

## 評估蒸發皿係數以推估台灣南部地區 蒸發散量之研究

### Evaluation of Pan Coefficients for Estimating Reference Evapotranspiration in Southern Taiwan

國立成功大學

國立成功大學

國立成功大學

國立成功大學

資源工程學系

資源工程學系

資源工程學系

資源工程學系

博士候選人

教授

博士候選人

碩士

葉信富

李振誥\*

陳忠偉

張格綸

Hsin-Fu Yeh

Cheng-Haw Lee

Jung-Wei Chen

Ke-Lun Chang

#### 摘要

在水資源規劃中，對於蒸發散量( $ET_{ref}$ )之評估通常依據氣象站蒸發皿之蒸發量資料，可利用蒸發皿蒸發量( $E_{pan}$ )與蒸發皿係數( $K_{pan}$ )來計算蒸發散量( $ET_{ref} = K_{pan} \times E_{pan}$ )。但近年來受全球氣候變遷影響，舊有蒸發皿係數未能反映現今環境條件下之蒸發散量。蒸發散量之推估已經發展出許多方法，其中以聯合國糧食與農業組織(FAO)建議之 Penman-Monteith 法為最佳估算方法。本研究以台灣南部地區 6 個氣象觀測站作為研究案例，蒐集 1990-2004 年之氣象資料評估蒸發散量及蒸發皿蒸發量，並探討皿蒸發係數之區域空間分布。結果顯示在台灣南部地區參考蒸散量與蒸發皿蒸發量有相同的趨勢分布，蒸發散量呈現南低北高的情況。另外在蒸發皿係數方面， $K_{pan}$ 值也都有區域性與季節性的變化。此分布情況可以正確的評估出真實蒸發散量做為區域性水文評估及管理之參考資訊。

關鍵詞：參考蒸發散量，蒸發皿係數，Penman-Monteith。

#### ABSTRACT

Evaporation pan ( $E_{pan}$ ) data are often used to estimate reference evapotranspiration ( $ET_{ref}$ ) for use in water resource planning. Generally,  $ET_{ref}$  is estimated as the product of the  $E_{pan}$  data and a pan coefficient ( $K_p$ ) ( $ET_{ref} = K_p \times E_{pan}$ ). In recent years, under the impact of global climate change, the early studies on  $K_{pan}$  didn't response to current climatic situation. However, reliable estimation of  $ET_{ref}$  using  $E_{pan}$  depends on the accurate

\*通訊作者，國立成功大學資源工程研究所教授，70101 台南市東區大學路 1 號，leech@mail.ncku.edu.tw

determination of  $K_{pan}$ . Many different methods for estimating  $ET_{ref}$  have been developed, among which the Penman-Monteith method is demonstrated to be especially excellent by the Food and Agriculture Organization (FAO). In this study, the Penman-Monteith reference evapotranspiration, pan evaporation, and pan coefficient are calculated, compared and regionally mapped at six meteorological stations during 1990-2004 in Southern Taiwan. Their spatial distribution and temporal are examined and discussed. The results show the reference evapotranspiration and pan evaporation have similar regional distribution patterns in the southern Taiwan both with the highest values being in the lower region and the lowest values being in the upper region. This distribution pattern provides valuable information for regional hydrological studies since it is one of the most important factors determining regional actual evapotranspiration, which, in turn, is a key parameter in regional water resources assessment and water management.

**Keywords:** Reference evapotranspiration, Pan coefficient, Penman-Monteith.

## 一、前 言

水文循環過程中，除了降雨、逕流及入滲外，蒸發散量(evapotranspiration)亦是當中重要水文因子之一，地球表面約有 70% 之水分透過蒸發散而返回大氣中，此為水分與能量流動之間非常複雜而相互影響過程的結果，其受到大氣、土壤及植生情況等因素的影響，受到這些複雜的因素影響，對於區域性的蒸發散量之量化顯得更加困難(葉信富等人，2005)。在水資源規劃利用上蒸發散量不但是一個重要的參數，在農業灌溉工程更是一個重要指標。由於近年來受到全球氣候變遷影響，不論水文或氣象上都與過去有所不同。許晃雄等人(2000)利用大氣環流模式 (*General Circulation Models, GCMs*)分析台灣地區過去百年來之氣候變遷的特徵，結果發現全島經歷了暖化現象，與全球暖化趨勢一致，年溫呈現上升之趨勢，氣溫上升速率在 1.0~1.4°C/100 年，遠大於全球平均值 0.6°C/100 年。世界氣象組織(*World Meteorological Organization, WMO*)與聯合國環境規劃署(*United Nations Environmental Program, UNEP*)為了能有效週期性的評估氣候變遷對於全世界環境、社會經濟所帶來的衝擊，於 1988 年成立了政府間氣候變遷專題小組(*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*)，更在 2001 年指出如果輻射增加，而濕

度減少，在氣溫上升 2°C，潛勢能蒸發散量 (potential evapotranspiration)可能增加 40%。近期不少研究也發現到長期蒸發皿之蒸發量呈現下降趨勢，但以水平衡或其他方法求得之實際蒸發散量卻有不同或完全相反的趨勢(Brutsaert and Parlange, 1998)。汪中和(2004)提出台灣百年來年均溫已上升 1.7 度，尤以近二十年來上升速率最快，而冬季變化幅度較大，近二十年來暖冬現象明顯，夏季溫度變化較小，但二十世紀前半期與後半期有明顯的差異。因此全球環境氣候變遷的問題已經引起國際間的高度關切。對於台灣環境氣候變遷所造成的衝擊，此相關課題已有相關學者展開積極之研究。氣候變遷會直接造成全球氣候的改變，太陽輻射、風、溫度、降水以及蒸發散都會有異常的變化。綜合上述所敘，環境氣候變遷造成與過去的氣候條件有所不同，對於過去所建立來推估蒸發散方法所採用之參數是否需要修正值得深入研究。

蒸發散包括了蒸發(evaporation)與蒸散(transpiration)兩個部份，其中對於自由水面蒸發量的計算，早期估計自由液面蒸發量的公式，可根據甚多經驗或半經驗公式，此類公式大多來自於 Dalton(1802)提出計算水面上蒸氣量的經驗式，認為水面上熱對流和風所交互產生的亂流，搬送了水面表層的水蒸氣，使得蒸發的現象持續發生。王如意和易任(2001)指出如果可以從水面

上兩處量測出溫度、溼度、風速，應用亂流理論，則可以計算出水面上所產生的蒸發量。利用蒸發皿蒸發量來估算參考蒸發散量，是一個相當普遍的方法，特別是在美國及亞洲地區的國家(Liu *et al.*, 2004)，從開放式水表面蒸發皿中蒸發提供了對輻射量、風、溫度和濕度整合結果的量測。Dalton 經驗式主要原理即利用空氣動力學概念，假設水面蒸發量大小與水面飽和水汽壓及空氣壓之差成正比。Blaney (1942)考慮以溫度、濕度及白天時數為基礎之經驗式，推估不同季節下之作物蒸發散量，此關係式隨後 Blaney and Criddle 修正後提出(Doorenbos *et al.*, 1984)。Penman (1948)參考了 Dalton 的理論首先將熱量傳輸和質量傳輸兩者結合，考慮可利用能量、邊界層溫度與水汽壓來計算自由液面之蒸發量，並搭配現地之蒸發皿實驗，測量皿蒸發量，結果顯示估計值與量測之蒸發量非常接近，之後估計蒸發散量的公式大多以此為基礎加以修改。而 Penman (1956)則於往後陸續對估算法中之區域經驗參數(empirical parameter)做適度之修正。Stanhill (1962)將 Penman 法公式中之能量項與氣體動力項之係數簡化，其所計算之蒸發散量與 Penman 法約僅有 0.2%的誤差。Jensen and Haise (1963)考慮加入溫度項、太陽輻射項與蒸發散量之關係，並配合土樣試驗之結果，決定其關係式。由於 Penman 法主要是適用於自由液面或是覆蓋完整且濕潤之短草地區，因此 Monteith (1965)將其修改 Penman 法，加了植物體內在阻力與環境外在阻力的考量，擴大運用至估計各種作物環境條件下之來估計蒸發散量，稱之為 Penman-Monteith 模式。Penman-Monteith 法係經過全世界 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 年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)頒佈最新的作物需水量之推估方式，此種方法乃將 Penman-Monteith 公式修改而成，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、

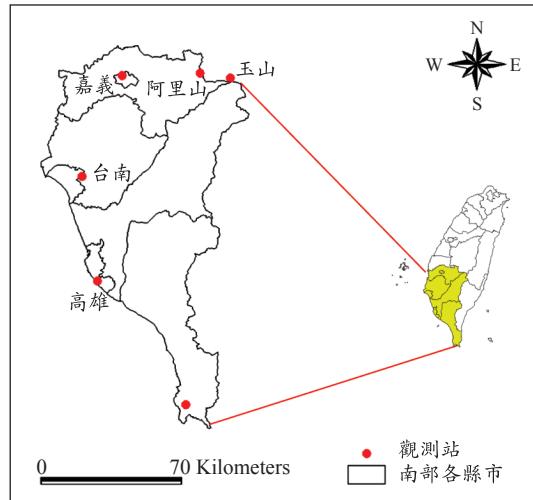


圖 1 中央氣象局南部地區氣象測站位置

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(黃振昌與宋易倫, 2003)。Allen *et al.* (1998, 2005)亦修改 Penman-Monteith 模式應用在灌溉工程上推估參考蒸發散量，對於各種的氣候條件下均獲得很好的評估。

實際上之蒸發散量要與參考蒸發散量等量相當時，必須在擁有充足水分的條件下，才能獲得，但因為地表覆蓋與氣候參數等條件的不同，蒸發皿蒸發量須乘以蒸發皿的修正係數才能代表參考蒸發散量，故本研究以廣泛被應用的 Penman-Monteith 法為基準，利用台灣南部地區 6 個氣象觀測站作為研究案例，蒐集 1990-2004 年等近 15 年的氣象資料推估蒸發散量及蒸發皿蒸發量，來建立蒸發皿係數，尋求較簡便之計算方式進而建立台灣南部地區蒸發皿係數之分布圖，探討皿蒸發係數之區域空間分布。將此分布情形判斷出合理的評估，求得真實蒸發散量做為區域性水文評估及管理之參考資訊。

## 二、區域概述與資料收集

本研究採用中央氣象局提供之台灣南部地區 6 個氣象觀測站資料，研究範圍包括了嘉義、台南、高雄及屏東等縣市，其地理位置分佈如圖 1 所示，氣象觀測站位置站況整理於表 1。

表 1 中央氣象局所屬南部地區各氣象站

測站名稱	北緯	東經	海拔高度 [m]	風速儀地面高度 [m]
阿里山	23°30'37.42"	120°48'18.39"	2415.9	15.1
嘉義	23°29'51.81"	120°25'28.21"	27.8	14.5
玉山	23°29'21.49"	120°57'06.26"	3845.7	9.2
台南	22°59'42.81"	120°11'49.18"	9.7	36.6
高雄	22°34'04.40"	120°18'28.92"	3.1	14.0
恆春	22°00'19.56"	120°44'16.99"	24.1	14.3

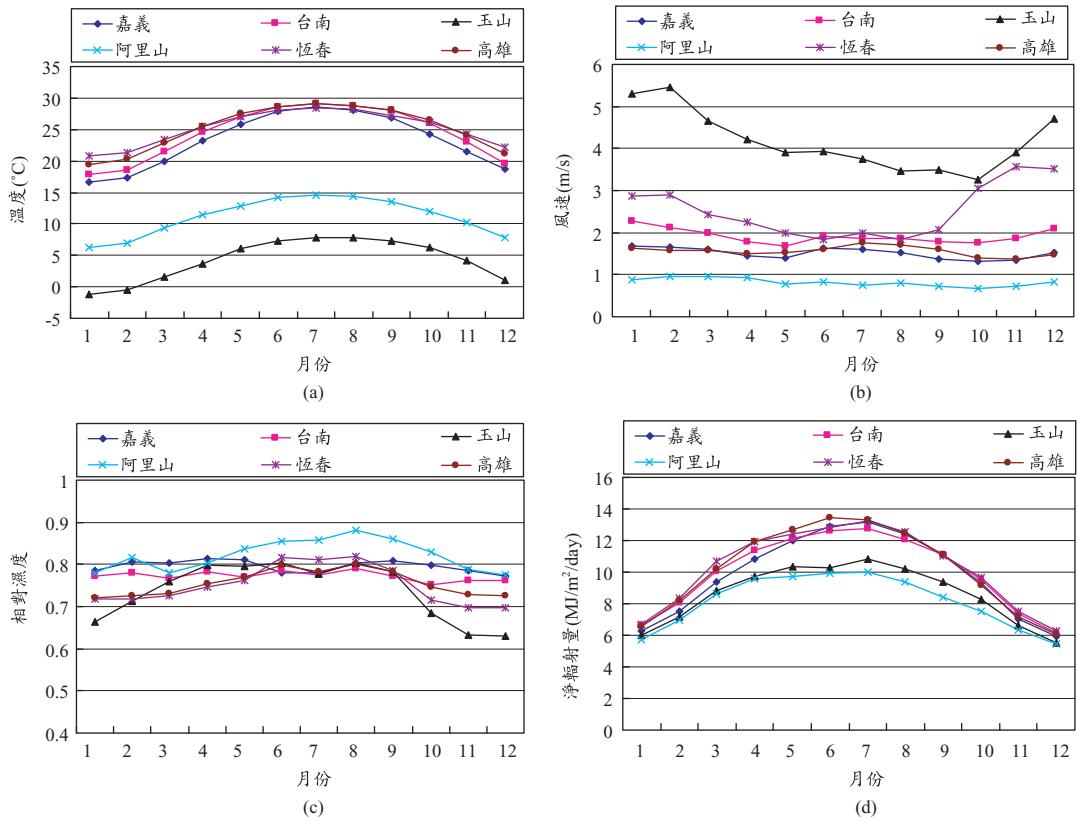


圖 2 (a)南部地區各氣象觀測站之(a)溫度變化圖(1990-2004 年)；(b)風速變化圖(1990-2004 年)；(c)相對濕度變化圖(1990-2004 年)；(d)淨輻射量變化圖(1990-2004 年)

本研究蒐集 1990 年至 2004 年之氣象資料進行比較，資料包括氣壓、溫度、相對溼度、日照時數、風速及蒸發皿蒸發量等資料整理於圖 2(a)-(d)中。南部區域各氣象觀測站之溫度變化大致介於 16.62 至 29.14[°C]，其中以阿里山與玉山氣象站較低，其介於 -1.15 至 14.51[°C]之間，如圖 2(a)所示。南部區域各氣象觀測站之風速變化其值

介於 0.67 至 3.93[m/s]之間，平均為 1.98[m/s]，如圖 2(b)所示。南部區域各氣象觀測站之相對濕度變化其值介於 0.63 至 0.88[-]之間，平均為 0.77[-]，如圖 2(c)所示。南部區域各氣象觀測站之輻射量變化大致介於 5.15 至 14.07 [MJm⁻²day⁻¹]，其中阿里山與玉山氣象站其值介於 5.52 至 10.82[MJm⁻²day⁻¹]之間，如圖 2(d)所示。

表 2 Penman-Monteith 法各參數輸入資料

參數	輸入資料
風速( $u_2$ )	測站量測的風速、風速儀地面高度
飽和水氣壓力( $e_s$ )	溫度
露點水氣壓力( $e_a$ )	相對溼度、飽和水氣壓力
氣壓曲線斜率( $\Delta$ )	溫度
溼度常數( $\gamma$ )	大氣壓力
淨輻射量( $R_n$ )	緯度、輻射量、風速儀高度、溫度及日照比
土壤熱通量( $G$ )	溫度

### 三、參考蒸發散量推估模式

#### 3.1 Penman-Monteith 法(FAO-56)

$$ET_{ref} = \frac{0.408(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34u_2)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

其中  $ET_{ref}$  : 參考蒸發散量 [mm/day] ;  
 $\Delta$  : 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 [ $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ ] ;  
 $\gamma$  : 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、溼度輻射能及風速等資料參數來計算(Allen *et al.*, 1998)。所需輸入的氣象參數整理於表 2 中。

#### 3-2 蒸發皿蒸發量與蒸發皿係數

蒸發皿蒸發量的量測，台灣氣象站為採用美國氣象局規定的 A 型蒸發皿(Class A Pan U.S. Weather Bureau, USWB)，如圖 3 所示。很多的研究顯示蒸發皿必須設置在適當環境並且小心維護，才能獲得蒸發皿蒸發量與參考蒸發散量之間高度的相互關係。此一關係係數為實際蒸發量與蒸發皿蒸發量的比值，稱為蒸發皿係數

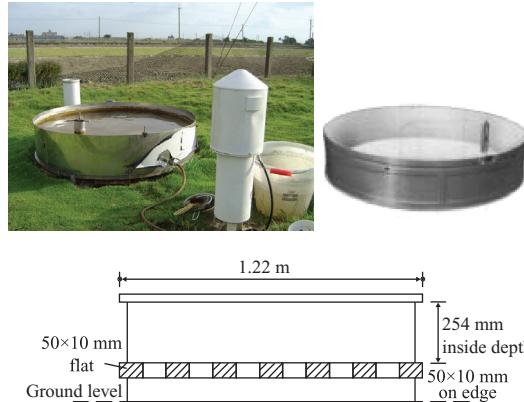


圖 3 美國氣象局 A 型蒸發皿(Class A Pan U.S. Weather Bureau, USWB)

(Pan coefficient)，故將蒸發皿之蒸發量乘上皿之係數，即可獲得一蒸發散量，此蒸發散量稱為參考蒸發散量(Reference evapotranspiration) (Irmak *et al.*, 2002; Snyder *et al.*, 2005)。

$$ET_{ref} = E_{pan} \times K_p \quad \dots \dots \dots (2)$$

其中： $ET_{ref}$  為參考蒸發散量 [L/T]； $E_{pan}$  為蒸發皿蒸發量 [L/T]； $K_p$  為蒸發皿係數 [-]。

### 四、結果與討論

本研究蒐集中央氣象局所提供的氣象資料(1990-2004)，應用聯合國糧食與農業組織(FAO)建議之 Penman-Monteith 法進行台灣南部地區參考蒸發散量( $ET_{ref}$ )的推估，同時與氣象測站之蒸發皿蒸發量( $E_{pan}$ )作比較，進而評估出區域之蒸發皿係數( $K_p$ )。本研究以台灣地區 5 月到 10 月之豐水期為濕季，11 月至 4 月雨量較少之枯水期為乾季，利用上述所求得之  $ET_{ref}$ 、 $E_{pan}$ 、 $K_p$  資料繪製研究地區常年及乾、濕兩季之區域空間分布圖，分析並探討此分布情況，此分布情況可以正確的評估出蒸發散量做為區域性水文評估及管理之參考資訊。本研究評估台灣南部地區  $ET_{ref}$ 、 $E_{pan}$ 、 $K_p$  常年、乾季及濕季平均值比較整理於表 3 中，其中常年平均  $ET_{ref}$  值為 1.99 至 4.17 [mm/d]，常年平均  $E_{pan}$  值為 2.25 至 4.70 [mm/d]，常年平均  $K_p$  值為 0.663 至 0.997 [-]。台灣南部地區乾季平均  $ET_{ref}$  值為 1.65 至 3.53 [mm/d]，乾季

表 3 台灣南部測站  $ET_{ref}$ ,  $E_{pan}$ ,  $K_p$  常年、乾季及濕季平均值比較表(1990-2004)

測站名稱	常年平均值			乾季平均值			濕季平均值		
	$ET_{ref}$ [mm/d]	$E_{pan}$ [mm/d]	$K_p$ [-]	$ET_{ref}$ [mm/d]	$E_{pan}$ [mm/d]	$K_p$ [-]	$ET_{ref}$ [mm/d]	$E_{pan}$ [mm/d]	$K_p$ [-]
阿里山	2.09	2.25	0.929	1.74	2.28	0.763	2.15	2.23	0.964
嘉義	3.20	3.57	0.896	2.48	2.86	0.867	3.93	4.28	0.918
玉山	1.99	3.00	0.663	1.65	3.07	0.537	2.35	2.94	0.799
台南	3.48	3.49	0.997	2.80	2.83	0.989	4.12	4.15	0.993
高雄	3.56	4.19	0.850	2.96	3.53	0.839	4.17	4.84	0.861
恆春	3.88	4.70	0.825	3.53	4.57	0.772	4.22	4.84	0.872

平均  $E_{pan}$  值為 2.28 至 4.57[mm/d]，乾季平均  $K_p$  值為 0.537 至 0.989[-]。台灣南部地區濕季平均  $ET_{ref}$  值為 2.15 至 4.22[mm/d]，濕季平均  $E_{pan}$  值為 2.23 至 4.84[mm/d]，濕季平均  $K_p$  值為 0.799 至 0.993[-]。從表中顯示  $ET_{ref}$  與  $E_{pan}$  值很相近其在濕季(5 月至 10 月)均呈現較高的現象，乾季(11 月至 4 月)則是較低的現象。另外，從表中得知台南地區  $K_p$  值於常年或乾、濕季節均有較高的比值(常年  $K_p$  值為 0.997、乾季為 0.989、濕季為 0.993)，顯示台南地區雨量充沛， $E_{pan}$  值可以直接視為  $ET_{ref}$  值之參考。而本研究發現玉山地區  $K_p$  值偏低(常年  $K_p$  值為 0.663、乾季為 0.537、濕季為 0.799)，主要原因本研究歸納為山區在夏、

秋兩季對流雲層發展旺盛，常受雲層籠罩，因此造成量測  $E_{pan}$  值較實際來的高， $K_p$  值相對較低。

根據  $ET_{ref}$ 、 $E_{pan}$  及  $K_p$  資料繪製台灣南部地區常年及乾、濕兩季之空間分布圖。研究結果顯示，常年平均  $ET_{ref}$  值空間分布以嘉義、阿里山及玉山觀測站地區呈現較低情形，其值介於 2.2-3.2[mm/d]，台南、高雄及恆春觀測站地區呈現較高情形，其值介於 3.4-4.0[mm/d]，如圖 4(a) 所示。乾季  $ET_{ref}$  值空間分布在嘉義、阿里山及玉山觀測站地區亦呈現較低，其值介於 1.8-2.4 [mm/d]，台南、高雄及恆春觀測站地區其值介於 2.8-3.6[mm/d]，如圖 5(a) 所示。濕季  $ET_{ref}$  值空間分布在嘉義、阿里山及玉山觀測站地區其值介於

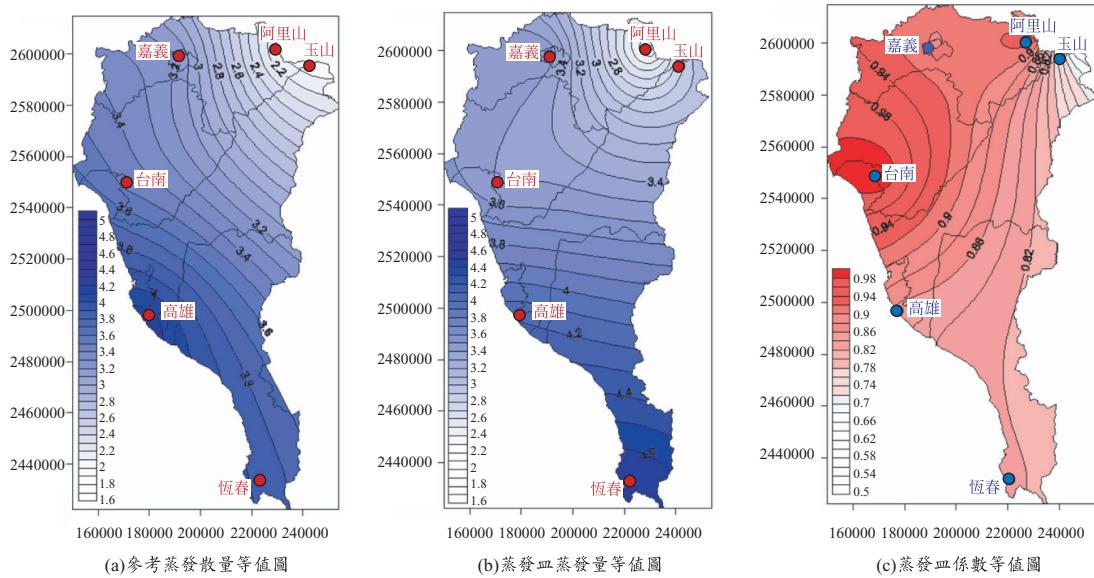


圖 4 台灣南部地區之參考蒸發散量、蒸發皿蒸發量及蒸發皿係數等值圖(1990-2004)

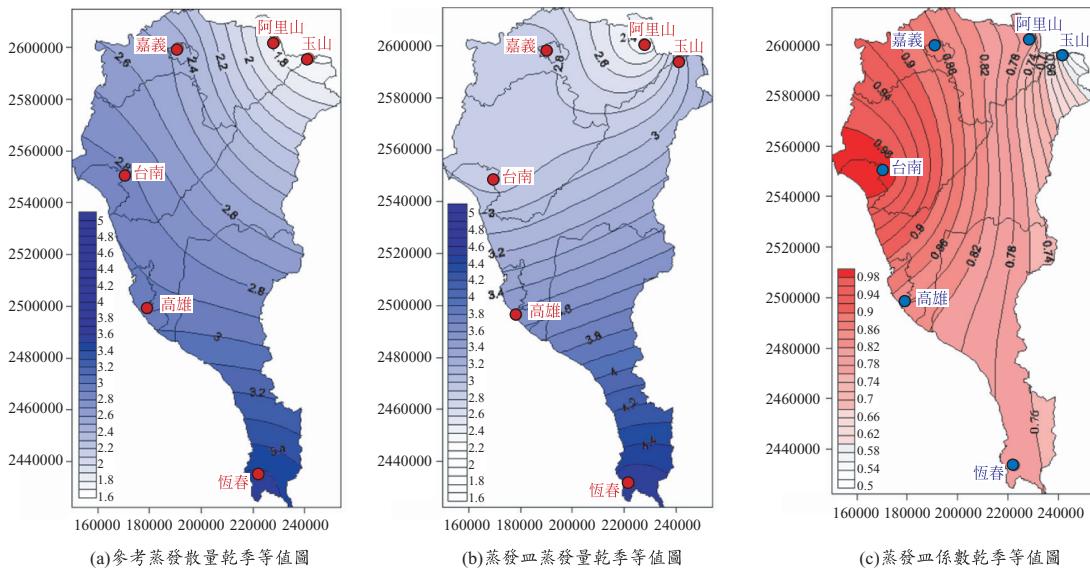


圖 5 台灣南部地區之乾季參考蒸發散量、蒸發皿蒸發量及蒸發皿係數等值圖(1990-2004)

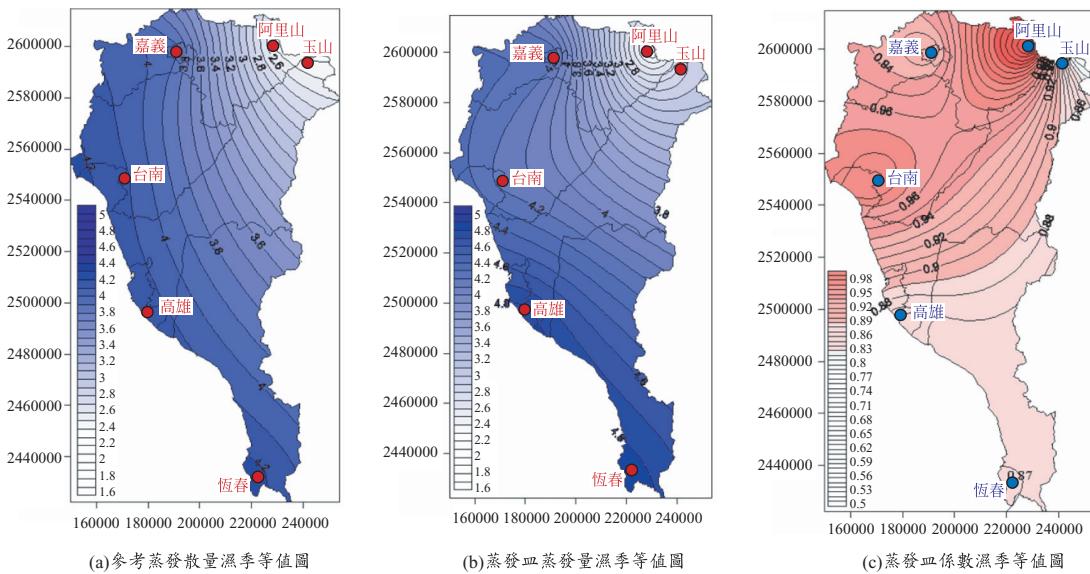


圖 6 台灣南部地區之濕季參考蒸發散量、蒸發皿蒸發量及蒸發皿係數等值圖(1990-2004)

2.6-3.8[mm/d]，台南、高雄及恆春觀測站地區其值介於 4.0-4.2[mm/d]，如圖 6(a)所示。常年及乾、濕季空間分佈均有相同趨勢，由南端向北端遞減，氣溫越高影響蒸發散量越大，可與降雨量判斷得知當地是否有無缺水情形。蒸發散量與降雨量差數大表示溼潤，小即為乾燥。

另外，利用中央氣象局提供的皿蒸發量資料

整理繪製常年及乾、濕兩季之  $E_{pan}$  值空間分布圖。研究結果顯示，常年平均  $E_{pan}$  值空間分布以嘉義、阿里山及玉山觀測站地區呈現較低，其值介於 2.4-3.4[mm/d]，台南、高雄及恆春觀測站地區呈現較高，其值介於 3.6-4.6[mm/d]，如圖 4(b) 所示。乾季平均  $E_{pan}$  值嘉義、阿里山及玉山觀測站地區其值介於 2.4-2.8[mm/d]，台南、高雄及恆

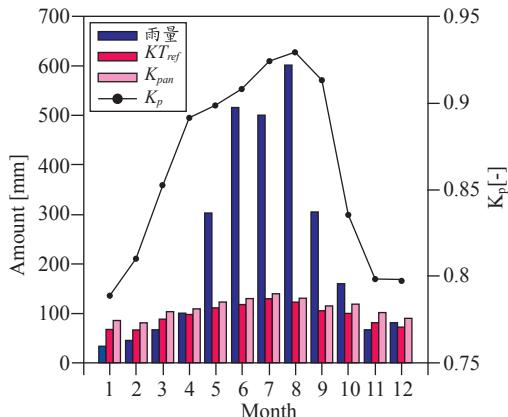


圖 7 台灣南部測站 1990-2004 年之平均雨量與  $ET_{ref}$ 、 $E_{pan}$  及  $K_p$  之比較圖

春觀測站地區其值介於 2.8-4.4[mm/d]，如圖 5(b) 所示。濕季平均  $E_{pan}$  值分佈嘉義、阿里山及玉山觀測站地區其值介於 2.4-4.0[mm/d]，台南、高雄及恆春觀測站地區其值介於 4.2-4.8[mm/d]，如圖 6(b) 所示。本研究探討  $E_{pan}$  值空間分佈趨勢亦與  $ET_{ref}$  值相同，由南端向北端遞減，而越靠近沿海的地區其值也會越高。

本研究利用 Penman-Monteith 法與氣象局提供的皿蒸發量( $E_{pan}$ )資料，將兩參考量做一比值( $K_p = KT_{ref} / E_{pan}$ )，其可評估出蒸發皿係數( $K_p$ )，並將結果亦整理繪製成常年及乾、濕兩季之空間分布圖，如圖 4(c)、5(c)及 6(c)所示。研究結果顯示，平均  $K_p$  值越趨近於 1.0 時，則表示與實際蒸發散量越趨近，對於皿蒸發量直接水的損失越小。此區域空間分佈中，在西半部地區常年及乾、濕季均有較高的趨勢，其  $K_p$  值約在 0.97 左右，在靠山區  $K_p$  值有較低的趨勢，約在 0.8 左右，其主要受地形變化影響。本研究利用圖 7 說明台灣南部測站 1990-2004 年之平均雨量與  $ET_{ref}$ 、 $E_{pan}$  及  $K_p$  之關係，圖中顯示台灣南部地區常年豐枯比高達 9 : 1， $K_p$  值明顯受到雨量影響其乾、濕季降雨量差異造成乾季  $K_p$  值較小而濕季較大，在日後台灣南部地區的推估必須採以乾、濕兩季探討，可以獲得更精確的參考蒸發散量評估。另外，本研究對於等值圖之推估可以對台灣南部蒸發散量的評估提供一區域性水文評估可

以瞭解空間分佈的關係，而非傳統單點測站的推估。

## 五、結論

本研究應用 Penman-Monteith 法及氣象測站之蒸發皿資料評估台灣南部地區參考蒸發散量及蒸發皿蒸發量，並探討蒸發皿係數之區域空間分布。結果顯示在台灣南部地區參考蒸發散量與蒸發皿蒸發量隨季節變化而有所改變，其值介於 1.65 至 4.22[mm/d]與 2.23 至 4.84[mm/d]之間，以夏季有最高值，而在冬季時則是較低。兩者之間有相同的分布趨勢，蒸發散量呈現南高北低的情況。另外， $K_p$  值也都有區域性與季節性的變化。此分布情況可以正確的評估出真實蒸發散量做為區域性水文評估及管理之參考資訊。在蒸發皿係數方面，本研究建議在未來可以透過蒸發皿係數與蒸發皿蒸發量的關係直接推求正確之參考蒸發散量。

## 參考文獻

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, (1998), Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, ISBN 92-5-104219-5.
- Allen, R.G., I.A. Walter, R. Elliot, T. Howell, D. Itenfisu, and M. Jensen, (2005), The ASCE standardized reference evapotranspiration equation, *Final Rep., National Irrigation Symp.*, ASCEEWRI Task Committee, Phoenix.
- Blaney, H.F., (1942), Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data, US Department of Agriculture, *Soil Conservation Service Technical Paper No. 96*, pp. 48.
- Brutsaert, W., and M.B. Parlange, (1998), 'Hydrologic cycle explains the evaporation paradox', *Nature*, 396, 30.
- Dalton, J., (1802), Experimental essays on the constitution of mixed gases: on the force of

- steam or vapor from water or other liquids in different temperatures, both in a Torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of gases by heat, *Manchester Lit. Phil. Soc. Mem. Proc.*, 5, 536-602.
6. Doorenbos, J., and W.O. Pruitt, (1984), Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, *Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd Ed.* FAO, Rome.
  7. Irmak, S., D.Z. Haman, and J.W. Jones, (2002), Evaluation of Class A Pan Coefficients for Estimating Reference Evapotranspiration in Humid Location, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(3), pp. 249-253.
  8. Jensen, M.E., (1973), *Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements*, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 215.
  9. Jensen, M.E., and H.R. Haise, (1963), Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation, *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*, 89(4), pp. 15-41.
  10. Liu B., M. Xu, M. Henderson, and W. Gong, (2004), A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000, *Journal of Geophysical Research* 109, D15102.
  11. Monteith, J.L., (1965), The State and Movement of Water in Living Organisms, *Evapotranspiration and environment*, 19, pp. 205-234.
  12. Penman H.L., (1948), Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. Lond.* 193, pp 120-145.
  13. Penman, H.L., (1956), Estimating Evaporation, *Trans. Am. Geoph. U.*, 37(1), pp. 43-50.
  14. Snyder R.L., M. Orang, S. Matyac, and M.E. Grismer, M. ASCE, (2005), Simplified Estimation of Reference Evapotranspiration from Pan Evaporation Data in California, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.131, No.3, pp. 249-253.
  15. Stanchill, G., (1962), The use of Picche evaporimeter in the calculation of evaporation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Reading, v.88, pp. 80-82.
  16. 中央氣象局，「氣候年報-地面資料」，1990-2004。
  17. 王如意、易任，(2001)，「應用水文學」，國立編譯館出版，茂昌圖書公司。
  18. 汪中和，(2004)，「臺灣降雨的長期變化及對環境的衝擊，自然與文化研討會」，農委會林試所。
  19. 許晃雄、柯文雄、鄒治華、陳正達，(2000)，「台灣環境變遷與全球環境變遷衝擊之評析-氣候」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
  20. 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，第 45 卷，53-70 頁。
  21. 葉信富、陳進發、李振誥，(2005)，「潛勢能蒸發散經驗公式之最佳化比較」，農業工程學報，第 51 卷，第 27-37 頁。

收稿日期：民國 97 年 2 月 22 日

修正日期：民國 97 年 5 月 14 日

接受日期：民國 97 年 5 月 28 日