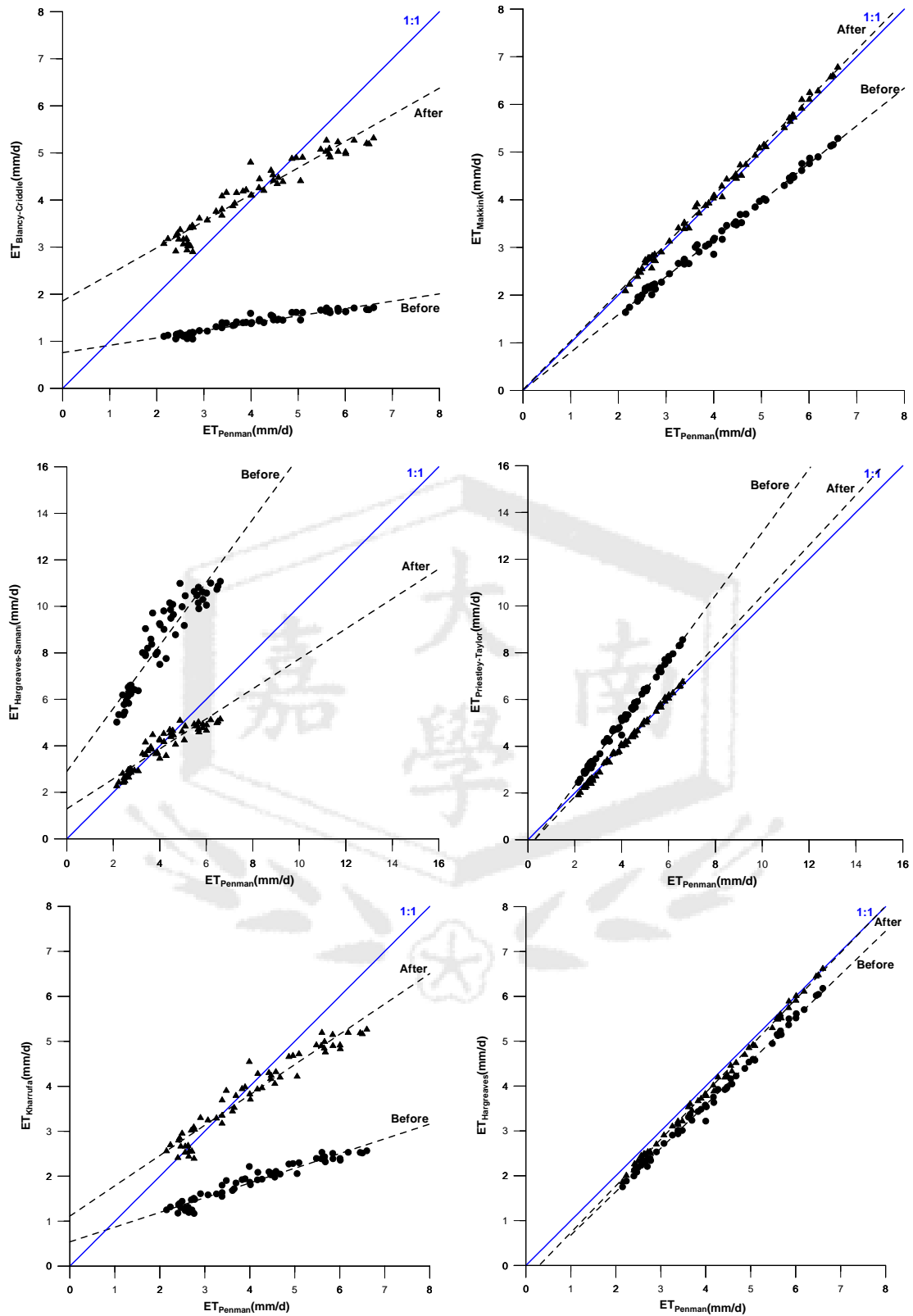


圖 4. 台東測站之 Penman-Monteith 方程式與不同蒸發散經驗公式校正前後比較圖