

荔枝園潛熱及二氧化碳通量之研究¹

姚銘輝^{2,3} 陳俊仁² 黃國祥²

摘要

姚銘輝、陳俊仁、黃國祥。2011。荔枝園潛熱及二氧化碳通量之研究。台灣農業研究 60:211–220。

本研究利用通量量測技術解決大面積監測果樹生理反應的限制，量測二氧化碳通量以瞭解荔枝 (*Litchi chinensis*) 果園植冠固碳能力，潛熱通量測值則代表果園實際蒸發散量。結果顯示，果園二氧化碳通量與太陽輻射量有直接關係 ($r = 0.87$)，並且與夜間溫度相關性亦高 ($r = 0.71$)。潛熱則與以氣溫及相對濕度所計算之水汽壓差相關係數最高 ($r = 0.70$)，至於常用於果園之水份監測指標，包括土壤水分含量、莖幹汁液流速、葉片蒸散量及氣溫-葉溫差值，與潛熱通量相關性並不高。因此，水汽壓差資料可做為荔枝果園水份管理之指標。

關鍵詞：荔枝、潛熱、二氧化碳通量、能量平衡、蒸發散。

前言

作物生長監測利用生理量測儀器僅能作單葉及定點量測，缺少長期且連續性監測功能，也無法提供大面積及夜間呼吸作用變化的監測，監測技術上的瓶頸限制一些議題的探討。氣象中所謂通量 (flux) 是利用具有高頻度偵測反應之儀器，配合電腦快速運算及儲存，所得之能量項瞬間值以共變異數 (covariance) 計算通量值 (Swinbank 1951)。雖然通量以輻射量、可感熱、水汽及二氧化碳等量測目標，但這些氣象通量測值也是作物生長監測的實際測值，通量系統已可將氣象變化及作物生理反應間作一結合，可應用於大面積農田之蒸發散量測 (Zhang *et al.* 2007)，潛熱或可感熱的傳送 (Ortega-Farias *et al.* 2006) 及二氧化碳吸存量評估

(Yao and chen 2005; Amiro 2010) 等議題的研究。

微氣候的能量機制無法僅由氣象資料說明，必須量測瞬間過流的變化才能對能量產生、傳送及轉換有所瞭解，這些通量包括長、短波輻射，可感熱 (sensible heat)、潛熱 (latent heat) 及向土壤傳導的能量。通量間可相互轉換，例如來自太陽的短波輻射為作物植冠 (canopy) 所吸收，同時土面及葉表也以可感熱及潛熱的能量方式向大氣傳送，這些轉換過程受表面特性影響，如植生、地形、土壤水分含量等影響，雖然農田耕作管理隨大氣環境及作物生長狀態而不同，但仍依循能量平衡的基本學理，而藉由通量的量測，則更能瞭解近地面微氣象的變化。

作物栽培環境能量的平衡可由下式說明：

$$R_n = H + LE + G + Q$$

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2550 號。接受日期：100 年 8 月 30 日。
2. 本所農工組副研究員、聘用人員、助理研究員。台灣 台中市 霧峰區。
3. 通訊作者，電子郵件：mhyao@tari.gov.tw；傳真機：(04)23317709。

R_n ：植冠上方之淨輻射 (net radiation) 通量密度； H ：可感熱通量密度； LE ：潛熱通量密度； G ：向土壤之傳導熱； Q ：作物熱能儲存
其中 Q 項佔所有熱量的比例甚微，可予以忽略 (Tanner 1960)。

我國對於果園微氣象研究甚少 (Chang *et al.* 1996; Tang & Chang 2010)，更缺乏長期及具有整個果園尺度之研究。荔枝 (*Litchi chinensis*) 是我國重要果樹，目前栽培面積約 12000 ha，分布在中部以南及東部地區，產期雖只有 2 個月 (中部地區為 5 月中旬至 6 月下旬)，但果實成熟期可避免颱風侵襲，是值得推廣種植之果樹。本研究探討荔枝果園不同生育階段之能量項變化，土壤水分-樹體-空氣之水份平衡及蒸發散量，荔枝葉片二氧化碳吸存與氣象因素間之關係為研究重點，希望藉由長期通量量測及分析結果，瞭解果園微氣象與作物生育之關係，有助於未來果園管理之參考。

材料與方法

田間作物栽培

觀測地點位於彰化縣芬園鄉之 120 m × 100 m 荔枝果園區，品種為黑葉及玉荷包，樹齡約 20 年，整個果園植冠 (canopy) 高度約 2 m，行株距約 2-3 m，栽培管理依一般慣行方式。在每年採收後 (約 7 月中旬) 進行強剪枝，植株高度降至 1.5 m，果園植冠覆蓋面積約 60%，至 11 月下旬至 12 月上旬間，整個果園植冠覆蓋面積約 90%，一直維持至隔年採收期。

通量量測系統的建立及儀器配置

通量系統架設於果園中央位置，偵測儀器包括：三維音波風速計 (three dimensional sonic anemometer)：Young 81000 (R.M.Young Company, MI, USA)，輸出速度為 4-32 Hz。開放式二氧化碳/水汽分析儀 (open path CO₂/H₂O analyzer)：LICOR-7500 (LI-COR, Inc., NE, USA)，最高反應頻率為 20 Hz。細熱電偶線 (fine wire

thermocouple)：線徑 12.7 μm，反應頻率大於 30 Hz。土壤濕度計 (soil moisture probe)：CS616 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。土溫計 (soil temperature sensor)：107-L (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)，埋設深度 10 cm。淨輻射計 (net radiometer)：REBS Q7.1 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。土壤熱流板 (heat flux plate)：HFT3 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)，埋設深度 5 cm。

所有感測器連接於 Campbell CR1000 資料蒐集器，系統程式依 Campbell 公司所提供加以修改，資料取樣頻率為 10 Hz，每 10 分鐘儲存一次資料。程式中有關通量計算方式，CO₂ 通量、潛熱 (latent heat) 及可感熱 (sensible heat) 通量依據 Yao *et al.* (2003) 所列之公式計算。樹體汁液流速 (sap flow) (SF-8, SolFranc Tecnoloids, S.L. Spain) 屬穿刺性量測方法，置於直徑約 4 cm 之枝條，用於探討樹體蒸散流 (transpiration flow) 之用；紅外線溫度計 (SI-111, Campbell Scientific, Inc., UT, USA) 則置於樹體上方 30 cm 處，用於量測植冠溫度變化，上述兩項儀器同樣連接於 Campbell CR1000 資料蒐集器，每 10 分鐘紀錄一筆資料。

光合作用速率及蒸散速率量測：利用光合作用分析儀 (LICOR-6400) 量測荔枝黑葉品種葉片之光合作用速率、蒸散速率、氣孔導度及氣孔內腔二氧化碳濃度 (C_i) 之數值。本研究所選擇量測試區，包括黑葉及玉荷包兩品種，但黑葉種植面積約佔 70%，因此，單株量測試驗以黑葉品種為主。

資料分析方法

本研究是以農田通量資料作為計算基準，農田能量平衡之指標是以向上及向下能量的比值，一般稱為閉合比 (closure ratio)，其計算方式為 (可感熱 + 潛熱)/(淨輻射 + 土壤熱流)，四種能量項之單位同為 W m⁻²。水蒸氣壓差 (VPD) 計算則由氣溫 (T) 估算飽和水蒸氣壓

(e_s)，其公式為 $e_s = 0.618 \exp [(17.27 \times T)/(T + 237.3)]$ ，實際水蒸氣壓 (e_a) 則由飽和水蒸氣壓和相對溼度的乘值， $e_a = e_s \times (RH)/100$ ，水蒸氣壓差則為飽和水蒸氣壓 (e_s) 扣減實際水蒸氣壓 (e_a)， $VPD = e_s - e_a$ ，單位為 kPa。

結 果

作物生長的能量來自於太陽輻射，除提供熱源外，太陽光波譜中可視光部分提供葉片行光合作用的能量，但以整個農田或果園而言，太陽光提供短波輻射，除部份為作物吸收外，部分以長波輻射方式反射回大氣中。淨輻射即表示實際在地表的能量淨值，而這些能量部分向土壤傳送，使土壤溫度增高，但絕大部分以潛熱及可感熱兩種型態向上傳送。圖 1 為荔枝園四種能量項之日變化，白天之淨輻射量隨太陽光照射地表強度而增減，土壤熱傳導所占極少，向上能量傳送以可感熱方式較潛熱高，主要是果園屬旱田，土壤水分較少所致。圖 2 為分析荔枝園開花期至成熟期期間之能量平衡狀態，因此期間整個果園植冠覆蓋率變化不大，維持在 90%，同時，由 11 月至隔年 6 月間也是低溫至高溫期，整個果園之閉合比值為 1.18。

通量系統架設於荔枝植株上方約 1 m 處，所量測資料代表果園上方的變化，包括大氣-植株-土壤的相互關係，荔枝於日間葉片行光合作用，光強度與二氧化碳通量的關係密切，相關係數可達 0.87 (圖 3)。至於溫度對於二氧化碳通量的影響，由於通量可作日夜連續性偵測，因此分別比較日溫及夜溫對二氧化碳通量的影響，由圖 4 得知夜溫 ($r = 0.71$) 與日溫 ($r = 0.44$) 相比有較高的正相關性。而二氧化碳通量與潛熱通量將因氣孔開啟，葉片同時吸收二氧化碳及進行蒸散作用，兩者通量的相關係數為 0.74 (圖 5)，但由於潛熱數值所代表不僅蒸散作用，尚包括土壤水分之蒸發作用，此和土壤水分狀態有關。

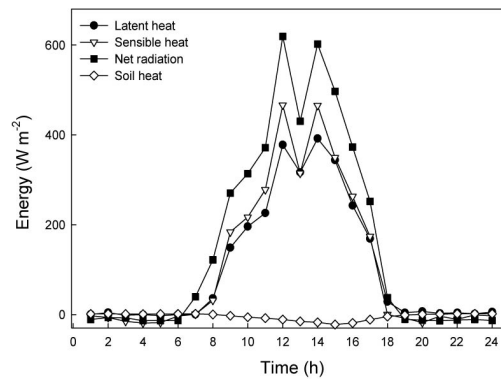


圖 1. 荔枝園能量項 (潛熱、可感熱、淨輻射及土壤熱流通量) 之日變化。

Fig. 1. Diurnal change of energy balance components (latent heat, sensible heat, net radiation and soil heat flux) in litchi orchards of Fenyuan in the calendar day 124, 2009.

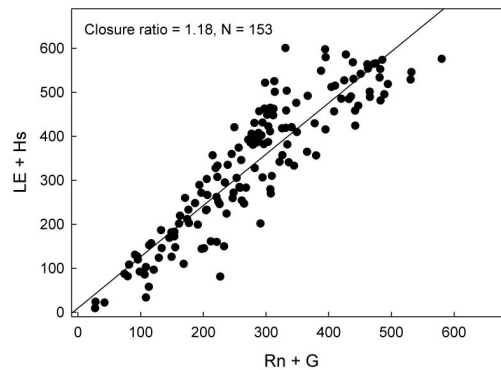


圖 2. 荔枝園每日平均潛熱及可感熱對淨輻射及土壤熱流之比值。

Fig 2. The daily average of turbulent flux for latent heat and sensible heat versus net radiation and soil heat flux in a litchi orchard observed during calendar day 10-162, 2009.

水份管理是果園經營重要工作，土壤水分狀態影響樹體水分的吸收、傳送及蒸散。當樹體葉片向大氣排出水份以維持葉片溫度的穩定，蒸散流 (transpiration flow) 由土壤根圈-根部-莖幹-葉片-大氣而行成一種拉力，除水分傳

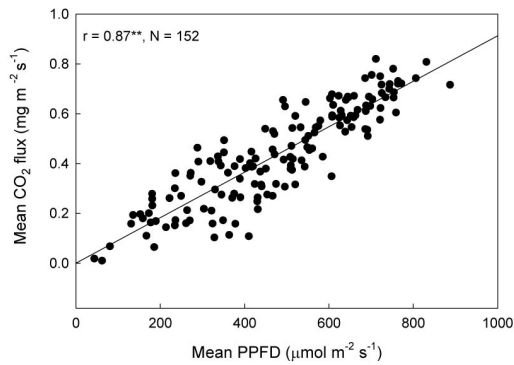


圖 3. 荔枝園二氧化碳通量與光合作用光量子通量密度之相關性。

Fig. 3. Linear relationships between daily averaged CO₂ flux and PPFD (photosynthetic photon flux density) in litchi orchard of Fenyuan during the time period of 10 am to 3 pm local standard time.

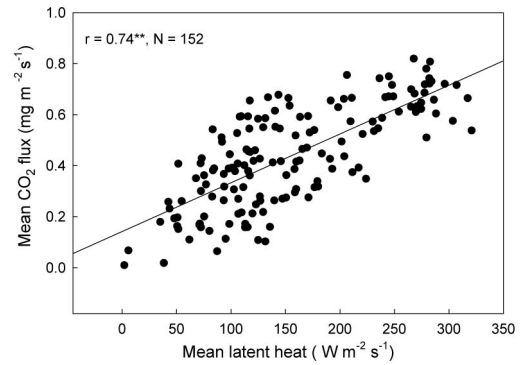


圖 5. 荔枝園二氧化碳通量與潛熱通量之相關性。

Fig. 5. Linear relationships between daily averaged CO₂ flux and latent heat flux in a litchi orchard in the time period between 10 am and 3 pm local standard time.

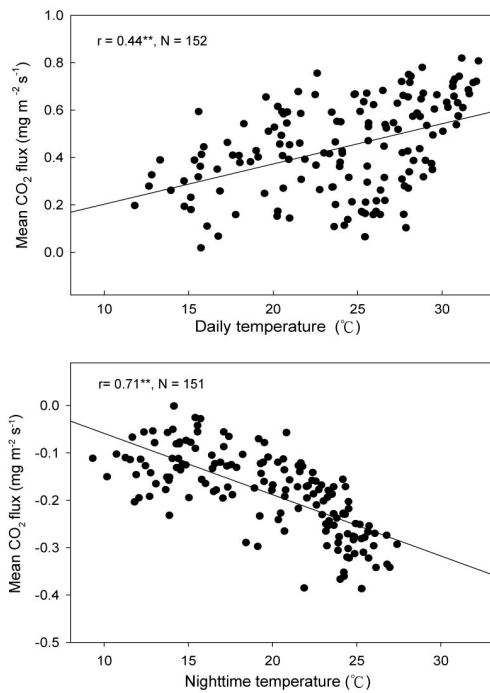


圖 4. 荔枝園二氧化碳通量與日溫及夜溫之相關性。

Fig. 4. Linear relationships between daily averaged CO₂ flux and day temperature (6 am to 6 pm) and night temperature (6 pm to 5:50 am) for litchi orchard.

輸外，也帶動根圈營養元素的吸收，此傳送機制對於樹體生長及管理極為重要。蒸散流可用汁液流速 (sapflow) 量測，量測原理為利用三個不同位置之感溫刺針，由溫差計算汁液的流速。圖 6 為不同土壤水分狀態下之汁液流速日變化，土壤水分在田間較難如實驗室作精細控制，潮濕狀態 (土壤水分含量為 16%，指降雨過後之土壤，相對乾旱狀態 (11%) 是在夏季約一個月未下雨及未灌溉之果園土壤，土壤龜裂及色澤呈白色。由荔枝果樹之汁液流速日變化，葉片受光後開始進行蒸散作用，上午 8 時根部往葉片輸送之水分即達穩定，至 16 時迅速下降，兩種不同土壤水分下之變化型態相近，但乾旱因受限於土壤水分供應而使流速偏低，同時夜間流速為負值，表示地上部水分往根部傳送。

葉片氣孔開閉影響二氧化碳吸收及水分蒸散，本研究以黑葉荔枝為材料，在田間依據不同溫度及光強度條件下量測葉片生理狀態，共計 320 筆資料，經分析後如表 1，氣孔開閉和光強度及葉溫相關性不顯著，但和葉片蒸散速率、光合作用及內腔二氧化碳濃度則有顯著正

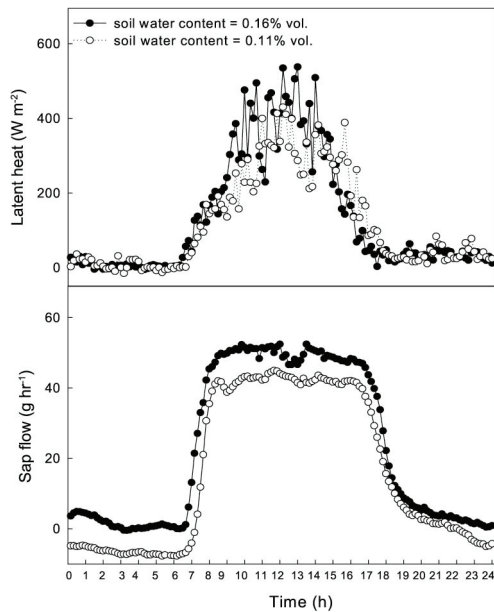


圖 6. 荔枝園不同土壤水份含量下之潛熱通量及樹體汁液流速之日變化。

Fig. 6. Diurnal changes of latent heat and sap flow in a litchi orchard of Fenyan during the calendar day 238 (soil water content = 0.16% vol.) and 267 (soil water content = 0.11% vol.), 2009.

表 1. 光合作用光子通量密度與荔枝葉片生理參數之相關係數

Table 1. Correlation coefficients between the photosynthetic photon flux density and physiological parameters of litchi leaves

Physiological parameter ^z	EVAP	GS	PN	C Int	T _{Leaf} ^y
PPFD	0.72**	-0.01	0.53**	-0.40**	0.82**
EVAP		0.48**	0.40**	0.06	0.79**
GS			0.26*	0.47**	-0.01
PN				-0.59**	0.33*
C Int					-0.24*

^z Physiological parameters, PPFD: photosynthetic photon flux density ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); EVAP: transpiration ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); GS: stomatal conductance ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); PN: photosynthesis rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); and C int: sub-stomatal CO_2 concentration (ppm).

^y T_{Leaf}: Leaf temperature ($^{\circ}\text{C}$).

*, ** Significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively. N: 320.

相關，葉片蒸散作用及光合作用與光強度及葉溫皆有顯著正相關性，其中蒸散作用之相關性較顯著 (大於 0.7 以上)。

潛熱係指果樹植冠上方垂直向上的水汽量，包括土壤蒸發及葉片蒸散，而測值受許多氣象因素或樹體本身狀態的影響，由表 2 以整年日平均值資料分析的結果，潛熱除和植冠-空氣溫度差相關性不高外，和氣象因素之氣溫、相對濕度及水蒸氣壓皆為顯著正相關性。汁液流速則和氣溫相關係數達 0.66，其次是相對濕度及光強度。水汽壓差是溫度及相對濕度的函數，因此，與兩者相關係數高達 0.95 以上，但也和水分傳輸之因素有密切關係，如光強度、葉溫及汁液流速，而和潛熱的相關係數約為 0.70。植冠-空氣溫度差除植冠溫度本身具有相關外，其餘皆不顯著。

討 論

果園過去屬於較粗放式的耕作，但在價格誘因下，逐漸重視氣象因素與果樹生理的關係，透過一些管理技術，如環刻、澆水、肥料控制、摘心及去根等不同方法，以避免隔年結果或落果等現象，已發展成精緻化栽培方式。但果樹生理反應與氣象環境息息相關，尤其是以整個園區為尺度，作綜觀性探討才有助於管理措施的進行。在整年資料中，荔枝園土壤水分含量約在 16–11% 之間，屬旱田環境，果園試區內能量以可感熱為太陽輻射能量消散主要形式。不同土壤水分狀態，可感熱與潛熱的比值不同，水稻田 (湛水狀態) 能量消散則以潛熱為主 (Yao *et al.*, 2009)。Wu & Lee (2004) 認為水稻田對氣候具有冷卻的功能，即是向上能量項以潛熱為主所致。至於果園則和水稻田有不同的能量平衡方式，向上能量傳遞以可感熱明顯高於潛熱之外，雖然水旱田以不同方式傳遞向上能量，但大體上，能量是可達到平衡。Yao *et al.* (2003) 分析台中地區一期作水稻之閉合比值

表 2. 荔枝園潛熱通量與微氣象及樹冠生理參數間之相關係數

Table 2. Correlation coefficients among the latent heat flux, micrometeorological data and canopy physiological parameters in a litchi orchard of Fenyuan

physiological parameter ^z	RH	Temp-a	PPFD	sapflow	Temp-c	△T	VPD ^y
LE ^z	-0.66**	0.71**	0.82**	0.41**	0.43**	-0.22*	0.69**
RH		-0.91**	-0.71**	-0.56**	-0.67	0.14	-0.98**
Temp-a			0.80**	0.66**	0.73**	-0.15	0.95**
PPFD				0.47**	0.48**	-0.28**	0.77**
Sapflow					0.82**	0.39**	0.60**
Temp-c						0.56**	0.72**
△T							-0.10

^z LE: latent heat ($W m^{-2}$); RH: relative humidity (%); Temp-a: air temperature ($^{\circ}C$); PPFD: photosynthetic photon flux density ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$); Sapflow: sapflow velocity ($g hr^{-1}$); Temp-c: canopy temperature ($^{\circ}C$); and ΔT : canopy-air temperature ($^{\circ}C$).

^y VPD: vapour pressure deficit (kPa).

*, ** Significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively. N: 377.

為 0.85，而果樹較農藝作物在土地覆蓋程度不均一，同時管理也較粗放，Daamen *et al.* (1999) 分析檸檬果園之閉合比值在 0.91 至 1.16 之間。本研究選定 11 月至隔年 6 月共計 152 日可用資料，主要是植冠覆蓋變動不大，而所測得閉合比值為 1.18。Kizer & Elliott (1991) 認為農田閉合比值可容許範圍為 0.7–1.3 之間。

作物在日間對於二氧化碳的吸收能力以受太陽輻射量影響為主，依據本研究荔枝園之光強度與二氧化碳通量之相關係數達 0.87，但由其他研究結果，所量測輻射量與 CO_2 吸收率的相關性更高，可達 0.9 以上 (Stewart *et al.* 2003)。事實上，這和量測尺度及方法有關，通量量測系統是量測大面積農田之通量變化，反應田間實際變化量， CO_2 通量值所代表除葉片固碳量及光呼吸量外，尚包括土壤呼吸量；而葉片固碳量除受光 (sunlit) 葉片外，植冠立體結構內不同遮陰程度葉片也影響整體果園固碳量，因此，輻射量和 CO_2 通量之相關性不如以單葉或單株為尺度的量測結果，但卻能反應實際田區的變化。太陽輻射量對於作物二氧化碳吸收影響仍為最重要的因素，因乾物重累積和截取輻射量也呈線性關係 (Chen *et al.* 2009)，

另 Jong *et al.* (1982) 指出夏威夷玉米穀粒產量可由輻射量變化解釋 78.5% 產量的差異。

過去研究文獻中，夜間呼吸作用方面的研究明顯少於光合作用，主要原因為測定困難，因此，在預測碳素平衡過程中，必須採用充滿不確定的呼吸作用估算值 (Högberg *et al.* 2001)。利用通量系統量測農田二氧化碳通量，可直接且長期監測開放環境下二氧化碳吸存量的動態變化，包括作物在日間對二氧化碳吸收淨值，及夜間農田二氧化碳排放量之量測。圖 4 比較日溫與夜溫與二氧化碳通量間之關係，顯然夜溫較日溫密切，主要原因為夜間只有樹體及土壤之呼吸作用，日間除呼吸作用外，尚有葉片光合作用之固碳作用，而固碳作用又直接受太陽輻射及其他氣象因素影響，因此與日間溫度之相關性較低。事實上，夜間呼吸量對作物影響逐漸受到重視，有文獻指出，氣候變遷對作物生長影響主要因夜溫升高，作物呼吸速率加速，而消耗作物日間所累積之碳水化合物所致 (Heinemann *et al.* 2006)。

當樹體水分缺乏時將影響光合作用，原因為氣孔關閉而減少水分散失及氣孔孔隙之二氧化碳通量 (Escalona *et al.* 2002)。水分狀態改變

是作物生理很敏感的指標，這結合土壤、樹體及氣候狀態，但在偵測上有些瓶頸，尤其是大面積農田 (或果園) 無法以單株反應作為管理決策依據，舉例來說，壓力箱 (pressure chamber) 診測土壤狀態是很好的方法，包括提供葉片及莖部之水份潛勢，但缺點在於無法連續及長期的監測。汁液流速量測是偵測果樹樹體蒸散流方法之一，同時為連續性紀錄，可供植物在不同環境變數下之缺水或需水之探討用，運用於包括葡萄 (Braun & Schmid 1999)、橄欖樹 (Williams *et al.* 2004) 及森林樹木 (Wilson *et al.* 2001) 等作物。但汁液流速和蒸散作用間會有時間差 (time lag)，由圖 6 可發現汁液流速和潛熱之日變化型態不同，潛熱受光強度及溫度影響呈單峰型，汁液流速則是平峰型，但如果以日平均資料統計則此誤差將消失，可反應實測之蒸散作用 (Patakas *et al.* 2005)。Nagler *et al.* (2007) 利用三角葉棉 (cottonwood) 發現汁液流速與蒸發散量有密切關係，而汁液流速在乾旱條件下明顯低於正常供水環境。本研究比較正常及乾旱環境下荔枝樹體汁液流速之差異，雖然莖幹水分傳輸形式相似，但乾旱時流速明顯較少，同時，夜間地上部水份往根部流動的現象 (流速為負值)，這在正常供水下無此現象，由此可知，乾旱情形下，樹體可透過汁液的流動作整株水分平衡的調節。

水汽壓差是飽合水汽和實際水汽之差值，在荔枝園周年量測資料中，和向上排放水汽之量測值，包括潛熱及汁液流速皆有高相關性，相關係數分別為 0.69 及 0.59。Patakas *et al.* (2005) 量測葡萄園缺水及蒸散作用之關係，當水分供應充足下，汁液流速和水汽壓差呈線性關係，但當缺水時，水汽壓差增加將使氣孔關閉及汁液流速減少，而氣孔關閉主因是在乾旱時過多水分散失及葉片水份潛勢 (water potential) 降至危險程度 (Tyree & Sperry 1988)。目前對於氣孔反應的生理機制並不完全瞭解，就

葡萄生理研究結果，高水汽壓差狀態下，在葉片有較高量的離層酸 (abscisic acid)，而離層酸會提高氣孔對水汽壓差的敏感性 (Lovisolo *et al.* 2002)。本研究利用光合作用分析儀量測荔枝葉片之生理特性，雖然量測並非處於乾旱狀態，但由表一可知氣孔開度和蒸散作用及水汽壓差有密切關係，但和氣象因子 (光強度及葉溫) 相關性反而不高。此外，植冠-空氣溫度差被認為是水分逆境的指標 (Patel *et al.* 2001)，主要是當土壤水分受到限制，氣孔關閉將使蒸散冷卻 (transpiration cooling) 減少，所以有研究指出，蒸發散量和植冠溫度-空氣溫度之差值有關 (Saha *et al.* 1986)，本研究荔枝園整年水份供應正常下，植冠溫度-空氣溫度之差值除和植冠溫度及汁液流速相關性較高外，和其他量測項目無關 (表 2)。在實際果園中，土壤水分乾旱至葉片產生萎凋現象情形並不多，農民除會以灌溉方式補充降雨不足之外，同時本研究選擇果園為 20 年以上之荔枝樹，根系深入土壤下層，發生極端乾旱情形甚少，而植冠溫度-空氣溫度主要是指葉片缺水使葉片組織失去溫度冷卻的作用，此時才與其他水分量測參數有關。Roberts & Rosier (1993) 指出氣孔導度對水汽壓差之反應是決定果樹灌水的重要指標，而這又受樹體生長及大氣環境的影響。Jarvis & McNaughton (1986) 引進無因次之 decoupling 係數 (Ω)，當 $\Omega \rightarrow 0$ 時，氣孔直接控制蒸散作用，兩者相關性極高；當 $\Omega \rightarrow 1$ 時，則蒸散作用增加受輻射量影響大，而較少受水汽壓差影響 (Wullschleger *et al.* 2000)。說明蒸發散量所受影響因子是複雜多變，不同田間狀態的影響關鍵指標不同，及所受影響程度也不同，需要有完整實測資料，尤其是具長期監測功能，才能對果園作有效水份管理，而由本研究結果也說明，在一般果園水份管理，光強度、溫度及水汽壓差皆是水分管理決策的參數，一些常用之水分監測指標 (如植冠溫度-空氣溫度差)，在

一般果園與蒸發散量實測值（潛熱）反而相關性不高。

結 論

隨著科技進展而不斷的更新結果通量技術，已打破過去氣象量測在空間及時間上的限制，同時更能以長時間且精確的描述作物生長及監測農業環境。本研究量測荔枝果園整年之氣象及通量資料，探討果樹生理反應與氣象環境間的相互影響，果園二氧化碳通量與太陽輻射量有直接關係，而與夜間溫度相關性高，說明通量方式可解決夜間呼吸量之量測問題，長期收集資料可將呼吸作用模式化，有助於作物生長監測及氣候變遷衝擊影響之相關評估。果園水份管理是一項重要工作，本研究由土壤水分含量、莖幹蒸散流、葉片蒸散作用、植冠-空氣溫度差及潛熱偵測值作為水分散失之指標等，由整年量測數據配合氣象資料以分析參數間之關係，潛熱通量是大面積果園水份蒸發散之實測值，但實際運用時建置價格偏高，汁液流速雖可反應樹體根部水分吸收狀態，並且連續紀錄，但僅能代表單株（或單枝）的水份監測工具。雖然上述每一種監測技術有其優缺點，但本研究建立不同監測技術間之相關性，未來在實際果園水份管理上，可依據現地需求選擇適用之監測技術以反應果園之蒸發散量。

致 謝

本研究試驗期間感謝本所農業工程組技工簡文章先生之協助，特申謝意。

引用文獻 (Literature cited)

- Amiro, B. 2010. Estimating annual carbon dioxide eddy fluxes using open-path analysers for cold forest sites. *Agric. For. Meteorol.* 150:1366–1372.
- Braun, P. and J. Schmid. 1999. Sap flow measurement in grapevines (*Vitis vinifera* L.). 2. Granier measurement. *Plant Soil* 215:47–55.
- Chang, J. W., H. M. Chang, C. N. Chao, and H. L. Wang. 1996. Investigates on the microclimate of mango orchard. *Chinese J. Agromet.* 3:151–157. (in Chinese with English Abstract)
- Daamen, C. C., W. A. Dugas, P. T. Prendergast, M. J. Judd, and K. G. McNaughton. 1999. Energy flux measurement in a sheltered lemon orchard. *Agric. For. Meteorol.* 93:171–183.
- Escalona, J., J. Flexas, and H. Medrano. 2002. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. *Vitis* 41:57–62.
- Heinemann A. B., H. N. Maia, D. N. Durval, K. T. Ingram, and H. Gerrit. 2006. Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. *Eur. J. Agron.* 24:52–61
- Högberg, P., A. Nordgren, N. Buchmann, A. F. S. Taylor, A. Ekblad, M. N. Högberg, G. Nyberg, M. Ottosson-Löfvenius, and D. J. Read. 2001. Large-scale forest gridling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* 411:789–792.
- Jarvis, P. G. and K. G. McNaughton. 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Adv. Ecol. Res.* 151:1–49.
- Jong, S. K., J. L. Brewbaker, and C. H. Lee. 1982. Effects of solar radiation on the performance of maize in 41 successive monthly plantings in Hawaii. *Crop Sci.* 22:13–18.
- Kizer M. A. and R. L. Elliott. 1991. Eddy correlation systems for measuring evapotranspiration. *Trans. ASAE* 34:387–392.
- Lovisololo, C., W. Hartung, and A. Schubert. 2002. Whole-plant hydraulic conductance and root-to-shoot flow of abscisic acid are independently affected by water stress in grapevine. *Funct. Plant Biol.* 29:1349–1356.
- Nagler, P., A. Jetton, J. Fleming, K. Didan, E. Glenn, J. Erker, K. Morino, J. Milliken, and S. Gloss. 2007. Evapotranspiration in a cottonwood (*Populus fremontii*) restoration plantation estimated by sap flow and remote sensing methods. *Agric. For. Meteorol.* 144:95–100.
- Ortega-Farias, S. O., A. Olioso, S. Fuentes, and H. Valdes. 2006. Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman-Monteith equation with a variable surface canopy resistance. *Agric. Water Manage.* 3:421–432.

- Patakas, A., B. Noitsakis, and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agric. Ecosyst. Environ.* 106:253–259.
- Patel, N. R., A. N. Mehta, and A. M. Shekh. 2001. Canopy temperature and water stress quantification in rainfed pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]. *Agric. For. Meteorol.* 109:223–232.
- Roberts, J. M. and P. T. M. Rosier. 1993. Physiological studies in young *Eucalyptus* stand in southern India and derived estimates of forest transpiration. *Agric. Water Manage.* 23:103–118.
- Saha, S. K., A. K. S. Gopalan, and D. S. Kamat. 1986. Relations between remotely sensed canopy temperature, crop water stress, vapour pressure deficit and evapotranspiration in chickpea. *Agric. For. Meteorol.* 38:17–26.
- Chen, S., S. H. Chen, and M. H. Yao. 2009. Study of radiation use efficiency in rice. *J. Agric. Assoc. Taiwan* 10:86–101. (in Chinese with English abstract)
- Stewart, D. W., C. Costa, L. M. Dwyer, D. L. Smith, R. I. Hamilton, and B. L. Ma. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agron. J.* 95: 1465–1474.
- Swinbank, W. C. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *J. Meteorol.* 8:135–145.
- Tang, C and Y. S. Chang. 2010. Estimate evapotranspiration by soil moisture depletion and heat budget for a sugar apple orchard at reclaimed land of Taitung area. *J. Taiwan Agric. Eng.* 56:35–43. (in Chinese with English abstract)
- Tanner, C. B. 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crop. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24:1–9.
- Tyree, M. T. and J. S. Sperry. 1988. Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress? Answers from a model. *Plant Physiol.* 16:879–882.
- Williams, D. G., W. Cable, K. Hultine, J. C. B. Hoedjes, E. A. Yepez, V. Simonneaux, S. Er-Raki, G. Boulet, H. A. R. de Bruin, A. Chenbouni, O. K. Hartogensis, and F. Timouk. 2004. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. *Agric. For. Meteorol.* 125:241–258.
- Wilson, K. B., P. J. Hanson, P. J. Mulholland, D. D. Baldocchi, and S. D. Wullschleger. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agric. For. Meteorol.* 106:153–168.
- Wu, F. C. and C. Y. Lee. 2004. Measurement and numerical simulation of paddy field ecoenvironment and microclimate. *J. Chinese Agric. Eng.* 50:64–84. (in Chinese with English abstract)
- Wullschleger, S. D., K. B. Wilson, and P. J. Hanson. 2000. Environment control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees. *Agric. For. Meteorol.* 104:157–168.
- Yao, M. H., J. C. Tsai, and L. S. Liang. 2003. Measurement of vertical profiles and fluctuations on agrometeorological factor within and above a rice canopy. *J. Taiwan Agric. Res.* 52:50–61. (in Chinese with English abstract)
- Yao, M. H. and S. H. Chen. 2005. Studies on the absorption and emission of carbon dioxide in paddy field. *J. Taiwan Agric. Res.* 54:150–161. (in Chinese with English abstract)
- Yao, M. H., S. H. Chen, and C. J. Liu. 2009. Relations of carbon dioxide and water vapour flux to meteorological factors in agricultural fields. *Crop Environ. Bioinformatics.* 6: 87–100. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, B. Z., S. Z. Kang, L. Zhang, T. S. Du, S. E. Li, and X. Y. Yang. 2007. Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method. *Hydrol. Process.* 21:3635–3641.

Latent Heat and CO₂ Flux Measurement in the Litchi Orchard¹

Ming-Hwi Yao^{2,3}, Chun-Jen Chen², and Guo-Sheng Huang²

Abstract

Yao, M. H., C. J. Chen, and G. S. Huang. 2011. Latent heat and CO₂ flux measurement in the litchi orchard. J. Taiwan Agric. Res. 60:211–220.

This research was conducted in the orchards of litchi (*Litchi chinensis*) to solve the problem of monitoring physiological responses of fruit trees in large field areas using the technique of flux measurement. Carbon dioxide flux was used to evaluate the carbon fixation capacity in litchi canopy. The value of latent heat flux can represent the actual evapotranspiration of the litchi orchard. Results of long term monitoring data collected in the orchard showed that the carbon dioxide flux was highly correlated to the solar radiation ($r = 0.87$) and the night temperature ($r = 0.71$). The latent heat flux was highly correlated to the vapor pressure deficit which was calculated by measuring temperature and relative humidity ($r = 0.70$). However, there were no good relationships between the latent heat flux and the commonly used water monitoring indices such as soil water content, sap flow in stem, leaf transpiration and values of differences between canopy temperature and air temperatures. Therefore, this study suggests that the vapor pressure deficit is a good index for the water management in litchi orchards.

Key words: Litchi, *Litchi chinensis*, Latent heat, CO₂ flux, Energy balance, Evapotranspiration.

1. Contribution No. 2550 from Taiwan Agricultural Research Institute (TARI), Council of Agriculture. Accepted: August 30, 2011.

2. Respectively, Associate Researcher, Assistance and Assistance Researcher, Agricultural Engineering Division, TARI, Taichung, Taiwan, ROC.

3. Corresponding author, e-mail: mhyao@tari.gov.tw; Fax: (04)23331673.