

全球溫暖化趨勢對臺灣地區溫室氣體排放量之影響

姚銘輝*、陳守泓

行政院農委會農業試驗所農工組

摘要

農業對溫室效應氣體扮演來源及積存雙重角色，主要包括二氧化碳、甲烷及氧化亞氮等三種氣體。農業溫室氣體的排放對於全球暖化具有一定影響。在臺灣，農業部門排放的甲烷及氧化亞氮分別各佔國內的 16% 及 87%，而由於農田逸釋大量溫室氣體，因此農田是溫室氣體減量的重要目標。近年來有許多研究致力於探討土壤碳封存能力，期望能減緩大氣溫室氣體增加的速度。除此之外，和嘗試改善肥料管理和降低化學氮肥的施用，以增加氮肥使用效率，甚至推廣有機農業禁用化學肥料，以減少氧化亞氮的排放。又改善稻田水分管理也可減少甲烷的排放，惟目前關於臺灣農田溫室氣體排放資料甚少，需有更多的研究來瞭解耕犁、耕作制度及肥料等問題間的交感，並釐清土壤有機碳封存和溫室氣體排放之關係。

關鍵詞：溫室氣體、碳封存、全球暖化。

Impact of Global Warming Trend on Greenhouse Gases Emission in Taiwan

Ming-Hwi Yao* and Shou-Hung Chen

Agricultural Engineering Division, Agricultural Research Institute, COA, Taichung Hsien 41301, Taiwan ROC

* 通信作者, mhyao@wufeng.tari.gov.tw

投稿日期：2007 年 10 月 1 日

接受日期：2008 年 1 月 8 日

作物、環境與生物資訊 5:52-59 (2008)

Crop, Environment & Bioinformatics 5:52-59 (2008)

189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan ROC

ABSTRACT

Agriculture plays an important role as the source and sink of greenhouse gases which include carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O). Agricultural greenhouse gas (GHG) emissions significantly contribute to global warming. Roughly 16 and 87% of the total national emission of CH₄ and N₂O, respectively, are attributed to agriculture practices. Quite a few of greenhouse gases evolved from cultivated cropland so that croplands are considered targets for GHGs mitigation. Recently much effort has been spend on the evaluation of soil carbon sequestration potential as a measure to temporarily reduce the increasing rate of atmospheric GHGs. Improved fertilizer management and chemical nitrogen use are found to increase nitrogen use efficiency. The practice of organic agriculture can reduce the emission of N₂O, and apply of an improved paddy water management can reduce emissions of CH₄. At present, there are few data on GHG emission from cropland in Taiwan, suggesting the need of further research on understanding the interactions of tillage, cropping system and fertilization upon soil organic carbon sequestration and GHG emission.

Key words: Greenhouse gas, Global warming, Carbon sequestration.

一、前言

2005 年因氣象災害造成全球經濟的損失高達二千億美金，約等於我國 5 年的政府總預算額度，若加上人員傷亡部份，是災害頻傳和損失慘重的一年。雖然氣象災害不全然是因為氣候變遷(其定義為因人類活動而導致氣候異常改變)所導致，但越來越多證據顯示，氣候變遷和氣象災害發生頻度(或強度)有關。一般對氣候變遷的觀念，是因為排放溫室氣體(greenhouse gas)，造成地球表面反射之長波輻射無法排出蓄積於大氣層內，而使全球氣溫升高。依據統計，全球百年來陸地溫度約上昇 0.5°C (IPCC 2001)，此趨勢和大氣溫室氣體濃度(尤其是二氧化碳)上昇趨勢相一致。基於此原因，引發國際社會對此議題的重視，1997 年在日本京都召開國際會議，會中訂定“京都議定書”，希望以國際力量共同防止或減緩溫室氣體的排放，同時訂有各國減量負擔及經濟制裁，此措施將衝擊我國經濟發展及農業生產。

農業生產過程中，溫室氣體有吸存及排放兩種角色。由於農作物相較於森林作物有較多人為耕作部分，包括作物選擇、種植方式、施肥及水分管理等，較具增加吸存及減少排放的潛力，以下簡介與農業有關之溫室氣體特性、量測技術與限制，排放潛勢估算模式，以及未來暖化對溫室氣體排放的影響，特別探討農業生產如何減少溫室氣體排放，及耕作制度改變以吸存更多大氣中二氧化碳等，希望藉此介紹有助於讀者對此議題的瞭解。

二、溫室氣體特性

“溫室氣體”顧名思義即是造成“溫室效應”(greenhouse effect)之氣體。但溫室效應原為地球之所以適合人類居住的重要原因之一，因為依據黑體輻射理論所計算之地球平均溫度為-18°C，但就是因為大氣中含有 0.035% (即 350ppm)的二氧化碳氣體(CO₂)，吸收地球反射的長波輻射，使熱能保存在大氣，使得地球維持人類適合居住之+14.5°C。但至 18 世紀工業革命以來，大量使用石化原料及森林砍伐結果，使大氣 CO₂ 濃度大幅增加，同時其他溫室氣體如甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)及氟氯碳化物(CFCx)等能吸收長波輻射之氣體也大量增加。其中，和農業有關的氣體包括 CO₂、N₂O 及 CH₄ 三種，這些溫室氣體之特徵資料如 Table 1 所列。表中所謂『生命週期』是指溫室氣體在大氣中消滅所需時間，CO₂ 在大氣、土壤、海洋及植物以不同形式存在或轉換，因此在大氣中生命週期較難定位；CH₄ 為 12.2 年，即目前排放一分子 CH₄ 至大氣中，必需經 12.2 年後才會分解消失；N₂O 更需 120 年(IPCC 1995)。濃度是比較目前(2005 年)和工業革命前(1800 年)的差異，CO₂ 由工業革命前 278 ppm，到目前 378 ppm，即兩百年來增加 100 ppm，CH₄ 增加 1075 ppb，N₂O 增加 44 ppb。而 CO₂ 如果不加以有效控制，每年將以 1600 ppb 的速度成長，到本世紀末將高達 530 ppm (IPCC 2001)。輻射作用力(radiative forcing)是指溫室氣體截取輻射能的能力，其中以 CO₂ 之 1.56 Wm⁻² 最高，CH₄ 為 0.47 Wm⁻² 居次，N₂O 為 0.14 Wm⁻² 最低(IPCC 1995)。

Table 1. The characteristics of greenhouse gases from agricultural fields.

Species	Life cycle (yr)	Concentration (ppb)		Growth rate ppb yr ⁻¹	Radiative forcing	
		1800	2005		W ppb ⁻¹	W m ⁻²
Carbon dioxide (CO ₂)	variable	278000	378000	1600	1.8×10 ⁻⁵	1.56
Methane (CH ₄)	12.2	700	1775	8	3.7×10 ⁻⁴	0.47
Nitrous oxide (N ₂ O)	120	275	319	0.8	3.7×10 ⁻³	0.14

三、農業生產之溫室氣體釋放

全球溫室氣體排放之輻射作用力，農業約占五分之一，如果加入土地改變則達到三分之一(IPCC 1995)，其中 CH_4 約佔 45 ~ 50%， N_2O 約佔 20 ~ 70% (Mosier *et al.* 1998)。溫室氣體排放量可由不同尺度作評估，尺度大小涉及評估方法和精確度。目前以大區域估算較為重要，因這可直接作為溫室氣體估算基線與動態監測體系的建立，本文即由區域估算模式及驗證方法作探討。

二氧化碳 (carbon dioxide; CO_2)

農作物吸收大氣 CO_2 行光合作用生產碳水化合物，是供給人類糧食最重要生化反應。面對未來 CO_2 濃度升高，由作物生理觀點是可增加生質量(biomass)累積，但是否增加糧食生產則看法紛歧，原因即在於評估尺度大小的差異。如果由單一葉片而論，因 CO_2 和 O_2 同時競爭 Rubisco (ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase) 酵素，氣孔內腔 CO_2 通量增加自然使固碳作用增加而呼吸作用減少。但以單株尺度而論，則多增加之碳水化合物不全然累積在經濟產量上，這涉及植體對營養分配的機制。而若以田間產量而論，則涉及之影響因素更多，如氣象災害發生頻率，雜草競爭(同樣會因 CO_2 增加而促進生長)、病蟲害等。由目前田間提高 CO_2 環境之模擬評估試驗結果，因 CO_2 濃度增加而增產之所謂“ CO_2 肥料效應”(CO_2 fertilization effect)，可能會因其他因素而抵消(Sasaki *et al.* 2007)。由上述說明可知氣候變遷影響是全面性，需由不同層面作綜觀性探討，所得到結果才能符合未來實際情景。

根據估算生態系每年經由光合作用固定大氣 CO_2 約為 61 Pg，但呼吸作用及由植體殘株的分解而排放至大氣之 CO_2 約為 60 Pg，因此植物僅 1 Pg 的積存，雖然這種估算存在著極大的變異性(Houghton *et al.* 1999)。所以若將 CO_2 視為溫室氣體的角度，

IPCC 將農田釋放量視為零。但近年來有些研究認為，農田經由土壤有機碳的累積，是碳封存(carbon sequestration)的重要積存(sink)(Lal and Kimble 1997)。尤其將傳統耕犁改變為最小或不耕犁方式，可增加土壤有機碳含量(Lal 2001)。West and Post (2002) 估算由耕犁改為不耕犁，每年可增加有機碳積存 57 gm^{-2} ，而輪作僅能增加 14 gm^{-2} ，由此可知減少耕犁對於碳吸存的重要性。以美國為例，農田不耕犁比例由 1995 年之 14.7% 增加至 2002 年 19.6% (Fawcett and Towery 2003)。同時，將邊緣土地或休耕地改種草地或牧草，對於碳封存的潛力最大(Lal *et al.* 1999)，依據調查可耕地轉為牧地，碳封存可達每年 $1.01 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，同時可使土壤有機碳增加(Uri and Bloodworth 2000)。Mensah *et al.* (2003) 調查農地轉種草地 5-12 年後，表土(0-5 公分)碳含量增加 52.7%，而種植 30 年之苜蓿地較附近農耕地之土壤碳素增加 114%。Su (2007) 比較土壤質地對碳封存的能力，作物改種苜蓿在表層土壤(0-20 公分)砂質性土壤增加碳 22.6-28.9%，砂質壤土 6.0-8.2%，此結果是因為粗質地土壤起始碳含量較低，有較大碳封存潛力。而將休耕地或受污染之農地改種多年生草地或林地，可增加農地之碳封存，但如果改種多年生農作物則更有經濟價值，依據報載加拿大正進行培育多年生小麥的研究，可減少耕犁頻率，使土壤有機碳累積。另改種多年生能源作物，利用宿根方式永續栽培也是可思考的方向。以我國為例，種植甘蔗即是可思考之方式。

甲烷 (methane; CH_4)

甲烷主要產生於湛水環境的土壤內，包括水田及沼澤地，而畜牧業也是甲烷排放主要來源，不過本文並不討論此部分。潮溼土壤中有甲烷菌(methanogens)分解土壤有機物而使甲烷釋放至大氣中。水田中甲烷釋放速率會隨季節、作物種類及氣候條件有不同，目前臺灣耕地面積仍有約 30 萬公頃水稻

田，因此甲烷釋放是農業溫室氣體排放重要來源。水稻田甲烷的主要釋放途徑有三種：(1)由水面進行的擴散作用釋出，此途徑的逸釋量最少；(2)水田土壤中以氣泡方式逸釋甲烷，此種途徑約佔全部釋放量 50~70%，通常在粗質地土壤中較為明顯；(3)經由水稻植株傳輸將甲烷逸釋至大氣中，此途徑亦為重要的逸釋途徑，其中大部分甲烷是由水稻的氣胞組織中釋出(Aulakh *et al.* 2001)。

至於如何減少水稻田甲烷的排放，有多種栽培技術可供嘗試。(1)改進供水方式。由於氧氣在水中傳送速率僅為空氣中之萬分之一，長期湛水使氧化還原電位下降，經由甲烷菌作用而將土壤有機物去胺化(deamination)及去羧化(dacarboxylation)過程進行而釋放出甲烷。因此，依據 Cole *et al.*, (1997)評估水稻田水分管理，若縮短湛水時間可減少約 50%之甲烷氣體排放，但水稻排水前應避免施肥，以減少 N₂O 的釋放。(2)種植低甲烷釋放之水稻品種，這部分約可減少 20%之排放量(Sass *et al.* 1999)。(3)使用甲烷生成抑制劑，如 Xu *et al.* (2000)以盆栽水稻試驗證實常用於田間之硝化抑制劑 hydroquinone 與 dicyandiamide 亦具有抑制甲烷生成之效果。(4)使用直播栽培以減少耕犁頻率，亦可降低水稻田溫室氣體之排放。

水稻田雖然是甲烷重要釋放來源，但以碳封存的角度而言，卻能較旱田儲存更多有機碳(Cai 1996)。主要原因為厭氧環境使有機物分解不完全，厭氧菌大約分解 2-5%的碳，但在通氣環境 30-40%的碳被分解(Alexander 1991)。Guo and Lin (2001)估算中國過去 600 年，將旱田轉為水田所儲存有機碳達 120-584 Tg。因此，水稻田對於碳封存具有極大潛力，但與甲烷釋放間如何取得平衡則需要對耕作系統作整體性規劃。

氧化亞氮(nitrous oxides ; N₂O)

根據統計在 1972-1992 年間，全球肥料施用量由 74 增加到 133 Tg，在此同期 NO_x、

N₂O 和 N₂ 也增加 35%(Desjardins *et al.* 2007)。其中氮肥使用量約佔肥料用量的 2/3，在 1990 到 2000 年間增加 10 Mt。氮肥因肥料配方之故，使用效率常低於 50%，因此 Oenema (1999)認為兩種農耕策略可減少 N₂O 在農田的釋放。(1)減少氮肥的投入及增加氮肥使用效率。這包括與豆科作物的輪作，增加有機氮的使用，相對也減少化學氮肥的施用。事實上，綠肥或有機肥可因土壤細菌緩慢分解，有助於土壤品質及肥力，而氮肥釋放速率常因施用時間、地點及氣候條件而異，因此精準施肥也是重要減量措施。(2)減少肥料在硝化及脫氮過程所產生之 N₂O。這部分與農田水分管理有關，例如在乾旱環境應避免使用尿素及無水氨(anhydrous ammonia)，都是可減少農田氧化亞氮的釋放。

農業溫室氣體量測及估算

由於農作物和 CO₂ 之間有吸存(固碳作用)和釋放(呼吸作用)二種，相關可供利用之估算模式甚多，但模式大多是以作物生長估算居多，需另作計算才可得到 CO₂ 之淨值。模式所預估結果需經田間實際驗證才有意義，但國內缺乏完整且連續性之實測資料，這部分是目前溫室氣體監測執行的限制因素。就量測技術而言，CO₂ 之吸存量以田間通量(flux)量測作為實測值的來源，其原理是利用統計學上共變異數(covariance)觀念，由量測 CO₂、水汽、垂直風速及溫度而得到各種通量。這種方式以大面積田區為量測範圍，具有非破壞性及長期監測的特性，為 CO₂ 監測或驗證的重要工具，此種方法同時是政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change ; IPCC，為聯合國下之研究組織，對氣候變遷議題具有權威性)所推薦。

由於兩種氣體在大氣中濃度甚低(2 - 0.2 ppm)，CH₄ 及 N₂O 實際田間排放量之量測較受到限制。過去田間氣體實際量測是採用

靜置箱法(static chamber method),即以不鏽鋼製上下開口之鐵盒插入土壤中,深約 5 至 10 cm,上端開口嵌有一圈水槽,另以壓克力製一面開口向下的五面密閉集氣槽,適嵌入水槽內。取樣時開啟風扇攪拌,所採集氣體樣品以氣體色層分析儀(gas chromatography)分析。這種方式優點為取樣方便及成本低,缺點為點資料,同時取樣過程容易影響觀測環境,即以密閉方式量測無法反應大區域之實測值。目前 IPCC 建議以氣象通量方式較適合,如上述 CO₂ 通量監測方式,微量氣體偵測儀(trace gas analyzer)以開放性及長期性監測所得數據較能得到正確之量測值以驗證模式的估算值,但缺點是儀器購置成本偏高,且操作及維護不易。

農業溫室氣體估算模式

針對溫室氣體排放 IPCC 曾提供一套估算的公式,但過於粗略,僅以水旱田耕地面積直接估算,未考慮各地之氣候及土壤之特殊性,因此有學者自行開發模式以供區域性估算之用。有關於農田溫室氣體排放估算模式之發展,早期是以迴歸關係建立排放量與作物生質量(Kern *et al.* 1997)及產量(Anastasi *et al.* 1992)之關係式,後來以機制型模式為發展重心,如 MERES(Matthews *et al.* 2000)、CENTURY(Parton 1996)及 DNDC(Li 2000)。以下簡述三種模式之特性。

MERES (Methane Emissions from Rice Eco System)模式是由英國 Cranfield 大學與國際稻米研究中心(IRRI)共同開發之模式,特別適用於水稻田甲烷釋放量的估算。MERES 模式開發部分係依據 CERES-Rice 模式而來,該模式包含土壤有機物分解路徑、水分管理和有機或無機肥料的施用等。水田甲烷釋放主要是甲烷菌分解土壤有機物而來,有機物分解包括前期作物殘留物、根分泌物及現植作物死亡根的分解等。這些受質供給速率的比例,由離子氧化態濃度測定,而這也是受質甲烷化的潛勢值。甲烷釋放之動態模

式即利用潛勢值,配合土層剖面根長分佈,以計算氧氣和甲烷的通量。MERES 所需土壤資料包括土壤 pH 值、有機碳濃度、土壤質地、土壤鐵含量、土層容積密度(bulk density)的平均值及各土層剖面可用水分的容量。

CENTURY 模式著重於作物-土壤間之營養循環,包括計算碳、氮、磷及硫在土壤之動態變化。同時估算各種溫室氣體之釋放量外,特別適用於土壤有機物之估算,例如不同耕地或栽培制度之碳封存能力即可透過此模式作潛力分析(Hill 2003)。

DNDC (De Nitrification and De Composition)模式較適用於我國農田溫室氣體之排放估算,主要原因是該模式普遍運用在區域排放量估算上,特別是東亞有水稻生產之國家。Cai *et al.* (2003)利用 DNDC 模式探討東亞(包括日本、中國及泰國)耕作系統之溫室氣體的排放。雖然,有些地區因特殊土壤條件及水稻品種導致預測稍差外,但以較長時間尺度(季或年)的估算則可符合各地的實測值,可由相關評估結果也說明 DNDC 模式是估算生態系溫室氣體釋放一項有效工具。同時,Smith *et al.* (2002)由加拿大不同土壤和氣候環境作評估,發現 DNDC 模式所作預測值較 IPCC 推薦之 N₂O 釋放估算方法準確。

建立適用於我國的農業溫室氣體推估模式對於排放基線及氣體減量是相當重要。主要原因為農業生產環境相當複雜,且受限於時間及空間上之差異,模式可將各項因素加以數值化或加權評估對環境影響,而得到面化的數據。同時估算結果可作為減量策略及作物栽培管理決策依據,因農業生產過程受氣候、土壤、病蟲害及管理技術等所影響,溫室氣體排放量同樣受到環境影響,因此減量策略必須依據實際環境條件及栽培管理上可行才足以推廣。畢竟農業生產直接影響農民生計,模式所提供減量策略需符合現行耕作制度,且在時間及資源有限下找出各種方案之限制因素及因應對策。另一方面,建立

模式所得到推估值可和地理資訊系統(GIS)連結，作為動態資料更新之平台，並運用地理統計之時間及空間分析技術，繪製農業生產區溫室氣體排放潛勢圖，提供作為氣候變遷衝擊評估、農業永續經營及農地利用規劃等公共政策研究的基本資料。

四、暖化對溫室氣體排放量之影響

IPCC 於 2007 年 2 月 2 日發布第四次氣候變遷的摘要報告(summary for policy maker)，認為全球暖化現象有 90% 以上的機率是來自於人類活動的結果，並且預估在本世紀末全球平均溫度將上升攝氏 1.1-6.4 度。而所謂人類活動主要為溫室氣體的排放，但相對的，暖化的結果也加速溫室氣體的排放。IPCC 依據不同氣候情境預估未來溫室氣體排放情形，以甲烷排放而言，南北極冰山及深海有一甲烷巨大來源，由於甲烷與水分子結合以低溫高壓方式存在，但若地球持續暖化導致冰山溶解而將大量甲烷釋放於大氣中，預估這將近有 10^7 Tg 甲烷的存量(Milich 1999)。依據 IPCC 預估若能由不同國家及部門共同執行減量策略，在 2040 年甲烷排放量將減緩，否則依目前每年增加速率成長，將由目前約 570 Tg 達到本世紀末的 1150 Tg。氧化亞氮排放量若不控制，將由 18 Tg 增加至 26 Tg，但若透過國際共同力量減量則可恢復至 1990 年水準。因此未來溫室氣體的排放或氣候變遷的速度，依賴人類的努力程度而定。

以農田溫室氣體排放而言，升溫使將土壤中有機物加速分解，包括 CO_2 、 CH_4 及 N_2O 大量釋放。另暖化將使作物葉片之呼吸作用增加，事實上呼吸量對作物影響極大，有文獻指出氣候變遷對作物生長影響主要因夜間溫度升高，使作物呼吸速率加速，消耗作物日間所累積之碳水化合物所致(Heinemann *et al.* 2006)。而甲烷來自於水稻田部分，由於人類對稻米的需求，全球將以每年 2.5% 的稻田增加速度(Bachelet and Gay 1993)。雖然增

溫使部分地區之水稻減產，但也減少緯度限制，使水稻種植向寒冷地區延伸，尤其是中國大陸及日本。另一方面，增加大氣二氧化碳濃度有助於作物根部生長，根部滲出液(exudates)增加，及增溫加速根圈微生物之活性，間接使土壤的甲烷釋放量增加。事實上，土壤甲烷的釋放和土溫有密切關係，溫度越高則釋放量越多，但當溫度高於 35°C 以上時，則釋放量減少(Parashar *et al.* 1993)。

五、結語

京都議定書於 2005 年 2 月 16 日正式生效，我國行政院於同年 4 月成立『氣候變遷及京都議定書因應小組』，同時研提『溫室氣體減量推動方案』。依據該方案所規劃之第一階段是與國際經驗接軌，並建立農業及森林部門溫室氣體清冊估算、排放基線、減量情境模擬、及成本與潛力估算等工作。目前國際上評估農業溫室氣體排放及驗證方法如上述說明，但農業溫室氣體評估是一件複雜工作，因農業包括吸存及排放兩種角色，此問題思考方向是應由大面積農田作週年觀測，以輻射作用力淨值作為指標，配合排放估算模式的利用，才能精準評估農業溫室氣體排放量及氣體相互轉換的循環，以建立本土性資料作為減量策略規劃依據。如何加強農業對於溫室氣體吸存的潛勢，則是另一項重要工作，尤其是對於土壤碳封存的研究及應用，透過長期性作物選擇，減少耕犁頻率及土壤施肥等耕作制度的改變，將大氣中二氧化碳氣體轉換為土壤有機質。未來努力的方向係將農業由溫室氣體排放源轉為吸存源，以祈找出減緩氣候變遷及永續農業經營之雙贏策略。

引用文獻

- Alexander M (1991) Introduction to Soil Microbiology. Wiley. New York. 360 pp.
- Anastasi C, M Dowding, VJ Simpson (1992) Future CH_4 emission from rice production. J.

- Geophys. Res.** 97:7521-7575.
- Aulakh MS, R Wassmann, H Rennenberg (2001) Methane emissions from rice fields-quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. **Adv. Agron.** 70:193-260.
- Bachelet D, CA Gay (1993) The impacts of climate change on rice yield: a comparison of four model performance. **Ecol. Modeling** 65:71-93.
- Cai ZC (1996) Effect of land use on organic carbon storage in soils in eastern China. **Water Air Soil Pollu.** 91:383-393.
- Cai Z, T Sawamoto, C Li, G Kang, J Boonjawat, A Mosier, R Wassmann, H Tsuruta (2003) Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems. **Glob. Biogeochem. Cycles** 18:1-10.
- Desjardins RL, MVK Sivalumar, C de Kimpe (2007) The contribution of agriculture to the state of climate: workshop summary and recommendations. **Agric. For. Meteorol.** 142:314-324.
- Fawcett R, D Towery (2003) Conservation tillage and plant biotechnology: how new technologies can improve the environment by reducing the need to plow. The Conservation Technology Information Center. <http://www.ctic.purdue.edu/CTIC/BiotechPaper.pdf>.
- Guo LP, L Erda (2001) Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy field: a review of work in China. **Chemosphere** 3:413-418.
- Heinemann AB, HN Maia, DN Durval, KT Ingram, G Hoogenboom (2006) Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. **Europ. J. Agron.** 24:52-61.
- Hill MJ (2003) Generating generic response signals for scenario calculation of management effects on carbon sequestration in agriculture: approximation of main effects using CENTURY. **Environ. Modeling Software** 18: 899-913.
- Houghton RA, JL Hackler, KT Lawrence (1999) The U.S. carbon budget: contribution from land-use change. **Science** 285:574-578.
- IPCC (1995) Climate Change 1995. The Supplementary Report to IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. New York, USA. 572 pp.
- IPCC (2001) Climate Change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press. New York, USA. 1032pp.
- Kern JS, Z Gong, G Zhang, H Zhuo, G Luo (1997) Spatial analysis of methane emissions from paddy soils in China and the potential for emissions reduction. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 49:181-195.
- Lal R, JM Kimble (1997) Conservation tillage for carbon sequestration. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 49:243-253.
- Li CS (2000) Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 58:259-276.
- Matthews RB, R Wassmann, RJ Arah (2000) Using a crop /soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia. I. Model development. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 58:141-159.
- Mensah F, JJ Schoenau, SS Malhi (2003) Soil carbon change in cultivated and excavated land converted to grasses in east-central Saskatchewan. **Biochemistry** 63:85-92.
- Milich L (1999) The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused? **Glob. Environ. Change** 9:179-201.
- Mosier A, C Kroeze, C Nevison (1998) Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 52:225-248.
- Oenema O (1999) Strategies for decreasing nitrous oxide emission from agricultural sources. p. 175-191. *In: International Workshop on Reducing Nitrous Oxide Emission from Agroecosystems.* Desjardins RL, JC Keng, K Haugen-Kozyra (eds.) Banff, Alberta, Canada.
- Parashar DC, PK Gupta, J Rai, RC Sharma, N Singh (1993) Effect of soil temperature on methane emission from paddy fields. **Chemosphere** 26:247-250.
- Parton WJ (1996) The CENTURY model. p.283-293.

- In : Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-term Datasets. Powlson DS, P Smith, JU Smith (eds.) NATO ASI series I. Colorado State University, USA.
- Sasaki H, T Hara, S Ito, N Uehara, HY Kim, M Lieffering, M Okada, K Kobayashi (2007) Effect of free-air CO₂ enrichment on the storage of carbohydrate fixed at different stages in rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Res.** 100:24-31.
- Sass RL, FM Fisher, A Ding (1999) Exchange of methane from rice fields: national, regional, and global budgets. **J. Geophys. Res.** 104:26943-26951.
- Smith WN, RL Desjardins, B Grant, C Li, R Lemke, P Rochette, MD Corre, D Pennock (2002) Testing the DNDC model using N₂O emission at two experimental sites in Canada. **Can. J. Soil Sci.** 82:365-374.
- Su YZ (2007) Soil carbon and nitrogen sequestration following the conversion of cropland to alfalfa forage land in northwest China. **Soil Till. Res.** 92:181-189.
- Uri ND, H Bloodworth (2000) Global climate change and effect of conservation practices in US agriculture. **Global Environ. Change** 10:197-209.
- West TO, WM Post (2002) Soil carbon sequestration by tillage and crop rotation : a global data analysis. **Soil Sci. Soc. Amer. J.** 66:1930-1946.
- Xu X, Y Wang, X Zheng, M Wang, Z Wang, L Zhou, O Van Cleemput (2000) Methane emission from a stimulated rice field ecosystem as influenced by hydroquinone and dicyandiamide. **Sci. Total Environ.** 263:243-253.

(本篇專題論述發表於 96 年 10 月 25 日之『全球暖化對臺灣農業氣象環境及作物生產之影響研討會』)

— 編輯：楊純明