

潛勢能蒸發散經驗公式之最佳化比較

Optimum Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration

國立成功大學資源工程學系
博士班研究生

葉信富

Hsin-Fu Yeh

私立高苑技術學院資訊管理學系
助理教授

陳進發

Jin-Fa Chen

國立成功大學資源工程學系
教授

李振誥

Cheng-Haw Lee

摘 要

在未飽和層水平衡中，潛勢能蒸發散量(potential evapotranspiration)扮演著極重要的角色，為水資源規劃中重要之參數。本研究以台南地區為研究案例，探討不同理論基礎之潛勢能蒸發散經驗公式，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 Blancy-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，來分別探討現地參數之最佳化。結果顯示，輻射能法之經驗公式經過校正後，均能達到最佳擬合狀態。

關鍵詞：潛勢能蒸發散，Penman-Monteith，溫度估計法，輻射能法。

ABSTRACT

Potential evapotranspiration is to play an important role of water budget model in unsaturated zone. In this study, various empirical equations for calculating potential evapotranspiration with different theory model are compared with the Penman-Monteith equation using daily meteorological data from Tainan meteorological station. There are two basic categories for evaluating the potential evapotranspiration which are used for optimization in-situ parameters: temperature-based model and radiation-based model. Temperature-based model is including Blancy-Criddle method, Hargreaves and Samani method, and Kharrufa method; Radiation-based model is including Makkink method, Priestley and Taylor method, and Hargreaves method. Finally, we can found that the empirical equations of radiation-based model are optimum fit in with Penman-Monteith equation.

Keywords: Potential evapotranspiration, Penman-Monteith, Temperature-based model, Radiation-based model.

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(Stewart, 1988；Katul and Parlange, 1992；Wanchang et al., 1999；Wilson et al., 2001)。

蒸發散量為水面蒸發、土壤蒸發、葉面蒸發及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，稱為潛勢能蒸發散(potential evapotranspiration)。滿足潛勢能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能蒸發散。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，實際蒸發散與潛勢能蒸發散之差極小，圖 1 為實際蒸發散與潛勢能蒸發散之示意圖。如前述潛勢能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. 潛勢能蒸發散可用以表示氣象之參數：潛勢

能蒸發散可以用來反應某地區之氣象情形，如溫度高，則潛勢能蒸發散必大。

2. 潛勢能蒸發散與雨量之關係：潛勢能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能蒸發散而定。差數大表示表示濕潤地，小即為乾燥地。就實用觀點言之，潛勢能蒸發散小於雨量，則該地區水源充足，無須灌溉；若潛勢能蒸發散大於雨量，則水源不足缺乏用水。
3. 潛勢能蒸發散與直接水的損失：就水方面而言，潛勢能蒸發散表示水分損失情形，完全視潛勢能蒸發散與實際蒸發散之差而定。若其差數甚小或為零時，潛勢能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)，潛勢能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。

關於潛勢能蒸發散量(potential 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

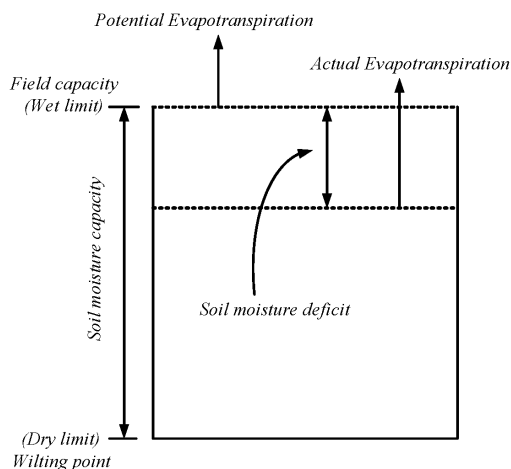


圖 1 潛勢能蒸發散量與實際蒸發散量示意圖

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(Monteith, 1981、1990)，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)。

本研究以台南地區為研究案例，探討不同理論基礎之潛勢能蒸發散經驗公式，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，應用於台南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；Hupet and Vanclouster, 2001)：

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

其中 ET ：潛勢能蒸發散率[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，在潛勢能蒸發散率的推估中，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)

在此所探討的潛勢能蒸發散率 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：

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

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潛勢能蒸發散方程式做推估及比較，其中包含有 Thornthwaite (1948)、Blaney-Criddle(1950)、Hamon(1961)、Romanenko(1961)、Linacre(1977)、Hargreaves and Samani(1985)及 Kharrufa(1985)等方法。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：

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

其中：p 為一年中每月之年日照百分率。

(2) Hargreaves and Samani 法：

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

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)推導出潛勢能蒸發散與現地日照百分率及溫度之關係如下：

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

2.3 輻射能法(radiation-based)

輻射能法主要是以能量平衡(energy-balance)的原理來推估潛勢能蒸發散率(Jensen et al., 1990)，Jensen et al. (1990)曾研究利用不同的輻射能方程式，對潛勢能蒸發散進行推估，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，其中包含 Turc (1961)、Makkink (1957)、Jensen and Haise (1963)、Hargreaves (1975)、Doorenbos and Pruitt (1977)、McGuinness and Bordne (1972)、Abteu (1996)及 Priestley and Taylor (1972)等，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潛勢能蒸發散經驗式：

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

其中：R_s 為總日照輻射能[cal cm⁻² 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：

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

(3) Hargreaves 法：

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

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

三、統計指標

本研究欲利用 Penman-Monteith 方程式與不同理論基礎之潛勢能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, R²)

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

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 R²=1。

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

表 1 1998~2002 年台南地區主要氣象參數月平均值

月份	氣溫[°C]	氣壓[mb]	露點溫度[°C]	日照比[%]	風速[m/s]	太陽輻射量[MJ/m ²]
Jan.	18.30	1016.3	14.86	53.14	1.41	13.78
Feb.	18.84	1016.1	15.28	51.28	1.36	14.65
Mar.	22.06	1012.8	18.38	52.52	1.26	17.32
Apr.	25.22	1010.8	21.90	46.56	1.17	18.16
May.	27.02	1007.8	24.08	39.36	1.01	17.68
Jun.	28.72	1006.4	25.92	44.20	1.17	18.89
Jul.	28.8	1003.9	26.08	38.48	1.18	17.61
Aug.	28.84	1005.3	26.00	49.96	1.13	19.26
Sep.	27.88	1006.2	25.08	49.42	1.15	17.71
Oct.	26.5	2830.9	23.44	52.70	1.07	16.01
Nov.	22.92	1013.7	19.60	54.30	1.27	13.89
Dec.	19.72	1016.5	16.60	45.62	1.41	11.49

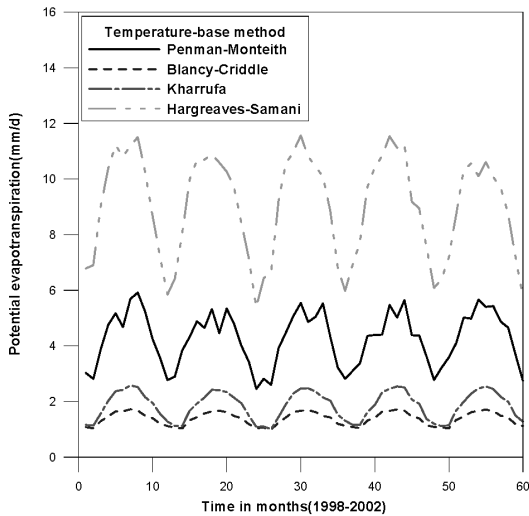


圖 2 Penman-Monteith 法與不同溫度估計法經驗式推估台南地區年潛勢蒸發散之比較圖(校正前)

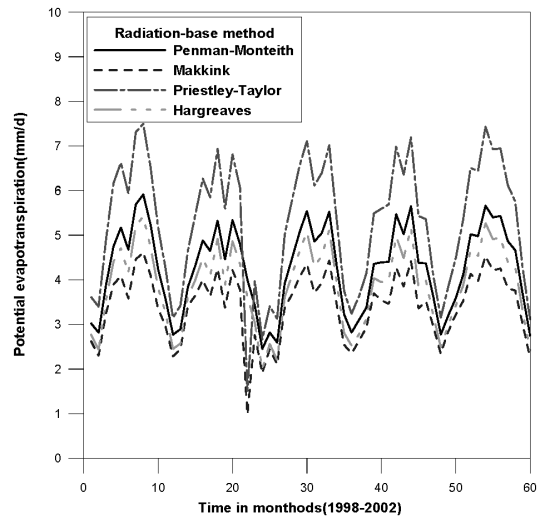


圖 3 Penman-Monteith 法與不同輻射能估計法經驗式推估台南地區年潛勢蒸發散之比較圖(校正前)

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

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)

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

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

本研究收集中央氣象局台南氣象站所紀錄之相關氣象項資料，如表 1 所示(中央氣象局 1998-2002)，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，進行台南地區的潛勢蒸發散量之推估。圖 2 及圖 3 為利用溫度估計法及輻射能估計法潛勢蒸發散經驗式分別與

表 2 溫度估計法方程式經驗參數校正前後比較表

溫度估計法	經驗方程式	原訂參數	修正參數
Blaney-Criddle method	$ET = kp(aT + b)$	$a=0.46$ $b=8.13$	$a=1.70$ $b=8.13$
Hargreaves-Samani method	$ET = aR_aTD^{1/2}(T + b)$	$a=0.0023$ $b=17.8$	$a=0.00115$ $b=14.8$
Kharrufa method	$ET = apT^{1.3}$	$a=0.34$	$a=0.70$

表 3 輻射能估計法方程式經驗參數校正前後比較表

輻射能估計法	經驗方程式	原訂參數	修正參數
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	$ET = a(T + b) \frac{R_s}{\lambda}$	$a=0.0135$ $b=17.8$	$a=0.0145$ $b=17.8$

Penman-Monteith 方程式之比較圖。其中顯示在台南地區資料下，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 ($a=1.70$, $b=8.13$; $a=0.70$) 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 即為溫度估計法與輻射能估計法中各經驗參數校正前後比較表，其經過指指指標

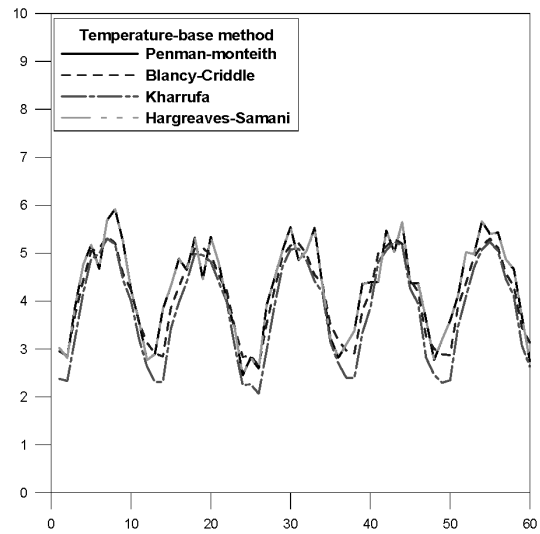


圖 4 Penman-Monteith 法與不同輻射能估計法經驗式推估台南地區潛勢能蒸發散之比較圖(校正後)

修正擬合後，所達最佳化之擬合結果，其圖示於圖 4 及圖 5。在表 4、表 5、表 6 及表 7 分別為利用兩種不同理論基礎經驗式校正前後之指標值，結果顯示，利用輻射能估計法之經驗式均能達到較佳之擬合結果。另外，圖 6 及圖 7 顯示 Penman-Monteith 法與不同理論基礎潛勢能蒸發散經驗式之校正前後相關程度、變異程度及平均

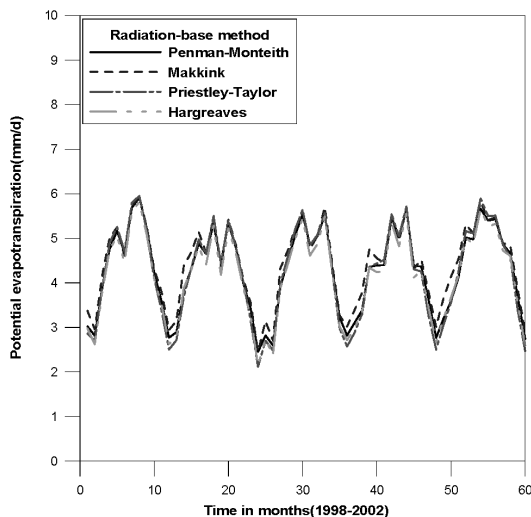


圖 5 Penman-Monteith 法與不同輻射能估計法經驗式推估台南地區潛勢能蒸發散之比較圖(校正後)

表 4 台南地區-溫度估計法模式評估指標值(校正前)

模式 指標值	Blancy-Criddle method	Hargreaves-Samani method	Kharrufa method
R^2	0.853	0.878	0.864
RMSE	2.984	4.877	2.475
MAE	2.890	4.774	2.420

表 5 台南地區-輻射能估計法模式評估指標值(校正前)

模式 指標值	Makkink method	Priestley-Taylor method	Hargreaves method
R^2	0.972	0.993	0.993
RMSE	0.950	1.177	0.407
MAE	0.863	1.088	0.396

表 6 台南地區-溫度估計法模式評估指標值(校正後)

模式 指標值	Blancy-Criddle method	Hargreaves-Samani method	Kharrufa method
R^2	0.861	0.885	0.864
RMSE	0.388	0.333	0.597
MAE	0.313	0.262	0.511

表 7 台南地區-輻射能估計法模式評估指標值(校正後)

模式 指標值	Makkink method	Priestley-Taylor method	Hargreaves method
R^2	0.976	0.993	0.993
RMSE	0.222	0.149	0.135
MAE	0.174	0.119	0.115

偏差情況。

五、結 論

本研究應用國際廣泛利用之 Penman-Monteith 方程式探討台南地區 1998 年至 2002 年潛勢能蒸發散，並透過三種統計指標來與其它不同理論基礎之潛勢能蒸發散經驗式做一最佳化參數校正，以建立本土化參數。結果顯示，台南地區潛勢能蒸發散隨季節變化而有所改變，其值介於 2.5mm/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。在溫度估計法中 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 ($a=0.00115$, $b=14.8$)；Blancy-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 ($a=1.70$, $b=8.13$ ； $a=0.70$) 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。本研究採用以上三種統計指標來進行 Penman-Monteith 方程式與其他不同理論基礎經驗式之最佳化擬合，經過校正後結果顯示，溫度估計法其誤差均方根值介於 0.333 至 0.597 之間；而平均絕對誤差介於 0.262

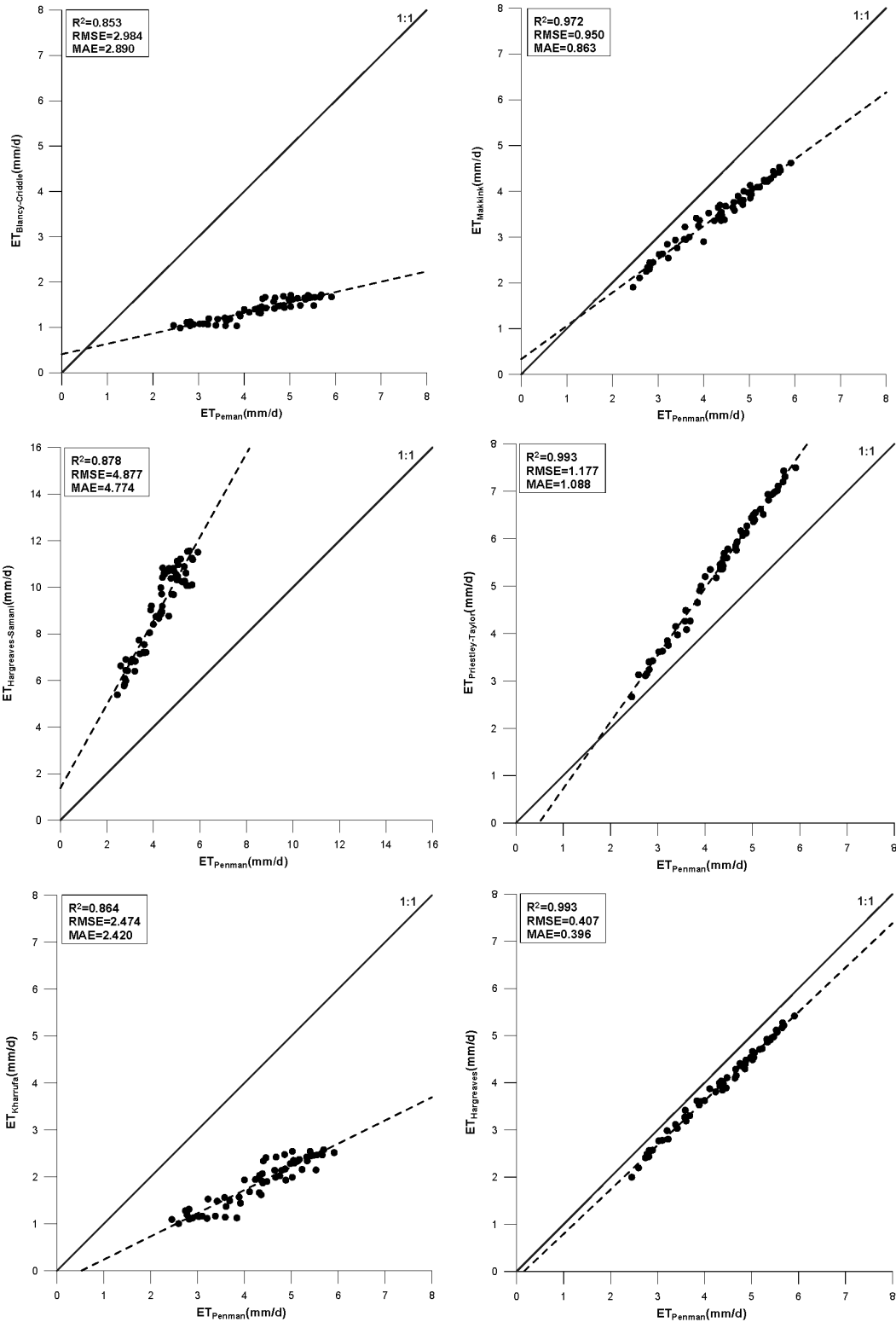


圖 6 台南地區使用 Penman-Monteith 法與不同理論模式經驗式推估潛勢蒸發散之比較圖（校正前）

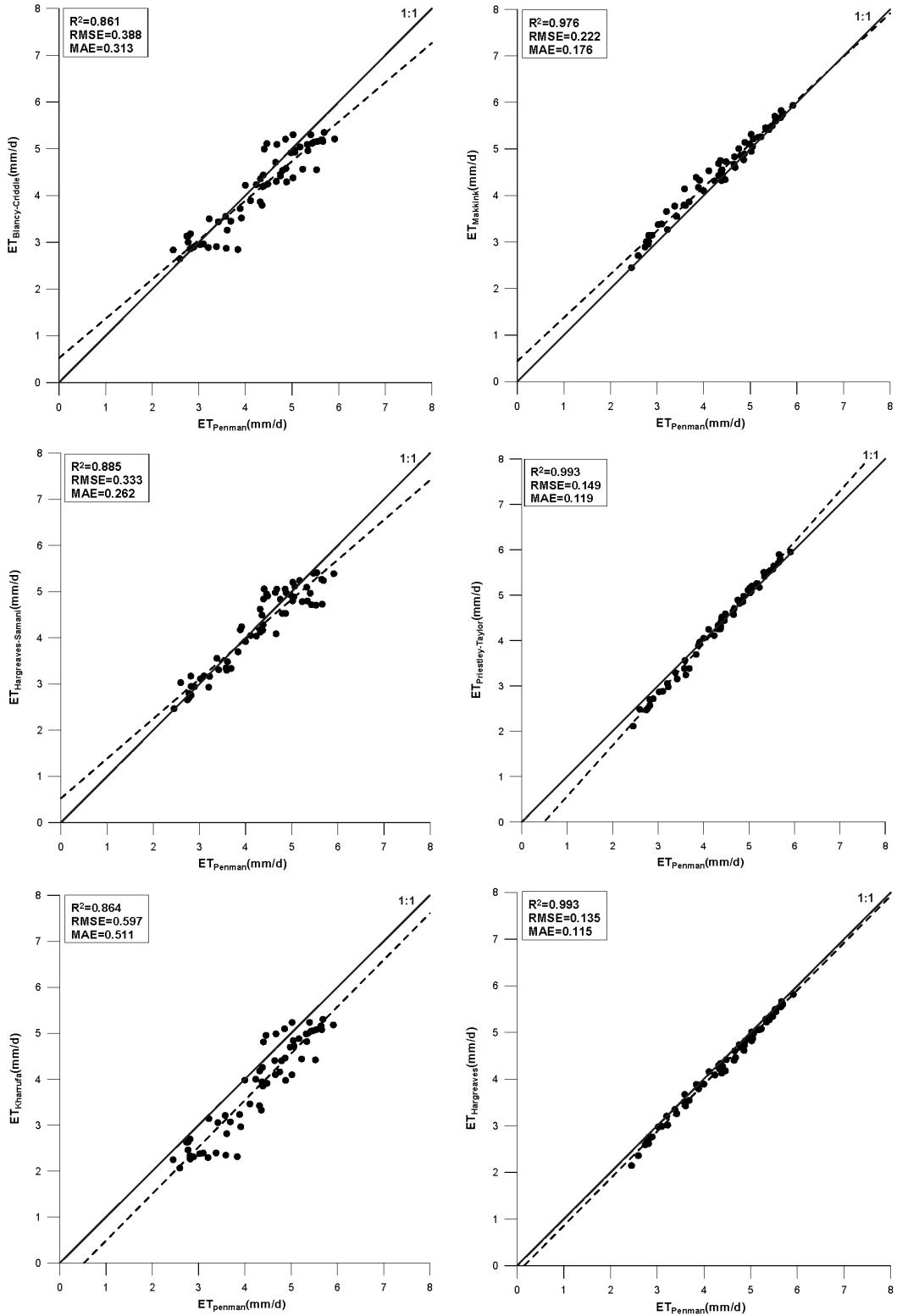


圖 7 台南地區使用 Penman-Monteith 法與不同理論模式經驗式推估潛勢蒸發散之比較圖（校正後）

至 0.511 之間。另外，輻射能估計法其誤差均方根值介於 0.135 至 0.222 之間；而平均絕對誤差介於 0.115 至 0.174 之間。所以本研究以 Penman-Monteith 方程式為主，探討不同理論基礎下潛勢能蒸發散經驗公式進行現地參數最佳化擬合，結果顯示輻射能法之經驗公式經過校正後，均能達到最佳擬合狀態。

參考文獻

1. 中央氣象局，氣候年報-地面資料，1998-2002。
2. 徐義人，2003，應用水文學，國立編譯館出版，大中國圖書公司。
3. 陳進發，2002，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。
4. 黃振昌、宋易倫，2003，Penman-Monteith 方程式蒸氣壓力差最佳計算式之探討，氣象學報，45，53-70。
5. Abtew, W., 1996. Evapotranspiration measurement and modeling for three wetland systems in South Florida. *Water Resour. Bull.*, 32, 465-473.
6. Allen, R. G., Pereira, L. S., Rase, D., and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
7. Blaney, H. F., and Criddle, W. D., 1950. *Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data*. US Department of Agriculture, Soil conservation Service, Tech. Pap. No. 96, 48 pp.
8. Doorenbos, J., and Pruitt, W. O., 1977. *Crop Water Requirement*, FAO, Irrigation and Drainage, Paper 24, 144 pp.
9. Hargreaves, G. H., and Samni, Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *TRANSACTION of the ASAE*.
10. Hargreaves, G. H., and Samni, Z. A., 1982. Estimation of potential evapotranspiration. *J. of Irrig. Drainage Div.*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 108, 223-230.
11. Hargreaves, G. H., 1975. Moisture availability and crop production. *TRANSACTION of the ASAE*, 18, 980-984.
12. Hamon, W. R., 1961. Estimating potential evapotranspiration", *J. Hydraul. Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng.*, 87, 107-120.
13. Hupet, F., and Vanclooster, M., 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 243, 192-204.
14. Jesen, M. E., and Haise, H. R., 1963. Estimation of evapotranspiration from solar radiation. *J. of Irrig. and Drainage Div. Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, 89, 15-41.
15. Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G., 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE, 332 pp.
16. Katul, G. G., Parlange, M. B., 1992. A Penman-Brutsaert model for wet surface evaporation. *Water Resource Research*, 28, 121-126.
17. Kharrufa, N. S., 1985. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beitrag zur Hydrologie, Sonderheft 5.1*, 39-47.
18. Linacre, E. T., 1977. A sampling formula for estimation evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricult. Meteorol.*, 18, 409-424.
19. Monteith, J. L., 1981. Evaporation and surface temperature. *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.*, 107, 1-27.
20. Monteith, J. L. and Unsworth, M. H., 1990. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London.
21. Makkink, G. F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters, *J. Instit. Water Engineers*, 11, 277-288.

22. McGuinness, J. L., and Bordne, E. F., 1972. A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values”, Tech. Bull. 1452, 71, *Agric. Res. Serv.*, U. S. Dept. of Agric., Washington, D. C..
23. Moges, S. A., Katambara, Z., and Bashar, K., 2002. Decision support system for estimation of potential evapotranspiration in Pangani basin. *3rd WaterNet/Warfsa Symposium ‘Water Demand Management for Sustainable Development’*, Dar es Salaam.
24. Priestley, C. H. B., and Taylor, R. J., 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-92.
25. Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water bare soil and grass. *Proc., Royal Soc.*, London, 193, 120-145.
26. Romanenko, V. A., 1961. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. *Proceedings Ukrainian Hydrometeorological research Institute*, 3, Kiev.
27. Stewart, J. B., 1988. Modeling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43, 19-35.
28. Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geog. Review*, 38, 55-94.
29. Turc, L., 1961. Estimation of irrigation water requirements, Potential evapotranspiration: A Simple climatic formula evolved up to date. *Ann, Agronomy*, 12, 13-49.
30. Wanchang, Z., Yinsheng, Z., Ogawa, K., Yamaguchi, Y., 1999. Observation and estimation of daily actual evapotranspiration and evaporation on a glacierized watershed at the headwater of the Urumqi River, Tianshan, Chain. *Hydrological Processes*, 13, 1589-1601.
31. Wilson, K. B., Habson, P. J., Mulholland, P. J., Baldocchi, D. D., Wullschlenger, S. D., 2001. 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.
32. Xu, C. Y., and Singh, V. P., 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 15, 305-319.
33. Xu, C. Y., and Singh, V. P., 2000. Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 14, 339-349.

收稿日期：民國 93 年 12 月 1 日
 修正日期：民國 94 年 3 月 29 日
 接受日期：民國 94 年 4 月 1 日