農田二氧化碳及水蒸氣通量與氣象因素之關聯性

姚銘輝[1*]、陳守泓[1]、劉嘉仁[2]
[1]行政院農委會農業試驗所農業工程組
[2]行政院農委會農業試驗所農場管理組

摘要

本研究比較不同作物種類(水稻、玉米及甘藷)、土壤水分差異(水、旱田)及種植時期(春、秋作)之農田通量與微氣象因素之間的關聯性。利用渦流相關偵測系統記錄作物整個生育期之通量資料。研究結果顯示，水稻田因湛水狀態使空氣溼度較高，水蒸氣壓差(VPD)偏低，水稻田之潛熱通量明顯高於顯熱通量。三種作物之 CO_2 及潛熱通量與輻射量有線性正相關，水稻及玉米相關係數在 0.7 以上，甘藷田較低約為 0.5。輻射利用效率(RUE)與溫度之間的關聯性在三種作物間有不同反應，水稻在溫度範圍為 24-32℃間之 RUE 與溫度成反比：玉米雖呈反比趨勢，但對溫度反應不大，幾乎呈定值；甘藷田 RUE 與溫度成正比，可能與秋作低溫有關。三種作物之水分利用效率(WUE)與 VPD 皆呈負相關。WUE 在植冠受光照後開始有明顯高值，在光照強度約為 1,000 μmol m^{-2} s^{-1} 時開始呈穩定。

關鍵詞：作物、通量、水蒸氣壓差、輻射利用效率、水分利用效率。

Relations of Carbon Dioxide and Water Vapor Flux to Meteorological Factors in Agricultural Fields

Ming-Hwi Yao[1*], Shou-Hung Chen[1] and Chia-Jen Liu[2]

[1] Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC
[2] Farm Management Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

ABSTRACT

This study was to compare the relations of microclimate factors with eddy fluxes from different farming conditions varying in crops (rice, corn and sweet potato), soil water status (paddy and upland) and planting seasons (Spring and Autumn). The eddy correlation system was setup above crop canopy to record the flux data during crop growth. Results indicated that relative humidity was higher and vapor pressure deficit (VPD) was lower in rice paddy field due to the submerged condition. In addition, latent heat flux was higher than sensible heat in energy balance. The relationship between CO_2 flux and radiation flux was a linear fashion in three crops. The correlation coefficient for paddy rice and corn was above 0.7 and was about 0.5 for sweet potato. The relationship between radiation use efficiency (RUE), defined as the ratio of CO_2 flux to photosynthetic photon flux density, and temperature varied in crops. RUE was negatively correlated with temperature in the range of 24-32 ℃ in rice, and was also negatively correlated in corn. However, positive relationship was observed in sweet potato owing to low temperatures. The water use efficiency (WUE), defined as the ratio of CO_2 flux to latent heat flux, was negatively correlated with VPD in three crops. The values of WUE increased after sun rise and remained in a stable condition at light intensity over 1,000 μmol m^{-2} s^{-1}.

* 通信作者, mhyao@ tari.gov.tw
投稿日期：2009 年 3 月 10 日
接受日期：2009 年 5 月 20 日
作物、環境與生物資訊 6:87-100 (2009)
Crop, Environment & Bioinformatics 6:87-100 (2009)
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

Key words: Crop, Flux, Vapor pressure deficit, Radiation use efficiency, Water use efficiency.

前言

傳統氣象因子包括輻射量、風速、氣溫、相對濕度和地表溫度等，可對作物栽培之物理環境做記錄及描述。但整個農田微氣候的能量機制無法僅由氣象資料說明，必須藉由量測作物生長環境之能量項，才能對各種能量的產生、傳送及轉換有所瞭解。農業氣象中所謂通量(flux)是指農田能量項渦流(eddy)的變化，利用具有高頻偵測反應之儀器，配合電腦快速運算及儲存，及能量項瞬間值之共變異數(covariance)計算通量(Swinbank 1951)。目前已發展成具有實測功能的系統，廣泛應用在蒸發散量測(Berbigier *et al.* 2001)，作物碳素循環(Sanchez *et al.* 2003)及農田二氧化碳吸存量評估(Sims and Bradford 2001)等工作。

農業上所謂"效率"是指產出和投入的比值(Spedding *et al.* 1981)。農作物產出部分，一般以光合作用速率、乾物重累積量或穀粒產量為衡量基準，但投入部分則較為複雜，除植體本身遺傳特性或生理反應外，氣象因素是作物生長的重要投入資源，也常是影響產出的限制因子。農作物之氣象資源利用效率的探討已普遍受到重視，包括對輻射利用效率(radiation use efficiency; RUE) (Albrizio and Steduto 2005)及水分利用效率(water use efficiency; WUE) (Polly 2002)。氣象資源利用效率依量測尺度及方法有不同定義，利用通量的量測，可針對生質量累積進行即時動態及長期連續性的偵測。此種方式對於田間作物生長監測及作物模式之建立可提供詳盡之實測資料，目前甚多作物模式之驗證即以通量資料作為生長描述之重要參數(Mihailovic and Eitzinger 2007)。

輻射利用效率係指作物對輻射能量利用的情形，此數值受作物及氣象環境的影響，包括氣象性質的參數，如水蒸氣壓差(vapor pressure deficit; VPD)(Stockle and Kiniry 1990)、溫度(Hammer and Vanderlip 1989)及水分狀態(Ong and Monteith 1985)。不同作物種類因生理特性也直接影響對輻射能量的利用，Gosse *et al.* (1986)指出 C_4 型作物輻射利用效率最高，其次是穀類作物，最低為豆科作物。水分利用效率則與蒸散作用有關，同時也受大氣中水蒸氣壓差的影響(Tubiello *et al.* 1999)。Mahrt and Vicker (2002)以通量方式探討 CO_2 及水蒸氣通量和水分利用效率關係，發現作物葉片氣孔關閉對 CO_2 通量影響較水蒸氣通量明顯，水蒸氣壓差和水分利用效率是呈顯著負相關(Baldocchi 1994)。

作者過去曾對水稻之氣象利用效率作一系列研究(Yao *et al.* 2005, 2006, 2007b)，但較少比較不同作物栽培間的差異，尤其是作物種類及栽培季節。國外文獻雖然有探討不同作物之氣象利用效率研究(Albrizio and Steduto 2003, Choudhury 2001)，但缺乏以通量量測方式探討氣象環境對作物氣象資源利用效率之影響。本研究收集一期作水稻、春作玉米及秋作甘藷田之生育期間之通量及氣象量測資料，以探討不同農作物在生育過程氣象因素及氣象資源利用效率之關係。

材料與方法

一、田間作物栽培

水稻觀測試驗於 2007 年一期作進行，甘藷於秋作進行，地點同為行政院農委會農業試驗所溪口農場，試區面積約為 2 ha。水稻栽種品種為臺農 71 號，行株距 15 cm × 30 cm，基肥施用臺肥 39 號 400 kg ha^{-1}，第一次追肥施用臺肥 1 號 160 kg ha^{-1}，穗肥施用硫酸鋅 160 kg ha^{-1}。甘藷栽培品種為臺農 57 號，肥料用量氮肥 80 kg ha^{-1}，磷肥 40 kg ha^{-1} 及鉀肥 160 kg ha^{-1}。玉米試驗於 2008 年春作進行，地點臺中縣霧峰鄉農業試驗所農場，玉米品種為臺農 1 號母本，行株距 75 cm

× 20 cm，基肥施用臺肥 39 號 500 kg ha^{-1}，第一次追肥施用臺肥 39 號 800 kg ha^{-1}。三種作物依據田間實際情形進行病蟲害及雜草管理。

二、農田微氣象測定儀器

測定儀器包括全天輻射儀(pyranometer)，model 8-48 (Eppley Laboratory Inc., Rhode Island, USA)，光譜測定範圍 285-2800 nm。光度計(quantum sensors)，model PAR-1 (PPsystems Inc. , Stotfold, UK)，光譜測定範圍 400-700 nm。每一感測器在使用前以光學輻射校正器(optical radiation calibrator, Licor 1800-02, LI-COR, Inc., NE, USA)校正參數。溫濕度計(hygro-thermometer)，model CS 500 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。風速和風向以二維風速計測定，model 03001 (R.M. Young Company, MI, USA)。

三、通量量測系統的建立及儀器配置

1. 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。
2. 開放式二氧化碳/水汽分析儀(open path CO_2 / H_2O analyzer)：LICOR-7500 (LI-COR, Inc., NE, USA)，最高反應頻率為 20 Hz。
3. 細熱電偶線(fine wire thermocouple)：Campbell 公司推薦所使用之熱電偶線之線徑為 12.7 μm，反應頻率大於 3 0Hz。
4. 土壤濕度計(soil moisture probe)：CS616 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。
5. 土溫計(soil temperature sensor)：107-L 熱電偶線(Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。
6. 淨輻射計(net radiometer)：REBS Q7.1 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。
7. 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 min 儲存一次資料。程式中有關通量計算方式，CO_2 通量依據 Yao *et al.* (2005)，潛熱(latent heat)及顯熱(sensible heat)通量依據 Yao *et al.* (2003)所列之公式計算。

四、氣象資源利用效率之計算

氣象資源利用效率可依據量測尺度及方法而有不同表示方式，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(顯熱+潛熱)/(淨輻射+土壤熱流)，四種能量項之單位同為 W m^{-2}，W 為 Watt 之縮寫。輻射利用效率以 CO_2 通量及輻射通量的比值，單位為 μg CO_2 μmol^{-1} PPFD。水分利用效率則以 CO_2 通量及潛熱通量的比值，單位為 μg CO_2 W^{-1}。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 $e_s = 0.618e\ x\ p[(17.27\times T)/(T+237.3)]$，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

本研究比較不同作物種類(水稻、玉米及甘藷)、土壤水分差異(水、旱田)及種植時期(春、秋作)農田氣象通量與微氣象因素之間的關聯性。Fig. 1 為三種作物在生育期間每日土壤水分含量及水蒸氣壓差之變化。水稻田因湛水栽培，僅在孕穗期至開花期間(曬田)，土壤水分含量有下降之外，其餘時間土壤水分皆維持在飽和狀態，旱田作物(玉米、甘藷)土壤水分則因降雨或灌溉才有提高現象。Fig.1b 為生育期間之水蒸氣壓差變化情形，

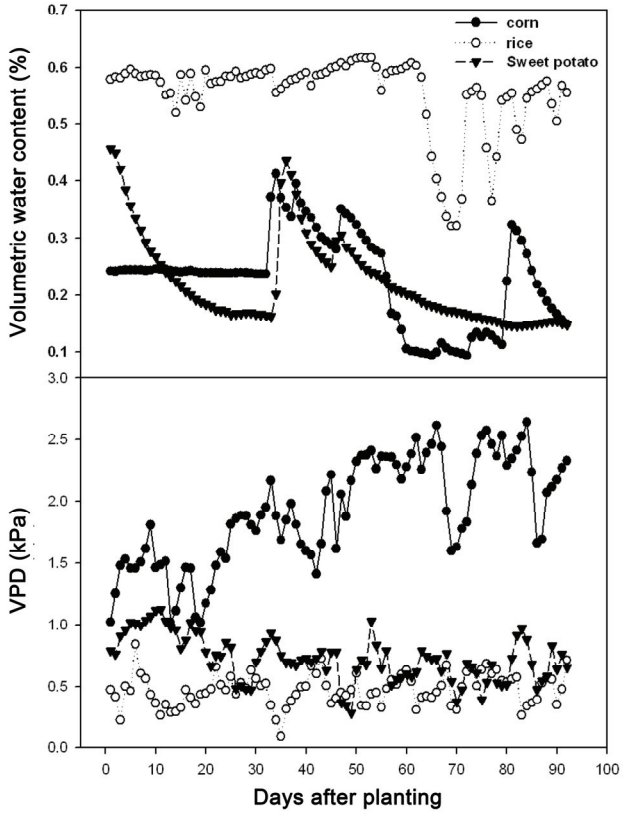


Fig. 1. Temporal changes in soil volumetric water content and vapor pressure deficit (VPD) during the cropping season of rice, corn and sweet potato.

水稻田因湛水狀態使空氣間溼度較高，水蒸氣壓差偏低。相對的，旱田之水蒸氣壓差較水田高，其中玉米田又較甘藷田為高。三種作物生長旺盛期(營養生長期葉面積指數最大)之田間能量平衡的差異如 Fig. 2 所示。由圖中資料顯示，水稻田之潛熱通量明顯高於顯熱通量，這可續由 Fig. 1 土壤水分及水蒸氣壓差得到印證。雖然三種作物田以不同形式傳遞能量，但各項能量間仍應維持平衡，在農田向上能量項包括潛熱及顯熱，向下能量項包括淨輻射及土壤熱流，四種能量項皆可由通量實測資料取得。能量平衡之指標是以向上及向下能量的比值表示，一般稱為閉合比，將 Fig. 2 資料重新計算之閉合比平均值，水稻田為 0.85，玉米田為 0.93，甘藷田為 0.81。

本研究在不同期作之農田架設通量儀器，收集作物整個生育期的通量變化，但因不同作物生長條件差異甚大。因此，分析通量資料僅取作物營養生長期葉面積指數最高 10 天資料，此時葉面積指數水稻為 4.0、玉米 3.5、甘藷 2.1，同時以上午 10 點至下午 3 點輻射量最高的時段為資料分析來源。CO_2 及潛熱通量和輻射量有線性正相關(Fig. 3)，水稻及玉米相關係數在 0.7 以上，甘藷田較低約為 0.5。由 Fig. 3 資料水稻田在光強度為 1,000 μmol m^{-2} s^{-1} 時約為 1.3 mg m^{-2} s^{-1} (平均溫度為 28℃)，玉米田約為 1.0 mg m^{-2} s^{-1} (平均溫度為 29℃)，甘藷田約為 0.5 mg m^{-2} s^{-1} (平均溫度為 26℃)。水稻田潛熱通量在光度為 1,000 μmol m^{-2} s^{-1} 時約為 350 W m^{-2}，玉米田及甘藷田約為 200 W m^{-2}。

輻射利用效率為 CO_2 通量與輻射量的除值，輻射利用效率與溫度之間的關聯性在三種作物間反應不同(Fig. 4)。水稻在溫度範圍為 24-32℃ 間之輻射利用效率與溫度成反比：玉米雖略呈反比，但對溫度反應不敏感，幾乎呈定值；甘藷輻射利用效率與溫度成正比。

本研究中水分利用效率是以 CO_2 與潛熱通量的除值表示，而由 eddy correlation 系統所量測之潛熱包含土壤蒸發及葉片蒸散兩

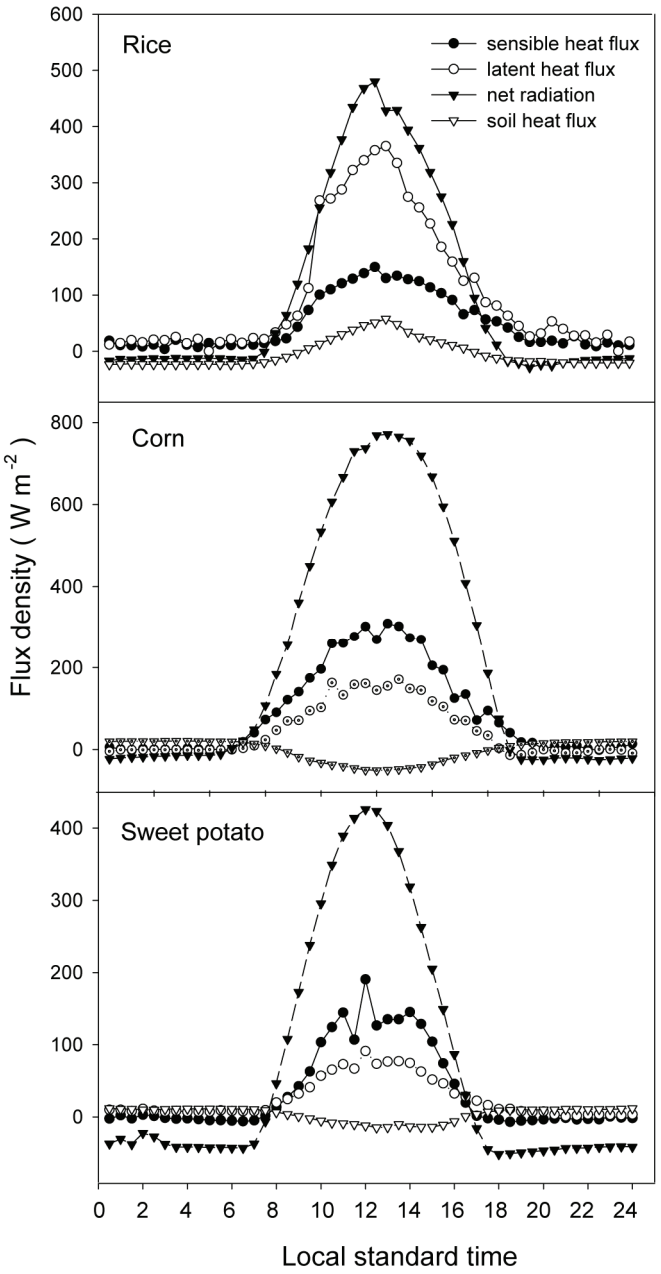


Fig. 2. Energy balance components measured from fields planted with rice, corn and sweet potato during the period of maximum leaf area index.

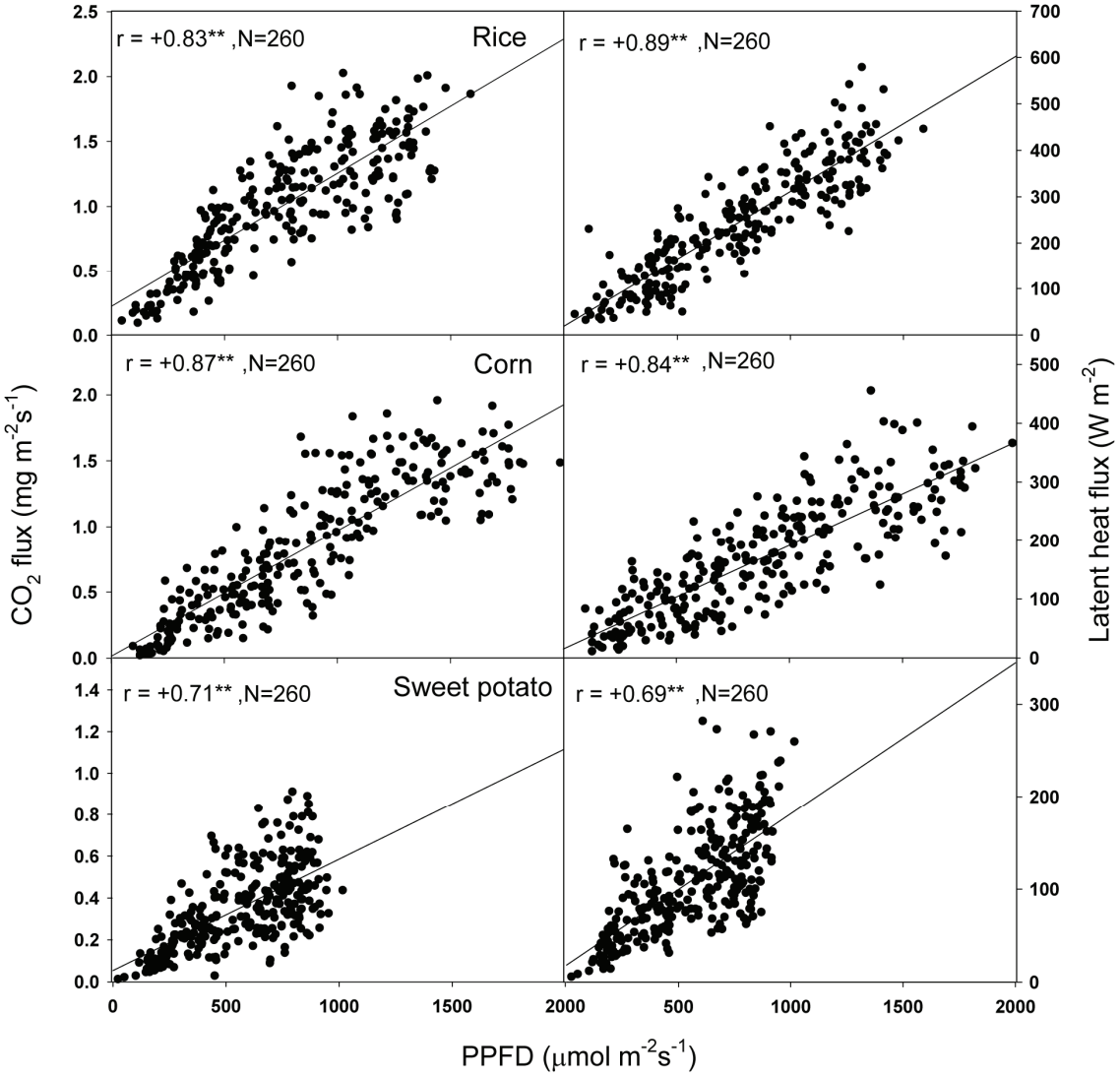


Fig. 3. Linear relationship between area averaged CO_2 flux and photosynthetic photon flux density (PPFD) in the time period between 10:00 and 15:00 local standard time in fields planted with rice, corn and sweet potato, respectively.

部分的總和，植冠上方蒸發散與葉片-空氣間之水蒸氣壓差關係密切，如 Fig. 5 所示。三種作物之水分利用效率與水蒸氣壓差之關係一致，皆呈負相關，當水蒸氣壓差較低時水分利用效率較高，反之亦同。為釐清水分利用效率與水蒸氣壓差間之關係，進一步繪製 Fig. 6，以顯示為玉米田輻射量、水蒸氣壓差及水分利用效率之日變化情形。水蒸氣壓差在中午前呈線性增加，可能和輻射量增加使氣溫增高及日間相對溼度較低有關，正午後因溫度逐漸下降使飽和水蒸氣量減少，水蒸氣壓差數值也下降。水分利用效率在植冠受光照後開始有明顯升高，在光強約為 1,000 μmol m^{-2} s^{-1} 時呈穩定。

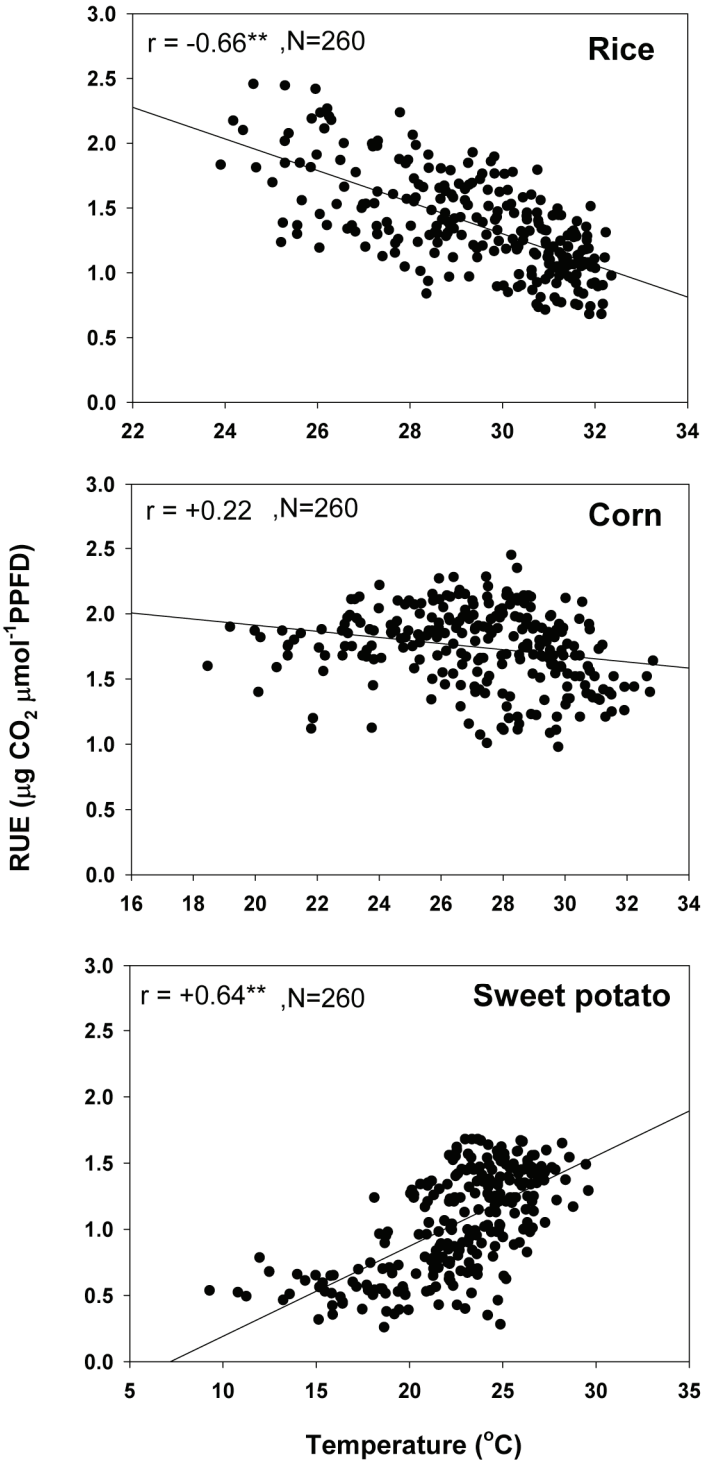


Fig. 4. Linear relationship between area averaged radiation use efficiency (RUE) and temperature in the time period between 10:00 and 15:00 local standard time in fields planted with rice, corn and sweet potato, respectively.

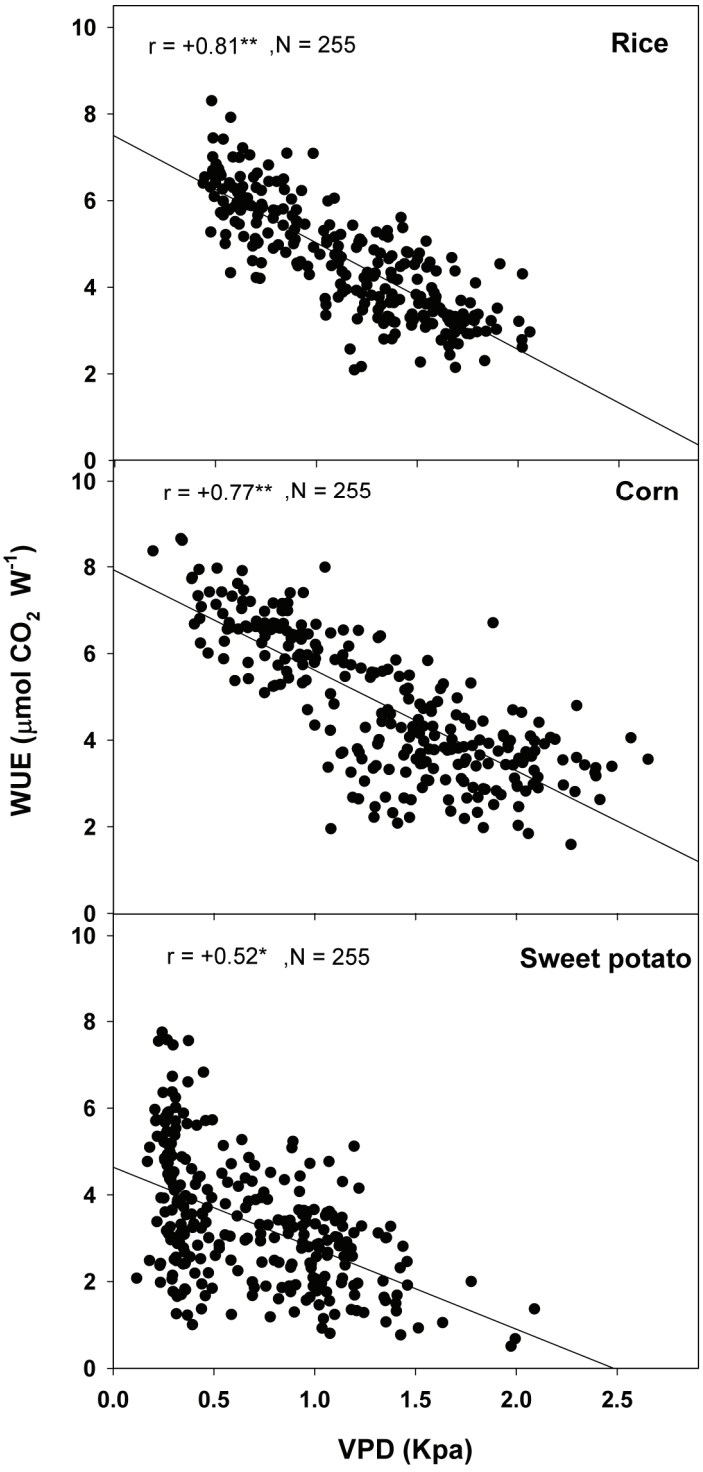


Fig. 5. Linear relationship between area averaged water use efficiency (WUE) and vapor pressure deficit (VPD) in the time period between 10:00 and 15:00 local standard time in fields planted with rice, corn and sweet potato, respectively.

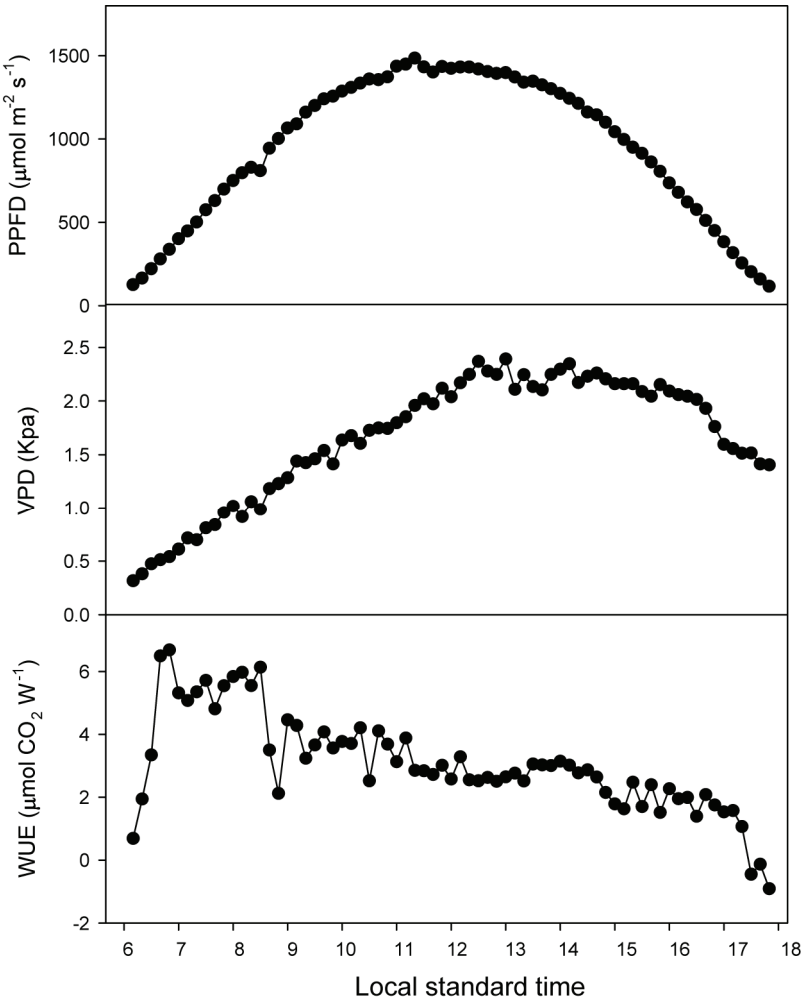


Fig. 6. Diurnal changes in photosynthetic photon flux density (PPFD), vapor pressure deficit (VPD), and water use efficiency (WUE) in corn field on the calendar date 134 in 2008.

農田各種通量與氣象因子間的相關性如 Table 1 所示，資料以整個生育期之日間資料作為統計基礎。由於輻射量是農田通量項及作物葉片固定 CO_2 的能量來源，所以三種農作物田間輻射量與通量項之相關性高，但輻射量與土壤熱流的相關性結果不一致；在水稻為正比，但玉米及甘藷則成反比，同時甘藷之相關性並不顯著。氣溫與田間潛熱及顯熱呈正相關，與潛熱相關性達 0.7 以上，顯熱則較低約為 0.5 左右，與土壤熱流則呈顯著負相關。

討論

農田是複雜的生態系統，各種作物栽培方式是經由長時間耕作習慣的累積，同時配合當地環境條件所演化而來。以我國水稻栽培為例，生育期間除孕穗期至開花期排水，以增加土壤含氧量及促進根部生長防止穗倒伏的原因外，其餘時間皆以湛水方式存在(如 Fig. 1 土壤水分含量變化)。耕作制度也直接影響氣象環境，水稻田長期湛水，由 Fig. 1 所示葉片-空氣水蒸氣壓差低，說明水稻田植

Table 1. Correlation coefficients between the flux data from eddy correlation measurements and climate parameters for rice, corn and sweet potato fields.

Crop	Weather parameter	CO_2 flux (mg CO_2 m^{-2})	Latent heat (W m^{-2})	Sensible heat (W m^{-2})	Net radiation (W m^{-2})	Soil heat (W m^{-2})
Rice	Temperature(℃)	-0.44	0.68**	0.38	0.46*	-0.56**
	Relative humidity (%)	0.13	-0.57**	-0.31	-0.64**	0.61**
	Solar radiation (MJ d^{-1})	0.83**	0.71**	0.58**	0.99**	0.72**
	Wind speed (m s^{-1})	-0.08	0.51*	0.30	0.41	-0.42
Corn	Temperature(℃)	-0.39	0.65**	0.50*	0.69**	-0.77**
	Relative humidity(%)	0.28	-0.47*	-0.52*	-0.52*	0.61**
	Solar radiation (MJ d^{-1})	0.66**	0.74**	0.85**	0.90**	-0.71**
	Wind speed (m s^{-1})	0.41*	-0.39	-0.33	-0.27	0.09
Sweet potato	Temperature(℃)	-0.38	0.74**	0.48*	0.60**	-0.36
	Relative humidity(%)	0.40	-0.35	-0.62**	-0.15	0.22
	Solar radiation (MJ d^{-1})	0.63**	0.76**	0.77**	0.97**	-0.31
	Wind speed (m s^{-1})	0.43*	-0.18	0.13	-0.12	0.08

*,** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, according to the analysis of two-tailed test.

冠上方的溼度較高，這原因是稻田向上能量項是以潛熱為主所致，輻射能透過葉片蒸散及土壤蒸發將植冠下方水分向上傳送(Fig. 2)。因此有研究指出，水稻田對氣候具有冷卻的功能(Wu and Lee 2004)，由上述說明可知農業氣象是土壤-作物-大氣相互影響的結果。至於旱田作物則和水稻田有不同的能量平衡方式，除向上能量傳遞以顯熱明顯高於潛熱之外，日間太陽輻射加熱時，土壤熱流向土層內傳送而呈負值，和水稻田因湛水使土層混和，土壤熱流因地面加熱而向上傳送不同。雖然土壤熱流能量佔整體能量平衡的比例不高，但卻也是水旱田能量項明顯差異特徵之一。而以三種作物田間能量平衡而言，雖然水旱田以不同方式傳遞能量，但大體上，能量是可達到平衡。Kizer and Elliott (1991) 認為農田閉合比值可容許範圍為 0.7-1.3 之間，本研究中三種作物田間之能量平衡皆在容許範圍以內。

太陽輻射量是作物生長能量的來源，直接影響作物葉片固碳作用及蒸散作用。由 Fig. 3 可說明輻射量和植冠上方所偵測之 CO_2 通量及潛熱通量有顯著正相關，水稻及玉米相關係數在 0.7 左右，但以其他方式所量測輻射量與 CO_2 吸收率的相關性更高，可達 0.9 以上(Ohashi *et al.* 1998, Stewart *et al.* 2003)。事實上，這和量測尺度及方法有關，本研究所用渦流相關系統是量測大面積農田之通量變化，可反應田間實際變化量，但 CO_2 通量所代表除葉片固碳量及光呼吸量外，尚包括土壤呼吸量；而葉片固碳量除受陽(sunlit)葉片外，尚包括植冠立體結構內不同遮陰程度(shaded)葉片，所以輻射量和 CO_2 通量之相關性，不如以單葉或單株為尺度的量測結果。同樣的，潛熱通量包括葉片蒸散及土壤蒸發的總和，這和以氣孔導度計(porometer)所量測之單一葉片蒸散量結果不同。至於不同作物間之比較，三種作物在固定光強下之 CO_2 通量及潛熱通量數值並不相同，CO_2 通量量測單位為單位面積內 CO_2 變化量。因

此，種植密度、葉面積指數及土壤呼吸量將影響通量數值。由 Fig. 3 結果可知，雖然就作物生理而言，玉米屬於 C_4 型作物應有較高的固碳能力(Gosse *et al.* 1986)，但本研究量測資料所示，水稻田之 CO_2 通量較玉米田為高，這應和量測時之葉面積指數差異有關。同時水稻田因湛水，水稻根部呼吸或分解有機物所排出之 CO_2 在水中傳遞較慢(Weast 1986)，葉片行光合作用所需 CO_2 源來自大氣，但玉米葉片光合作用所需碳源尚包括土壤呼吸向上傳送之 CO_2，因此由植冠上方所量測之 CO_2 通量較水稻為低。至於甘藷田較其他兩種作物偏低的原因，與低溫影響光合作用進行有關。三種作物田間潛熱量和輻射量亦有高相關性，可由 Table 1 及 Fig. 3 之結果作說明。

輻射利用效率整合作物多種發育、型態、生理和生化過程，所以輻射利用效率常作為評估不同期作及氣候條件下作物生長及產量限制的指標(Sinclair and Muchow 1999)。過去研究認為輻射利用效率在非逆境環境(non-stress)下呈穩定數值(Monteith 1977)，是基於單一葉片生理及生化反應的結果，但以單株或田間的尺度而言，由小麥的研究發現，缺水、輻射環境和作物氮素含量皆能影響輻射利用效率(Sinclair and Muchow 1999)。另外，由長期水稻生育調查資料分析結果可知，輻射利用效率是隨作物葉面積指數及乾物重累積變化(Yao *et al.* 2005)，因此凡影響到作物生長的因素皆會使輻射利用效率改變。至於氣象因素與輻射利用效率的關係，Kumar *et al.* (1996)分析豆類作物生長與氣象變數之間的關係，認為溫度與輻射利用效率在作物開花前呈負相關，開花後則呈正相關。Brown *et al.* (2006)由紫花苜蓿(lucerne)週年栽培結果指出溫度與輻射利用效率呈正相關。兩篇結果不同原因在於溫度範圍，在寒冷地區栽種作物，溫度越高越有助於光合作用，因此輻射利用效率與溫度呈正相關，本研究甘藷即屬於此種情況(Fig. 4)。但適溫或高溫環境易使葉片老化及乾物種累積減少，或是呼吸作用增高，此時輻射利用效率數值即下降，本研究玉米及水稻的分析結果即有此現象。但水稻較玉米明顯的原因應和作物本身適溫有關，玉米為 C_4 型作物，對溫度需求或耐受性應較水稻 C_3 型為高。由本研究三種作物之研究結果說明，溫度與輻射利用效率的關係是取決於作物本身生理特性，以及對於氣象環境的適應性。

水分利用效率(WUE)是葉片 CO_2 通量和潛熱通量的比值，農田潛熱和葉片氣孔開啟程度有關，尤其是葉面積指數大，整個作物植冠形成，蒸發散量以葉片蒸散為主時，葉片蒸散則與氣孔開啟程度息息相關。作物葉片氣孔開閉直接影響葉肉細胞之水分蒸散及吸收 CO_2 的變化，因此任何影響氣孔開閉的氣象因子，也同時影響水分利用效率。由 Table 1 可知溫度影響三種作物之田間潛熱變化，而氣溫影響水分利用效率是經由葉片-空氣間水蒸氣壓差值(Allen *et al.* 1994)，而水蒸氣壓差又與葉片氣孔開閉有關(Testi *et al.* 2007)。Mahrt and Vicker (2002)由通量塔長期觀測資料指出，水蒸氣壓差與潛熱通量是呈正相關。本研究中三種作物之水分利用效率與水蒸氣壓差間有一致性的負相關(Fig. 4)，此與作物破壞性取樣所作結果相同(Baldocchi 1994)。

水分利用效率與輻射量的相關性，CO_2 通量及潛熱通量與輻射量皆呈正相關(Table 1 及 Fig. 3)，但根據作物生理研究指出，當葉片氣孔因逆境或生理調節而關閉，對於氣孔內腔 CO_2 通量的影響大於水蒸氣通量(Mahrt and Vicker 2002)。以日變化而言，清晨太陽照射後葉片氣孔逐漸開啟，在

低光時下光能利用效率極高。以水稻為例，光量子產量可達 0.1 μmol m^{-2} s^{-1} CO_2 / μmol m^{-2} s^{-1} PAR (Yao *et al.* 2007a)。但此時溫度及水蒸氣壓差皆低，植冠之葉片蒸散尚未進行(潛熱通量低)，因此水分利用效率最高值出現在清晨，之後隨太陽輻射量增強後，CO_2 通量及潛熱通量同時增加，兩者的比值近於恆定。至日落時光合作用停止，植冠上方 CO_2 通量減少，水分利用效率數值下降(Fig. 6)。

結語

通量技術在農業研究上的運用，隨著科技進展而不斷的更新結果，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。本研究量測不同農田之氣象及通量資料，探討耕作制度差異與氣象環境間的相互影響，也由輻射及水分利用效率的數據，探討通量與氣象因子間之關聯性。研究結果顯示，由長期通量觀測數據說明，三種種植不同作物之農田，向上及向下能量可達到平衡，但能量的釋放方式因農田環境而不同；例如水稻田因湛水狀態使空氣溼度較高，水蒸氣壓差偏低，水稻田之潛熱通量明顯高於顯熱通量。另外，三種作物之 CO_2 及潛熱通量和輻射量有線性正相關。而輻射利用效率(CO_2 通量與輻射量之比值)與溫度之間的關聯性，水稻在溫度範圍為 24-32℃間之 RUE 與溫度成反比：玉米雖略呈反比，但對溫度反應不大，幾乎呈定值；甘藷田 RUE 與溫度成正比，可能與秋作低溫有關。由作物間比較結果說明，溫度與輻射利用效率的關係是取決於作物本身生理特性，以及對於氣象環境的適應性。至於水分利用效率和水蒸氣壓差的關聯性，三種作物量測結果皆呈反比。

致謝

本研究係執行農業長期生態研究計畫(95,96,97 農科-11.5.1-農-C1)之部分成果，本所嘉義分所溪口農場陳榮坤先生提供水稻及甘藷量測場地，特申謝忱。

引用文獻

Albrizio R, P Steduto (2005) Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. I. Radiation use efficiency. **Agric. For. Meteorol.** 130:254-268.

Allen LH, RR Valle, JW Mishoe, JW Jones (1994) Soybean leaf gas exchange of carbon dioxide and water stress. **Agron. J.** 86:625-636.

Baldocchi DD (1994) A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C_3 (wheat) and an open C_4 (corn) crop. Part II. CO_2 exchange and water use efficiency. **Agric. For. Meteorol.** 67: 291-321

Berbigier P, JM Bonnefond, P Mellmann (2001) CO_2 and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. **Agric. For. Meteorol.** 108:183-197.

Brown HE, DJ Moot, EI Teixeira (2006) Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Madicago sativa*) in a temperate climate. **Europ. Agron.** 25:319-327.

Choudhury BJ (2001) Modeling radiation- and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice. **Agric. For. Meteorol.** 106:317-330.

Gosse G, C Varlet-Grancher, R Bonhomme, M Chartier, JM Allirand, G Lemaire (1986) Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. **Agronomie** 6:47-56.

Hammer GL, RL Vanderlip (1989) Genotype-by-environment interaction in grain sorghum. I. Effects of temperature on radiation use efficiency. **Crop Sci.** 29:370-376.

Kizer MA, RL Elliott (1991) Eddy correlation

systems for measuring evapotranspiration. **Trans. ASAE** 34 : 387-392.

Kumar PV, NN Srivastava, US Victor, DG Rao, AVMS Rao, YS Luo, YDA Sims, RB Thomas, DT Tissue, JT Ball (1996) Sensitivity of leaf photosynthesis to CO_2 concentration is an invariant function for C_3 plant：a test with experimental data and global application. **Global Biogeochem. Cy.** 10:209-222.

Mahrt L, D Vickers (2002) Relationship of area-averaged carbon dioxide and water vapour fluxes to atmospheric variables. **Agric. For. Meteorol.** 112: 195-202.

Mihailovic DT, J Eitzinger (2007) Modelling temperatures of crop environment. **Ecol. Modelling** 202:465-475.

Monteith J L (1977) Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philos. Trans. R. Soc. Lond. Biol. Sci.** 281:277-294.

Ohashi K, A Makino, T Mae (1998) Gas exchange characteristics in rice leaves grown under the conditions of physiologically low temperature and irradiance. **Plant Cell Physiol.** 39: 1384-1387

Ong CK, JL Monteith (1985) Response of pearl millet to light and temperature. **Field Crops Res.** 11:141-160.

Polly HW (2002) Implication of atmospheric and climate change for crop yield and water use efficiency. **Crop Sci.** 42:131-140.

Sanchez ML, MI Ozores, MJ Lo'pez, R Colle, B DeTorre, MA Garcia, I P'erez (2003) Soil CO_2 fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. **Agric. For. Meteorol.** 118:85-95.

Sims PL, JA Bradford (2001) Carbon dioxide fluxes in a southern planes prairie. **Agric. For. Meteorol.** 109:117-134.

Sinclair TR, RC Muchow (1999) Radiation use efficiency. **Adv. Agron.** 65:215-265.

Spedding CRW, JM Walshingham, AM Hoxey (1981) **Biological Efficiency in Agriculture**. Academic Press, London. 300 pp.

Stewart DW, C Costa, LM Dwyer, DL Smith, RI Hamilton, BL Ma (2003) Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. **Agron. J.** 95: 1465-1474.

Stockle CO, JR Kiniry (1990) Variability in crop radiation use efficiency associated with vapour pressure deficit. **Field Crop Res.** 25:171-181.

Swinbank, WC. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **J. Meteorol.** 8 : 135-145.

Testi L, F Orgaz, F Villalobos (2007) Carbon exchange and water use efficiency of a growing, irrigated olive orchard. **Environ. Exp. Bot.** 63:168-177.

Tubiello FN, G Lin, JW Druitt, BDV Marino (1999) Ecosystem-level evapotranspiration and water use efficiency in the desert biome of biosphere 2. **Ecol. Eng.** 13: 263-271.

Weast RC (1986) **Handbook of Chemistry and Physics**. CRC press, Boca Raton. FL. 716pp.

Wu FC, CY Lee (2004) Measurement and numerical simulation of paddy field ecoenvironment and microclimate. (in Chinese with English abstract) **J. Chinese Agric. Eng.** 50:64-84.

Yao MH, JC Tsai, LS Liang (2003) Measurement of vertical profiles and fluctuations on agro-meteorological factor within and above a rice canopy. (in Chinese with English Abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 52: 50-61.

Yao MH, SH Chen, LS Liang (2005) Studies on meteorological resources use efficiency in rice. I. Radiation use efficiency. (in Chinese with English Abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 54: 123-134.

Yao MH, SH Chen, S Chen (2006) Studies on use

efficiency of meteorological resources for rice. II. Water use efficiency. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 55:43-56.

Yao MH, SH Chen, S Chen (2007a) Use of chlorophyll fluorescence for estimating leaf photosynthesis of crops. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 56:224-236.

Yao MH, SH Chen, S Chen (2007b) Studies on the meteorological resources use efficiency of rice for climate change. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 56:31-44.

－編輯：楊純明