

# 台灣水稻田溫室氣體排放之估算研究

姚銘輝<sup>2,4</sup> 陳守泓<sup>2</sup> 陳述<sup>3</sup>

## 摘 要

姚銘輝、陳守泓、陳述。2006。台灣水稻田溫室氣體排放之估算研究。台灣農業研究 55:280~293。

本研究目的在評估 DNDC (De Nitrification and De Composition) 模式在不同耕作管理及氣候情境下，對於台灣水稻田溫室氣體排放估算之能力。經與實測值比較之結果顯示，水稻田二氧化碳及甲烷排放量以 DNDC 模式模擬可得到符合實際之結果，同時，由土壤質地，水分管理及氣候情境的敏感度分析，可瞭解溫室氣體排放的潛勢，如果能配合更多土壤或管理的資料，DNDC 模式可作為估算農業生產過程溫室氣體排放的可接受工具。此外，模式估算和地理資訊系統相結合，由不同空間差異資訊下，將扮演評估台灣水稻田溫室氣體排放潛力之重要角色。

**關鍵詞：**水稻、溫室氣體、氣候變遷、地理資訊系統

## 前 言

一般認為氣候變遷是溫室氣體 (greenhouse gas) 排放所致，造成地球表面反射之長波輻射無法排出，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 1995)，此趨勢和大氣中溫室氣體濃度 (尤其是二氧化碳) 上昇趨勢相一致，因此有關溫室氣體排放估算對於地球升溫速率及氣候變遷預測極為重要。而有關我國農田溫室氣體排放量估算部分，過去相關研究較著重於田間量測 (Yang & Chang 1999; Yang *et al.* 2003)，尚未以模式作大面積估算工作，而這部分卻是國家排放清冊及基線建立之重要依據。

在農業生產過程中，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份，包括作物選擇、種植方式、施肥及水分管理等，具有增加吸存及減少排放的潛力，但相對也使得估算溫室氣體排放較為複雜，除氣候及土壤等因素外，包括作物種類、耕作方式、施肥量及施肥時期等，皆直接或間接影響估算量。目前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)，InfoCrop (Aggarwal *et al.* 2004) 及 DNDC (Li 2000)。其中以 DNDC 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.*

- 
1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2274 號。接受日期：95 年 12 月 5 日。
  2. 本所農工組副研究員、聘用人員。臺灣 臺中縣 霧峰鄉。
  3. 本所作物種原組助理研究員。臺灣 臺中縣 霧峰鄉。
  4. 通訊作者，電子郵件：mhyao@wufeng.tari.gov.tw；傳真機：(04)23331673。

(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，以較長時間尺度（季或年）的估算則符合各地的實測值，而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  $N_2O$  釋放估算方法準確。

本研究擬探討 DNDC 是否適用於我國水稻田溫室氣體排放推估，同時作為減量策略及作物栽培管理決策依據。但因農業生產過程受多重且複雜環境所影響，包括氣候、土壤、病蟲害及管理技術等，溫室氣體排放量也同樣受到環境影響，因此，減量策略必須在環境條件及栽培管理上可行才足以推廣，模式模擬結果可提供減量策略之可行性評估，在有限時間及資源下找出各種方案之限制因素及因應對策。另為研究成果展現，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，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，藉以提供氣候變遷衝擊評估，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。

## 材料與方法

### 模式結構及參數

DNDC 模式是以土層溼度變化作為模式開發的主軸，所輸入資料包括三項，1. 氣象因素：每日平均最高溫、平均最低溫、日射量及累積雨量。2. 土壤特性：質地、容積密度、土壤酸鹼度和有機碳含量。3. 栽培管理參數：作物種類、種植時間和方式等。模式輸出值為每日土壤碳通量，包括  $CO_2$ 、 $CH_4$  及溶解有機碳；氮素方面，包括  $N_2O$ 、 $N_2$ 、 $NO$  和  $NH_3$  之每日通量等。DNDC 模式經過多次修改，包括土壤物理－化學過程的交互關係，以及氣象條件的適應性等 (Li *et al.* 1994)。

DNDC 模式就結構而言，可分四個次模式，分別描述如下：(1) 土壤氣候次模式：預測土溫和土層溼度剖面，及單位時間植體的吸收速率。土層溫度和溼度剖面是由一維土壤熱流通量和溼度流量模式計算而來，但有些設定值，如表面逕流及土層 20 cm 內根密度視為均一性，蒸散損失也僅限於 20 cm 之內等。(2) 作物植體生長模式：預測作物生長之生質量 (biomass) 和穀粒、桿、根含氮量；蒸散量是由作物生長和個別作物之水分利用效率參數計算而來。(3) 四種土壤碳素分解模式：包括 litter、labile humus、passive humus 和微生物生質量等。每一種 pool 有固定分解速率及碳氮比值，而分解速率受土壤質地、土溫、濕度和氮素限制的潛勢影響。(4) 脫氮次模式：脫氮過程受土壤溼度增加和土壤氧利用率減少影響，其中土壤氧化還原電位則依據土壤有機物含量分解所需耗氧量計算。

### 模式模擬條件及資料驗證

DNDC 模擬是以田區整年排放量為評估單位，本研究主要針對水稻田之排放，配合水稻耕作時序進行模擬。除一、二期水稻外，也假設二期作水稻收割後種植綠肥作物（油菜），至隔年一期作插秧前將其翻犁入土壤中。施肥量則依據施肥手冊之推薦用量，模式模擬過程中不考慮雜草及病蟲害問題。

模式所預估結果需經田間實際驗證才有意義，但這部份卻是目前溫室氣體監測執行的限制因素。國際上是以田間溫室氣體通量 (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  $\text{CO}_2$ 、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功能，為溫室氣體監測或驗證重要工具。過去農試所利用通量方式觀測水稻田在生育期間之  $\text{CO}_2$  通量資料可作為模式驗證之用 (Yao & Chen 2005)。至於水稻田  $\text{CH}_4$  排放資料，是依據 Yang & Chang (1999) 在台北地區所量測之資料，量測方法為靜置箱法 (static chamber method)。兩項實測值之詳細量測方法及條件請參閱原始文獻。

### 敏感性分析

針對土壤特性包括不同質地，容積密度及酸鹼度對作物生長及溫室氣體排放進行敏感度分析，並分別在分蘖期間以不同排水日數探討水稻田水分狀態對稻田土壤之溫室氣體排放之影響。DNDC 模式結果除提供  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  與  $\text{N}_2\text{O}$  之排放量外，同時計算全球暖化潛勢值 (Global warming potential, GWP)，其定義為溫室氣體吸收長波輻射所截取熱量之指標，若以  $\text{CO}_2$  吸收熱量值為 1，則  $\text{CH}_4$  為 21， $\text{N}_2\text{O}$  為 310 (Watson *et al.* 1996)。其計算式為：

$$\text{GWP} = \text{CO}_2 + \text{CH}_4 \times 21 + \text{N}_2\text{O} \times 310$$

另探討未來可能氣候情境 (scenarios) 對農田溫室氣體排放的影響，尤其是溫度、降雨量及大氣  $\text{CO}_2$  濃度提高後之影響，此氣候情境之不同敏感性分析可作為未來減量策略之參考。

### 農業溫室氣體排放潛勢評估

選取中央氣象局局屬 103 站，每站觀測資料包括平均最高溫、平均最低溫度及降雨量資料，將測站氣象資料及土壤性質資料一併輸入 DNDC 模式，所得預測值以地理資訊系統 ArcGIS 空間分析模組將其面化，可得到全國溫室氣體排放之潛勢圖。

## 結 果

本研究所用 DNDC 模式是依據美國農業環境所研發 (Li *et al.* 1994)，在用於預估我國農田溫室氣體排放量前需經驗證，才能確保模式的適用性。因此，模式推估值與田間實測值之比較是首先需完成之工作。由於水稻田（湛水環境）排放  $\text{N}_2\text{O}$  甚少，所以模式驗證以  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}_2$  為主。圖 1 為 DNDC 模擬水稻田  $\text{CH}_4$  釋放通量和 Yang & Chang (1999) 實測值之比較。模擬和量測是依據台北 1995 年水稻一期作之結果，模式輸入值按實測值之條件設定，該期作水稻之插秧期為 3 月 14 日（太陽日 74 日），生育初期 DNDC 模式預估  $\text{CH}_4$  排放量甚低，至分蘖期開始則大幅增加，生育後期則迅速降低。實測值大致符合水稻生育變化，但因為僅是點資料，且所顯示數值是當日最高值和最低值之平均，因此比較上較為困難，而依據實測值估算一期作生育期所排放  $\text{CH}_4$  量為  $2.6 - 11.7 \text{ gm}^{-2}$  (Yang & Chang 1999)，DNDC 所模擬結果則為  $15.3 \text{ gm}^{-2}$ ，預估值較實測值有偏高現象。雖然模式盡可能依據實測值條件作設定，但仍有一些參數並未實測，加上  $\text{CH}_4$  排放受環境或耕作方法影響極大，例如，Yang & Chang (1999) 同時比較 1996 年一期作連續湛水  $\text{CH}_4$  排放量為  $32.6 \text{ gm}^{-2}$ ，間歇性灌溉為  $11.7 \text{ gm}^{-2}$ ，兩種處理相差 3 倍，本研究結果顯示利用 DNDC 所模擬  $\text{CH}_4$  結果可符合田間實際狀況。

在 DNDC 模式估算式中並無群落上方之  $\text{CO}_2$  通量淨值，本研究利用作物植體每日  $\text{CO}_2$  固定量扣除土壤及根部之  $\text{CO}_2$  排放量，所得數值和  $\text{CO}_2$  通量觀測儀所測田間實測值作比較（圖 2），該實測值是 2004 年在農業試驗所農場所觀測的結果，由圖中可知 DNDC 模擬值和觀測值的變化大致上相近，同時也隨水稻生育期間之葉面積伸展變化，但模擬通量值在生育初期較觀測值有偏高，生育

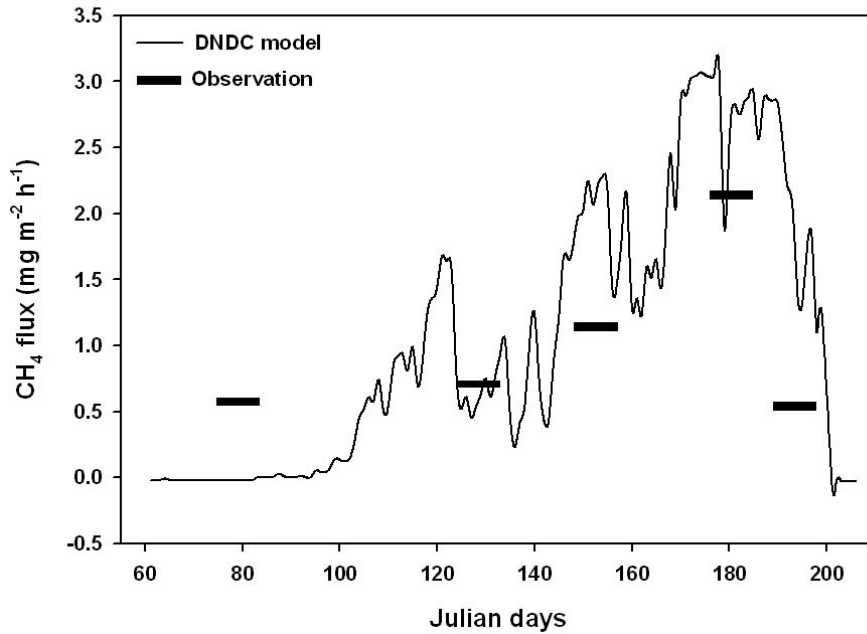


圖 1. 比較台北地區水稻一期作甲烷通量之實測值及模式預估值差異。

Fig 1. Comparisons between the measured and predicted CH<sub>4</sub> flux in a paddy field during the first cropping season in 1995, Taipei.

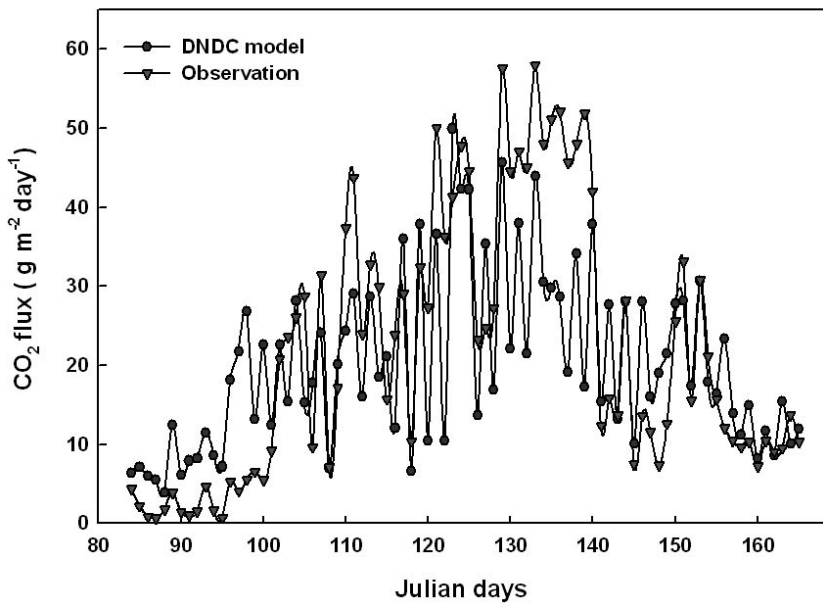


圖 2. 比較台中地區水稻一期作群落上方二氧化碳之實測值及模式預估值差異。

Fig 2. Comparisons between the measured and predicted CO<sub>2</sub> flux from above the canopy of rice during the first cropping season in 2004, Taichung.

中期則有偏低，生育後期則兩者相近。由於水稻葉面積指數在 DNDC 模式預估值及田間實測值兩者相近（資料未顯示），通量值差異可能原因在於模式光合作用的估算參數對環境變化之反應不同，這部分仍需更多資料才能有確切了解，不過由整個生育期每日平均  $\text{CO}_2$  固定量，DNDC 模式模擬值為  $20.2 \text{ gm}^{-2}$ ，實際觀測值為  $21.8 \text{ gm}^{-2}$ ，兩者差異不大，綜合  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}_2$  之驗證結果，DNDC 模式可作為水稻田評估溫室氣體排放之工具。

表 1 為土壤性質與溫室氣體排放之敏感度分析。土壤質地粘粒含量高則  $\text{CH}_4$  含量相對較低，不同質地土壤差異極大。另外， $\text{CO}_2$  排放量和  $\text{CH}_4$  反應相近， $\text{N}_2\text{O}$  雖隨粘粒含量增加而遞減，但反應較不明顯，至於作物產量之敏感度則不若溫室氣體排放顯著，穀粒、桿及根之生質量累積對土壤質地的反應也相一致。容積密度 (bulk density) 是指土壤孔隙度，土壤越鬆軟或含有機質較高時，則密度越低，當容積密度範圍為 1.1-1.6 間時， $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  的反應趨勢相近，隨密度增加，排放量減少一半， $\text{CO}_2$  則減少三分之一。另由土壤酸鹼度的敏感度分析中，pH 5.5- 8.0 之間有極大差異，土壤 pH 值高則有機物分解快速， $\text{CH}_4$  釋放量高，而酸性土壤則釋放量相對較低。

如果以年際間變異而言，溫室氣體排放主要受每年之氣候條件影響，而 DNDC 模式之氣候敏感度分析可瞭解各項氣象因子對排放量之影響程度。表 2 將溫度分別以  $0.5^\circ\text{C}$  幅度增溫，最高增溫  $5^\circ\text{C}$ ，結果顯示  $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  明顯依增溫幅度而增加排放量，但  $\text{CO}_2$  排放反而不明顯。因此可推論，當未來氣候變遷加劇時，農田溫室氣體排放以  $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  對氣候環境較敏感。另在降雨量影響溫室氣體排放部分，表 2 比較不同年度之排放量，2003 年為乾旱年份，農試所氣象站所紀錄之年累積雨量為 960 mm；2005 年則為多雨年份，年累積雨量為 2331 mm。雖然水稻田皆以連續澆水模擬，但兩個年度對於  $\text{N}_2\text{O}$  的排放估算量差異極大，乾旱之 2003 年  $\text{N}_2\text{O}$  排放量將近是 2005 年 10 倍以上，而  $\text{CH}_4$  在乾旱年度也明顯高於雨量充沛的年度。此外，當大氣中  $\text{CO}_2$  濃度增加對  $\text{CH}_4$  影響遠大於  $\text{N}_2\text{O}$ ，這是因碳源增加，大氣  $\text{CO}_2$  濃度由目前 350 ppm 提高至 750 ppm，水稻田  $\text{CH}_4$  釋放量由  $531 \text{ kg ha}^{-1}$  增加至  $653 \text{ kg ha}^{-1}$ 。

DNDC 模式是以土層溼度變化作為各項參數估算的依據，因此農田土壤水分含量變化直接影響溫室氣體的排放，水稻整個生育期除分蘖時期外，大部分皆以澆水條件生長。圖 3 是探討 2004 年水稻一期作分蘖期間，不同排水日數對  $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  排放量之影響，隨排水日數增加則  $\text{CH}_4$  下降，同時  $\text{N}_2\text{O}$  上升，本研究也比較不同年度氣象環境對於排水處理的差異，雖然結果相似，但幅度則差異甚大（資料未顯示），然而在實際水稻田對於土壤水分監測或控制並不容易，這將影響對溫室氣體排放之估算，圖 4 所示為 2002 年各地區水稻田溫室氣體排放潛勢之分析，耕作制度為水稻-水稻-油菜，水稻種植期間水分管理以連續澆水處理，將每一地區之土壤及氣候條件輸入 DNDC 模式作估算，估算值由地理資訊系統依據空間分析模組，繪製水稻田溫室氣體之排放潛勢圖。圖中我國中央山脈地區因屬高地，氣溫偏低，除影響作物產量外，溫室氣體排放也相對減少；農耕區地勢平坦，土壤特性適合水稻生育， $\text{CO}_2$  及  $\text{CH}_4$  明顯有較高排放潛勢，在農耕區之水稻田整年  $\text{CH}_4$  排放量大約在  $300\text{-}500 \text{ kg ha}^{-1}$  之間。另圖 4 之  $\text{N}_2\text{O}$  在農耕區並不明顯，這可由表 2 之氣候敏感度分析得知， $\text{N}_2\text{O}$  除受溫度影響外，降雨量也影響肥料分析過程，但降雨量較無區域性差異，因此  $\text{N}_2\text{O}$  排放量在台南縣及高雄縣等農耕區域反而較不明顯。至於 GWP 值以西部地區明顯較高，同時在北、中、南農耕區有明顯高值範圍，山區則排放潛勢明顯偏低，而整體 GWP 範圍在  $46000\text{-}110000 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  之間。

表 1. 不同土壤質地、容積密度及酸鹼度對水稻田產量及溫室氣體排放之敏感度分析  
 Table 1. The sensitivity analysis of production and greenhouse gases emissions in paddy fields under different soil texture, bulk density and soil pH conditions

Soil texture	Bulk density	Soil pH	1 <sup>st</sup> crop (kg ha <sup>-1</sup> )			2 <sup>nd</sup> crop (kg ha <sup>-1</sup> )			Greenhouse gas (kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )			
			Grain	Straw	Root	Grain	Straw	Root	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GWP
Sand (0.03 <sup>z</sup> )	1.4	6.0	7018	6316	702	5660	5094	566	32802	12425	3.9	470073
Loamy sand (0.06)	1.4	6.0	7035	6331	703	5891	5302	589	32863	5346	7.2	273688
Sandy loam (0.09)	1.4	6.0	7049	6344	705	5916	5325	592	32501	3163	7.2	211250
Silt loam (0.14)	1.4	6.0	7040	6336	704	6073	5466	607	31064	2351	7.4	183332
Loam (0.19)	1.4	6.0	7042	6338	704	5877	5289	588	29862	1827	7.3	164236
Sandy clay loam (0.27)	1.4	6.0	6678	6010	668	5687	5119	569	26727	1432	4.4	140234
Silty clay loam (0.34)	1.4	6.0	6080	5472	608	5415	4873	542	24305	327	2.9	99659
Clay loam (0.40)	1.4	6.0	6171	5554	617	5364	4827	536	21519	488	2.1	93584
Sandy clay (0.43)	1.4	6.0	6444	5800	644	5426	4883	543	20916	582	1.9	93906
Silty clay (0.49)	1.4	6.0	6568	5911	657	5065	4559	507	18888	756	0.9	90844
Clay (0.63)	1.4	6.0	5549	4994	555	4339	3905	434	15722	344	0.4	67490
Clay loam (0.40)	1.6	6.0	6557	5901	656	5855	5269	585	24771	639	2.3	109819
Clay loam (0.40)	1.5	6.0	6388	5749	639	5611	5050	561	23132	562	2.6	101802
Clay loam (0.40)	1.4	6.0	6171	5554	617	5364	4827	536	21519	488	2.1	93584
Clay loam (0.40)	1.3	6.0	5951	5356	595	5103	4593	510	19909	416	2.1	85676
Clay loam (0.40)	1.2	6.0	5713	5142	571	4831	4348	483	18307	355	1.2	77676
Clay loam (0.40)	1.1	6.0	5661	5095	566	4553	4098	455	16712	322	1.1	70804
Clay loam (0.40)	1.4	8.0	7049	6344	705	6580	5922	658	21474	1265	1.6	114939
Clay loam (0.40)	1.4	7.5	6898	6208	690	5826	5244	583	21496	991	2.0	107552
Clay loam (0.40)	1.4	7.0	6324	5691	632	5533	4980	553	21512	770	2.2	101538
Clay loam (0.40)	1.4	6.5	6183	5565	618	5410	4869	541	21518	623	2.2	97439
Clay loam (0.40)	1.4	6.0	6171	5554	617	5364	4827	536	21519	488	2.1	93584
Clay loam (0.40)	1.4	5.5	6184	5566	618	5345	4810	534	21520	348	1.9	89568

<sup>z</sup> clay fraction of soil by weight.

表 2. 2003 年及 2005 年不同溫度、降雨及二氧化碳濃度對水稻田溫室氣體排放之敏感度分析

Table 2. The sensitivity analysis of greenhouse gases emissions under different temperature, rainfall, and ambient CO<sub>2</sub> concentration during the years of 2003 and 2005.

Temp. (°C)	Rainfall (% of control <sup>z</sup> )	CO <sub>2</sub> (ppm)	2003					2005				
			CO <sub>2</sub> (kg C/ha)	N <sub>2</sub> O (kg C/ha)	CH <sub>4</sub> (kg C/ha)	GWP (kg CO <sub>2</sub> /ha)	CO <sub>2</sub> (kg C/ha)	N <sub>2</sub> O (kg C/ha)	CH <sub>4</sub> (kg C/ha)	GWP (kg C/ha)		
+0	1	350	21244	21.0	531	102955	20689	1.8	369	87041		
+0.5	1	350	21334	22.7	586	105693	20783	2.0	425	89073		
+1.0	1	350	21434	24.7	631	108316	20943	2.3	479	91278		
+1.5	1	350	21520	26.4	664	110369	21012	2.6	539	93380		
+2.0	1	350	21690	28.2	690	112314	21105	2.9	588	95273		
+2.5	1	350	21707	29.8	710	113992	21221	3.4	617	96716		
+3.0	1	350	21751	31.4	732	115563	21261	3.7	637	97616		
+3.5	1	350	21692	32.9	744	116308	21364	4.2	648	98518		
+4.0	1	350	21584	34.1	756	116893	21452	4.5	660	99319		
+4.5	1	350	21533	35.6	764	117688	21477	5.2	674	100161		
+5.0	1	350	21453	36.5	775	118118	21385	5.7	687	100409		
+0	120	350	21259	17.2	529	101501	20691	1.9	369	86984		
+0	115	350	21252	18.0	530	101150	20689	1.8	369	87041		
+0	110	350	21248	19.4	530	102210	20691	1.7	369	87029		
+0	105	350	21241	19.4	531	102205	20686	1.9	369	87088		
+0	100	350	21244	21.0	531	102955	20689	1.8	369	87041		
+0	95	350	21238	21.3	531	103121	20680	2.3	369	87299		
+0	90	350	21223	21.8	532	103320	20680	1.6	369	86953		
+0	85	350	21211	20.6	550	103215	20680	1.6	369	86953		
+0	80	350	21214	22.8	533	103812	20660	2.9	369	87521		
+0	1	350	21244	21.0	531	102955	20689	1.8	369	87041		
+0	1	450	21223	21.0	594	104670	20670	1.8	402	87914		
+0	1	550	21215	21.0	630	105643	20658	1.8	422	88434		
+0	1	650	21209	21.0	648	106130	20651	1.8	433	88708		
+0	1	750	21207	21.0	653	106265	20646	1.8	436	88761		

<sup>z</sup>Control : actual rainfall of 2003 or 2005.

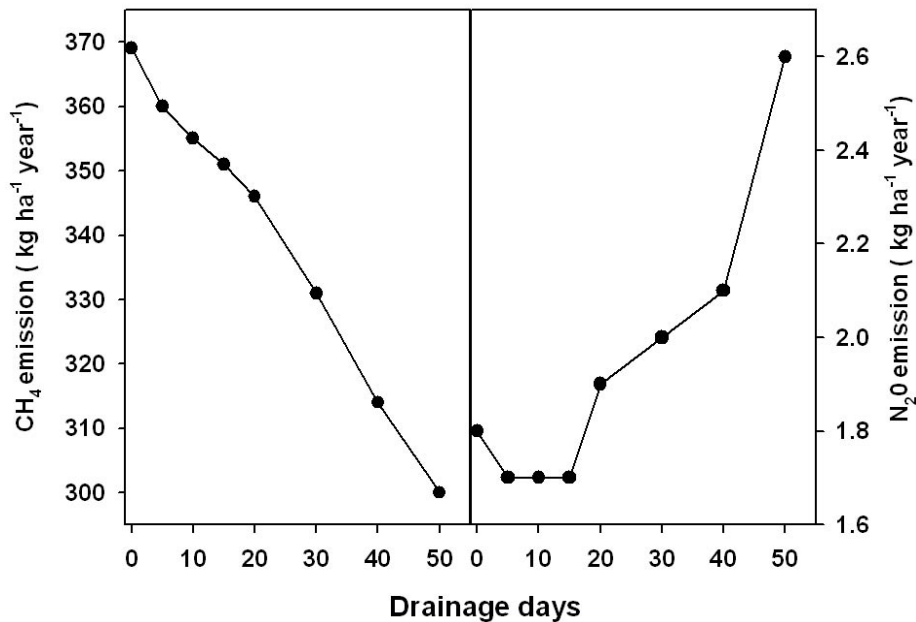


圖 3. 水稻分蘖期間不同排水日數對甲烷及氧化亞氮排放之敏感度分析。

Fig 3. The sensitivity analysis of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from different drainage days during the tillage stage of rice.

## 討 論

國際社會對氣候變遷議題相當重視，1997 年在日本京都召開國際會議，會中訂定“京都議定書”，希望以國際共同力量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。我國行政院則於 94 年成立『氣候變遷暨京都議定書因應小組』，積極規劃因應政策，其中包括農業溫室氣體排放清冊估算及基線建立，因必須瞭解排放量才能進行成本估算及減量措施研擬。

DNDC 雖經由不同土壤質地之短期及長期實測加以驗證 (Li *et al.* 1994 2000)，但溫室氣體通量在農業生態系中有很高空間及時間上的變異，包括生態因素（氣候、植生及人為活動等），土壤環境因素（如土溫、土壤溼度、酸鹼度、還原電位和受質濃度梯度）及生化反應 (Li *et al.* 2004)。因此，田間溫室氣體排放量的量測，對於模式驗證非常重要。目前量測方式分為密閉式（靜置箱法）和開放式（微氣象法，micrometeorological method）。前者以人工至田間抽取氣體樣品分析，僅能有某一時間點的資料，但量測成本低廉，同時不受田區限制，是溫室氣體排放之主要量測方法。微氣象法是利用儀器直接置於田間作長期觀測，所得資料是連續性，包括日夜間變化，但缺點是設備昂貴，且受吹風距離 (fetch) 限制。Laville *et al.* (1997) 曾比較靜置箱法、渦流相關法 (eddy correlation method) 及雷射吸收光譜法 (tunable diode laser absorption spectrometer) 三種方法在 N<sub>2</sub>O 量測上之差異，發現三種方法所得結果相近。在國內，台大楊盛行教授已有多利用靜置箱法量測 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 之資料，可作為 DNDC 模式驗證之用，但由圖 1 結果說明，利用靜置箱法所得數據資料雖符合水稻生育階段之變化，但受限於取樣方法，無法依據每日不同氣候條件和 DNDC 之推估值作比較，但目前僅有此資料，並且由實測值推估整個生育期的結果與模式預估值相近；至於 CO<sub>2</sub> 較為複

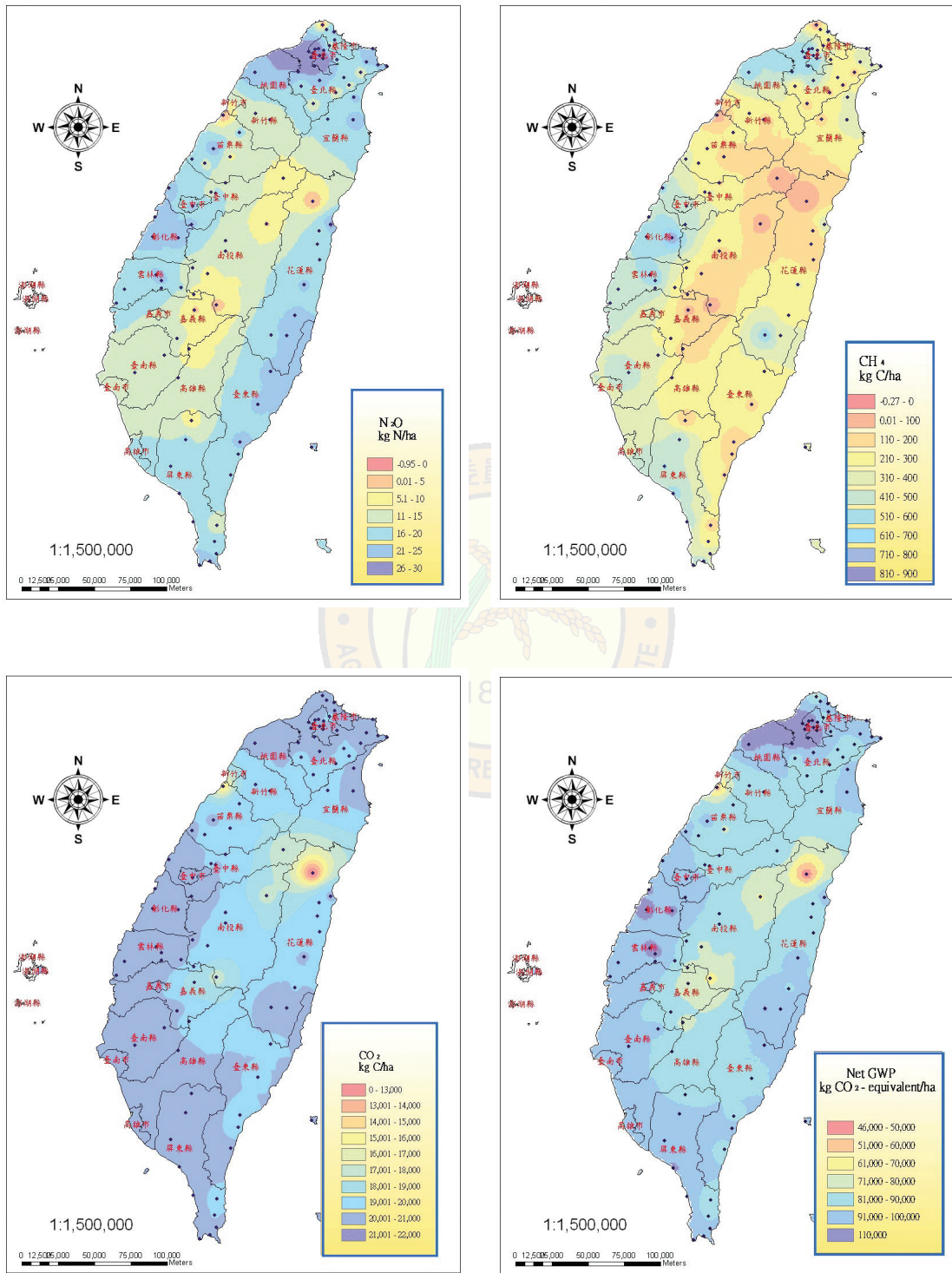


圖 4. 台灣以縣為尺度之水稻田溫室氣體排放潛勢圖。

Fig 4. DNDC-modeled greenhouse gases emissions in rice agricultural land with county scale in 2002, Taiwan.

雜，因其來源包括呼吸（地上部及根部）及葉片固碳作用，如果以靜置箱法將限制空氣對流，箱內會因葉片吸收而減少  $\text{CO}_2$  濃度，以開放式之渦流相關法則以不破壞群落結構而量測通量變化，本研究完整量測之資料可作為  $\text{CO}_2$  排放量之驗證，雖然實測值和預估値在水稻不同生育階段反應不同，但生育期間平均排放量極為相近，這說明 DNDC 模式在預估我國水稻田溫室氣體排放具有適用性。

DNDC 模式在估算各項參數或輸出值之計算式，可由 Zhang *et al.* (2002) 之附錄說明得知。其中  $\text{CH}_4$  產生受土壤質地、土溫、氧化還原電位及土壤酸鹼度影響。由表一可知土壤粘粒含量明顯影響  $\text{CH}_4$  釋放量，實測資料也證實土壤中黏土含量和  $\text{CH}_4$  釋放量呈負相關 (Sass *et al.* 1994)，Denier van der Gon & Neue (1996) 觀察不同黏土含量土壤之  $\text{CH}_4$  季節變化，黏土含量 66% 及 21%， $\text{CH}_4$  釋放量分別為 20.1 及 36.1  $\text{g m}^{-2}$ 。黏土可保護有機物質裂解及促使土壤捕捉  $\text{CH}_4$  而減少釋放 (Wang *et al.* 1993)。Li *et al.* (2002) 分析中國各地區水稻田  $\text{CH}_4$  排放量，結果顯示由極細到極粗之土壤質地，可決定  $\text{CH}_4$  排放量 80% 之變異。但粘粒含量也影響水稻田之  $\text{CO}_2$  及  $\text{N}_2\text{O}$  排放量，黏土 (粘粒含量 0.63) 雖然整體溫室氣體排放量最低，但水稻產量也最低。我國土壤容積密度平均約為 1.3 (Juang *et al.* 2005)，由敏感度分析結果說明，容積密度和溫室氣體排放呈正相關，這和粘粒含量反應不同，土壤越緊實則溫室氣體排放越多，同時三種溫室氣體的反應一致。另土壤酸鹼度地域性差異極大，在敏感度分析中，水稻田土壤酸鹼度範圍設定為 pH 5.5- 8.0 之間，基本上，淹水會使土壤 pH 值穩定在 6.5 至 7.2 之間，這是適合  $\text{CH}_4$  產生之條件 (Ponnamperuma 1972)，而 pH 偏高在水-土壤介面會抑制  $\text{CH}_4$  氧化 (King *et al.* 1990)，因土壤 pH 值高則有機物分解快速， $\text{CH}_4$  釋放量高，而酸性土壤則釋放量相對較低。

氣候因素是溫室氣體排放的重要影響因素，由表 2 結果顯示，氣溫升高將使排放量增加，這和高溫加速有機物分解有關 (Zhang *et al.* 2002)。另外，土溫也是決定  $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  釋放量之重要因子， $\text{CH}_4$  釋放和土溫具有良好關係，尤其是通量速率和土層 5 cm 溫度有關，當土溫由 20°C 增加至 25°C 時釋放加倍 (Holzpfel-Pschorn *et al.* 1986)，在 35°C 以下土溫和  $\text{CH}_4$  釋放量呈線性關係，但超過 35°C 則下降 (Parashar *et al.* 1993)。DNDC 模式之氣象輸入值並未要求輸入土溫資料，主要原因在於資料取得不易及變異極大，模式內土溫是由平均最高溫、平均最低溫及日射量估算而來。在表二氣候敏感度分析中，設定水稻生育過程皆在湛水環境，即無缺水逆境發生，但由 2003 年及 2005 年降雨量多寡不同之年份可知，溫室氣體排放量或全球暖化潛勢值差異甚大，但降雨敏感度分析則與排放量無差異 ( $\text{N}_2\text{O}$  除外)，其說明降雨對於溫室氣體排放的影響應屬於間接性質。

湛水水稻田每年約排放 50 Tg  $\text{CH}_4$ ，約佔全球排放量之 8% (Sass *et al.* 1999)；而施肥之旱田作物排放約 2 Tg  $\text{N}_2\text{O}$ ，大約佔全球排放量之 10% (Mosier *et al.* 1998)。過去幾十年的耕作，土壤大約減少 10-50% 有機碳含量，由此估算將近有 40 Pg  $\text{CO}_2$  排放到大氣中 (Houghton 2000)。因此，農地耕作或施肥改善是溫室氣體排放重要的一環，這包括精準施肥以減少  $\text{N}_2\text{O}$ ，水分管理對  $\text{CH}_4$  排放的控制，以及農田耕作將大氣  $\text{CO}_2$  固定於土壤等。水稻田在湛水環境中  $\text{CH}_4$  釋放多， $\text{N}_2\text{O}$  釋放甚少，但當水稻田排水則  $\text{N}_2\text{O}$  排放多， $\text{CH}_4$  則減少 (圖 3)，兩種氣體在不同水分狀態互為消長。Cai (1997) 指出水稻生育中期通氣有助於  $\text{CH}_4$  減量 50%。Frolking *et al.* (2004) 以亞洲水稻作分析，同樣發現  $\text{CH}_4$  受土壤質地影響極大，在連續湛水之水稻田，若適當排水將減少  $\text{CH}_4$  30-50%，但增加 100-500%  $\text{N}_2\text{O}$ ，及小幅度增加  $\text{CO}_2$  在土壤中之固定。土壤水分含量影響  $\text{N}_2\text{O}$  釋放是一項複雜反應，例如湛水使更多有機質溶解，或低氧化還原電位促進脫氮過程，而使  $\text{N}_2\text{O}$  產生，但  $\text{N}_2$  減少也可使  $\text{N}_2\text{O}$  通量

減少 (Davidson 1991)，不過以年計算，水稻田在湛水時僅有  $0.04 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$ ，非湛水為  $1.7 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$  (Chen *et al.* 1995)，和  $\text{CH}_4$  排放量 (約  $200\text{-}400 \text{ kg ha}^{-1}$ ) 比較則不值得重視。

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，包括建立農業及森林部門溫室氣體清冊估算、排放基線建立、減量情境模擬，以及成本及潛力估算等工作。因此農業溫室氣體排放清冊及潛勢分析是整體衝擊評估之基礎，但因有時間及空間上之差異，包括土壤、氣候及植生條件等，利用模式作全國性的空間分析，並以圖示方式做說明，有助於各區域排放差異比較及減量策略規劃之依據。事實上，最近已有以國家尺度之相關研究報告，例如印度 (Pathak *et al.* 2005)，中國 (Li *et al.* 2005)，及東亞各國 (Cai *et al.* 2003) 等。本研究以水稻田為評估目標，建立我國大尺度之排放潛勢圖。在農耕區  $\text{CH}_4$  排放量大約在  $300\text{-}500 \text{ kg ha}^{-1}$  之間，與 Yang *et al.* (2003) 所作估算值有明顯偏高現象 (以 2000 年為例為  $75.6 \text{ kg ha}^{-1}$ )，但與 IPCC 連續湛水之估算值 (以 2000 年為例為  $362.5 \text{ kg ha}^{-1}$ ) 相近。Yang *et al.* (2003) 於文中述及水稻生育期間排水是影響  $\text{CH}_4$  偏低之原因，而由圖 3 在水稻生育期間不同排水日數對  $\text{CH}_4$  排放量確實有明顯影響，但因我國各地水稻排水日數無法得到資料，因此圖 4 之潛勢圖仍以連續灌水作為模擬條件。至於實際溫室氣體排放可經由本研究所驗證之模式估算，由各地實際耕作面積、作物種類、耕作週期及實際操作條件作估算，但每一項工作皆需有實測值作驗證，以前的實測值仍有不足之處，同時觀測值應由大面積農田作週年觀測，以全球暖化潛勢值 (GWP) 作為指標，精準評估農業溫室氣體排放量及氣體相互轉換的循環，才能建立我國實際排放量之資料，並作為減量策略規劃依據，及對農業產業永續經營之衝擊評估。

### 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 (Literature cited)

- Aggarwal, P. K., N. Kalra, S. Charder, and H. Pathak. 2004. InfoCrop: A Generic Simulation Model for Annual Crops in Tropical Environment. Indian Agricultural Research Institute. New Delhi. 132 pp.
- Anastasi, C., M. Dowding, and V. J. Simpson. 1992. Future  $\text{CH}_4$  emission from rice production. *J. Geophys. Res.* 97: 7521-7575.
- Cai, Z. C., G. X. Xing, X. Y. Yan, X. Xu, H. Tsuruta, K. Yagi, and K. Minami. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant Soil* 196: 7-14.
- Cai, Z., T. Sawamoto, C. Li, G. Kang, J. Boonjawat, A. Mosier, R. Wassmann, and H. Tsuruta. 2003. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems. *Global Biogeochem. Cycles* 18: 1-10.
- Chen, G. X., G. H. Huang, B. Huang, J. Wu, Y. Xiu, X. H. Xue and Z. P. Wang. 1995.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from a rice field and effect of *Azolla* and fertilization on them. *China J. Appl. Ecol.* 6: 378-382.

- Davidson, E. A. 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystem. P. 219-235. *in*: Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides, and Halomethane. (Rogers, J. and W. Whiteman, eds.) American Society of Microbiology, Washington D. C.
- Denier van der Gon, H. A. C. and H. U. Neue. 1996. Oxidation of methane in rhizosphere of rice plants. *Biol. Fertil. Soils* 22: 359-366.
- Frolking, S., C. S. Li, R. Braswell, and J. Fuglestedt. 2004. Short- and long-term greenhouse gas and radiation forcing impacts of changing water management in Asian rice paddies. *Global Change Biology* 10: 1180-1196.
- Holzappel-Pschorn, A., R. Conrad, and W. Seiler. 1986. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil. *Plant Soil* 92: 223-291.
- Houghton, R. A. 2000. Emissions of carbon from land-use change. P. 63-76. *in*: The Carbon Cycle. (Wigley, T. M. L. and D. S. Schimel, eds.) Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- International Panel on Climate Change (IPCC). 1995. Climate Change 1995. The Supplementary Report to IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. 879 pp.
- Juang, K. W., Y. M. Liu, and D.Y. Lee. 2005. Estimating the spatial distribution of soil penetration resistance in a field as a function of water content and bulk density. *Soil Environ.* (in press)
- Kern, J. S., Z. Gong, G. Zhang, H. Zhuo, and 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.
- King, G. M., P. Roslev, and H. Skovgaard. 1990. Distribution and rate of methane oxidation in sediments of the Florida Everglades. *Appl. Environ. Microbiol.* 56: 2902-2911.
- Laville, P., C. Henault, P. Renault, P. Cellier, A. Oriol, X. Devis, D. Flura, and J. C. Germon. 1997. Field comparison of nitrous oxide emission measurements using micrometeorological and chamber methods. *Agronomie* 17: 375-388.
- Li, C., S. Frolking, and R. Harriss. 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochem. Cycles* 8: 237-254.
- Li, C. S. 2000. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 58: 259-276.
- Li, C. S., S. Frolking, X. M. Xiao, B. Boore III, S. Boles, J. Qiu, Y. Huang, W. Salas, and R. Sass. 2005. Modeling impacts of farming management of rice alternatives on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biogeochem. Cycles* 19: GB3010, doi:10.1029/2004GB002341.
- Li, C. S., A. Mosier, R. Wassmann, Z. Cai, X. Zheng, Y. Huang, H. Tsuruta, J. Boonjawat, and R. Lantin. 2004. Modeling greenhouse gas emission from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling. *Global Biogeochem. Cycles* 18: GB1043, doi:10.1029/2003GB002045

- Li, C. S., J. Qiu, S. Frohling, X. Xiao, W. Salas, B. Moore III, S. Boles, Y. Huang, and R. Sass. 2002. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980-2000.-*J. Geophys. Res. Lett.* 29(20),1972, doi:10.1029/2002 GL015370.
- Matthews, R. B., R. Wassmann, and R. J. 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.
- Mosier, A., C. Kroeze, and C. Nevison. 1998. Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 52: 225-248.
- Parashar, D. C., J. Rai, P. K. Gupta, and N. Singh. 1993. Effect of soil temperature on methane emission from paddy field. *Chemosphere* 26: 247-250.
- Parton, W. J. 1996. The CENTURY model. p283-293. *in* : Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-term Datasets. ( Powlson, D.S., P. Smith and J. U. Smith, eds) NATO ASI series I.
- Pathak, H., C. S. Li, and R. Wassmann. 2005. Greenhouse gas emission from Indian rice field : calibration and upscaling using the DNDC model. *Biogeoscience* 2: 113-123.
- Ponnamperuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24: 29-96.
- Sass, R. L., F. M. Fisher, and A. Ding. 1999. Exchange of methane from rice fields: national, regional, and global budgets. *J. Geophys. Res.* 104: 26943-26951.
- Sass, R. L., F. M. Fisher, S. T. Lewis, F. T. Turner, and M. F. Jund. 1994. Methane emission from rice field : effect of soil properties. *Global Biogeochem. Cycles* 8: 135-140
- Smith, W. N., R. L. Desjardins, B. Grant, C. S. Li, R. Lemke, P. Rochette, M. D. Corre, and D. Pennock. 2002. Testing the DNDC model using N<sub>2</sub>O emissions at two experimental sites in Canada. *J. Soil Sci.* 82: 365-374.
- Wang, Z. P., R. D. Delaune, P. H. Masscheleyn, and W. H. Jr. Patrick. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 382-385.
- Watson, R. T., M. C. Zinyowera, R. H. Moss, and D. J. Dokken. 1996. *Climate Change 1995, impact, adaptation and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses*, Cambridge University Press, USA. 879 pp. Inter-government Panel on Climate Change.
- Yang, S. S. and H. L. Chang. 1999. Diurnal variation of methane emission from paddy fields at different growth stages of rice cultivation in Taiwan. *Agric. Ecosyst. Environ.* 76: 75-84.
- Yang, S. S., C. M. Liu, C. M. Lai, and Y. L. Liu. 2003. Estimation of methane and nitrous oxide emission from paddy fields and uplands during 1990-2000 in Taiwan. *Chemosphere* 52: 1295-1305.
- Yao, M. H. and S. H. Chen. 2005. Studies on absorption and emission of carbon dioxide in paddy field. *J. Taiwan Agric. Res.* 54: 150-161. (in Chinese with English Abstract)
- Zhang, Y., C. Li, X. Zhou, and B. Moore III. 2002. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecol. Modell.* 151: 75-108.

# Studies on the Estimation of Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in Taiwan<sup>1</sup>

Ming-Hwi Yao<sup>2,4</sup>, Shou-Hung Chen<sup>2</sup> and Shu Chen<sup>3</sup>

## Abstract

Yao, M. H., S. H. Chen, and S. Chen. 2006. Studies on the estimation of greenhouse gas emissions from paddy fields in Taiwan. *J. Taiwan Agric. Res.*55:280~293.

The De nitrification and De composition (DNDC) model was evaluated for its ability to estimate greenhouse gases emissions from agricultural land in Taiwan under various management practices and climate scenarios. Compared with actual observation data in paddy field, the results indicated that the model could estimate the CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions satisfactorily. In addition, the sensitivity analysis of the soil texture, water management and climate scenarios could be used to understand the potential of greenhouse gases emissions. By incorporating necessary modifications based on the local soil properties and management practices, the DNDC model proved to be an acceptable tool to estimate greenhouse gases emissions during the processes of agricultural production. Moreover, the DNDC model integrated with the spatial information from GIS databases could play an important role in evaluating the potential of greenhouse gas emissions from paddy fields in Taiwan.

**Key words:** rice (*Oryza sativa L.*), greenhouse gas, climate change, geographical information system

---

1. Contribution No. 2274 from Agricultural Research Institute, Council of Agriculture. Accepted: December 5, 2006.

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

3. Assistance Researcher, Plant Germplasm Division, ARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.

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