

# 以熱收支法探討平台階段之柑橘果園蒸發散量

唐琦<sup>[1\*]</sup> 郭明揚<sup>[2]</sup>

**摘要** 本研究自 2012 年 11 月 3 日至 2013 年 8 月 28 日止，於嘉義縣大林鎮東側丘陵地所闢建平台階段柑橘果園，設置一 4m 高之氣象觀測塔，分別觀測果樹冠層上氣溫、相對濕度、風速、風向及淨輻射量，果園近地表土層之地溫及地中熱流量等氣象因子，觀測所得數據配合熱收支法來估算平台階段柑橘果園之蒸發散量，初步得知：冬季期間柑橘果實有增加蒸散作用使其蒸發散量高於其他各季，且果園近地表土層呈現散熱狀態，易有逆溫狀態。柑橘果園之蒸發散量介於 1~8mm，平均值為 4.3mm。

**關鍵詞：**蒸發散量、平台階段、柑橘。

## To Estimate Evapotranspiration of Citrus Orchard on Bench Terrace by Heat Budget Method

Chi Tang<sup>[1]</sup> Ming-Yang Guo<sup>[2]</sup>

**ABSTRACT** This study was focus on the estimation of evapotranspiration on the bench terrace for the citrus orchard. The experimental site was located at the hill of eastern Dalin Township, Chiayi County. All the meteorological sensors included as: air temperature, relative humidity, wind speed, wind direction and net radiation above orchard canopy, earth temperature and soil heat flux under ground surface had set in a meteorological tower with 4 meter height, and measured from November 3, 2012 to August 28, 2013. The result had shown as follow, the evapotranspiration of citrus orchard during the winter season was higher than other seasons, since the fruitage would increase transpiration. At the same time, the outgoing earth energy could result radiation temperature inversion at ground surface in the orchard. The evapotranspiration of citrus orchard on bench terrace was range 1 to 8 mm, and the mean value was 4.3 mm.

**Key Words:** Evapotranspiration, bench terrace, citrus orchard.

### 一、前言

臺灣早期針對山坡地進行水土保持處理，曾大面積推廣平臺階段，以建構農民發展坡地農業之基礎，而臺灣西南部區域在此等保育措施下之平臺階段，能有利於截流降雨及延緩地表逕流時間，使得農民縱使在看天田的耕作管理，仍可種植果樹及高經濟作物，有助我國農業能有永續發展。而近年來，全球氣候變遷加劇，時有強降雨及顯著旱澇發生，此將直接衝擊水資源利用之分配不均，而在該區域為持續發展農業，則勢必利用拘限層的地下水，而地下水補注不及，將會有超抽地下水情事，此將有造成臺灣沿海地區之地層下陷或海水入侵的影響，故配合氣候變遷，亟思提供農業耕作管理所需作物需水量，將能利於相關農業用水之維運。

---

[1] 國立屏東科技大學水土保持系副教授 (\* 通訊作者 E-mail: [tangchi@npust.mail.edu.tw](mailto:tangchi@npust.mail.edu.tw))

Associate professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Neipu, Pingtung, Taiwan.

[2] 國立屏東科技大學水土保持系學生

Graduate student, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Neipu, Pingtung, Taiwan

作物於開花及結果期間之作物需水量可由蒸發散量(Evapotranspiration)代表(Miranda et al., 2006), 且用蒸發散量來決定農地灌溉水量, 將不致有低估情形, 此能利於土壤水分管理及提高作物生長需水之利用效率(Tyage et al., 2000)。而蒸發散量的觀測方法包括: 水收支法(Water budget method)、微氣象測定法(Micro-meteorological measurements)及經驗法(Empirical method)等三大分類, 其中微氣象測定法常可將淨輻射量、地中傳導熱量、氣溫、相對濕度實測值, 來結合具有物理意義的熱收支法(heat budget method)(唐琦等 2000)。而蒸發散量的估測亦為水文與氣象相關研究的共同課題, 使得在逐日或逐時的蒸發散量估算會受到氣象條件變動(夏禹九等, 1989)。蒸發散量雖可作為決定灌溉水量之指標, 但該數值係源自植物葉面蒸散與其附近地面及水面蒸發之總合, 受近地表土層與氣層之狀態影響甚鉅, 加以地表植被隨時間與空間變化, 更會造成蒸發散量出現差異。蓋因具作物之植被覆蓋, 縱使旱季期間蒸散率偏低情形下, 其蒸發散量仍會較裸露地者為多(Radersma and Ridder, 1996)。如多年生作物在旱季期間之蒸發散量有偏低情形, 但其值仍較裸露地表土層者為多(Simone et al., 1996), 此顯示地表植被覆蓋程度即會影響蒸發散量之多寡, 則於農地估算蒸發散量時, 常將地表植被覆蓋視為完全覆蓋, 使得作物環境影響降低。如在降雨時, 即會造成日射量、氣溫、相對濕度、相對濕度等氣象因子受到影響, 進而有相當大的異變。

## 二、研究區域概述

本研究試區位於嘉義縣大林鎮大浦美工業區, 鄰近淺丘平臺階段之柑橘果園, 南北向長度220m及東西向長度80m, 面積約1.76ha, 果樹樹齡8年以上, 樹幹基徑約20~35cm, 冠層平均高度2m。為了解平臺階段於設置果園後之蒸發散量(Evapotranspiration)變化, 乃於果園居中區域設置高度4m之觀測用鐵塔, 分別設置各微氣象感測元件於果園冠層上及近地表土層, 包括: 氣溫、相對濕度感測計(R.M.Young, 41002, Traverse, USA, 高度4m及2.5m)、風向風速計(R.M. Young, 05103, Traverse, USA, 高度4m)、淨輻射量(Kipp & Zonen, NR-LITE, AM Deflt, Netherland, 高度2.5m)及地中傳導熱量(Hukseflux, HFP01, CV Deflt, Netherland 深度0.05m), 相關儀器設置如圖1所示。另本試區為避免澆灌影響微氣象觀測出現差異, 僅針對定期除草進行果園管理, 使地表植被高約維持在0.1m以下。而所有微氣象測定採每10秒間隔測定一次, 再紀錄十分鐘平均值或累加值, 觀測期間2012年11月3日至2013年8月28日。

## 三、研究材料與方法

本研究採用熱收支法(Heat budget method)進行淺丘平臺階段之柑橘果園蒸發散量估測, 其方法敘述如後。植物群落之熱收支應包括: 樹冠層上方氣層、樹冠層、林內空氣層、枝幹、枯枝落葉層及近地表土層等各項熱通量所組成(楊之遠等, 1989)、(原蘭芳信, 1992)、(Vogel et al., 1995)、(Munn, 1966)、(Smith et al., 1997)、(Ibañez and Pérez, 1998), 其熱收支可由下式表示。

$$R_n = B + H + \text{IE} + Q \quad (1)$$

式(1)中,  $R_n$  為淨輻射量(net radiation);  $B$  為地中傳導熱量(soil heat flux);  $H$  為顯熱(sensible heat flux);  $\text{IE}$  為潛熱(latent heat flux);  $Q$  為植被儲存熱量(canopy heat storage), 包括植株儲存熱量及光合作用純量之總合, 以上單位為  $\text{MJ m}^{-2}$ 。式(1)中之  $Q$  受冬季乾旱期間番荔枝及荊竹冠層不如其他季節生長旺盛, 使得就一日植被儲存熱量變化甚微, 故為簡便計算該項熱通量可忽略不計。

上式  $H$  及  $\text{IE}$  可由鮑溫比(Bowen ratio,  $\beta$ )法得知, 其關係如式(2)所示。

$$\beta = \frac{H}{\text{IE}} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta e} \quad (2)$$

式(2)中之  $\Delta t$  及  $\Delta e$  分為二不同高度之氣溫( $^{\circ}\text{C}$ )及其空氣中水蒸汽壓(hPa)差值。而實際與飽和水蒸

汽壓可由式(3)求得。

$$e = e_s \times R.H. \quad (3)$$

式(3)中，R.H.為相對濕度(%)， $e$ 、 $e_s$  分為空氣中實際及飽和水蒸汽壓(mm Hg)。而前述  $e_s$  及  $l$  可依據 Wright(1987)所提之推估公式以求得，見式(4)及(5)。

$$e_s = 6.105 + 0.444 t + 1.434 \times 10^{-2} t^2 + 2.623 \times 10^{-4} t^3 + 2.953 \times 10^{-6} t^4 + 2.559 \times 10^{-8} t^5 \quad (4)$$

$$l = 2500.21 - 2.365 t \quad (5)$$

式中， $l$ 為單位蒸發潛熱(J g<sup>-1</sup>)。再將 $E$ 除以單位蒸發潛熱( $l$ )，則可逕行估算蒸發散量(mm)。

## 四、結果討論

先將平臺階段上柑橘果園試區觀測所得之微氣象因子進行統計，並整理如表 1。

表 1 觀測期間於平臺階段上柑橘果園之微氣象因子統計(12, 2012~8, 2013)

Tab.1 The statistic of micro meteorological elements on a citrus orchard at terrace (12, 2012~8, 2013)

Year	Month	Wind speed (m s <sup>-1</sup> )	Prevailing wind direction	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Net radiation (MJ m <sup>-2</sup> )	Soil heat flux (MJ m <sup>-2</sup> )
2012	12	0.9	NE	18.5	82	7.70	0.39
	1	1.1	NNE	16.6	79	9.74	0.01
	2	1.2	NE	19.8	79	11.08	-0.26
	3	1.0	SE	22.1	77	12.12	-0.23
2013	4	0.9	SSE	23.9	85	10.37	-0.15
	5	0.8	SE	26.6	93	11.45	-0.33
	6	1.1	SE	29.0	86	14.39	-0.05
	7	1.0	SSE	27.6	89	15.04	-0.02
	8	1.0	SW	27.4	92	14.04	-0.02
<b>mean</b>		1.0		23.5	85	11.77	-0.07

由表 1 可知，觀測期間之各月平均風速介於 0.8~1.2 m s<sup>-1</sup>，全期之平均風速為 1 m s<sup>-1</sup>，呈現氣流微弱狀態，此顯係柑橘果園試區受周邊高大樹冠植被有減剎近地表氣流之效應，此對於冬季期間若晴空狀態，將易於近地表氣層形成逆溫狀態。而各月盛行風向顯示，果園試區僅 12 月至 2 月期間有東北至北北東之風向，表受東北季風影響；餘者各月盛行風向以東南至南南東為主，此應受果園試區於南側有旱作與鄰近公路，而能利於空氣容易流入。而 12 月至 2 月之冬季期間，各月平均氣溫以 1 月達到 16.6°C 之最低值，餘者各月之平均氣溫則有隨春、夏二季漸增，其平均氣溫最高值出現在 6 月，此時適逢果園試區鄰近北迴歸線，使該地區太陽高度接近 90°，表果園地面有吸收較多之太陽輻射機會，加以風速微弱，則氣溫自有偏高趨勢。果園試區於觀測期間之平均相對濕度介於 77~93%，其中以 5 月至 8 月之相對濕度有略高於 12 月至 4 月之冬季期間者之相對濕度，此顯前者屬雨季期間及後者屬旱季期間所致。而 12 月至 7 月期間之淨輻射量由 9.74MJ m<sup>-2</sup> 漸增至 15.04MJ m<sup>-2</sup>，顯然隨著柑橘樹冠層生長茂盛與季節轉變而呈現遞增趨勢。此外，地中傳導熱量僅在 12 及 1 月有出現 0.39 MJ m<sup>-2</sup> 及 0.1 MJ m<sup>-2</sup>，表示柑橘果園試區近地表土層呈現散熱狀態，則其間近地表氣層易有逆溫狀態出現，需對果園進行低溫防護；其餘各月之地中傳導熱量介於 -0.02~0.33MJ m<sup>-2</sup>，表示柑橘果園試區近地表土層呈現吸熱狀態，有利維持果園內近地表氣層之氣溫穩定。

而柑橘果園試區以熱收支法所估測之蒸發散量(ET)為求方便日後相關研究參考，則建立估測公式將為可行之方式，因此本研究乃將最具代表性與關聯性之淨輻射量(Rn)先與 ET 進行相關性分析，其結果示如圖 1 及式(6)。

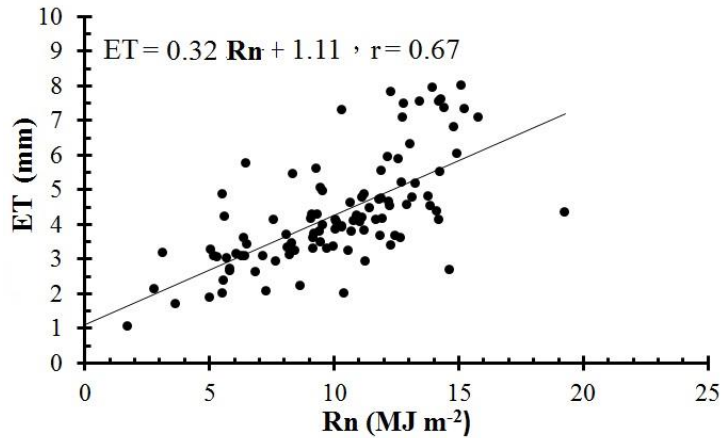


圖 1 平臺階段之柑橘園蒸發散量(ET)與淨輻射量(Rn)之關係

Fig. The relationship between evapotranspiration (ET) and net radiation (Rn) of citrus orchard at terrace

$$ET = 0.21 Rn + 2.46, r=0.64^{**}. \quad (6)$$

式中，ET 為蒸發散量，Rn 為淨輻射量。由圖 1 可知，部份 Rn 於超過 10 MJ m<sup>-2</sup>時，有 ET 低於 2mm 情形，經對照數據得知，其值主要出現在 6 月至 8 月之夏季期間，概因果園有受到午後陣雨影響所致。而 12 月期間係柑橘盛產期間，果實蒸散作用明顯增加，加以常遇晴空弱風狀態，則將使 ET<sub>H</sub> 達到 8mm，此時適當灌溉應是維持果樹生長之必要管理措施。此外，圖中 ET<sub>H</sub> 與 Rn 兩者間呈現遞增趨勢，由二者間關係式(見式 6) 之相關係數為 0.64，已達 1%顯著水準，顯示二者間之關係密切，能據以該式進行相關柑橘果園估測蒸發散量。此外，再由圖 1 可知，柑橘園試區所估測之蒸發散量介於 1~8mm 及平均值為 4.3mm，此相較臺東番荔枝果園蒸發散量介於 0.7~6.6mm 及平均值為 3mm(唐琦與張裕山，2010)，則柑橘相較具有高呼吸率的番荔枝，其具有較高之蒸發散量。

本研究另以氣象資料中較方便取得之氣溫(T)與 ET<sub>H</sub> 進行相關性分析，期能建立簡易推估柑橘園蒸發散量之關係式。然依據葉信富等(2013)以臺灣地區 20 個氣象觀測站蒸發量資料評估各區域蒸發散量，得知臺灣西南部有較高趨勢，且有季節性的變化。故本研究依據嘉義氣象站觀測資料進行區分，以 5 月至 8 月及 12 月至 4 月共前後二個期間，區分為雨季及旱季來進行相關性分析，其結果示如圖 2、式(7)及式(8)。

$$ET_d = 0.26 T - 0.64, r=0.6^{**}. \quad (7)$$

$$ET_r = 0.14 T - 0.56, r=0.37. \quad (8)$$

式中，d 及 r 分別表示 12 月至 4 月及 5 月至 8 月之旱季及雨季期間。在圖 2 中，柑橘園蒸發散量於 12 月至 4 月及 5 月至 8 月二個期間均與氣溫具有線性遞增趨勢，其相關係數分別為 0.6 及 0.37，前者已達 1%顯著水準，顯示旱季期間 T 與 ET 之密切關聯，能據以該式進行相關柑橘果園估測蒸發散量；而雨季期間 T 與 ET 之關係雖未達顯著水準，此係受降雨影響而使部分蒸發散量出現偏低情形。再由圖 2 視之，柑橘園蒸發散量於 12 月至 4 月及 5 月至 8 月二個時期與 T 之關係斜率分別為 0.26 及 0.14，顯示柑橘果園於冬季 12 月期間進入盛產期，果樹冠層及果實之蒸散作用面積增加，此將致使全園蒸發散量增加趨勢有大於春季 5 月期間者，則蒸發散量對氣溫之關係斜率有略高趨勢；再就 5 月至 8 月之 T 與 ET 關係斜率比較，其值偏低，顯係柑橘果園之果樹冠層初萌新葉，且期間已無果實

情形下，其蒸散作用自無法似盛產期顯著，加以值逢雨季，雖然氣溫增加，卻並未使得柑橘果園蒸發散量明顯增加。

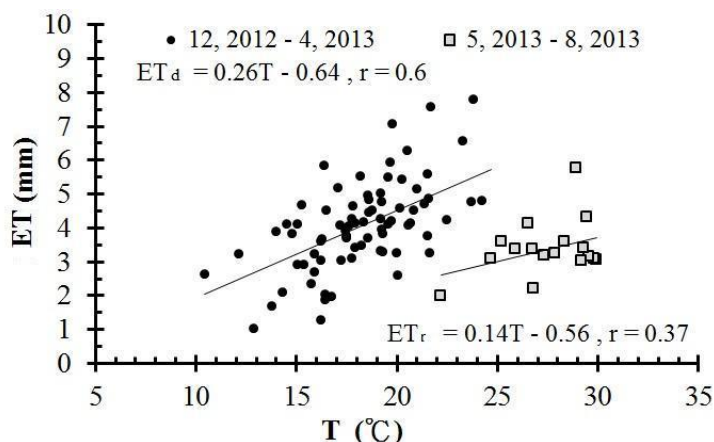


圖 2 平臺階段之柑橘園蒸發散量(ET)與氣溫(T)之關係

Fig.2 The relationship between evapotranspiration (ET) and air temperature (T) of citrus orchard at terrace

## 參考文獻

1. 甘俊二、陳清田、陳焜耀，1996，台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，p. 8-19。
2. 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，p. 1-27。
3. 施嘉昌、黃振昌，1989，從氣象因子估算玉米需水量之研究，台灣地區農業氣象資源應用研討會專輯，中央氣象局，p. 127-140。
4. 施嘉昌、黃成達，1994，玉米蒸發散係數之研究，農業工程學報，第 40 卷，第 1 期，p.1-15
5. 唐琦、陳俐伶、徐森雄，2006，以熱收支法估測台灣南部地區奧古斯汀草地蒸發散量之探討，2006 農業工程研討會論文集，p. 151-158。
6. 唐琦、張裕山，2010，以土壤水分遞減法與熱收支法估算臺東地區新興地番荔枝果園蒸發散量。
7. 唐琦、游繁結、徐森雄，2000，以作物係數法推估三種不同草地之蒸發散量，水土保持學報，第 32 卷，第 4 期，p. 197-206。
8. 夏禹九、楊之遠，1989，由氣象因素估測蒸發散量的限制條件，臺灣地區農業氣象資源應用研討會專輯，p. 127-140。
9. 楊之遠、曾文柄、柳中明，1989，近地面氣層-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)，台灣地區農業氣象資源應用研討會專輯，中央氣象局，pp.141~169。
10. 葉信富、李振誥、陳忠偉、張格綸，2008，評估蒸發皿係數以推估台灣南部地區蒸發散量之研究，農業工程學報，第 54 卷，第 3 期，pp.27-35。
11. 原藺芳信、清田信、矢吹萬壽(1992)，「林地と造成された芝地の熱環境および水收支の特徴」，農業氣象，48(2):147~155。
12. Ibañez M. and P. J. Pérez, 1998, A simple method for estimating the latent heat over grass from radioactive Bowen ratio, *J. Appli. Meteorol.*, 37: 387-392.
13. Munn R.E., 1966, *Descriptive Micromereorogy*, Academic INC., New York, PP.163-166 Vogel C.A., D.D. Baldocchi, A.K. Luhar and K.S. Rao, 1995, A comparison of a Hierarchy of models for determining energy balance components over vegetation canopies, *J. Appli. Meteorol.*, 34: 2182-2196.