

水稻田二氧化碳吸存量之研究¹

姚銘輝^{2,3} 陳守泓²

摘要

姚銘輝、陳守泓。2005。水稻田二氧化碳吸存量之研究。台灣農業研究 54:150-161。

水稻田的二氧化碳對於溫室氣體的平衡佔有重要角色。本研究利用鮑溫比/能量平衡系統直接量測水稻田之二氧化碳平衡。結果顯示，水稻一期作之平均二氧化碳吸存量為 $22.0 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ，二期作為 $17.9 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 。吸存量受期作之葉面積指數影響，指數大則固定二氧化碳量多。土壤二氧化碳通量受土壤含水量影響，但在灌水環境則通量可忽略。比較不同量測二氧化碳吸收量的方式，和鮑溫比/能量平衡系統比較，密閉方式可能有低估情形，尤其是在高光環境。

關鍵詞：氣候變遷、溫室氣體、水稻、CO₂ 通量、鮑溫比/能量平衡系統。

前言

近年之氣候變遷主因係燃燒石化原料產生 CO₂ 所致，如何降低 CO₂ 排放量已為全球關注之焦點。以全球尺度 CO₂ 平衡而言，有所謂“missing sink” (Schimel *et al.* 1995)，意即對部分碳積存的去向並不清楚。雖然針對這方面已有相當多研究(Fan *et al.* 1998；Schmid *et al.* 2000)，但仍有許多不確定因素無法考量，因此各國紛紛建立長期觀測碳通量的網狀研究，例如歐洲之 Euroflux (Valentini *et al.* 1996) 及美國之 Ameriflux (<http://www.esd.ornl.gov/programs/NIGEC/esiplan.html>)。我國在碳平衡方面的研究集中在森林地區，而佔 80 萬公頃之農田則研究甚少，雖然農地之耕種時期較短且作物種類較多，但佔 35 萬公頃之水稻田則有較一致的種植順序。一、二期作水稻配合冬季裡作 (如油菜、田菁)，所以就 CO₂ 的釋放及吸收而言，較不受作物種類更迭的影響。農作物日間行光合作用消耗 CO₂，夜間則釋出 CO₂，全天的淨 CO₂ 通量是評估農田吸存量的重要數據。同時，農田和森林植物的差別在於前者有灌溉及施肥等耕作行為，這對於 CO₂ 的增量或減量有重要影響，其中特別是土壤狀態影響最大。Raich & Potter (1995)以全球尺度估算土壤之 CO₂ 釋出量為 $77 \times 10^6 \text{ GgC per year}$ ，這大約是工業化所產生 CO₂ 的 10 倍(Schlesinger & Andrews 2000)，因此在探討溫室氣體減量的同時，也應重視農田在減量潛力的重要性。

農田 CO₂ 通量的來源可分為三部份，包括植株葉片因光合作用對 CO₂ 之吸收、土壤根部或微生物之呼吸量及植株地上部之呼吸量。農田耕作方式對於 CO₂ 的吸收及釋放有影響，尤其水稻栽培在生

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2234 號。接受日期：94 年 8 月 1 日。
2. 本所農業工程組副研究員與聘用人員。臺灣 臺中縣 霧峰鄉。
3. 通訊作者，電子郵件：mhyao@wufeng.tari.gov.tw；傳真機：(04)23331673。

育期過程中，除分蘖期屬於晒田外，其餘時間皆處於湛水狀態。Sanchez *et al.* (2003)以大麥植冠(canopy)量測結果指出，土壤溼度對土壤 CO₂ 釋出影響極大。Miyata *et al.* (2000)則認為水稻非湛水較湛水狀態在夜間 CO₂ 釋出量高，而白天非湛水卻較湛水低 33%，主要原因是非湛水由土壤 CO₂ 向上釋放量高所致，而全天非湛水 CO₂ 吸收量為 14.5 g CO₂ m⁻²，湛水為 29.8 g CO₂ m⁻²。雖然該篇量測詳盡，但僅限於一周的資料，缺乏對水稻整個生育期的瞭解。

水稻田 CO₂ 吸存量研究可用不同方式進行，但每一種量測方式都有其優點及限制條件。Chen *et al.* (2001)曾針對我國水稻生育期及連作的 CO₂ 吸存量作探討，不過研究方式是以壓克力箱封閉系統。利用氣象觀測方式之量測可作長期且大面積監測，並且不破壞田區完整性，是值得嘗試的方法。鮑溫比/能量平衡(Bowen Ratio/Energy Balance; BREB)系統可長期置於田間，直接量測田區之 CO₂ 通量周年變化，而許多研究也證明該系統可成功量測 CO₂ 通量(Dugas *et al.* 1999; Sims & Bradford 2001; Emmerich 2003)。本研究即探討於田開放性環境下直接量測 CO₂ 通量的可行性，利用 BREB 系統作為量測工具，直接量測水稻植冠(canopy)上方垂直 CO₂ 通量，進行水稻田周年 CO₂ 通量量測，以作為氣候變遷因應策略評估參考依據外，同時探討水稻田之水分管理措施對 CO₂ 減量之影響。

材料與方法

將 BREB 系統 (023/CO₂ System, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)架設於農委會農業試驗所農場(圖 1)。量測項目包括淨輻射量(net radiation)、土壤熱流(soil heat flux)、潛熱(latent heat)、可感熱(sensible heat)、鮑溫比(Bowen ratio)及二氧化碳通量(CO₂ flux)等。該系統將紅外線 CO₂ 偵測器(Li-6262, Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)設定為差分(differential)模式，偵測不同高度偵測點之 CO₂ 及水汽量，作為計算垂直通量梯度之基礎，同時由 76 μm 線徑之熱電偶線量測溫度通量，淨輻射計(Q7, REBS, Seattle, WA, USA)量測不同生育階段及氣象條件下之淨輻射量，土壤熱流板(HFT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)則量測地面向下之能量項，風速及風向以二維風速計量測(Model 03001, R. M. Young company, Traverse city, MI, USA)，大氣溫濕度變化由溫濕度計量測(HMP45C, Vaisala Inc., Woburn, MA, USA)。所有感測器接於資料收集器 (23X datalogger, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)。

通量計算是利用 Dugas *et al.* (1999)所述之方法。由水稻植冠上方 1.0 和 1.5 m 高度之溫度和濕度梯度差計算鮑溫比，其中可感熱則由鮑溫比計算而來。至於渦流擴散率(turbulent diffusivity)是假設熱、水汽和 CO₂ 皆相同，每 20 分鐘計算可感熱通量和所量測之溫度梯度，CO₂ 通量之平均值由水汽密度差(vapor density differences)作校正(Webb *et al.* 1980)，所用計算公式如下：

$$F_c = k_c \frac{P T_i \Delta \rho_{ci}}{P_i T \Delta Z} + k_c \frac{P T_i M_a \rho_{ci} \Delta \rho_{vi}}{P_i T M_v \rho_{ai} \Delta Z}$$

其中，F_c：CO₂ 通量密度，P：大氣壓力，P_i：LI-6262 之內部壓力值，T：大氣溫度，T_i：LI-6262 之內部溫度，ρ_{ci}：CO₂ 密度，ρ_{ai}：乾空氣密度，ρ_{vi}：水汽密度，小寫 i 表示以 LI-6262 設定之壓力和溫度計算之，k_c：CO₂ 渦流擴散率，M_a 和 M_v 分別為乾空氣及水汽之分子量，Z：高度。

水稻自插秧後利用光合作用分析儀(Li-6400, Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)量測單一葉片之 CO₂ 吸收量，並由植冠分析儀(canopy analyzer)(Li-2000, Licor, Inc. Lincoln, NE, USA)量測田區之葉面積指數，由單葉光合作用速率及葉面積指數的乘值估算整個田間葉片吸收 CO₂ 總量。另每週將水稻地上部取樣、稱重及烘乾，以瞭解各器官乾物重累積情形。



圖 1. 水稻田架設之鮑溫比/能量平衡系統。

Fig. 1. The Bowen ratio / energy balance system in paddy field.

土壤 CO₂ 的釋出量則分別在不同水分狀態下進行量測，利用土壤呼吸箱(Licor 6400-09, Inc., Lincoln, NE, USA)置於地面直接量測土壤的呼吸率，另由於土溫是呼吸率的函數，置土溫計 (TCAV, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)及土壤溼度計(CS615, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)於水田土面下，以長期記錄土壤水分狀態及溫度變化。

結 果

利用氣象觀測方式量測 CO₂ 通量，要有適當的吹風距離(fetch)。本試驗在農業試驗所農場進行，供試田區為 0.5 公頃，試區周圍皆為水稻田，提供平整及均勻之量測環境。水稻種植品種為台農 67 號。93 年一期作水稻由 2 月 25 日插秧至 6 月 24 日收穫為止共 120 天；二期作由 7 月 29 日插秧至 11 月 16 日收穫為止共 111 天。一期作生育期間氣象條件屬高溫及少雨，累積降雨量為 302mm，較同期之歷年平均值 595mm 減少甚多，水田供水以灌溉方式為主；二期作生育期間初期遭遇多次豪雨，整個生育期累積降雨量為 672mm，較一期作之 302mm 高出甚多，但在水稻生育中、後期，除 10 月 25 日有 7mm 降雨外，其餘皆無降雨紀錄。

水稻生育性狀中以葉面積指數對二氧化碳吸存最為重要。圖 2 為一、二期作每週葉面積指數的變化，由於二期作生育初期因豪雨而生長不佳，葉面積指數最高值僅至 4.0，而一期作初期雖遇缺水情形，但因灌溉供水正常，且光照充足及溫度適當，指數可超過 5.0 以上。

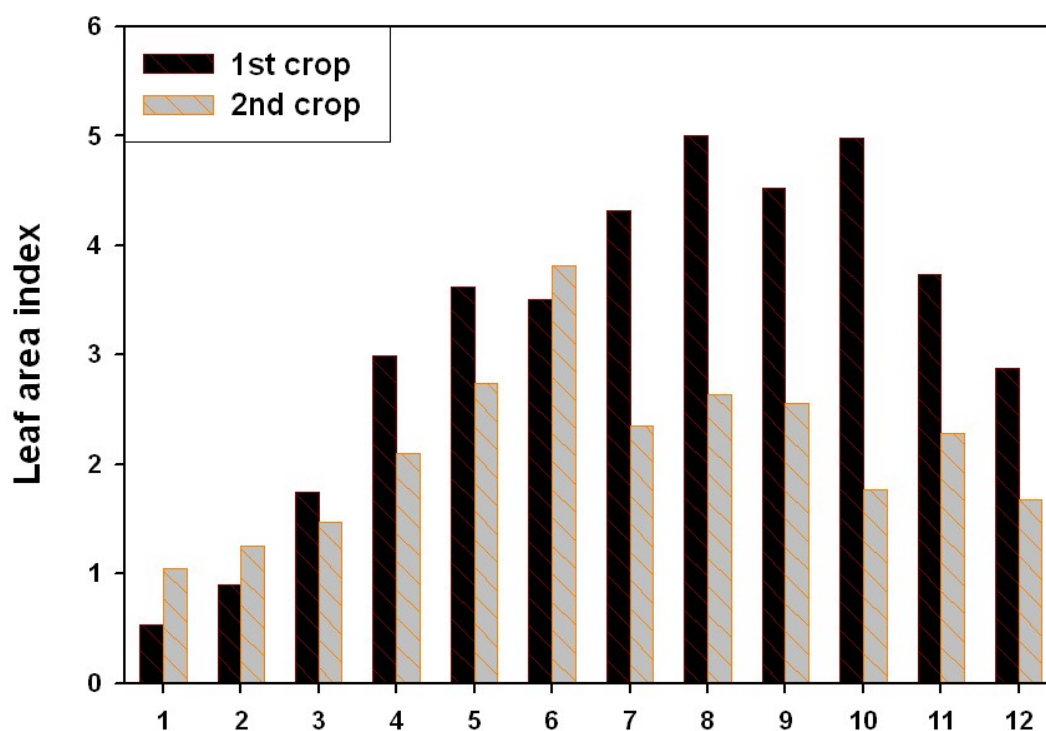


圖 2. 水稻一、二期作葉面積指數之變化。

Fig. 2. The seasonal changes change of leaf area index during the first and the second cropping seasons of 2004.

BREB 系統於插秧後四週內架設於試區中央位置，至水稻收割前停止收集資料。將 BREB 系統所量測資料依據生育階段劃分，就日變化而論，二氧化碳通量因夜間呼吸作用而略為下降，至太陽光照後，群落上方之二氧化碳通量迅速上升，每一生育階段因葉面積多寡而會有不同二氧化碳固定量，圖 3 所示為一期作水稻每一生育階段最高固定量之日變化。如果換算為每日淨量計算，則分蘖初期(葉面積指數為 2)固定量為 $5.3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ；分蘖盛期(葉面積指數為 3.5)固定量為 $20.7 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ；而最高量出現在水稻孕穗期(葉面積指數為 5)，固定量可達 $59.6 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ，之後葉片逐漸老化，水稻乳熟期(葉面積指數 4)之固定量為 $12.5 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 。

水稻田二氧化碳的釋放來自於葉片、根及土壤之呼吸作用，利用光合作用分析儀之土壤同化箱(Licor 6400-09)量測不同水分含量之二氧化碳釋放量(圖 4)。實驗分為裸露土壤及分蘖盛期之水稻田土壤，當土壤水分含量大於 $0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ，土壤上方有一層水膜存在，此時兩種土壤環境皆無法測出二氧化碳釋放量，代表水膜會阻止土壤內二氧化碳往地上傳送，也就是水田在湛水環境可忽略地下之二氧化碳釋放量。但如果土壤無水膜存在時，則土壤二氧化碳釋放量會因根部呼吸而較裸露土壤為高，土壤水分含量在 $0.1\text{-}0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 間有較高值，低於 $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 則會因乾旱而減少呼吸量。

整個水稻生育期間固定總量淨值，是由每日固定量累加而成，一期作水稻生育期共 120 天，但由於插秧初期屬湛水環境，且葉面積少，BREB 量測是由插秧後四週開始記錄，至收穫期為止共 82 天資料(圖 5)。植冠上方二氧化碳通量受生育階段及氣象條件影響，氣象條件主要為受太陽輻射量及溫度，兩者影響二氧化碳固定量。一期作量測初期溫度偏低，曾出現 16°C 低溫，同時太陽輻射量甚低，二氧化碳固定量幾乎為 0，之後隨葉面積增加及溫度升高，固定量逐漸增加，但至生育後期因葉片老化，雖高溫及強光條件下固定量仍偏低，整個量測期間淨量(日間光合作用固定量扣減夜間呼吸量)為 $1,804 \text{ gm}^{-2}$ ，即每日平均值為 22 gm^{-2} 。

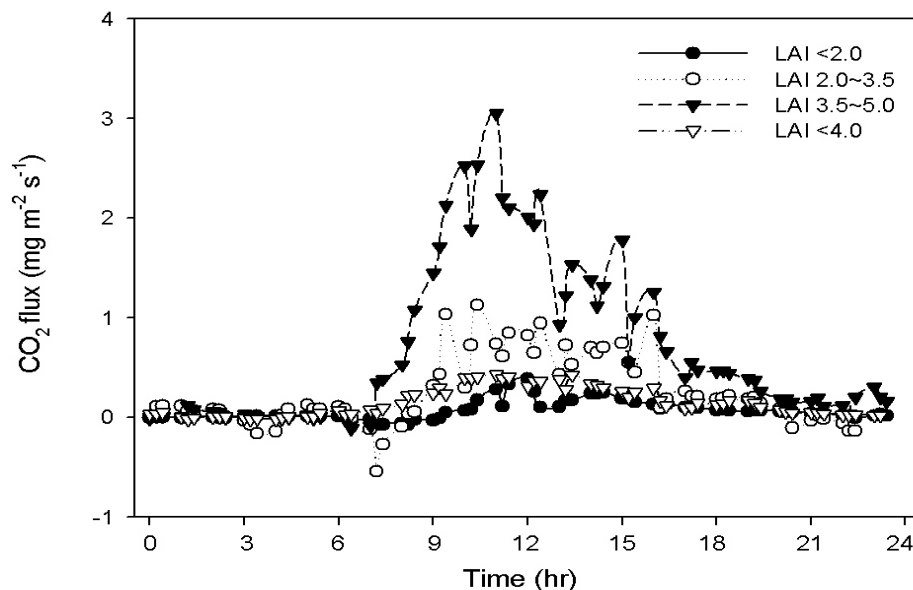


圖 3. 水稻生育期間不同葉面積指數之二氧化碳通量日變化。

Fig. 3. Diurnal changes of CO_2 flux in different leaf area indices during the growing period of rice.

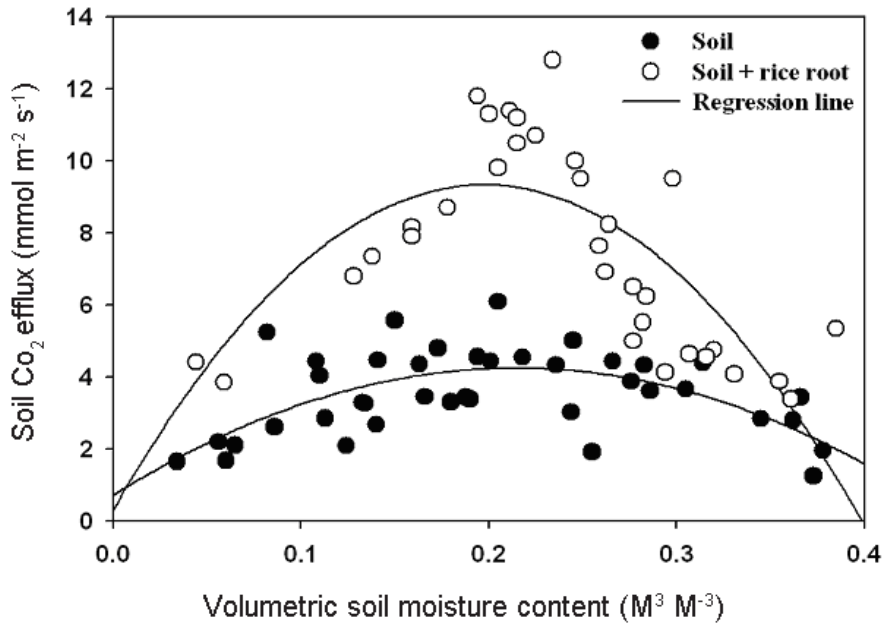


圖 4. 不同土壤環境之含水量和二氧化碳釋出量的關係性。

Fig. 4. The relationship between soil water content and CO₂ flux under different soil conditions.

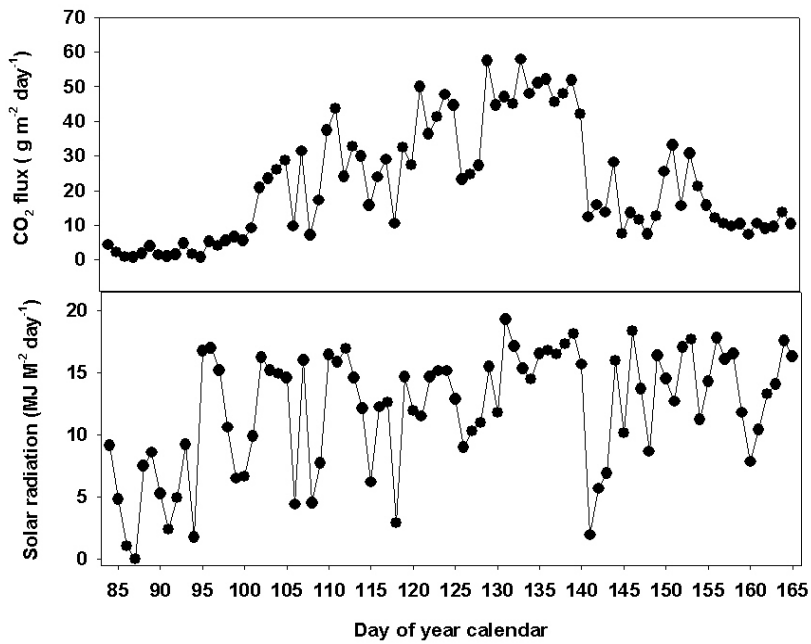


圖 5. 水稻一期作生育期間之二氧化碳通量及太陽輻射量之日變化。

Fig. 5. Daily changes of the CO₂ flux and solar radiation during the first cropping season of rice in 2004.

二期作由於生育氣象環境不佳，對於二氧化碳吸存量較一期作明顯偏低，分蘖盛期固定量之平均值，一期作為 $20.7 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ；二期作為 $15.6 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ；最高固定量在水稻孕穗期，一期作固定量可達 $59.6 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ，但二期作最高值僅達 $30 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ；之後葉片逐漸老化，一期作水稻乳熟期之固定量為 $12.5 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ，二期作則略高，約在 $13.2 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ，較高原因為二期作生育後期屬高溫高光之環境，有助於光合作用的進行，二氧化碳的吸存量也較高。二期作水稻生育期共 111 天，但因雷擊及豪雨致使資料有缺，9 月 8 日起才有完整資料，至 11 月 2 日之資料收集時間為 56 天，整個量測期間淨量(日間光合作用固定量扣減夜間呼吸量)為 $1,004 \text{ g m}^{-2}$ ，即每日平均值為 17.9 g m^{-2} 。

對於水稻二氧化碳固定速率可由不同尺度或量測方式作探討，本研究所用之 BREB 系統屬於開放式，適用於大面積量測之氣象方法，但相對於密閉式量測方法之差異為何？表 1 是比較由光合作用分析儀所測之二氧化碳固定率與 BREB 所量測之差異，量測時間為上午 10 點至 12 點之資料，BREB 為每 20 分鐘一筆資料之平均值，光合作用分析儀則取 15 筆成熟葉之量測平均值。在不同光強條件下，由光合作用速率所估算之二氧化碳固定率較 BREB 量測值低，尤其光度越強，兩者的差異越大。本研究也曾利用 Chen *et al.* (2001)所建立之系統，利用壓克力箱量測稻株之二氧化碳固定率，數值也同樣偏低(資料未顯示)。顯然，量測方式對於氣候變遷二氧化碳吸存量之評估會有相當大影響。

討 論

田間表面和大氣間之能量、水汽及碳素的傳動是土壤-作物-大氣連續過程中最基本物理量，而作物生產即是將大氣中礦化之碳素，以氣體 CO_2 方式轉為有機碳水化合物。Campbell & Norman (1998)認為空氣中渦流(turbulent)混合和傳送使作物碳素之供應能源源不絕，同時也將作物植冠周圍的水汽移除，也就是說，在作物植冠表面邊界層(boundary layer)之渦流傳送影響可感熱和潛熱通量，也控制著蒸發散量和群落溫度。渦流共變法(eddy covariance method)可說是量測通量的最佳方法 (Ham & Heilman 2003)，BREB 方法則屬於一種間接量測通量的方式，仍有些誤差(Sinclair *et al.* 1975)，然而許多研究已成功的量測 CO_2 通量(Emmerich 2003)。BREB 在夜間量測 CO_2 通量有些困難，特別是當大氣條件穩定，及熱和水汽的擴散不等時，但 Frank *et al.* (2002)用 BREB 測夜間 CO_2 通量，認為僅略

表 1. 比較二氧化碳固定率之差異，資料由 BREB 系統及光合作用分析儀之二氧化碳交換速率計算而來
Table 1. Comparisons of CO_2 fixation rates calculated by using portable photosynthesizer close chamber and BREB system methods

DOY ^z	PAR ^y ($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	PHS ^x ($\mu \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	LAI ^w ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)	CO ₂ fixation rate ($\text{mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	
				CO ₂ —PHS	CO ₂ —BREB
109	753±12	26.7±3.5	1.12±0.08	0.30±0.06	0.56±0.09
115	1343±21	32.1±3.1	1.62±0.12	0.52±0.08	1.37±0.10
118	136±25	7.5±1.8	2.10±0.15	0.16±0.08	0.20±0.05
122	1245±31	32.2±2.3	2.80±0.09	0.90±0.07	1.54±0.08
125	968±24	22.7±2.7	3.18±0.19	0.72±0.10	0.93±0.11
129	845±15	22.4±2.0	3.52±0.21	0.79±0.06	1.10±0.07
132	830±16	23.7±3.2	3.80±0.25	0.90±0.08	1.45±0.07

^z DOY : day of year calendar.

^y PAR : photosynthetically active radiation.

^x PHS : photosynthesis rate.

^w LAI : leaf area index.

低估夜間植物或土壤呼吸的損失。整個系統運作的維持需經過校正過程，校正包括由熱或水汽通量所引起之密度差異(Webb *et al.* 1980)，音波風速計和二氧化碳分析儀的位置(Moore 1986)及感測器的反應頻率(Massman & Lee 2002)。事實上，通量測定自 1970 年代起開始發展(Desjardins & Lemon 1974)，發展初期曾受限於儀器開發、購製成本及運算速度的限制，但至目前為止，技術上的問題已陸續受到解決。因此有大量針對不同量測環境或研究目的有關通量量測的文獻發表，這方面的進展也使農業研究者擺脫研究尺度的限制，由過去葉片、盆鉢、小區群落至大面積田區的尺度，使研究成果更貼近實際作物生長。本研究利用 BREB 系統量測水稻田二氧化碳通量，可直接且長期監測田間開放環境下二氧化碳吸存量的動態變化，是探討溫室氣體議題的有利工具。探討不同量測方式間的差異，則有助於資料相互比較。表 1 為使用開放式及密閉式方法量測 CO₂ 淨量的差異，由單葉或單株推估大面積 CO₂ 淨值時，和 BREB 實測值會有差異，可能原因包括量測尺度及環境影響，以光合作用分析儀量測約 1 平方公分葉面積的變化量，雖可由葉面積指數推估大面積通量，但整個水稻生育氣象條件，包括土壤、空氣擾動及植株不均勻性等，皆會影響推估結果。而壓克力同化箱量測尺度是以單株變化為主，但密閉環境包括水汽、溫度和 CO₂ 濃度皆和實際田間數值差異甚大。表 1 結果說明密閉式和開放式量測結果，前者有低估現象。

當進行氣候變遷評估溫室氣體吸存或排放時，必須建立模式才能依據水稻生育條件進行模擬。事實上，就作物本身碳素的平衡，包括 CO₂ 吸收(光合作用)及 CO₂ 釋放(呼吸作用)兩項。但呼吸作用方面的研究明顯少於光合作用，主要原因包括測定困難(Amthor & Baldocci 2001)及模式化觀念上受限制(Choudhury 2001)。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)。呼吸作用對溫度極為敏感，但光合作用相對較不敏感(Amthor 1989)，這暗示兩者屬於獨立通量。目前利用 BREB 系統所量測僅限於觀測地點的變化，若要建立水稻田二氧化碳排放或吸存清單估算與基線建立時，仍需要透過模式的建立才能做大面積的估算，因如果以通量量測 CO₂ 變化量，僅有淨量而無法區分葉片之光呼吸或光合作用的比例。光合作用部分目前已有多種模式可供利用，但有關呼吸所排放出 CO₂ 量的估算，仍有必要進行更精確的模式化工作。

至於土壤 CO₂ 釋放受土壤種類、土壤溫度、土壤溼度、降雨、植株光合作用及土壤受質分解之影響，但水田土壤在水稻生育期間除短期乾燥(曬田期)外，其餘皆呈湛水狀態，即在土壤表面有一層深淺不同之水膜，事實上，CO₂ 在水中傳送速率僅為空氣中的千分之一(Weast 1986)。本研究利用同化箱量測湛水之土壤 CO₂ 通量數值甚低，Miyata *et al.* (2000)也獲得相同結果，即湛水時之土壤 CO₂ 通量可忽略不計。但在非湛水情況下，圖 4 說明不同土壤水分含量之土壤 CO₂ 通量，當土壤呈乾燥或潮濕兩種極端時，土壤 CO₂ 通量較低。有機質分解速率因乾旱缺水而減緩，由土壤向上排放 CO₂ 量減少；過濕則因有水膜會阻擋氣體擴散，因而在土壤水分含量為 0.2 m³ m⁻³ 時，土壤 CO₂ 通量最高，尤其加上水稻根部呼吸作用，通量值可達 10 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ 以上。土壤 CO₂ 通量可由土壤溫度及溼度模式化(Da Rocha *et al.* 2000)，然而植物根部呼吸作用卻難以量化，但因水稻大多時間是以湛水生長，土壤 CO₂ 通量就整體吸存量而言，並不需要特別探討。

本研究實際量測水稻一、二期作水稻對固碳能力的差異(圖 5 及圖 6)，及水稻不同生育期之二氧化碳吸存量(圖 3)，顯示作物群落上方之 CO₂ 通量值受作物種植、土壤環境及微氣象條件的影響。Miyata *et al.* (2000)探討水稻田排水前後之 CO₂ 通量值變化，指出湛水會阻礙土壤 CO₂ 通量的傳送，使日淨吸存量較非湛水處理約增加 1 倍外，土壤水分多寡也影響氣孔敏感度，間接可解釋水稻田 CO₂ 的平衡。當然，CO₂ 吸收淨值也受作物本身光合作用能力影響，本研究中水稻最高日吸存量为 59.6 g m⁻² day⁻¹，但 C₄ 型之玉米則高達 80 g m⁻² day⁻¹ (Pattey *et al.* 2001)。

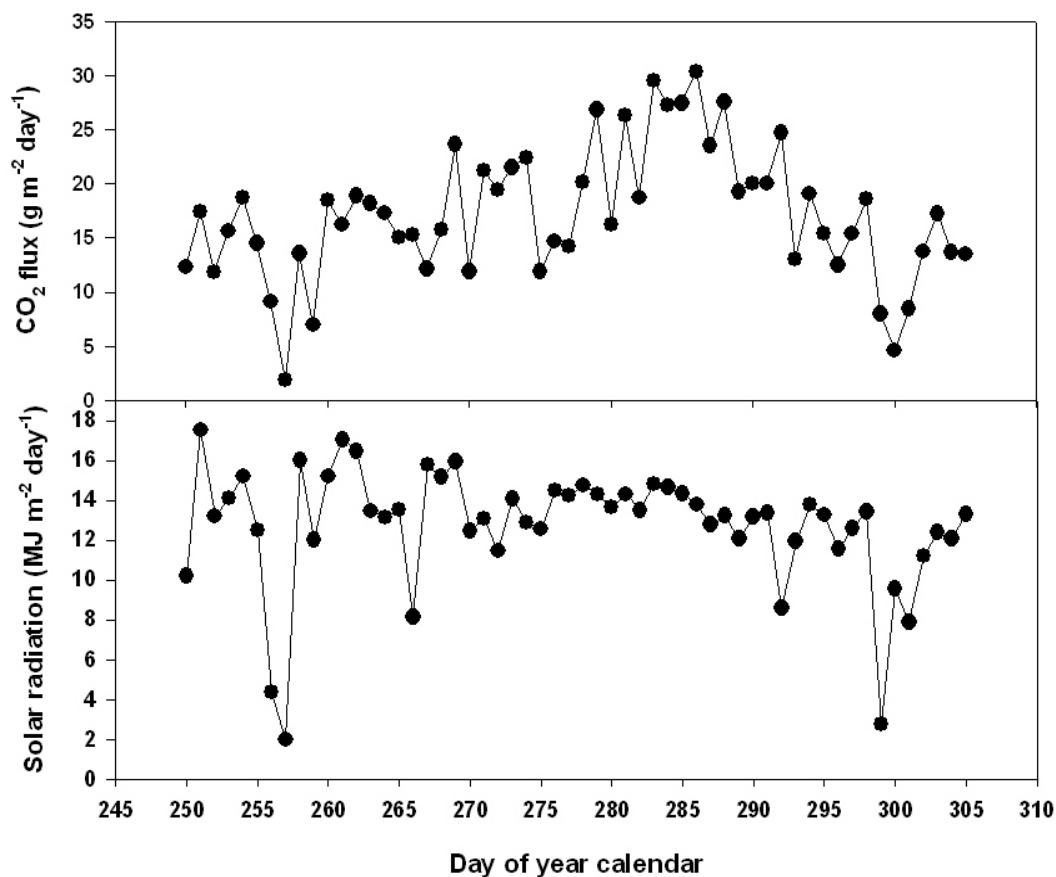


圖 6. 水稻二期作生育期間之二氧化碳通量及太陽輻射量之日變化。

Fig. 6. Daily changes of the CO₂ flux and solar radiation during the second cropping season of rice in 2004.

結 論

2005 年 2 月 16 日京都議定書生效，對於全球溫室氣體的排放控制更趨嚴謹，高污染產業則面臨經濟制裁，而對於農業生產過程二氧化碳吸存量之探討，有助於釐清農業在溫室氣體排放的比重。此外，國內尚未有針對大面積農田進行長期觀測的資料，本研究有助於對此部份的瞭解，同時能提供氣候變遷衝擊評估相關研究的參考。而所建立之 BREB 系統也可運用在不同作物生長環境之 CO₂ 通量偵測，能擴及早田、森林及棲地植物等，對於我國 CO₂ 總量評估具有助益。

誌 謝

本研究承國科會永續會計畫 (NSC93-EPA-Z-002-008) 經費支持，特申謝忱。

引用文獻

- Amthor, J. S. 1989. *Respiration and Crop Productivity*. Springer, New York, 215 pp.
- Amthor, J. S. and D. D. Baldocchi. 2001. Terrestrial higher plant respiration and net primary production. p.33-59. *in* : *Terrestrial Global Productivity*. (Roy, J., B. Saugier, and H. D. Mooney, eds.) Academic Press, London.
- Campbell, G. S. and J. M. Norman. 1998. *Introduction to Environmental Biophysics*. 2nd ed. Springer-Verlag, New York. 300 pp.
- Chen, H. W., J. H. Yen, R. S. Chung, C. H. Lai, S. S. Yang, and Y. S. Wang. 2001. Carbon dioxide flux density in cultivated rice paddy field. *Proc. Natl. Sci. Counc.* 25:239-247.
- Choudhury, B. J. 2001. Modelling radiation- and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice. *Agric. For. Meteorol.* 106:317-330.
- Da Rocha, H. R., O. M. R. Cabral, M. A. F. Da Silva Dias, M. A. Ligo, J. A. Elbers, H. C. Freitas, C. Von Randow, and O. Brunini. 2000. Atmospheric CO₂ flux and soil respiration measurements over sugarcane in Southeast Brazil. p. 405-414. *in*: *Global climate change and tropical ecosystems*. (Kimble, J. M. and B. A. Stewart, eds.) CRC Press, England.
- Desjardins, R. L. and E. R. Lemon. 1974. Limitation in the eddy covariance technique for determination of the carbon dioxide and sensible heat flux. *Boundary-Layer Meteorol.* 5:475-488.
- Dugas, W. A., M. L. Heuer, and H. S. Mayeux. 1999. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agric. For. Meteorol.* 93:121-139.
- Emmerich, W. E. 2003. Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agric. For. Meteorol.* 116:91-102.
- Fan, S., Gloor, M., J. Pacala, S. Sarmiento, J. Takahashi, and T. Tans. 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and model. *Science*. 282:442-446.
- Frank, A. B. 2002. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. *Environ. Pollut.* 116:397-403.
- Ham, J. M. and J. L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agron. J.* 95:1393-1403.
- 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.
- Massman, W. J. and X. Lee. 2002. Eddy covariance corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. For. Meteorol.* 113:121-144.
- Miyata, A., R. Leuning, T. D. Denmead, J. Kim, and Y. Harazono. 2000. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded Paddy field. *Agric. For. Meteorol.* 102:287-303.
- Moore, C. 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary Layer Meteorol.* 37:17-35.
- Pattey, E., I. B. Strachan, J. B. Boisvert, R. L. Desjardins, and N. B. McLaughlin. 2001. Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyperspectral reflectance measurements. *Agric. For. Meteorol.* 108:85-99.

- Raich, J. W. and C. S. Potter. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soil. *Global Biogeochem. Cycles* 9:23-26.
- Sanchez, M. L., M. I. Ozores, M. J. Lo'pez, R. Colle, B. DeTorre, M. A. Garcia and I. P'erez. 2003. Soil CO₂ fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. *Agric. For. Meteorol.* 118:85-95.
- Schlesinger, W. H. and J. A. Andrews. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 48:7-20.
- Schimel, D., I. Enting, M. Heimann, T. Wigley, D. Raynaud, D. Alves, and U. Siegenthaler. 1995. CO₂ and carbon cycle. p. 35-71. *in: Climate Change 1994 : Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios.* (Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris, and K. Maskell, eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, N.Y, USA.
- Schmid, H. P., C. Susan, B. Grimmond, F. Copley, B. Offerle and H. B. Su. 2000. Measurements of CO₂ and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. *Agric. For. Meteorol.* 103 : 357-374.
- Sims, P. L. and J. A. Bradford. 2001. Carbon dioxide fluxes in a southern planes prairie. *Agric. For. Meteorol.* 109:117-134.
- Sinclair, T. R., Jr. L. H. Allen, and E. R. Lemon. 1975. An analysis of errors in the calculation of energy flux densities above vegetation by a Bowen ratio profile method. *Boundary-Layer Meteorol.* 8:129-139.
- Valentini, R., P. de Angelis, G. Matteucci, R. Monaco, S. Dore, and G. E. Scarascia Mugnozza. 1996. Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Biol.* 2:199-207.
- Weast, R. C. 1986. *Handbook of chemistry and physics.* CRC press, Boca Raton. FL. 716 pp.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurement for density effect due to heat and water vapor transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 106:85-100.

Studies on the Absorption and Emission of Carbon Dioxide in Paddy Field¹

Ming-Hwi Yao^{2,3} and Shou-Hung Chen²

Summary

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.

The uptake of carbon dioxide in rice paddies may play an important role in balancing the budget of greenhouse gases, but there is considerable uncertainty in the magnitude of the net fluxes from the related ecosystems. The Bowen ratio/energy balance (BREB) technique was used to measure CO₂ fluxes over a paddy field site at Wufeng, Taichung. As a result, the average net daily CO₂ uptake in first crop was 22 g m⁻² day⁻¹, while it was 17.9 g m⁻² day⁻¹ in second crop. Differences in the CO₂ budget between the two growing seasons are due mainly to the different leaf area index (LAI). The peak LAI coincided with peak net CO₂ fluxes during growing periods. Soil CO₂ flux was found responsive to changes of soil water content. However, CO₂ exchange rate can be neglected in the submerged soil. In addition, when comparing the carbon gain measured in the chamber system and open-path system, the closed environment was found underestimated, specially under high light condition.

Key words: Climate change, Greenhouse gas, Rice, CO₂ flux, Bowen ratio/energy balance (BREB) system.

1. Contribution No.2234 from Agricultural Research Institute, Council of Agriculture. Accepted: August 1, 2005.

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

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