

嘉南藥理科技大學補助專題研究計畫成果報告

台灣地區區域化蒸發散量之評估

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：150400-CN9826

執行期間：98年8月1日至98年12月31日

計畫主持人：陳尉平

共同主持人：

計畫參與人員：

執行單位：嘉南藥理科技大學休閒保健管理系

中華民國99年2月28日

嘉南藥理科技大學補助專題研究計畫成果報告

台灣地區區域化蒸發散量之評估

計畫編號：150400-CN9826

計畫執行期間：98年8月1日至98年12月31日

計畫主持人：陳尉平 休閒保健管理系

E-mail：wpchen@mail.chna.edu.tw

摘要

在水文循環過程中，蒸發散對於區域性水資源評估及管理是相當中重要的水文因子。本研究計畫延伸「台灣地區區域化蒸發散量參數之評估(1/2)」(NSC-96-2221-E041-016)，以廣泛被應用的 Penman-Monteith 方法為基準，來推估蒸發皿係數，尋求較簡便之計算方式進而建立台灣蒸發皿修正係數之分布圖，以利推估出真實蒸發散的分布圖，並探討蒸發皿係數之區域空間分布。另外，探討前人發展之蒸發皿係數(K_{pan})經驗式並利用 Penman-Monteith 法與蒸發皿(E_{pan})之比值($K_{pan} = ET / E_{pan}$)來進行實際蒸發皿係數之評估比較。本研究利用統計指標分析上述兩種蒸發皿係數方式所評估的蒸發散量之差異，並評估台灣地區區域化的蒸發散量，以期尋求較簡單之經驗方程式解決氣候參數資料之不足等問題。

關鍵字: Penman-Monteith 法、蒸發皿蒸發量、蒸發皿係數

Assessment of regional reference evapotranspiration in Taiwan

Abstract

Evapotranspiration (ET) is an important component of hydrologic budgets, as well as plays an active role in the regional water resources assessment and management. The purpose of this study is to use the meteorological data to estimate the regional reference evapotranspiration and to assess the spatial distribution maps of pan coefficient (K_p) in study area. In addition, five empirical equations of pan coefficient by previous researches are applied to estimate the regional reference evapotranspiration. Moreover, In order to improve the absence of climatic data and to confirm the applicability of five empirical equations, results of empirical equations of pan coefficient compared with the ratio of Penman-Monteith combined method (ET) and pan evaporation (ET_{pan}) recorded ($K_p = ET / E_{pan}$). Finally, the differences of two methods are calculated by statistical analysis.

Keywords: *Pan Coefficient, Penman-Monteith, evapotranspiration*

一、背景及目的

隨著社會的變遷、經濟及產業的發展，台灣已由過去的農業型態轉變為工商業型態，在急遽的轉變下及人口密度的上升，造成民生用水與工業用水的需求與日俱增，迫使原已有限的水資源更加匱乏。近年來，由於全球氣候變遷影響，造成溫室效應之氣體(如二氧化碳、甲烷、氟氣碳化物等)於過去數十年間有明顯增加，大幅提高現今全球暖化的可能性，此氣候改變對降雨造成之影響更直接造成水資源的衝擊，大氣溫度升高亦將增加蒸發散量，也因而減少水資源的使用。然而，在水資源的開發利用，卻不能無限制的開採，必須兼顧生態的平衡，造成水資源的供需更加緊迫。臺灣受到地理及氣候的影響，且降雨於時間與空間上的分布不均，其乾溼季節分明且由北向南更加顯著，山區降雨多於平地；北部多於南部。台灣由於地處板塊交界處，地屬狹長型，境內有中央山脈，高度在1,000-3,000m以上的區域更佔全島1/3面積。正因為如此，造就了地勢變化起伏極鉅、河川短而急促、坡度大、水流急的特性，不易將降雨攔蓄利用，使得雨水都直接奔流入海，讓台灣可利用的水資源更加有限。因此，如何有效的運用水資源，在水文循環的過程中，每個環節的掌握即是重要的關鍵。

水文循環過程中，除了降雨、逕流及入滲外，蒸發散量亦是當中重要水文因子之一，全球平均每年降雨約有 70%之水份因為蒸發散而返回大氣中，一般溫度區域環境之下，蒸發散量是非常高的，因此在水資源循環中，真實蒸發散之評估即扮演著極重要之角色(Jayatilaka *et al.*, 1998)。此為能量與水分流動之間非常複雜且相互影響過程的結果，並且也受到大氣、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。在水資源規劃利用上蒸發散量不但是是一個重要的參數，在農業灌溉工程更是一個重要指標。近年來由於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，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、亦或是造成此變化的原因等問題都值得深入研究。

蒸發散(evapotranspiration)為水經由土壤蒸發、水面蒸發、葉面蒸散及截流蒸發等進入大氣之總和，亦可視為流域水份損失之總和，為構成水圈及大氣圈中水分流動中一個重要的因子，此參數為水資源規劃利用之重要參數，農業灌溉營運管理之依據。蒸發散為水循環中之一環，因其作用可以調節氣候，使氣候適於人類生活。蒸發散為在自然環境下，水由液態轉變成氣態，而擴散至大氣中之現象，其中包括由土壤表面、水面或其他之固體表面之蒸發(evaporation)與水經由植物之氣孔而擴散至大氣中之蒸散(transpiration)兩部分，在自然環境下蒸發與蒸散兩者不易分離，因此，一般將其合併而稱為蒸發散(王如意和易任，2001)。對於水面、土壤及葉面蒸發散估算之方法，發展至今一般對蒸發散量的計算，是利用水平衡公式估算而求得，其會受到氣候因子與土壤因子之影響，於實際區域中不易直接求得，並可加以分為由水平衡觀點之直接測定法與應用微氣候原理之間接測定法兩大方面加以探討。

本研究計畫延伸「台灣地區區域化蒸發散量參數之評估」(NSC-96-2221-E041-016)，該研究計畫利用單一氣象參數(溫度估計法及輻射能法)並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，與國際糧食與農業組織(*Food and Agriculture Organization, FAO*)所推薦之Penman-Monteith方法做一比較，以建立台灣區域化參數。本研究有鑒於蒸發散量經驗公式已發展出許多不同的方法，其每個公式，均有不盡相同的參數與變數，對於複雜之經驗公式運算耗時不易計算，若是氣象站之儀器不足而造成基本氣象資料短缺，易造成公式無法應用，為了解決上述之問題，本研究之重點即在探討以氣象資料評估蒸發散量及蒸發皿蒸發量，來推估蒸發皿係數，並尋求較簡便之經驗方程式解決參數資料的不足等問題，進而建立台灣蒸發皿係數之分布圖，並探討皿蒸發係數之區域空間分布。以提供正確的蒸發皿係數來評估蒸發散量做為區域性水文評估及管理之參考資訊。

二、文獻回顧

2.1 環境氣候變遷相關文獻

環境氣候變遷在整個地球圈的演進歷史中不斷發生，規模有大有小，隨著社會的變遷、經濟及產業的發展後，使得氣候變化因素裡，又增加了人為成分，對於未來氣候的變化裡又更添其不確定性。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，此相關課題已有許多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。在工業革命前，大氣中的二氧化碳含量大約是280ppm。距離工業革命的百年後(2004)，二氧化碳的含量已經增加到350ppm，增加量超過 30%。如果不加以控制而任由二氧化碳繼續增加，預計在2030年時，二氧化碳的含量會超過550ppm，濃度會變成工業革命開始時的兩倍多。當二氧化碳的濃度增加一倍，地球表面的溫度就會上升3-5度(鍾崇燾和向曼菁，2005)。吳瑞賢等人(1994)利用統計原理分析台灣北部地區之氣象資料之歷年之變化，發現氣溫為上升率最為明顯之氣象因子。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%。虞國興和許書平(1998)、金紹興和謝明昌(2001)探討雨量資料之長期趨勢變化，

發現年不降雨日數及年最大不降雨日數均呈現逐年增加之趨勢，同時，中南部地區之降雨量呈現逐年減少之趨勢而北部有增加之趨勢，使得降雨型態將改變為延時縮短，降雨強度增強。全球受到氣候變遷影響，不論水文或氣象上都與過去有所不同，近期不少研究也發現到長期蒸發呈現下降趨勢，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。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是值得深入研究。

2.2 Penman-Monteith 法相關文獻

在水文循環中蒸發散量為一較難量化的部份，蒸發散包括了蒸發與蒸散兩個部份，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。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。Hedke(1924)曾利用效率加熱法(effective heat)來估算地區性之作物蒸發散量。Blaney and Morin(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(1956a, b)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。Kohler et al. (1955)採用Penman法發展之估算法，配合皿蒸發量進行估算湖面之自由水面蒸發量。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。Van Bavel(1966)於美國亞利桑那州之鳳凰城進行苜蓿之蒸發散試驗，並考慮作物在夜晚時，由於葉面氣孔關閉可能造成夜間蒸發散量高估，因此建議修正葉面氣孔的影響，將可得到更正確的蒸發散量。聯合國糧食及農業組織(FAO)(1977)推薦了Blaney-Criddle法、輻射法、Penman法及皿蒸發量法等四種方法來推估作物需水量(crop water requirements)。Monteith(1981)曾利用森林或作物所有覆蓋之葉子都視作為單一葉子，利用阻抗係數(resistance coefficient)來反應該層內的熱量與水氣傳輸。Choudhury and Monteith(1988)探討只考慮單一層地表邊界無法有效反應出地表覆蓋狀態，所以將地表邊界層分為四層，並帶入不同阻抗係數進行模擬。

Penman-Monteith法為經過全世界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(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(Monteith, 1981、1990) (黃振昌與宋易倫，2003)。Allen et al.(1998、2005)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(Oliveira and Yoder, 2000; Itenfisu, 2003)。

2.3 蒸發散量經驗法相關文獻

蒸發散量的評估中除了最常利用的Penman系列的估算方式外，在國內外的文獻中針對不同區域或不同氣候條件下也發展出不少相關方法及經驗公式。過去在國內研究方面，曹以松(1967)針對不同型號之蒸發皿做一比較，並探討蒸發皿蒸發量不同變化之因素。夏禹九(1980)探討森林集水區的蒸發散量估算方法作一討論，比較Penman法與桑懷特(Thornthwaite)經驗法，並考慮森林與自由水面表面粗糙度之不同，修正Penman法公式，Penman法有獲得較好結果。施嘉昌和黃振昌(1987)認為過去國內對作物需水量之研究，受到國外地域色彩濃厚之經驗公式估算及分析，不僅估算式之背景條件不符合且對整個蒸發散過程描述因子過於簡單，亦無基本之立足點，建議蒐集農業氣象、灌溉及作物觀點於一體，以理論觀點及應用數理統計方法予以分析，確立國內參數及算式。陳清田(1991)應用Penman、Van Bavel、Priestley-Taylor、Jensen-Haise、Blaney-Criddle及Thornthwaite等模式推估蒸發散量，並與嘉義地區A型蒸發皿做直線迴歸，比較在同樣的氣候條件下兩者之相關性，期能建立適用於估算嘉義區作物需水量之最佳模式，結果以修正之Penman模式最佳。甘俊二等人(1996)比較Modified Penman、Modified Blaney-Criddle、Radiation、Pan Evaporation及Penman-Monteith等估算式推估作物需水量，結果顯示在諸估算式中以Penman-Monteith法為最佳，探究其原因，蒸發散量之推求是以植物生理為出發點，消弭了估算式中因地域性參數之影響所產生的誤差，故其穩定性佳，日後臺灣地區作物需水量之推估，在資料充足之情況下可以此估算式

為之。蔡西銘等人(2001)利用地理資訊系統，針對土地使用情形及地表覆蓋之不同而分別建檔，再選擇合適之公式，估算其單一之蒸發散量，並予以加權平均之，以推估區域蒸發散量，其與氣象站蒸發皿之蒸發量的相關性甚高。童慶斌與陳主惠(2001)進行土壤含水量之觀測，結合實際土壤含水量變化以瞭解土壤水分對蒸發散量之阻抗情形，並建立土壤含水量觀測之標準程序，瞭解實測蒸發散量與Penman-Monteith法推估蒸發散量之關係。葉信富等人(2005a, b)利用不同理論基礎之經驗公式與國際農業糧食組織(FAO)建議之Penman-Monteith方程式計算潛勢蒸發散量探討比較，並已建立台灣區域化參數。

而在國外研究方面，Sverdrup(1946)和Thornthwaite (1948)分別根據水氣由水面傳遞至大氣的質量來估算水面的蒸發量，推導出估算蒸氣量的經驗公式。Hamon(1961)利用Blaney、Penman、Thornthwaite及Hamon等四種不同公式法分別計算美國北卡羅萊納州區域蒸發散，結果顯示，Hamon公式與Penman 及Thornthwaite公式所預測之年平均蒸發散較為接近，而月平均蒸發散略有不同，在冬季時，Hamon公式預測值比Thornthwaite公式預測值高，但在夏季則是相反。並在同年亦曾探討Penman及Hamon公式預估美國東北部蒸發散之變化，結果顯示，此兩個公式在濕潤區域所預測的蒸發散極為相近，主要受到綠洲效應(oasis effect)影響較小所致。Omar(1968)應用Mather改良型蒸發散計(modified-type evapotranspirometers)量測阿拉伯聯合大公國溫暖乾燥地區蒸發散量，並與Penman、Papadakis、Thornthwaite及Hamon等四種蒸發散公式比較，結果顯示Penman公式最佳，Papadakis 公式次之，至於Thornthwaite及Hamon公式則偏低，只有蒸發散計實測量的65%，此外Hamon公式於夏季時低估較多，冬季時則與實測量較為接近。Priestley and Taylor(1972)發展出適用於潮溼地區蒸發散估計之簡化公式，在潮濕區域只考慮能量影響，蒸發散量與能量平衡部份成正比。Bowen(1926)以可感熱與潛熱之比值定義為Bowen ratio，結合地表能量平衡

來評估蒸發散量，主要利用分層溫度和水汽梯度資料來估算蒸發散量與可感熱，此方法現今仍廣泛使用，並發展出整合式實驗儀器量測系統，Malek and Bingham(1993)就利用整合式Bowen ratio measurement system量測美國猶他州北方的半乾燥山谷地區蒸發散量，並配合水平衡方式求得之實際蒸發散量比較，得到高度的相關性。Xu et al. (2000) 首先分析在不同時間尺度下氣象參數對於蒸發量之相關性，並利用不同經驗式與蒸發皿蒸發量比較，結果顯示，氣壓差無論在任何時間尺度都有很高的相關性，而風速相關性最低，尤其長時間觀測更較短期更低。另外，以月平均氣象參數資料進行Penman法估算，可獲得與蒸發皿蒸發量最佳關係度，而Thornthwaite法與Turc法則是有低估現象，尤其在冬季更為顯著。Irmak et al. (2002)在佛羅里達州(Florida)利用A型皿修正係數來估測蒸發散量，並比較其Cuenca(1989)、Snyder(1992)兩人經驗式，結果Cuenca經驗式對於佛羅里達有較好的估測。Snyder et al(2005)利用4種蒸發皿經驗公式推估蒸發皿蒸發量，並與氣候參數的資料簡化對參考蒸發散量估算，此法為一概念式且容易有規則輸入電腦應用，但必須對該地區進行劃分等級使用，才会有較好的結果。Irmak et al. (2006)利用敏感性分析Penman-Monteith法，探討少雨、地中海類型、潮濕海岸、潮濕半潮濕內陸及島型地區等6種不同氣候區域中溫度、風速、淨輻射量及氣壓差等氣象因子對蒸發散量之影響變化，結果顯示6種不同氣候區域氣壓差影響最大，其次風速、淨輻射量、溫度。

綜合文獻所述，迄今蒸發散量經驗公式已發展出眾多不同的方法，其每個公式，均有不盡相同的參數與變數，對於複雜之經驗公式運算耗時不易計算，若是氣象站之儀器不足而造成基本氣象資料短缺，易造成公式無法應用，為了解決上述之問題，本研究將以 Penman-Monteith 法與氣象局之皿蒸發量，推估蒸發皿係數，進而建立台灣蒸發皿係數之分布圖，並探討蒸發皿係數之區域空間分布。以提供正確的蒸發皿係數來評估蒸發散量做為區域性水文評估及管理之參考資訊。另外，蒐集前人發展較簡便之蒸

發皿係數(K_{pan})經驗式和利用 Penman-Monteith 法與蒸發皿(E_{pan})之比值 ($K_{pan} = ET / E_{pan}$)評估之實際蒸發皿係數做比較，利用統計指標分析探討兩種方式所評估的蒸發散量之差異，以期尋求較簡便之經驗方程式解決氣候參數資料之不足等問題。

三、研究成果

研究計畫部分成果為利用 Penman-Monteith 法與蒸發皿蒸發量，兩種方式來推估蒸發散量，收集中央氣象局所提供的基本氣象參數資料，其中針對複雜的 Penman-Monteith 法進行兩種敏感性分析，首先為氣候參數時間尺度敏感性分析，探討在不同時間尺度下氣候參數對於蒸發散量的相關程度，決定其氣候參數時間尺度作為研究探討。其次為氣候參數敏感性分析，探討 Penman-Monteith 法中各個氣候參數對於蒸發散量影響變化量。

3.1 氣候參數時間尺度敏感性分析

對於眾多氣候參數資料，本研究選擇 Penman-Monteith 法中之太陽輻射量、水汽壓力差、相對溼度、風速及溫度等五種影響蒸發散量的重要氣候因子，將現地資料利用不同時間尺度進行分析。本研究採用日平均、旬平均及月平均等三種方式探討在不同時間尺度對於 Penman-Monteith 法評估蒸發散量的相關程度，並決定其氣候參數時間尺度作為研究計算探討。本研究利用中央氣象局所提供的台南氣象觀測站做為研究對象。收集氣候參數包括溫度、風速、相對溼度、太陽輻射量、水汽壓力差及蒸發散量等資料。分別以日平均、旬平均及月平均進行分析。本研究採用每個氣候參數的標準化值藉由轉換計算做比較，其分析公式如下

$$Z_i = \frac{(X_i - \mu)}{\sigma} \quad (1)$$

式中，

Z_i 為標準化值；

X_i 為氣象參數在不同時間段之值；

μ 為氣象參數之平均值；

σ 為氣象參數之標準差。

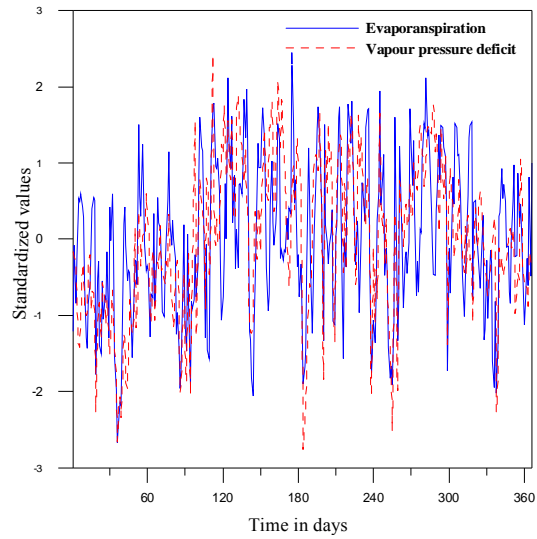
首先探討 Penman-Monteith 法與水汽壓力差、風速、太陽輻射量、相對濕度及溫度等氣候參數之日平均、旬平均及月平均相關係數，研究結果整理於表 1 中。另外，採用每個氣候參數的標準化值藉由轉換計算做比較，圖 3.1 為水汽壓力差與蒸發散量在不同時間尺度之關係程度，而圖 1(a)為日平均圖，其相關係數為 0.37；圖 1(b)為旬平均圖，其相關係數為 0.57；圖 1(c)為月平均圖，其相關係數為 0.91，研究結果顯示，3 種時間尺度對於蒸發散量以月平均值有較佳的相關度。圖 2 為風速與蒸發散量在不同時間尺度之關係程度，圖 2(a)為日平均圖，其相關係數為 0.01；圖 2(b)為旬平均圖，其相關係數為 0.13；圖 2(c)為月平均圖，其相關係數為 0.21。研究結果顯示，風速在不同時間尺度下對於蒸發散量之相關度是最低的；圖 3 為太陽輻射量與蒸發散量在不同時間尺度之關係程度，圖 3(a)為日平均圖，其相關係數為 0.68；圖 3(b)為旬平均圖，其相關係數為 0.71；圖 3(c)為月平均圖，其相關係數為 0.86，研究結果顯示在 3 種時間尺度對於蒸發散量以月平均值有較佳的相關性，並且在春季與秋季時最為顯著。圖 4 為相對濕度與蒸發散量在不同時間尺度之關係程度，圖 4(a)為日平均圖，其相關係數為 0.16；圖 4(b)為旬平均圖，其相關係數為 0.22；圖 4(c)為月平均圖，其相關係數為 0.24，研究結果顯示，相對濕度對於蒸發散量在不同時間尺度下均不顯著。圖 5 溫度與蒸發散量在不同時間尺度之關係程度，圖 5(a)為日平均圖，其相關係數為 0.15；圖 5(b)為旬平均圖，其相關係數為 0.20；圖 5(c)為月平均圖，其相關係數為 0.58，研究結果顯示，相對濕度對於蒸發散量之相關亦不高。

比較各圖研究結果顯示，圖 1(a)、圖 2(a)圖 3(a)、圖 4(a)及圖 5(a)中無法明顯看出相關性；圖 1(b)、圖 2(b)、圖 3(b)、圖 4(b)及圖 5(b)中以水汽

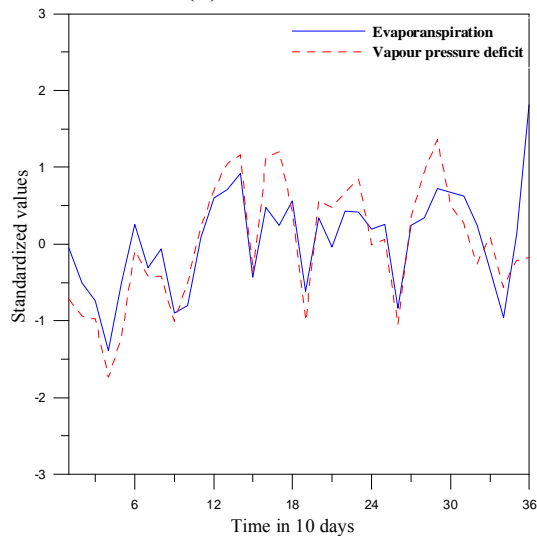
壓力差與太陽輻射量表現較佳；圖 1(c)、圖 2(c)、圖 3(c)、圖 4(c)及圖 5(c)中可以明顯看出相關性較高。綜合上述結果，水汽壓力差與太陽輻射量對與蒸發散量之相關性影響最為顯著，其它的氣候因子對於蒸發散量之相關性影響則是較低，特別是長時間(月平均)比短時間(日平均)較為顯著。由於影響蒸發散量的氣候因子會因時間尺度的改變而有所變化，以月平均作為在資料上的處理有較佳的結果，故在計算過程本研究將採月平均資料估計。

表 1 Penman-Monteith 法與各氣候參數之相關係數

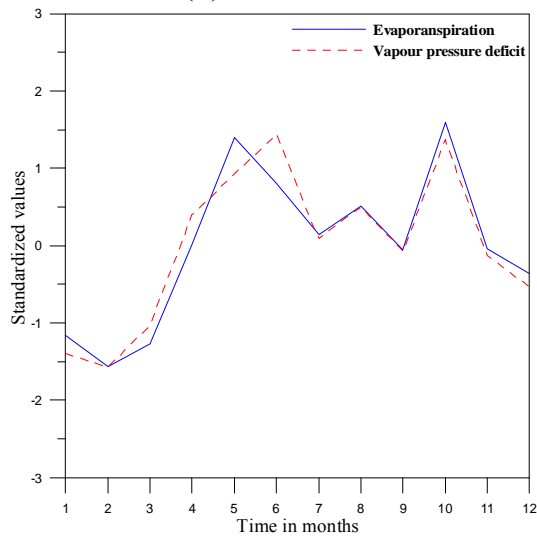
氣候參數	日平均 R ² 值	旬平均 R ² 值	月平均 R ² 值
水汽壓力差	0.37	0.57	0.91
風速	0.01	0.13	0.21
太陽輻射量	0.68	0.71	0.86
相對濕度	0.16	0.22	0.24
溫度	0.15	0.20	0.58



(a) 日平均值

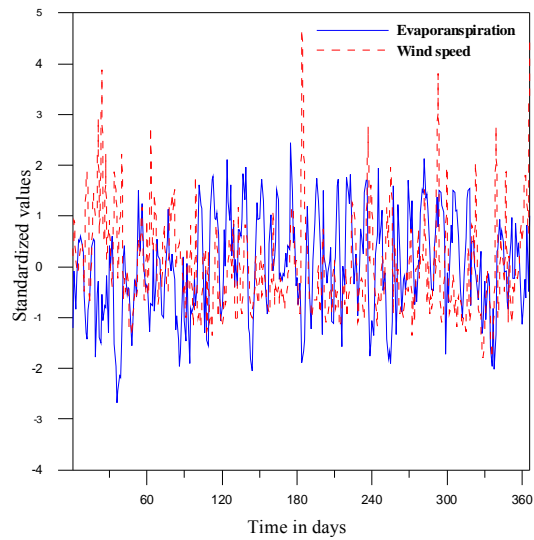


(b) 旬平均值

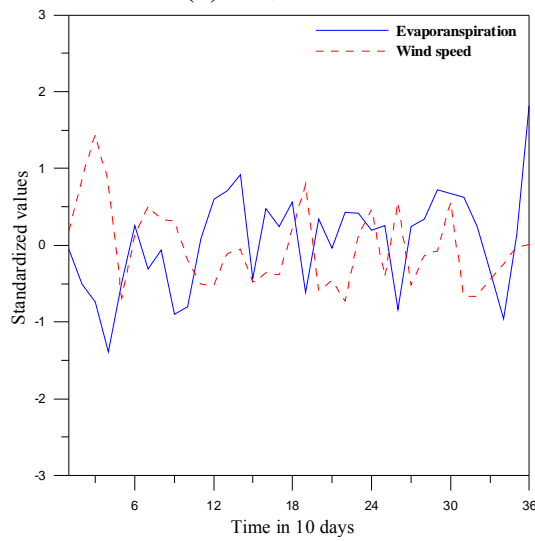


(c) 月平均值

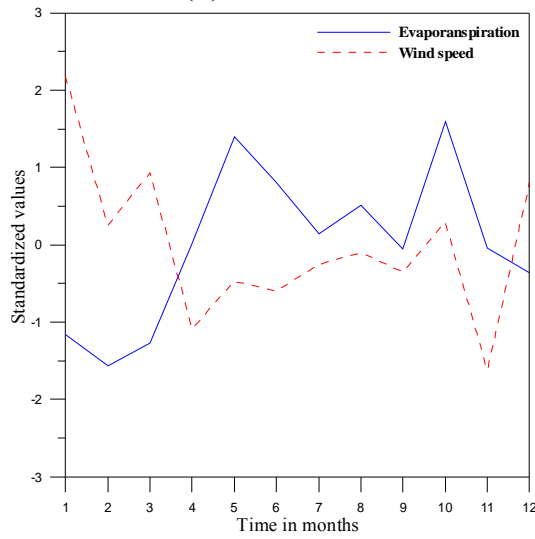
圖 1 蒸發散量與水汽壓力差在不同時間尺度之關係程度



(a) 日平均值

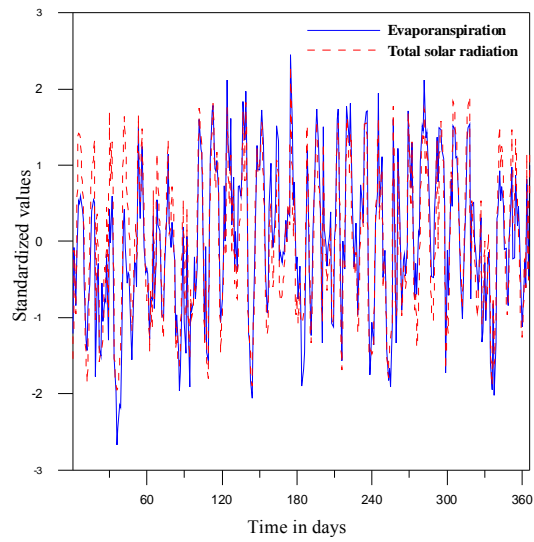


(b) 旬平均值

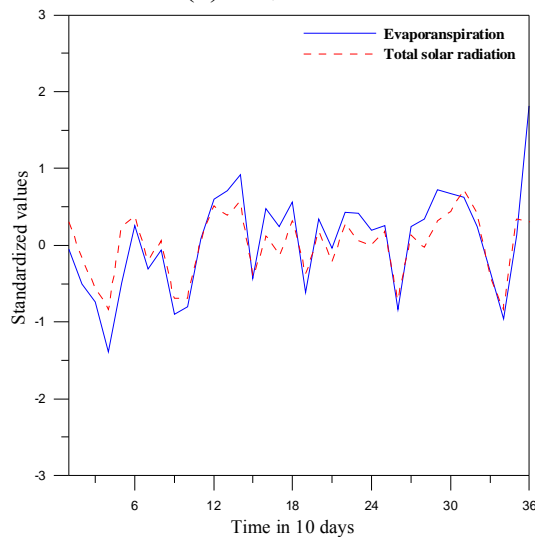


(c) 月平均值

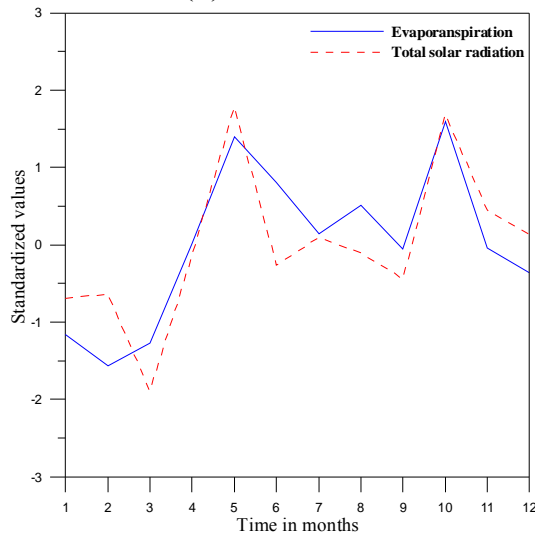
圖 2 蒸發散量與風速在不同時間尺度之關係程度



(a) 日平均值

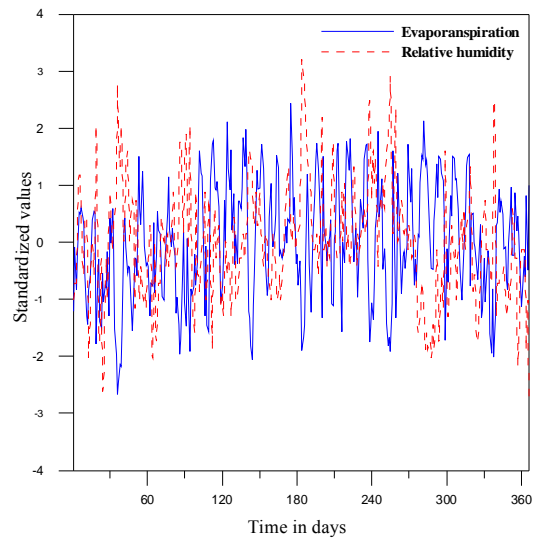


(b) 旬平均值

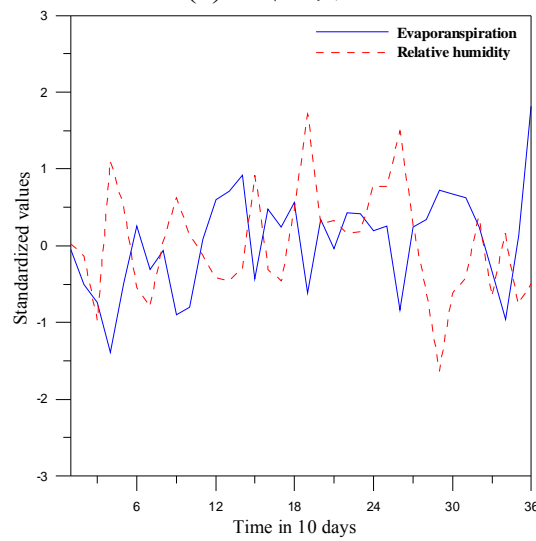


(c) 月平均值

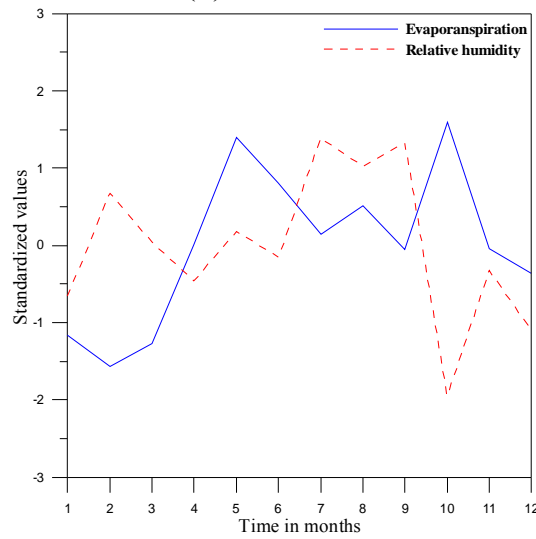
圖 3 蒸發散量與太陽輻射量在不同時間尺度之關係程度



(a) 日平均值

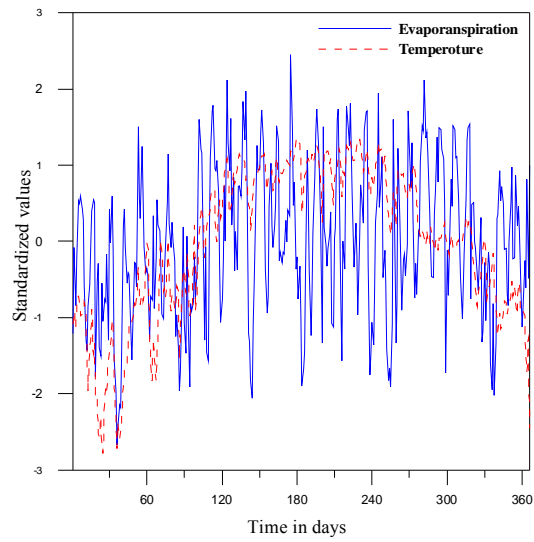


(b) 旬平均值

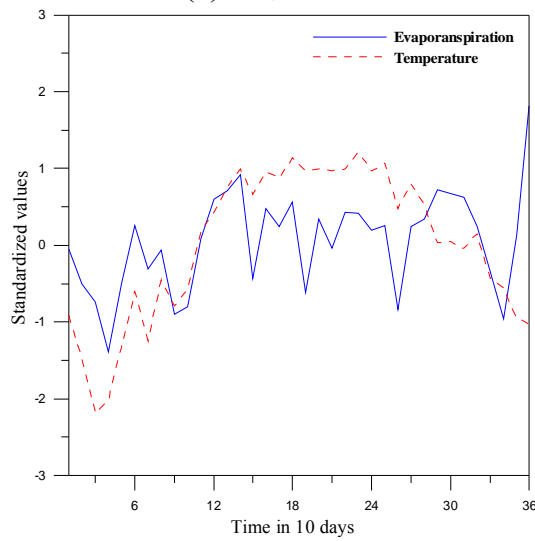


(c) 月平均值

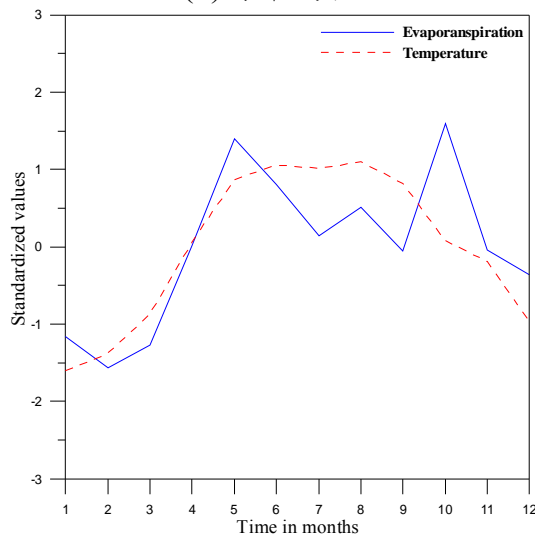
圖 4 蒸發散量與相對濕度在不同時間尺度之關係程度



(a) 日平均值



(b) 旬平均值



(c) 月平均值

圖 5 蒸發散量與溫度在不同時間尺度之關係程度

研究計畫成果，除了探討氣候參數在時間尺度的問題，更進一步另外探討 Penman-Monteith 法中太陽輻射量、水汽壓力差、風速及溫度等四種氣候因子對於蒸發散量的影響評估。該研究利用中央氣象局所提供的台灣南部地區 9 個氣象觀測站做為研究探討。並收集 1990 至 2004 年長年觀測紀錄的溫度、風速、太陽輻射量及水汽壓力差等氣候參數資料進行分析，其分析公式如下：

$$X(t) = X(t) + \Delta X \quad (2)$$

式中 X 為氣候參數； t 為觀測時間； ΔX 為單位改變量。

氣候參數敏感性分析中，假設各種參數間為不相關之獨立變數，於每次分析時僅考慮一種參數變化而固定其他參數，以增加或減少 1.0 個單位變化量至 4.0 個單位變化量對蒸發散量影響變化程度。此外，對於水汽壓力差變化評估如上述所提增減單位量將造成變化過大，而無法與其他氣候因子探討，因此水汽壓力差之單位增減變化量修正為以增減 0.4 個單位量至 2.0 個單位做為分析。

本研究以 9 個氣象觀測站(分別為阿里山、嘉義、玉山、成功、台南、台東、高雄、大武及恆春氣象站)利用 Penman-Monteith 法推估蒸發散量變化。本研究進行參數敏感性分析，以嘉義觀測站為例，結果顯示，以水汽壓力差影響變化最大，其蒸發散相對改變百分比為-112.71 至 112.71(%)之間；太陽輻射量次之，其蒸發散相對改變百分比為-41.21 至 41.21(%)之間；接著是風速，其蒸發散相對改變百分比為-36.82 至 21.66(%)之間；變化最小為溫度，其蒸發散相對改變百分比為-13.91 至 14.73(%)之間，如表 2 所示。其中亦發現成功、台南、台東、高雄、大武及恆春觀測站均有相同結果，如圖 6(a)-6(g)所示。另外，在山區的氣象觀測站(阿里山、玉山)，以阿里山觀測站為例，結果顯示，以水汽壓力差影響變化最大，其蒸發散相

對改變百分比為-83.87 至 83.87(%)之間；太陽輻射量次之，其蒸發散相對改變百分比為-44.72 至 44.72 (%)之間；接著是溫度，其蒸發散相對改變百分比為-11.25 至 11.39(%)之間；變化最小為風速，其蒸發散相對改變百分比為-3.30 至 0.78(%)之間，如表 3 所示。亦發現玉山觀測站均有相同結果，如圖 6(h)及圖 6(i)所示，其受到地勢變化影響，造成風速及溫度的影響程度與平地不相同，以溫度對於蒸發散量影響大於風速。

表 2 嘉義觀測站氣候參數敏感性分析表

風速改變量 (m/s)	輻射量改變量 (MJm ⁻² day ⁻¹)	溫度改變量 (°C)	氣壓差改變量 (kpa)	蒸發散相對改變量 (mm/day)	蒸發散相對改 變百分比(%)
1	0	0	0	0.16	5.15
2	0	0	0	0.31	10.17
3	0	0	0	0.43	15.45
4	0	0	0	0.53	21.66
-1	0	0	0	-0.20	-6.14
-2	0	0	0	-0.44	-14.52
-3	0	0	0	-0.74	-26.73
-4	0	0	0	-1.15	-36.82
0	1	0	0	0.25	7.92
0	2	0	0	0.51	16.89
0	3	0	0	0.76	27.52
0	4	0	0	1.01	41.21
0	-1	0	0	-0.25	-7.92
0	-2	0	0	-0.51	-16.89
0	-3	0	0	-0.76	-27.52
0	-4	0	0	-1.01	-41.21
0	0	1	0	0.09	2.77
0	0	2	0	0.18	5.94
0	0	3	0	0.27	9.76
0	0	4	0	0.36	14.73
0	0	-1	0	-0.09	-2.73
0	0	-2	0	-0.17	-5.78
0	0	-3	0	-0.26	-9.35
0	0	-4	0	-0.34	-13.91
0	0	0	0.4	0.46	14.42
0	0	0	0.8	0.92	30.74
0	0	0	1.2	1.38	50.10
0	0	0	1.6	1.85	75.02
0	0	0	2.0	2.31	112.71
0	0	0	-0.4	-0.46	-14.42
0	0	0	-0.8	-0.92	-30.74
0	0	0	-1.2	-1.38	-50.10
0	0	0	-1.6	-1.85	-75.02
0	0	0	-2.0	-2.31	-112.71

表 3 阿里山觀測站氣候參數敏感性分析表

風速改變量 (m/s)	輻射量改變量 (MJm ⁻² day ⁻¹)	溫度改變量 (°C)	氣壓差改變量 (kpa)	蒸發散相對改變量 (mm/day)	蒸發散相對改 變百分比(%)
1	0	0	0	0.01	0.28
2	0	0	0	0.01	0.48
3	0	0	0	0.01	0.65
4	0	0	0	0.02	0.78
-1	0	0	0	-0.01	-0.38
-2	0	0	0	-0.02	-0.94
-3	0	0	0	-0.04	-1.82
-4	0	0	0	-0.07	-3.30
0	1	0	0	0.23	10.98
0	2	0	0	0.47	22.04
0	3	0	0	0.70	33.25
0	4	0	0	0.94	44.72
0	-1	0	0	-0.23	-10.98
0	-2	0	0	-0.47	-22.04
0	-3	0	0	-0.70	-33.25
0	-4	0	0	-0.94	-44.72
0	0	1	0	0.06	2.78
0	0	2	0	0.12	5.59
0	0	3	0	0.18	8.45
0	0	4	0	0.24	11.39
0	0	-1	0	-0.06	-2.77
0	0	-2	0	-0.12	-5.56
0	0	-3	0	-0.18	-8.38
0	0	-4	0	-0.24	-11.25
0	0	0	0.4	0.35	16.23
0	0	0	0.8	0.69	32.59
0	0	0	1.2	1.04	49.15
0	0	0	1.6	1.39	66.11
0	0	0	2	1.73	83.87
0	0	0	-0.4	-0.35	-16.23
0	0	0	-0.8	-0.69	-32.59
0	0	0	-1.2	-1.04	-49.15
0	0	0	-1.6	-1.39	-66.11
0	0	0	-2	-1.73	-83.87

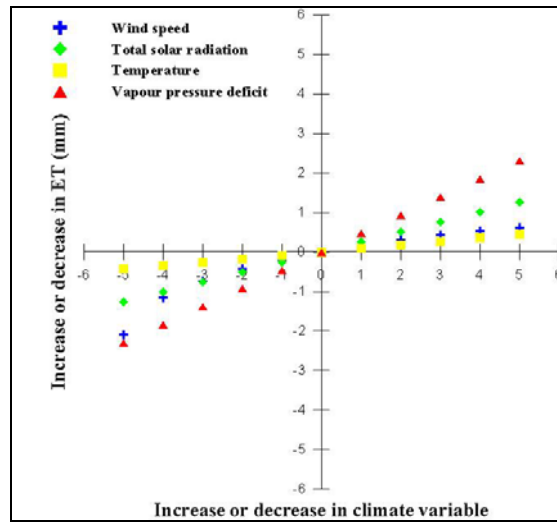


圖 6(a)嘉義氣象站

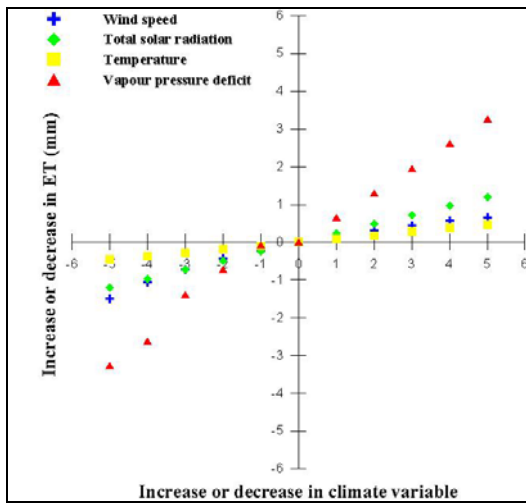


圖 6(b)成功氣象站

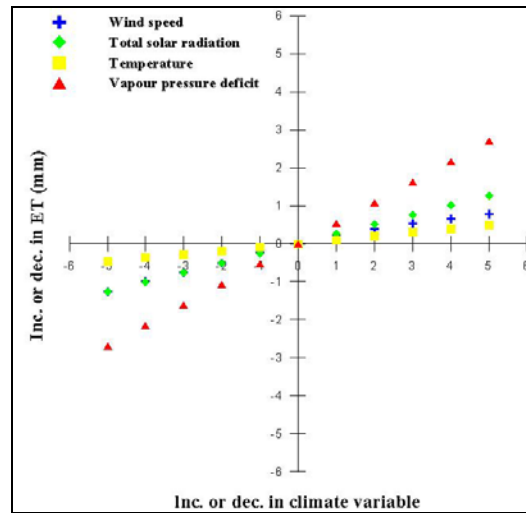


圖 6(c)台南氣象站

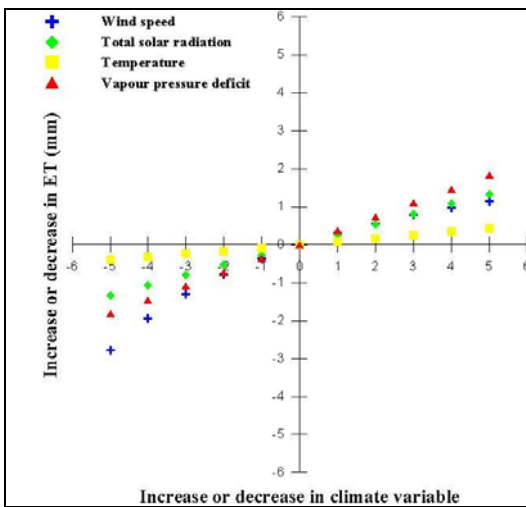


圖 6(d)台東氣象站

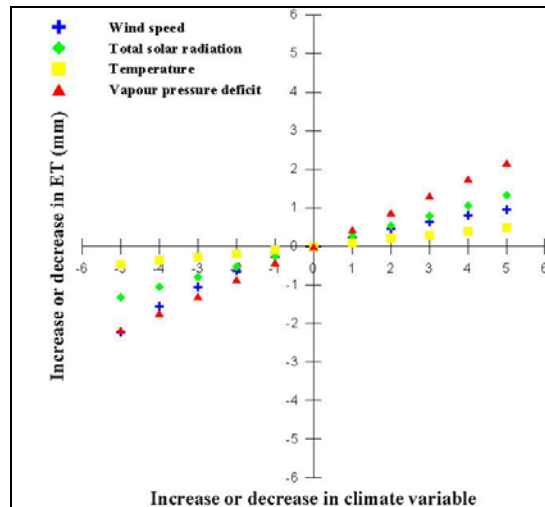


圖 6(e)高雄氣象站

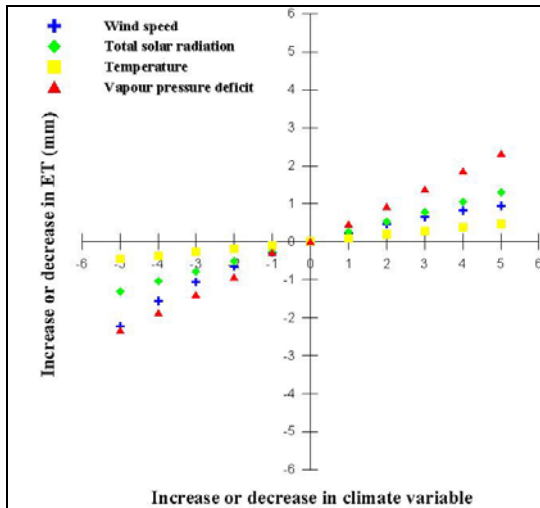


圖 6(f)大武氣象站

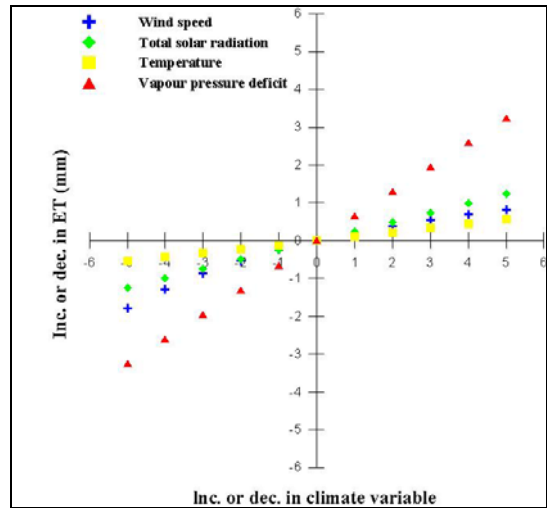


圖 6(g)恆春氣象站

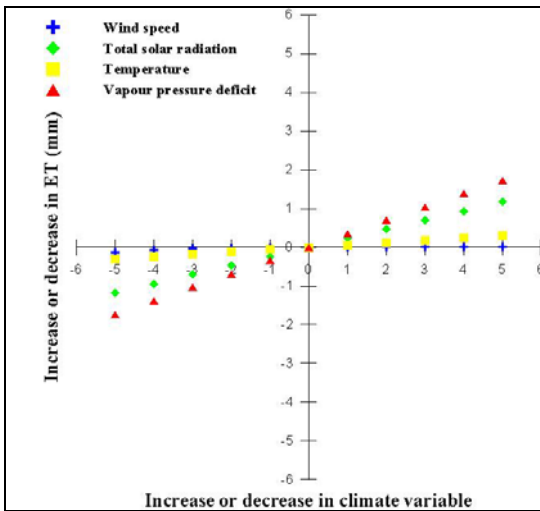


圖 6(h)阿里山氣象站

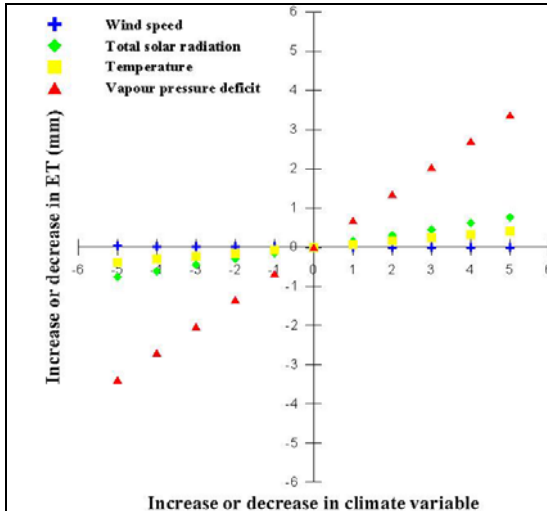


圖 6(i)玉山氣象站

圖 6 氣候參數對於蒸發散量敏感性分析圖

(a)嘉義氣象站；(b)成功氣象站；(c)台南氣象站；(d)台東氣象站；(e)高雄氣象站；(f)大武氣象站；(g)恆春氣象站；(h)阿里山氣象站；(i)玉山氣象站

四、參考文獻

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.

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.

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.

Bowen, I.S., (1926), “The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface”, *Physical Review*, 27, pp. 779-787.

Brutsaert, W., and M.B. Parlange, (1998), “Hydrologic cycle explains the evaporation paradox”, *Nature*, 396, 30.

Cuenca, R.H.,(1989), “Irrigation system design: an engineering approach”, New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 133.

Doorenbos, J. and W.O. Pruitt, (1984), “Guidelines for Predicting Crop Water Requirements”, *Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd Ed. FAO*, Rome.

Hamon, W.R., (1961), “Estimating potential evapotranspiration”, *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of the American Societh of Civil Engineers*, 87, pp. 107-120.

Itenfisu, D., R.L. Elliott, R.G. Allen, and I.A. Walter, (2003). “Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort.” *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(6), pp. 440–448.

Irmak S., M., J.O. Payero, D.L. Martin, M., A. Irmak, and T.A. Howell, (2006), “Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(6), pp. 564-578.

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.

Jayatilaka, C.J., B. Storm, L.B. Mudgway, (1998), “Simulation of water flow on irrigation bay scale with MIKE-SHE”, *Journal of Hydrology*, 208 pp.

108-130.

Jensen, M.E., H.R. Haise, (1963), "Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation", *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*, 89(4), pp. 15-41.

Kohler, M. A., T.J. Nordenson, and W.E. Fox, (1955), "Evaporation from Pans and Lakes", U.S. Dept. of Commerce, Washington, pp. 1-19.

Malek, E., G.E. Bingham, (1993), "Comparison of the Bowen rationenergy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration", *Journal of Hydrology*, 146, pp. 209-220.

Monteith, J.L., and M.H. Unsworth, (1990), "Principles of Environmental Physics", Edward Arnold, London.

Monteith, J.L., (1965), "The State and Movement of Water in Living Organisms", *Evapotranspiration and environment*, 19, pp. 205-234.

Monteith, J.L., (1981), "Evaporation and surface temperature", *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.*, 107, pp. 1-27.

Omar, M.H., (1968), "Potential evapotranspiration in a warm arid climate", *Agroclimatological Methods: Proceedings of the reading symposium, Natural Resources Research*, 7, UNESCO, pp. 348-353.

Oliveira, C.W., and R.E. Yoder, (2000), "Evaluation of daily reference evapotranspiration estimation methods for a location in the southeastern USA", *ASAE Paper No. 002030*, St. Joseph, Mich.

Penman H.L., (1948), "Natural evaporation from open water, bare soil and grass", *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 193, pp. 120-145.

Penman, H.L., (1956a), "Estimating Evaporation", *Trans. Am. Geoph. U.*, 37(1), pp. 43-50.

Penman, H.L., (1956b), "Evaporation: an introductory survey", *Neth. J. Agr. Sci*, 4, pp 9-29.

Priestley, C.H., and R.J. Taylor, (1972), "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters", *Monthly Weather Review*, 100(2), pp. 81-92.

Snyder, R.L., (1992), "Equation for Evaporation Pan to Evapotranspiration Conversions", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(6) pp. 977-980.

Snyder, R.L., M. Orang, S. Matyac, and M.E. Grismer, (2005), "Simplified Estimation of Reference Evapotranspiration from Pan Evaporation Data in California", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(3), pp. 249-253.

Stanhill, G., (1962), "The use of Piche evaporimeter in the calculation of evaporation", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Reading, v.88, pp. 80-82.

Sverdrup, H.U., (1946), "The humidity gradient over the sea surface", *J. Meteorol.*, 3, pp. 1-8.

Thornthwaite, C.W., (1948), "An Approach Toward A Rational Classification of Climate", *Geographical Review*, 38, pp. 55-94.

Van Bavel C.H., (1966), "Potential Evaporation the Combination Concept and Its Experimental Verification", *Water Resource Research*, 2(3), pp. 455-467.

Xu, C.Y., and V.P. Singh, (2000), "Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation", *Hydrological Processes*, 14, pp. 339-349.

王如意、易任，2001，「應用水文學」，國立編譯館出版，茂昌圖書公司。

甘俊二，陳清田，陳焜耀，1996，「臺灣地區作物需水量推估模式之合適性研究」，*農業工程學報*，第42卷，第2期，8-19頁。

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。

吳瑞賢、朱佳仁、林永敏、蘇文瑞，1994，「台灣北部地區溫度、雨量變遷之初步探討」，*農業工程研討會論文集*，401-407頁。

金紹興、謝明昌，2001，「氣候變遷對台灣水文環境之影響」，*新世紀水資源問題研析與對策研討會*，A1-A7頁。

施嘉昌、黃振昌，1987，「作物需水量與氣象因子相關理論分析之研究」，*農業工程學報*，第33卷，第2期，1-27頁。

夏禹九，1980，「集水區蒸發散量之初步研究」，*農業工程學報*，第26卷，第1期，50-55頁。

曹以松，1967，「定水位蒸發皿之研究」，*農業工程學報*，第13卷，第2

期，15-23頁。

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。

陳清田，1998，「以 Penman-Monteith 法估算區域性參考作物需水量之研究」，嘉義技術學院學報，第 58 卷，53-62 頁。

童慶斌、陳主惠，2001，「台灣地區合理之蒸發散折算係數與區域蒸發散量估算方法之建立(1/2)及(2/2)」，經濟部水資源局計畫報告。

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 頁。

葉信富、陳進發、李振誥，(2005a)，「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 1 期，27-37 頁。

葉信富、陳進發、李振誥，(2005b)，「台灣地區潛勢能蒸發散經驗公式之最佳化比較，第十一屆大地工程研討會」，淡江大學舉辦，台北。

虞國興、許書平，1998，「氣候變遷對水資源之衝擊-雨量分析」，農業工程學報，第44卷，第1期，9-24頁。

蔡西銘、邱金火、林殷瑋，2001，「地理資訊系統推估區域蒸發散量之研究」，中原學報，第29卷，第3期，219-229頁。

鍾崇燊、向曼菁，2005，「春天的花兒秋天開？都是溫室效應惹的禍！」，科學發展，第388期，66-71頁。