

# 7 田間蒸發散量之估測與應用

申雍

國立中興大學土壤環境科學系

E-mail:yshen@nchu.edu.tw

摘要 .....	86
壹、前言 .....	86
貳、田間蒸發散量測定與估算方法 .....	87
參、區域蒸發散量之估算與應用 .....	91
肆、結語 .....	93
伍、參考文獻 .....	93
英文摘要 .....	96

# 7 田間蒸發散量之估測與應用

申雍

國立中興大學土壤環境科學系

E-mail:yshen@nchu.edu.tw

## 摘要

田間蒸發散量的多寡不僅直接影響土壤中的有效水分含量及作物產量，也是擬定灌溉計畫和進行水資源規劃時的重要參考資料。本文首先說明測定地表蒸發散量的技術，介紹利用氣象資料推估地表蒸發散量的方法，然後論及估計區域蒸發散量的注意事項，以及農業上可能的應用方向。使用滲漏計法和微氣象法可以測得田間蒸發散量短期間內的動態變化，是計算作物係數和評估作物水分利用效率的重要基礎資料。氣象資料只適合推估長期的盆面蒸發散量，若要推估大區域盆面蒸發散量的分佈，還必須考量所使用氣象測站資料的適用範圍與測站密度。就台灣西南部地區而言，利用氣溫和日射資料可以合理推估月累積盆面蒸發散量之空間分佈。

關鍵詞：水資源、灌溉、氣象、氣候、作物水分利用。

## 壹、前言

水不僅是光合作用的原料，也是土壤中養分被動吸收和作物體內各種成分移運時的介質，而葉片的蒸散作用更是降低葉溫的重要機制。由於作物全生育期中必須由土壤吸收大量的水分，所以作物生長之良窳以及產量之高低與土壤中有效水分含量密切相關(Krogman and Hobbs, 1976; Retta and Hanks, 1980; Tanner, 1981)。土壤中有效水分之散失，主要經由土表之蒸發和葉片的蒸散，因此不僅田間的灌溉作業必須考量蒸發散量的實際損失；所有牽涉水資源管理與運用之規劃，也都將地表之

蒸發散量列為重要的考量因子之一。

台灣地區每年可用的水資源(水庫、河川、地下水)約有192億立方公尺，農業灌溉用水使用約120億立方公尺，其中又以水稻灌溉用水為主(黃，1992)，當民生與工業用水逐年增加之際，農業是否真需要如此鉅量的灌溉用水，已成為其他用水標的事業的質疑之一。由於灌溉用水除需補充田間蒸發散損失外，還包含有整地用水、田間滲漏、以及輸水損失等與作物生長無直接相關的用水量，因此若能準確估算田間的蒸發散量，將可評估目前農業用水是否合理，也可作為研發或更新灌溉管理技術的基礎。

地表之蒸發散量受微氣象、植被、土

壤等多項因子的綜合影響，具有明顯之時間與空間變異特性，因此需依據設定之研究目標與預期之應用範圍，選擇適合的測定或估算方法，才能明瞭田間蒸發散量之動態變化，並估算在特定時段與空間範圍內的總蒸發散損失，以供進一步之應用。本文首先將討論目前常用之田間蒸發散量的估測方法，再舉例說明蒸發散量估測在農業上的應用。

## 貳、田間蒸發散量測定與估算方法

田間蒸發散量可以實際進行測定，也可以由氣象資料予以估算，兩種方式各有其適用的範圍。於田間進行蒸發散量之測定，可以明確得知田間特定範圍內實際蒸發散量的動態變化，但受限於時間、經費、人力、場所、…多項因素之限制，通常僅適合用於特定小區域進行之研究工作。利用氣象測站觀測紀錄進行估算，雖然資料獲取較容易，適用的範圍也略廣，但通常僅能估算長時期的平均盆面或潛在蒸發散量，不適合作為瞭解短期間的動態變化使用；要轉換成田間實際蒸發散量，還必須考量作物種類、生育階段、土壤性狀、…等植物與土壤特性的影響。

### 1. 田間測定方法

田間測定實際蒸發散量的技術可分為下列幾大類，(1)蒸發皿法，(2)滲漏計法，(3)土壤水分收支法，和(4)微氣象法。蒸發皿法主要測定所模擬之自由水面的蒸發量，雖未考量田間蒸發散過程中因土壤和植物所加諸之各種限制，但卻能代表田間

多種微氣象因子的綜合影響結果。由於綠洲效應(oasis effect)之故(Tanner, 1957)，盆面蒸發量常高於大面積自由水面(如湖面)的蒸發量，可利用晞皿係數( $p_a n$  coefficient)加以修正(Doorenbas and Pruitt, 1975; Brutsaer, 1984)。一般則將盆面蒸發量直接乘以適當的作物係數( $c r o p$  coefficient)，以換算得知田間的實際蒸發散量(施等, 1988)。蒸發皿的大小和皿中水深會影響蒸發量的測值，中央氣象局以直徑120cm，深25cm的A型蒸發皿為標準測定儀器，需維持水深在18~20cm間，通常每天定時測定水深一次，再換算為每天之盆面蒸發量(中央氣象局, 1986)。臺灣早期使用之日式直徑20cm，深10cm的20cm蒸發皿，因皿內水溫較高，所測得之蒸散量較A型蒸發皿約高30%，且受局地微氣象環境影響(圖1)。

滲漏計法係以人為方式將一土體獨立出來，再以稱重的方式計算出土體經由蒸發散所減少的水量，因此可以直接測定地表的蒸發散量，也常被作為比較其他測定方法準確性的基準(Rosenberg *et al.*, 1983; Brutsaert, 1984)。地表蒸發散減少的重量通常遠小於整個獨立土體的重量，由於稱量儀器性能之限制，大部份滲漏計的精確度僅適合測定每天的蒸發散量。基本上，種植於滲漏計內外之作物的生育狀況不應產生差異，才能正確測得田間作物的實際蒸發散量，但此基本要求卻不易被正確施行，常見的因素包括土壤回填時改變了剖面層次和密度、土壤水分剖面與實際狀況不同、以及根系生長受限制等(Pelton, 1961)。若採用盆栽或令滲漏計突出地面，其測值將會因曬衣繩效應(clothesline effect)而顯著高於田間真正的蒸

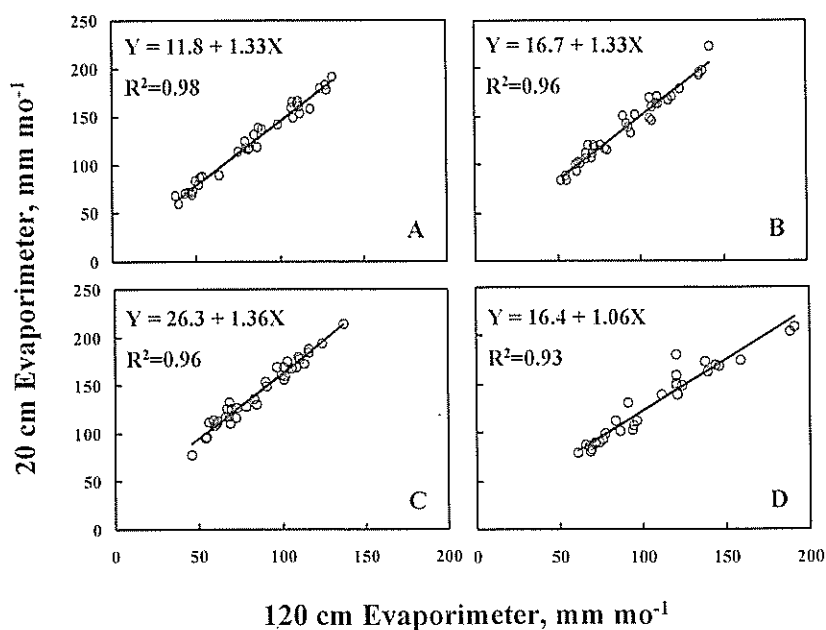


圖1. 氣象測站盆面蒸發量受蒸發皿直徑之影響(A)台南站467411(B)嘉義站467480(C)台中站467490(D)梧棲站467770。

發散量(Tanner, 1957; van Bavel *et al.*, 1962)。

土壤水分收支法主要依據物質不滅定律，以下式計算蒸發散量(ET)，

$$ET = PI \pm RO - D + \Delta SW$$

其中PI代表降雨/灌溉，RO代表逕流，D代表滲漏/毛管水補充， $\Delta SW$ 代表土層中蓄積水分的變化。本式可計算從大集水區至小坵塊等不同尺度下的蒸發散量，其準確度則決定於各參數量測的準確性。就小坵塊田區而言，土壤滲漏損失/毛管水補充(D)和土層中蓄積水分的變化( $\Delta SW$ )兩項是其中最難準確估算的參數(Jackson *et al.*, 1973; Wight, 1971; Wilcox and Sly, 1974)；就大集水區而言，雨量之空間分佈也很難準確估算。一般而言，土壤水分收支法並不適合用於測定短期(如每天)的蒸發散量，多用於長期蒸發散量之估算，且其中土壤滲漏損失/毛管水補充(D)和土層中蓄

積水分的變化( $\Delta SW$ )兩項常被假設變動很小而忽略不計。水田浸水時期可以利用簡易滲漏筒中水深的變化計算每日的蒸發散量，但應用此法時，需避免打入田中的滲漏筒在犁底層以及筒壁間產生裂隙，因而改變了滲漏速率。

微氣象法可以測得田間實際蒸發散量的動態變化，目前以波溫比值法(Bowen ratio)和渦流相關法(eddy correlation)兩種方法較為常用(Kanemasu, 1979; Rosenberg *et al.*, 1983; Brutsaert, 1984; Verma, 1990)。波溫比值法所使用的儀器設備較簡單且便宜，但必須注意滿足該法有關熱源和水氣源均勻分佈的假設，因此測定儀器不能距土表(或植被表面)太近；且因溫度和水氣壓的梯度值很小，所以各感應器的校驗必須非常確實。使用渦流相關法時必須滿足的限制較波溫比值法為少，但必須使用能快速反應的昂貴感測儀器，才能測得由渦

流引起的垂直變動。使用微氣象法進行測定時，儀器必須架設於已完全依地表狀況調整之邊界層中(Oke, 1978; Verma, 1990)，因此試驗區需有足夠的吹風緩衝距離(fetch)。若以儀器高度:吹風緩衝距離=1:50的低標準計算，當感測器架設於試區中央的植被上方1m處，最好能有100m×100m的試區面積。若試區面積不夠大，則可將測定儀器向下風處移動，或選購取樣頻率高(n Hz)的感測器，以降低感測器架設的高度( $Z_{min} \approx 2U/n$ )。楊等(1986)利用空氣動力法和波溫比值法，以及姚等(2002)利用渦流相關法測定水稻田中蒸發潛熱和可感熱通量的動態變化，是臺灣地區少數以微氣象方法進行田間蒸發散量測定的實例，未來若能改進測定儀器的穩定性，並於不同地區選擇有足夠吹風緩衝距離的試區，應可獲得較精確的田間蒸發散量數據，提供作為計算作物係數，以及驗證氣象資料估

算模式的基礎資料。

## 2. 氣象資料估算方法

利用氣象觀測資料估算地表潛在蒸發散量的方法可分為下列幾大類 (Rosenberg *et al.*, 1983)，(1)以氣溫為基礎之方程式：如Thornthwait法、Blaney-Criddle法、Hargreaves法、Linacre法；(2)以日射及氣溫為基礎之方程式：如Makkink法、Jensen-Haise法、Solar Thermal Unit法；(3)應用多種氣象因子之混合法：如Penman法、Monteith-Penman法、Van Bavel法、Slatyer-McIlroy法、Priestley-Taylor法。液態水經由蒸發或蒸散作用轉成氣態水需要吸收大量的熱能，由於日射是地表能量的主要來源；氣溫不僅反應了入射日射能量的多寡，還決定地表空氣中的飽和水蒸氣壓；日照時間也間接代表入射之日射能量和氣溫，因此日射(圖2)、氣溫(圖

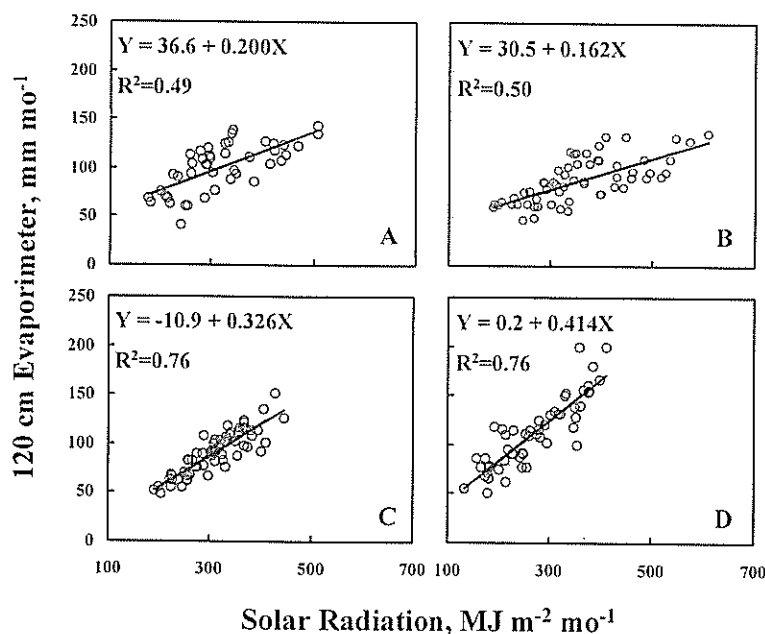


圖2. 氣象測站盆面蒸發量與日射量之關係(A)台南站467411(B)嘉義站467480(C)台中站467490(D)梧棲站467770。

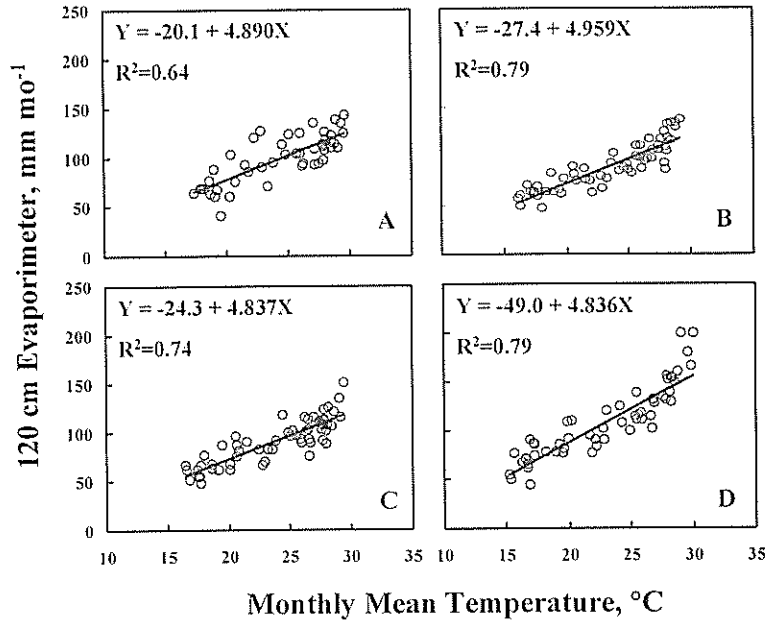


圖3. 氣象測站盆面蒸發量與氣溫之關係(A)台南站467411(B)嘉義站467480(C)台中站467490(D)梧棲站467770。

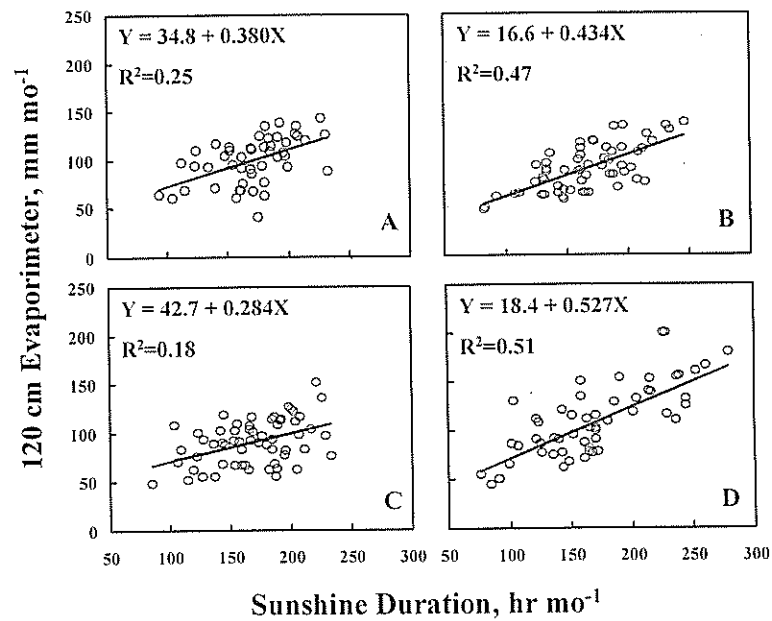


圖4. 氣象測站盆面蒸發量與日照長度之關係(A)台南站467411(B)嘉義站467480(C)台中站467490(D)梧棲站467770。

3)、和日長(圖4)與盆面蒸發量之間有良好的相關，這也是第(1)、(2)類的方法可以合理推估地表蒸發散量的原因。由於決定地表蒸發散量的重要因素不只日射與氣溫兩項，因此第(1)、(2)類的方法通常只適合作為估算長期(如每月)地表的盆面或潛在蒸發散量使用。

Penman(1948)曾應用由能量平衡觀念導出的第(3)類的方法估算水面蒸散量。由於此類方法具有更好的物理基礎，理論上不僅可以估算的更為精確，也可用於估算短期間的蒸發散量，因此已被使用於潛在(盆面)蒸發散量和作物需水量之估算(施及黃，1987；陳，1991；ICID, 1994；甘等，1996；陳及甘，1997)。此類方法所需的觀測項目多，且大量使用經驗公式以估算淨輻射能量、土壤熱通量、作物相關參數以及風速函數等計算過程中必須之項目。由於各地微氣象環境、作物特性、以及觀測儀器架設高度都不盡相同，若直接引用其他地區發展之經驗公式估算田間蒸發散量則準確性必然較差，最好仍以當地累積的長期試驗資料進行相關經驗公式之修正。目前臺灣地區應用氣象資料估算作物蒸發散量仍多推薦使用Blaney-Criddle法(施等，1988；張及蔡，2000)，主因該法僅需月平均氣溫和依據緯度推算之每月日長佔全年日長百分比兩項資料。

應用氣象資料僅能推估當時氣候環境下的盆面或潛在蒸發散量，如需推估田間作物的蒸發散量，還須乘以適當的作物係數。這些作物係數都必須經由長期田間試驗才能求得，雜作灌溉手冊(1980)、張及蔡(1985)、施等(1988)均列有臺灣地區以往有關水稻和數種旱作試驗所求得之作物係數。惟作物係數不僅因氣候環境改變而

有地區性與季節性的差異，作物品種、栽培管理方式、土壤性質等因素也可能影響作物係數的數值。由於作物係數數值直接影響所推估出的田間蒸發散量，因此對於作物係數的準確性與適用性實需給予高度重視。在目前強調水資源必須節約使用的大環境下，如何儘快依地區、季節、作物、土壤等因素提出相對應的作物係數，以供進行水資源的合理分配與規劃，應是農業界相關科研人員的重要使命之一。

### 參、區域蒸發散量之估算與應用

地表蒸發散量的多寡，攸關各地區水資源的規劃與利用，以往有關蒸發散量之研究，多偏重於局地微氣象環境與農田蒸發散量間之關聯，較少對大區域範圍內之蒸發散量進行估算。氣象測站的資料屬於點的資料型態，若要估算大範圍的蒸發散量，則可以應用地理統計技術，將具有空間相依性之點的資料型態轉換成面的資料型態。

申及黃(1996a)研究結果指出，即使在本省西南部地區的平原地形上，各氣象測站觀測之項目中，除氣溫與日射量兩項觀測值有較廣的適用範圍外，其餘如濕度、風速、蒸發量等觀測值的適用範圍均侷限在測站附近。因此不論單獨採氣象測站的蒸發皿資料，或採用由多項氣象因子估算之混合法(如Penman法)，都可能因各測站間蒸發皿、溼度、風速等測值的空間相依性差，而無法正確進行空間分佈之計算。最好利用具有較高空間相依性的氣溫與日射量測值，以第(1)、(2)類的方法間接推算研究區域內盆面蒸發散量之空間分佈。

申及黃(1996b)曾應用臺灣西南部地區九個測站之月平均氣溫和日射量資料，利用地理統計技術計算區內每日氣溫與日射量月平均值於 $2\text{km} \times 2\text{km}$  網格下的空間分佈值，再應用Jensen-Haise法分別求出各網格位置的盆面蒸發散量值，以得到臺灣西南部地區盆面蒸發散量的空間分佈圖。圖5則為區內各地潛在蒸發量於冬季和夏季時典型的空間分佈。由圖中可知盆面蒸發散量的空間分佈，則約略呈現帶狀之分佈，此與區內因地形平坦，日射量之分佈依餘弦定律原理應大略與緯度平行的推論相符。此外，冬季時因氣溫與日射量均低於夏季，因此估算所得之各地盆面蒸發散量冬季比夏季低。若直接以各氣象測站的盆面蒸發量進行空間分佈計算(圖6)，因盆

面蒸發量測值受局地多種微氣象環境因子的影響，因此所得之蒸發散量空間分佈圖很難依據氣象學理論解釋。

申及黃(1996b)由不同年期各月份潛在蒸發散量的空間分佈資料，配合水稻在不同生育階段的作物係數，可進一步推估各地一、二期作水稻田間總蒸發散量的累年平均值或最大值，此類資訊可提供區內各農田水利會擬定轄區內灌溉計畫時參考。利用區內各月份潛在蒸發散量與降雨量的空間分佈資料，佐以區內各主要土類之分佈區域、有效水分含量等土壤相關資訊，即可評估旱季時區內土壤的乾旱程度，此類資訊也是進行農業生產與相關投資規劃時的重要參考資料。

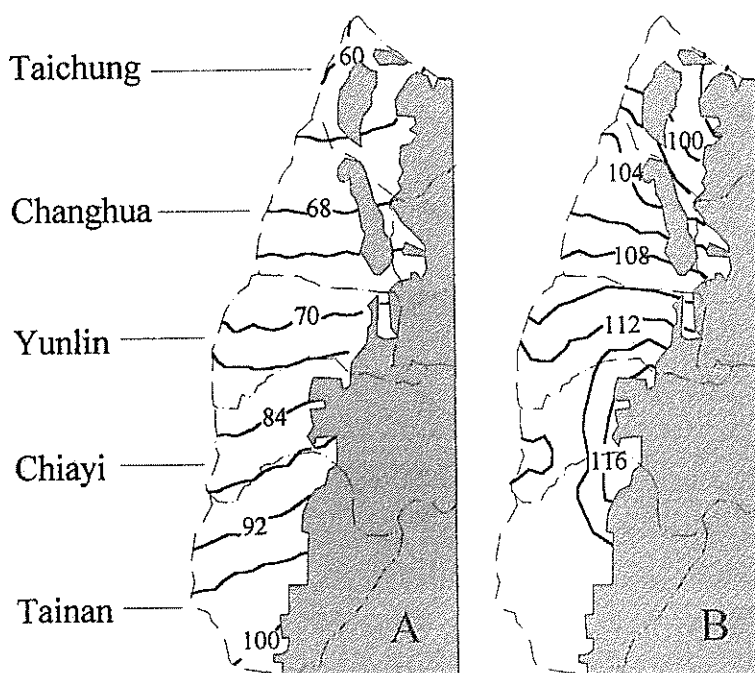


圖5. 利用氣象測站氣溫和日射量資料所推估之台灣西南部區域盆面蒸發散量典型分佈圖 (A)冬季(B)夏季(取自申及黃, 1996b)。



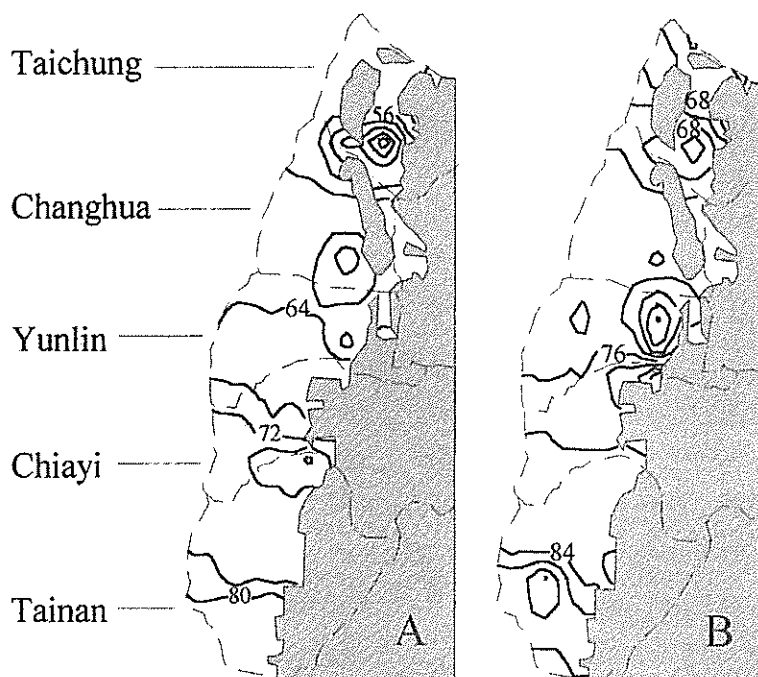


圖6. 利用氣象測站盆面蒸發量資料所推估之台灣西南部區域盆面蒸發散量典型分佈圖(A)冬季(B)夏季。

## 肆、結語

田間蒸發散量的多寡不僅直接影響土壤中的有效水分含量及作物產量，也是擬定灌溉計畫和進行水資源規劃時的重要參考資料。進行田間蒸發散量測定，除可以提供計算作物係數的必要資料外，也是評估作物水分利用效率的重要依據。利用滲漏計法和微氣象法都可獲得準確的每日蒸發散量資料，但滲漏計法受設置地點和作物栽培與管理能力之限制，要依作物種類、土壤性質、氣候條件分別求得適用的作物係數，將是非常耗時與艱鉅的工作。微氣象法由於可將設備移動至選定的試驗地區進行，因此較為靈活與方便。

應用氣象資料可以間接推估大區域盆面蒸發散量的分佈圖，但必須考量所使用

氣象測站資料的適用範圍與測站密度。由區域盆面蒸發散量分佈圖，再佐以適當的作物和土壤參數，可以推估田間作物蒸發散量分佈圖、土壤乾旱發生難易度分佈圖等多種與水資源規劃和農業生產密切相關的資訊。惟以往經驗顯示，所需的作物與土壤參數資料仍非常粗放，還有相當大的改進空間。

## 伍、參考文獻

- 中央氣象局。1986。地面氣象測報作業規範。中央氣象局。292pp.
- 申雍、黃學文。1996a。臺灣西南部地區氣象資料有效範圍之檢驗。中華農業氣象 3：33-43。
- 申雍、黃學文。1996b。臺灣西南部地區潛在蒸發散量之估算與應用。中華農業

- 氣象 3 : 141-149。
- 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。中國農業工程學報 42:8-19。
- 施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二。1988。灌溉排水原理。第三版。中央圖書出版社。531pp。
- 施嘉昌、黃振昌。1987。作物需水量與氣象因子相關理論分析研究。中國農業工程學報 33:1-27。
- 姚銘輝、蔡金川、梁連勝。2002。水稻植冠之氣象因素垂直剖面及通量之量測。中華農業研究(投稿中)。
- 黃金山。1992。臺灣農業經營的轉變及用水的調整。農業用水管理研討會論文集。p 77-89。中國農業工程學會。
- 陳清田、甘俊二。1997。臺灣地域性作物需水量之推估研究。中國農業工程學報 43:1-18。
- 陳清田。1991。嘉義地區作物需水量推估之研究。中國農業工程學報 37 : 82-109。
- 張建勳、蔡明華。2000。灌溉與排水。第二版。中國土木水利工程學會。269pp。
- 楊之遠、曾文柄、柳中明。1989。近地面邊界層－水稻集團與大氣間動量、熱量與水汽量之垂直輸送通量分析(一)。臺灣地區農業氣象應用資源研討會專輯。p.141-169。中央氣象局。
- 雜作灌溉手冊。1980。臺灣省水利局。
- Brutsaert, W. 1984. Evaporation into the atmosphere – Theory, History, and Applications. D. Reidel Publishing Company, New York.
- Doorenbas, J. and W.O. Pruitt. 1975. Crop Water Requirements. FAO irrigation and drainage paper No. 24.
- Jackson, R.D., B.A. Kimball, R.J. Reginato and F.S. Nakayama. 1973. Diurnal soil-water evaporation: Time-depth-flux patterns. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37:505-509.
- Jensen, M. E. and H. R. Haise. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. Irrig. Drainage Div. ASCE 89:15-41.
- Kanemasu, E.T. 1979. Techniques for calculating energy and mass fluxes. p. 156-182. In: Modification of the Aerial Environment of Plants. Barfield, B.J. and J.F. Gerber (eds.).
- Krogman, K.K. and E.H. Hobbs. 1976. Scheduling irrigation to meet crop demands. Publ. 1590. Agriculture Canada. 18pp.
- Oke, T.R. 1978. Boundary Layer Climates. Methuen and Co. Ltd., London. 372pp.
- Pelton, W.L. 1961. The use of lysimetric methods to measure evapotranspiration. p. 106-134. Proc. 2nd Hydrology Symp. (Toronto), Canada.
- Penman, H. L. 1949. The dependence of transpiration on weather and soil conditions. J. Soil Sci. 1:74-89.
- Retta, A. and R.J. Hanks. 1980. Corn and alfalfa production as influenced by limited irrigation. Irrig. Sci. 1: 135-147.
- Rosenberg, N. J., B. L. Blad and S. B. Verma. 1983. Micro-climate: The biological environment. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Tanner, C.B. 1957. Factors affecting evaporation from plants and soils. *J. Soil Water Conserv.* 12:221-227.
- Tanner, C.B. 1981. Transpiration efficiency of potato. *Agron. J.* 73:59-64.
- Verma, S.B. 1990. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. *Remote Sens. Rev.* 5:99-115.
- Wight, J.R. 1971. Comparison of lysimeter and neutron scatter techniques for measuring evapotranspiration from semiarid rangelands. *J. Range Management* 24:390-393.
- Wilcox, J.C. and W.K. Sly. 1974. Ratio between evapotranspiration from lysimeters and evaporation from small evaporimeters using 2- and 3-hour periods of measurement. *Can. J. Plant Sci.* 54:559-564.
- Van Bavel, C.H.M., L.J. Fritschen and W.E. Reeves. 1962. Transpiration by Sudan grass as an externally controlled process. *Science* 141:269-270.

# Measurement/Estimation and Application of Field Evapotranspiration

Yuan Shen

Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung-Hsing University,

Taichung, Taiwan (ROC)

E-mail:yshen@nchu.edu.tw

## Abstract

Field evapotranspiration affects not only soil available water and crop yields but also water resources management and planning. In the paper, measurement techniques and estimation methods for determining field evapotranspiration were discussed. Spatial distribution of regional potential evapotranspiration and its agricultural applications were also discussed. Both lysimetric and micrometeorological methods can provide dynamic changes of field evapotranspiration which serves as the basis of computing crop coefficients and crop water use efficiency. Meteorological data are suitable for estimating long-term field evapotranspiration. To estimate regional potential evapotranspiration from meteorological data, the representative range of data used and density of available stations must be taken into consideration. For southwest region of Taiwan, spatial distribution of monthly pan evaporation can be reasonably estimated by mean air temperature and solar radiation.

**Key words :** Water resources, Irrigation, Meteorology, Climate, Crop water use.