

台灣東部水田土壤甲烷氣體之釋放及其影響因子¹

彭德昌² 黃山內³

摘要

為瞭解台灣東部水田土壤甲烷氣體之釋放量及探討其影響因子，自 83 年二期作至 85 年一期作在花蓮縣吉安鄉之片岩石灰性沖積土及富里鄉之片岩混合粘板岩老沖積土進行試驗。試驗處理分別為稻草掩埋與否（吉安）及一般與增施氮肥（富里），於水稻生育期間在田間實地收集氣體分析甲烷之釋放量。結果顯示，吉安鄉試區 83 年及 84 年二期作水田之甲烷釋放量為平均分別為 90 及 809 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，84 年及 85 年一期作平均分別為 832 及 494 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ；富里試區 83 年及 84 年二期作平均分別為 7,481 及 16,795 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，84 年及 85 年一期作平均分別為 4,029 及 6,851 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ 。稻草掩埋處理會顯著增加水田甲烷之產生與其釋放量，增加幅度為 18.9% 1,106.7%（平均 361.6%），增施氮肥亦有增加甲烷釋放量之趨勢，增加幅度為 50.6% 99.1%（平均 69.7%）。甲烷之釋放量受氣候因素之影響甚大，溫度（包括氣溫、水溫及地溫）較高時，甲烷之釋放量亦較多。

（關鍵字：水田土壤、甲烷釋放、稻草掩埋、氮肥施用）

¹花蓮區農業改良場研究報告第 141 號，本計畫經費承行政院國家科學委員會（計畫編號：NSC84-2621-P-067H-001 及 NSC85-2621-P-067H-001）支助，謹此致謝。

²花蓮區農業改良場作物環境課助理研究員。

³花蓮區農業改良場前場長，現任台南區農業改良場場長。

前言

大氣組成分的改變會顯著影響地球表面溫度之變化，其中導因於二氧化碳濃度的增加，已有許多研究報告(Manabe and Wetherald,1987;Dickinson,et al.,1986)，然而大氣中亦有微量稀有之氣體，如甲烷(CH_4)、臭氧(O_3)、氧化亞氮(N_2O)及氟氯碳化物(CFCs)等，對於地球表面氣候改變之影響並不亞於二氧化碳(Wang et al.,1976;Ramanathan et al.,1985)。因此，這些微量氣體在大氣中之消長，廣泛引起地球科學家之重視。

根據近年來之研究顯示，大氣中甲烷濃度每年之增加率約為 1%(Blake and Rowland,1988)除了二氧化碳之外，甲烷被認為是最重要之溫室效應氣體，因為甲烷除在大氣中之濃度逐年增加之外，其相對熱吸收潛勢約為二氧化碳之 30 倍(Bouwman,1991)。

大氣中甲烷之來源雖有許多途徑，但根據估計約 80%是在還原狀態之環境下，由一群極端厭氣之微生物分解有機物所產生(Ehhalt and Schmidt,1978)，自然濕地、水田、垃圾掩埋場、反芻動物消化腔道、白蟻消化腔道等則為甲烷主要產生之場所(Bouwman,1991)。

雖然湖中底泥為甲烷之產生主要場所之一，但其產生之甲烷必須藉由擴散作用並經過氧化與還原交替之水與土層，或上面覆被之水層，才有機會逸釋進入到大氣之中。在這種情況

下，80%以上之甲烷會被氧化成為二氧化碳(Conrad and Rothfuss,1991)。然而在反芻動物之消化腔道及水田土壤所產生之甲烷，則大部分直接釋放進入大氣中(Seiler et al.,1984)，因此，如何控制反芻動物消化腔道及水田產生之甲烷與逸釋，遂成為相當重要之研究課題。

水稻為當前世界上最重要之糧食作物，其栽培管理過程包括：整地、碎土、浸水、插植、施肥、噴藥、排水等，生育期間為 4 5 個月，為使水稻生育正常，其間計有長達 95%以上之時間必須浸水或保持濕潤狀態，土壤中之空隙呈現飽和水分之狀態，氧氣在大氣中之擴散速率比在水中約快 10,000 倍(Greenwood and Boodman,1964)，而且由於稻田表面上被覆水與土壤中好氣性微生物之活動，促使浸水土壤很快就成為厭氣無氧之狀態(Frenzel et al.,1992)，有利於有機物進行厭氣性之分解，進而產生甲烷氣體(Burke and Lashof,1990)。水田土壤產生甲烷氣體係一種生物性作用，而土壤物理、化學與生物之特性等因素均會影響甲烷菌的活動，其中土壤溫度、氧化還原電位(Eh)、有機物含量、土壤酸鹼度(pH)、化學肥料及合成性農藥之施用等方面之關係最為密切，近年來已有許多此方面之研究報告(Yagi and Minami,1990;Kimura et al.,1993;Lindau et al.,1993;Wang et al.,1993)。

水稻有如其他濕地水生植物一樣，在浸水之狀態下，根部因受刺激而形成具有通氣功能之氣胞組織，能將大氣中之氧氣傳輸進入根圈，一方面可維持水稻根及根圈微生物之好氧性代謝作用，另一方面可因氧化作用而阻止了有害物質如 Fe^{2+} ， Mn^{2+} 與 H_2S 向根之表面移進(Armstrong and Armstrong,1988)，而使水稻之根在浸水狀態下尚能維持正常之功能。雖然稻田土壤中所產生之甲烷，約有 80 90%在根圈中被氧化(Frenzel, et al.,1992)，但水稻確能將土壤中之甲烷經氣胞組織直接運送進入大氣，據研究結果顯示，由土壤產生之甲烷進入大氣中者，90%以上係經由水稻植株傳輸進入大氣之中(Hozapfel-Pschorn and Seiler,1986;Huang,1989) 因此如何控制及減少其排放與逸釋量，以對於阻止大氣中甲烷氣體濃度急速增加，備感重要。

台灣地區水稻栽培面積約為 360,000 公頃(台灣農業年報,1996)，為本省最重要之糧食作物，目前全部採用濕田狀態之栽培耕作方式，以獲得稻穀較高之產量。稻田土壤主要可分為粘板岩沖積土、砂頁岩沖積土、紅壤及片岩沖積土，田間栽培之生長期間一期作自 1 月至 7 月，二期作自 8 至 12 月，受各地區氣候及土壤條件影響，其品種、肥料及農藥之使用略有不同，產量亦有所差異，此均與甲烷菌之活動性進而與甲烷氣體之產生及逸釋有密切之關係。根據初步調查結果顯示，本省稻田甲烷之產生與逸釋量以田間灌排水之狀態與土壤溫度之關係較為密切(Huang,1989)，但整個期作及整個年度甲烷氣體之產生與逸釋量如何，則有待探討。

台灣東部地區主要稻田土壤為片岩沖積土，部分含有石灰質及混有粘板岩，水稻生育受環境因素及品種特性之影響，其產量較西部為差，為瞭解本地區一般水稻栽培管理下土壤甲烷產生及逸釋情形，並探討稻草掩埋及增施化學氮素肥料對於稻田甲烷氣體逸釋之影響，特在行政院國家科學委員會之支助下辦理本研究。

材料與方法

(一) 試驗期間

自 83 年二期作至 85 年一期作止。

(二) 試驗地點

試驗地點分別設於花蓮縣吉安鄉及富里鄉之水稻田，面積各為 0.1 公頃，內設四個採樣點。

(三) 試驗處理

吉安試區分為稻草掩埋區（稻草之使用量為 5 tons/ha，稻草掩埋前先切成 5cm 長，於插秧前 14 天耕犁翻入土中）及稻草移除區兩種處理；富里試區分為高氮區（一期作 N 150kg/ha，二期作 120kg/ha）及低氮區（一期作 N 120kg/ha，二期作 N 90kg/ha）兩種處理。

(四) 土壤特性

兩試驗區土壤之理化性經分析如表一所示，吉安試區土壤為片岩石灰性沖積土，屬吉安系，質地為粉質壤土，pH 為 7.3 7.9 之間，有機質含量為 2.3 3.1%，游離性鐵為 123 1,551ppm，易還原性錳為 191 262ppm。富里試區為片岩混合粘板岩老沖積土，pH 為 4.8 5.2 之間，有機質含量為 2.1 2.5%，游離性鐵為 1,024 1,438ppm，易還原性錳為 64 88ppm。

表一、試驗後稻田土壤化學性質分析資料

Table 1. Chemical properties of the paddy soil after experiments

Crop season	Location	Treatment	pH	OM (%)	----- (ppm) -----		
					P	K	Ca
2nd crop 1994	Chian	Without straw	7.6	2.0	1.7	14.4	2756
		Straw incorporated	7.7	2.3	4.8	15.7	2765
	Fuli	N 90 kg/ha	5.4	1.7	5.4	71.2	510
		N 120 kg/ha	5.5	2.2	5.8	85.5	555
1st crop 1995	Chian	Without straw	7.8	1.9	4.0	13.4	4355
		Straw incorporated	7.9	2.3	5.3	12.8	4438
	Fuli	N 120 kg/ha	5.7	2.5	65.0	125.0	1241
		N 150 kg/ha	5.6	2.8	50.0	228.0	1543
2nd crop 1995	Chian	Without straw	7.6	2.3	10.0	16.9	5920
		Straw incorporated	7.7	2.7	30.0	21.4	5614
	Fuli	N 90 kg/ha	5.2	2.1	14.6	38.3	471
		N 120 kg/ha	5.1	2.3	17.5	39.5	490
1st crop 1996	Chian	Without straw	7.5	2.4	25.0	14.3	4930
		Straw incorporated	7.3	3.1	31.3	15.5	4522
	Fuli	N 120 kg/ha	4.8	2.4	18.8	47.2	654

		N 150 kg/ha	4.9	2.5	20.0	47.9	462
--	--	-------------	-----	-----	------	------	-----

表一、試驗後稻田土壤化學性質分析資料

Table 1. Chemical properties of the paddy soil after experiments

Crop season	Location	Treatment	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
			----- (ppm) -----				
2nd crop 1994	Chian	Without straw	125	23	353	4.0	2.1
		Straw incorporated	135	332	423	22.6	8.4
	Fuli	N 90 kg/ha	63	1133	63	9.6	6.6
		N 120 kg/ha	74	1324	76	15.1	11.1
1st crop 1995	Chian	Without straw	70	76	263	0.8	1.2
		Straw incorporated	83	76	263	0.8	1.2
	Fuli	N 120 kg/ha	51	78	139	8.0	5.4
		N 150 kg/ha	80	91	160	7.8	5.0
2nd crop 1995	Chian	Without straw	91	123	214	0.5	2.9
		Straw incorporated	77	232	191	2.8	5.7
	Fuli	N 90 kg/ha	61	1024	64	8.4	7.5
		N 120 kg/ha	72	1137	75	9.6	8.9
1st crop 1996	Chian	Without straw	108	406	262	20.7	2.6
		Straw incorporated	113	1551	248	20.3	9.1
	Fuli	N 120 kg/ha	88	1438	79	10.4	8.4
		N 150 kg/ha	86	1361	88	10.7	9.2

(五) 田間管理

1. 吉安試區 83 年第 2 期作之供試水稻品種為台梗 4 號，7 月 25 日灌水整地，8 月 1 日插秧，於 11 月 25 日收穫，施肥方式係依農民慣行之方式施肥，三要素施用量 N:P₂O₅:K₂O 為 110:60:60 kg/ha。水分管理方式，於插秧後一個月內田間保持湛水狀態，插秧後 35 天進行排水曬田。曬田後，約每週灌水一次，至收穫前一週停止。84 年第 1 期作供試水稻品種為台梗 6 號，於 2 月 20 日灌水整地，2 月 27 日插秧，7 月 8 日收穫，三要素施用量 N:P₂O₅:K₂O 為 120:60:60 kg/ha，其他田間栽培管理與前同。84 年第 2 期作供試品種為台梗 4 號，8 月 5 日灌水整地，8 月 12 日插秧，於 12 月 4 日收穫，其他田間管理與 83 年第 2 期作同。85 年第 1 期作供試品種為台梗 4 號，2 月 1 日灌水整地，2 月 8 日插秧，7 月 4 日收穫，其他田間管理與 84 年第 1 期作同。

2.富里試區 83 年第 2 期作，供試水稻品種為台梗 6 號，於 7 月 28 日灌水整地、8 月 11 日插秧，12 月 13 日收穫。三要素施用量為氮素肥料分為二級，即 120 及 90 kg N/ha（二期作），與 150 及 120 kg N/ha（一期作），磷鉀 $P_2O_5:K_2O$ 為 60:60 kg/ha。水分管理方式，於插秧後一個月內，田間保持湛水，插秧後 30 天進行曬田。曬田後每 7-10 天灌水一次，至收穫前 10 天停止。84 年第 1 期作供試水稻品種為台梗 8 號，於 1 月 25 日灌水整地，2 月 12 日插秧，7 月 13 日收穫，其它田間管理與前期相同。84 年第 2 期作，供試水稻品種為台梗 4 號，於 8 月 6 日灌水整地，8 月 13 日插秧，12 月 10 日收穫，其他田間管理與 83 年第 2 期作同。85 年第 1 期作，供試水稻品種為高雄 139 號，於 2 月 8 日湛水整地，2 月 15 日插秧，7 月 13 日收穫，其他田間管理與 84 年第 1 期作同。

（六）田間氣體採樣

- 1.田間採集氣體裝置：採用密閉盒靜置採氣方式(Huang,1989)，將逸釋之土壤氣體收集，供採樣分析。其裝置為無底之壓克力質材製成之盒子，其底部之面積大小可以罩住四叢水稻為原則，以目前之行株距，其底部大小為 40cm×60cm，但高度隨水稻生長期分為 50cm 及 100cm，頂部開小孔，塞入橡膠塞並連接矽膠管，伸入採氣盒中，其長度為採氣盒高度之一半，以便採取均勻代表性之氣體。
- 2.土壤甲烷釋出率分析採樣：採隨機排列之方式將採樣盒插入試區土中數公分並靜置，以收集土壤釋出氣體，俟數分鐘平衡後即以注射筒採集第一氣樣，約經半小時後採第二次氣樣，約過 1 小時採第三次氣樣，同時記錄時間，氣體帶回實驗室以氣相層析儀(GC)附裝火燄離子檢定器(Flame Ionized Detector)分析其甲烷濃度，再予計算出土壤甲烷之釋出率，每處試驗區設四採樣點，每點每次取 4 重複。於插秧後主要生育時期約每隔 2-3 週中選擇一天採樣之，採樣時間為清晨 6-8 時及中午 12-14 時，共採氣樣二次。
- 3.田間狀況調查：於每次赴田間採氣之同時，記錄表土深度 5cm 處之土溫、水溫、氣溫、浸水狀況。

（七）實驗室分析

- 1.田間氣樣甲烷分析方法：田間採取攜回氣體樣本以氣相層析儀 Hitachi 163 附火燄離子檢定器分析之，分析管柱為 3m 長之 propark Q，攜帶氣體為氮氣，分析條件 N_2 、空氣、 H_2 之流速分別為 26、595、38 ml/min，注入器及分析管柱之溫度條件分別為 110 及 60。氣體之注入量 0.3 ml，滯留時間 57 秒。與已知甲烷濃度之標準氣體比較之，可求出樣品甲烷的濃度。
- 2.甲烷釋出率：由田間採得之氣樣，經分析其濃度，可由公式計算甲烷之釋出率， $F=(V/A)(C_2/C_1)(t_2-t_1)$ ，F 為產氣率，V 與 A 分別為採樣盒體積及底面積， C_2 為兩次採樣之甲烷氣體濃度差即濃度增加量， t_2-t_1 為兩次採樣時間之差值。
- 3.水田土壤理化性質分析：
 - (1)質地：比重計法
 - (2)pH：玻璃電極法（水：土 = 1：1）。

(3)有機質：Walkley-Black 氏氧化法。

(4)游離性鐵($Fe_2O_3\%$)：0.3MSodiumCitrate 與 $1MNaHCO_3$ 萃取(6:1)，再以原子吸光儀測定。

(5)易還原性錳：以 1N 中性 NH_4OAc -Hydroquinone 液萃取(10:1)，再以原子吸光儀測定。

結果與討論

(一) 試驗區水稻生育調查

吉安試區為片岩沖積土，土壤質地屬坩質壤土，坩粒含量高達 65%，pH 值為 7.3 - 7.9，典型之石灰性土，排水性良好，於插秧後調查植株之株高、分蘖、穗數及乾物重，其結果如表二。乾物重係於成熟期將水稻之地上部包括稻穀及稻草割取後置於 70℃ 熱風循環烘箱中烘乾 72 小時後秤重所得。結果顯示，開始試驗第一年第一作稻草掩埋區之株高較移除區略高，但分蘖數則略低，而乾物重則減少 3.3%。第二作分蘖盛期，稻草掩埋區之水稻生長情形（株高與分蘖數）較稻草移除區為佳，然而，成熟期之株高與穗數，稻草掩埋區則略遜於稻草移除區。第二年之第一作，稻草掩埋區之水稻初、中期生長（分蘖盛期），其株高與分蘖數均較稻草移除區為佳，但在乾物重方面，前者仍較後者減少 8.8%。第二年之第二作，水稻之生育情形，對於稻草掩埋之反應與第一年相類似，亦即株高、分蘖數及乾物重均差異不大。稻草為一種碳氮比甚大（約 60:1）之有機物，掩埋後在土壤中分解時常發生土壤缺氮（氮素剝奪）及有機碳化合物（如短鏈脂肪酸）之過剩而影響水稻生長之現象，此又以第一次掩埋及夏天高溫時最為明顯，若能連續掩埋，此一減產逆境則逐漸改善，數作後掩埋稻草區才有增產之現象出現。

富里試區位於吉安試區之南方，兩地相距遠達約 120 km，其氣候屬熱帶圈。該試區為片岩混有少量粘板岩之老沖積土，土壤質地為壤土，粘粒、坩粒及砂粒之含量大約相當，但 pH 值則較低，約為 4.8 - 5.8，排水性良好，該地區氮肥之施用量一般第二期作約為 100 kg N/ha，而第一期作則為 140 kg N/ha，為瞭解氮肥施用量對稻田土壤甲烷產生及逸釋之影響，富里試區之氮素施用量分為二級處理，第二期作為 90 及 120 kg N/ha，第一期作則為 120 及 150 kg N/ha。水稻之生長情形調查結果顯示，第一年與第二年富里試區第二期作高氮區之株高與低氮區相當，分蘖方面則比低氮區多 0.3 - 3 支，但高氮區之乾物重反而較低氮區略低。一期作水稻之生育情形，高氮區與低氮區比較之結果與第二期作相似。但在乾物重方面，高氮區則略高於低氮區。顯示施用多量氮素肥料其生育外觀似較佳，但乾物重並不一定較高。

由兩個試區水稻之生育情形顯示，83 年二期作與 85 年一期作水稻未受災害影響生長頗為正常。

表二、試驗區水稻生育調查

Table 2. Agronomic traits of rice plant at two experimental plots

Crop	Location	Treatment	Active tillering
------	----------	-----------	------------------

season			Plant height (cm)	Tiller (no./hill)
2nd crop 1994	Chian	Without straw	54.6	15.5
		Straw incorporated	55.4	13.9
	Fuli	N 90 kg/ha	59.3	16.8
		N 120 kg/ha	68.6	17.1
1st crop 1995	Chian	Without straw	75.7	11.9
		Straw incorporated	81.4	13.1
	Fuli	N 120 kg/ha	68.3	16.3
		N 150 kg/ha	74.6	17.7
2nd crop 1995	Chian	Without straw	42.0	14.0
		Straw incorporated	46.0	15.0
	Fuli	N 90 kg/ha	57.9	18.8
		N 120 kg/ha	60.0	19.9
1st crop 1996	Chian	Without straw	43.6	18.3
		Straw incorporated	45.8	17.0
	Fuli	N 120 kg/ha	57.0	18.7
		N 150 kg/ha	57.3	19.6

表二、試驗區水稻生育調查

Table 2. Agronomic traits of rice plant at two experimental plots

Crop season	Location	Treatment	Maturing		
			Plant height (cm)	Tiller (no./hill)	Wt. of dry matter (g/hill)
2nd crop 1994	Chian	Without straw	74.9	17.4	49.3
		Straw incorporated	75.0	16.4	47.7
	Fuli	N 90 kg/ha	100.5	17.1	64.9
		N 150 kg/ha	107.7	20.1	64.1
1st crop 1995	Chian	Without straw	99.8	13.4	52.8
		Straw incorporated	98.8	12.9	51.6
	Fuli	N 90 kg/ha	100.8	18.3	64.0
		N 150 kg/ha	105.4	21.6	63.3

2nd crop 1995	Chian	Without straw	82.0	14.0	58.3
		Straw incorporated	83.0	14.0	51.3
	Fuli	N 90 kg/ha	85.5	17.6	65.8
		N 150 kg/ha	84.9	20.6	63.1
1st crop 1996	Chian	Without straw	91.8	21.9	50.9
		Straw incorporated	91.1	20.0	50.2
	Fuli	N 90 kg/ha	103.4	20.1	63.5
		N 150 kg/ha	107.6	21.5	64.7

(二) 稻草移除與掩埋對稻田土壤甲烷逸釋之影響

稻草是生產稻穀之副產物，細長強韌，富含有機物可供為動物之飼料、褥草，編織草袋、草繩、草蓆，洋菇栽培堆肥之材料，栽培作物畦面覆蓋土表時，具有保水、保溫之功能，且可防止沖蝕，又可當作燃料，用途甚廣，但近年來稻草之用途有許多競爭之代替用品，且因其體積膨鬆龐大，收集費工，運搬費用高，若棄置於田面，將形成後續期作整地栽培時之障礙物。目前稻草之處理方式以燃燒與掩埋最為普遍，由於燃燒產生大量煙霧，造成空氣污染，亦易引起交通事故，而且有有機物與部分氮磷營養元素因燃燒而損失，形成資源浪費而常遭詬病，為顧及處理之必要性及符合環保之要求，因此稻草之處理目前推荐於收穫斬切後直接掩埋入土為主。

稻草之產量約與稻穀相當，掩埋後經土壤微生物之分解，複雜之有機物經過多次之分解遂成為簡單之有機化合物，最終產物則為水、二氧化碳、甲烷等。

吉安試區包括稻草移除與掩埋區處理之甲烷逸釋量如表三。其結果顯示，二期作稻草移除區之稻田土壤甲烷逸釋量 1994 年從 4 至 273 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均為 90 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，1995 年從 0 至 2450 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均為 809 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，而稻草掩埋區 1994 年則從 29 至 5342 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均為 1086 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，1995 年從 189 至 12254 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均為 2639 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ 。顯見稻草掩埋與否二者甲烷逸釋量相差甚多，掩埋區較移除區 1994 及 1995 年分別增加 1106% 與 226% 之多。

二期作稻田甲烷之逸釋量插秧後即可測得相當之量，並以水稻分蘖盛期為最多，隨著水稻進入成熟期而漸減，清晨測得之甲烷量遠較中午為低。1995 年一期作稻草移除區之逸釋量從 0 至 1889 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均為 832 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，1996 年從 0 至 1993 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均為 494 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，而稻草掩埋區 1995 年則從 0 至 2256 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均為 989 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，1996 年從 0 至 4683 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，平均 961 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，二者相差雖較二期作為小，但掩埋區較移除區增加，1995 年為 18%，1996 年則達 94%，兩年平均 56%。一期作稻田甲烷之逸釋量隨水稻之生長而增多，在插秧後二天之測定值不論是移除區或掩埋區均無法檢測，而插秧後一個月內所測得之數值仍相當低，甲烷之逸釋量在幼穗形成期至抽穗期時，始有明

顯之增加，但遠較二期作低得多。清晨之測定值多較中午為低，此一趨勢在稻草移除區與掩埋區均有相似之情形。

表三、稻草掩埋試驗（吉安）水稻主要生育期稻田甲烷之釋放量（單位： $\mu\text{g CH}_4/\text{hr} \cdot \text{m}^2$ ）

Table 3. Methane emission of different growth stages at Chian paddy field with straw incorporate trial (unit: $\mu\text{g CH}_4/\text{hr} \cdot \text{m}^2$)

Crop season	Treatment	Transplanting		Active tillering		Panicle initialing	
		Early morning	Noon	Early morning	Noon	Early morning	Noon
2nd crop 1994	Without straw	188	255	19	57	32	273
	Straw incorporated	3872	5342	43	116	182	1041
1st crop 1995	Without straw	0	9	19	51	806	1790
	Straw incorporated	0	31	24	87	792	2016
2nd crop 1995	Without straw	42	267	2013	399	552	386
	Straw incorporated	208	241	12254	9091	189	806
1st crop 1996	Without straw	0	0	0	42	0	0
	Straw incorporated	0	83	0	100	141	374

表三、稻草掩埋試驗（吉安）水稻主要生育期稻田甲烷之釋放量（單位： $\mu\text{g CH}_4/\text{hr} \cdot \text{m}^2$ ）

Table 3. Methane emission of different growth stages at Chian paddy field with straw incorporate trial (unit: $\mu\text{g CH}_4/\text{hr} \cdot \text{m}^2$)

Crop season	Treatment	Heading		Maturing		Average
		Early morning	Noon	Early morning	Noon	
2nd crop 1994	Without straw	4	31	10	32	90
	Straw incorporated	42	29	75	116	1086
1st crop 1995	Without straw	1014	1859	1889	880	832
	Straw incorporated	414	1792	2256	2472	989
2nd crop 1995	Without straw	232	2450	0	1748	809
	Straw incorporated	300	1934	382	989	2639
1st crop 1996	Without straw	166	1933	1416	1383	494
	Straw incorporated	4683	917	1850	1458	961

（三）氮肥施用量對稻田土壤甲烷逸釋之影響

台灣地區土壤氮素含量均甚低，施用氮肥為增加農作物產量之最有效途徑。施用氮肥可促進農作物之生長，增加土壤中之有機物，包括根泌物、老化及脫落之根表皮細胞等，均可供為微生物生活分解之碳源。水田施用氮肥之種類主要為尿素與硫酸銨，此二種氮肥之銨在水田中可經硝化作用而形成硝離子或亞硝離子，與硫酸銨之副成分硫酸根，上述三種陰離子在氧化還原電位變化中均扮演著重要之角色，可直接或間接影響甲烷之產生與逸釋，因此，富里試區設有二個氮肥用量之副區，以便比較不同氮肥用量對於稻田甲烷逸釋之影響。

二期作氮肥不同施用量對水稻田甲烷逸釋量之影響，經田間採樣測定其結果如表四顯示：稻田甲烷之逸釋量在每公頃 90kg N 之施用下，1994 年從 15 至 25,827 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 4,340 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，1995 年從 0 至 31,332 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 8,436 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，而 120kg N/ha 區 1994 年則從 33 至 38,221 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 7,481 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，1995 年從 0 至 101,820 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 16,795 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，顯示高氮區之甲烷逸釋量遠較低氮區為高。一期作稻田甲烷之逸釋量在 120kg N/ha 之施用下，1995 年從 168 至 8,623 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 2571 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，1996 年從 234 至 17315 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 4548 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，而 150kg N/ha 1995 年則從 486 至 13223 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 4029 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，1996 年從 100 至 28,365 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，平均為 6851 $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ，顯示高量氮肥施用區稻田之甲烷逸釋量比低氮區為高。若單以二期作而言，1994 年高氮區較低氮區增加 72%，1995 年增加 99%，兩年平均 85.5%，另就一期作而言，1995 年前者較後者增加 56.7%，1996 年則增加 50.6%，兩年增加 53.6%。富里試區二期作不同水稻生育情形之甲烷逸釋量，顯示以水稻生長初期較高，隨後節節降低，而一期作則較不一致，但可看出在水稻分蘖盛期以後之逸釋量較多，生育初期與成熟期均較少。

表四、氮肥施用量試驗（富里）水稻主要生育期稻田甲烷之釋放（單位： $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ）

Table 4. Methane emission of different growth stages at Fuli paddy field with nitrogen application trial (unit: $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$)

Crop season	Treatment (kg N/ha)	Transplanting		Active tillering		Panicle initialing	
		Early morning	Noon	Early morning	Noon	Early morning	Noon
2nd crop 1994	90	1608	25827	2126	10600	206	2828
	120	1401	38221	4474	27545	382	1781
1st crop 1995	120	3438	168	911	8623	3248	5952
	150	5179	590	486	13223	6134	7173
2nd crop 1995	90	5758	15024	31332	27223	380	1878
	120	3199	5932	51264	101820	498	2008
1st crop	120	516	234	4816	3949	17315	14849

1996	150	666	100	6933	4016	28365	24982
------	-----	-----	-----	------	------	-------	-------

表四、氮肥施用量試驗（富里）水稻主要生育期稻田甲烷之釋放（單位： $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ）

Table 4. Methane emission of different growth stages at Fuli paddy field with nitrogen application trial (unit: $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$)

Crop season	Treatment	Heading		Maturing		Average
		Early morning	Noon	Early morning	Noon	
2nd crop 1994	90	91	56	44	15	4340
	120	483	420	66	33	7481
1st crop 1995	120	737	1291	482	863	2571
	150	703	966	3755	2081	4029
2nd crop 1995	90	599	1166	0	999	8436
	120	666	849	0	1716	16795
2nd crop 1996	120	933	466	1233	1166	4548
	150	566	783	399	1699	6851

（四）試驗田田間之溫度測定及一日中稻田甲烷釋放率之變化

試驗期間測定水稻田田間之氣溫、地溫與水溫，以便瞭解溫度對甲烷逸釋之影響，結果（表五及六）顯示，第二期作水稻生育初期之溫度較高，爾後逐漸降低，而一期作之溫度變化則與第二期作相反。三種測定溫度中，以地溫最為穩定，氣溫與水溫在清晨與中午時段之變化最大。甲烷測定結果，顯示第二期作插秧後即測得高量，隨後則逐漸低降，而一期作插秧後，甲烷之逸釋量低，甚至為不可檢測，爾後才逐漸增加。此外，中午時段之測值亦顯然高於清晨，可證明甲烷之產生與逸釋與溫度有密切之關係。

一日中稻田甲烷之釋放率經三次實地採樣測試，結果如表七，顯示其最高量二次出現於中午 12 時，一次出現於下午 1 時，亦得知稻田甲烷之釋放率受溫度（氣溫、地溫與水溫）之影響甚大。

表五、吉安試區水稻各生育期田間溫度之變化（單位： $^{\circ}\text{C}$ ）

Table 5. Temperature of different growth stages at Chian paddy field (unit: $^{\circ}\text{C}$)

Rice growing stage		2nd crop, 1994			1st crop, 1995		
		Air	Water	Soil	Air	Water	Soil
Transplanting	EM	24.5	27.5	28.0	14.7	15.5	16.3
	N	31.2	37.0	26.0	19.5	20.8	18.7
Active tillering	EM	24.6	24.5	26.5	19.5	20.2	21.2

	N	31.2	40.0	34.0	18.7	20.0	20.5
Panicle initialing	EM	23.2	22.5	23.5	21.4	21.7	22.8
	N	30.1	26.0	27.0	29.9	36.2	28.6
Heading	EM	22.6	22.2	23.3	19.3	20.3	21.5
	N	26.2	28.2	26.1	22.2	22.7	22.3
Maturing	EM	21.4	21.5	22.0	23.7	24.5	24.0
	N	25.0	22.1	22.5	25.7	28.0	26.5

表五、吉安試區水稻各生育期田間溫度之變化（單位： ）

Table 5. Temperature of different growth stages at Chian paddy field (unit:)

Rice growing stage		2nd crop, 1995			1st crop, 1996		
		Air	Water	Soil	Air	Water	Soil
Transplanting	EM	27.2	23.6	24.0	9.6	9.8	12.0
	N	32.8	37.3	30.7	24.8	28.0	17.5
Active tillering	EM	24.6	24.6	27.5	17.7	18.3	17.7
	N	26.8	26.5	25.5	25.0	29.4	23.8
Panicle initialing	EM	20.0	21.2	21.4	17.6	16.5	17.5
	N	22.8	24.4	22.6	21.5	26.3	21.8
Heading	EM	22.2	21.8	24.5	19.2	20.8	21.2
	N	27.8	20.8	26.5	18.4	21.0	21.2
Maturing	EM	20.2	19.4	20.0	27.5	24.6	25.3
	N	19.7	20.0	20.0	30.6	31.8	27.0

EM: Early morning, N: Noon.

表六、富里試區水稻各生育期田間溫度之變化（單位： ）

Table 6. Temperature of different growth stages at Chian paddy field (unit:)

Rice growing stage		2nd crop, 1994			1st crop, 1995		
		Air	Water	Soil	Air	Water	Soil
Transplanting	EM	24.6	24.0	26.0	14.5	14.6	15.0
	N	30.1	38.5	32.5	13.8	14.5	15.0
Active tillering	EM	23.8	24.0	26.0	19.7	19.8	22.2
	N	30.5	39.0	33.0	32.3	35.5	24.6
Panicle initialing	EM	19.7	21.2	22.0	18.8	20.4	23.3

	N	27.6	29.0	27.0	27.4	28.0	24.3
Heading	EM	23.0	22.5	24.2	18.3	20.2	21.3
	N	29.2	29.7	27.0	20.2	22.3	23.0
Maturing	EM	15.5	16.4	17.0	22.8	23.0	26.0
	N	25.8	23.8	21.5	32.5	33.6	27.2

表六、富里試區水稻各生育期田間溫度之變化 (單位:)

Table 6. Temperature of different growth stages at Chian paddy field (unit:)

Rice growing stage		2nd crop, 1995			1st crop, 1996		
		Air	Water	Soil	Air	Water	Soil
Transplanting	EM	20.2	22.7	25.1	12.8	12.2	15.6
	N	28.1	33.7	29.0	19.8	20.7	17.0
Active tillering	EM	23.5	24.7	26.2	16.9	19.0	22.0
	N	30.5	30.6	29.3	31.4	35.2	24.0
Panicle initialing	EM	21.8	22.8	23.0	18.0	19.2	21.8
	N	30.8	32.0	26.8	30.0	28.8	23.0
Heading	EM	18.9	20.3	22.4	22.2	22.8	23.5
	N	27.6	28.0	24.9	21.8	23.6	23.8
Maturing	EM	14.9	15.7	19.5	24.1	24.6	26.8
	N	22.5	19.6	19.8	36.8	29.3	28.9

EM: Early morning, N: Noon.

表七、稻草掩埋試驗 (吉安) 一日中稻田甲烷之釋放 (單位: $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$)

Table 7. Diurnal variation of methane emission at Chian paddy field with straw incorporate trial (unit: $\mu\text{g CH}_4/\text{hr}\cdot\text{m}^2$)

Time	1st crop, 1995		2nd crop, 1995		1st crop, 1996	
	Without straw	Straw incorporated	Without straw	Straw incorporated	Without straw	Straw incorporated
6am	552	189	600	2108	166	4683
9am	737	316	4333	1033	533	4583
12am	386	806	8933	15266	1933	917
3pm	633	1228	2366	3066	267	933
6pm	760	398	3633	2933	0	0

9pm	575	313	1199	4533	967	1000
-----	-----	-----	------	------	-----	------

(五) 不同深度稻田土壤甲烷產生率之影響

經實地採樣測試結果如表八所示，稻田土壤甲烷之產生率以土壤深度 3-6cm 者為最多，0-3cm 者次之，6-9cm 者較少，此與水稻之根圈位置有密切關係(Huang,1989)，惟田間測定數據較少，尚待進一步之試驗與証實。

表八、稻草掩埋試驗（吉安）不同土壤深度對稻田土壤甲烷產生率之影響（單位：μg CH₄/kg soil.hr）

Table 8. Methane emission of different soil depth at Chian paddy field with straw incorporate trial (unit: μg CH₄/kg soil.hr)

Rice growing stage	Depth (cm)					
	Without straw			Straw incorporated		
	0-3	3-6	6-9	0-3	3-6	6-9
Active tillering	7.90	10.62	4.12	773.89	129.16	60.24
Panicle initialing	35.57	108.40	96.38	179.13	192.20	67.93
Heading	28.97	22.64	27.75	119.51	112.52	77.65
Maturing	59.61	224.84	142.16	395.99	256.78	415.50

結論

- 經由 83 年二期作至 85 年一期作之田間測定結果顯示，台灣東部地區稻田之甲烷逸釋量，吉安試驗區二期作稻草移除區（一般耕作體系）兩年之數據平均為 449.5μg CH₄/hr.m²，如果以生育日數 116 天計算，全期之釋放量估計為 12,514g CH₄/ha，而一期作為 663μg CH₄/hr.m²，如以生育日數 145 天計算，則全期之釋放量估計為 23,072g CH₄/ha，雙期作水田全年種植水稻二個期作，其甲烷在水稻生育期間釋放量共為 35,586g CH₄/ha。富里試區甲烷逸釋量二期作施用氮肥 90kg N/ha 之情況下，則甲烷逸釋量兩年平均為 6,388μg CH₄/hr.m²，如果以當地生育日數 123 天計算，全期之釋放量估計為 188,573g CH₄/ha。而一期作施用氮肥量為 120 N kg/ha，其甲烷之逸釋量兩年平均 3,559μg CH₄/hr.m²，如以生育日數 150 天計算，則全期之釋放量為 128,124g CH₄/ha，估計全年水稻田之甲烷釋放量為 316,697g CH₄/ha。吉安與富里兩地相距約 120km，而氣候條件與土壤之性質迥異，在一般水稻栽培管理情況下，富里試區稻田土壤之甲烷逸釋量較吉安試區則高出達 13.7 倍之多，顯示甲烷之逸釋率受土壤與氣候之因素影響甚大。
- 從吉安及富里兩個試區二年四期作之調查結果顯示，稻草掩埋區稻田之甲烷逸釋量確較稻草移除區者為高，增加率平均為 36.1%。高氮量區稻田之甲烷逸釋量亦較低氮區者為高，增加率平均為 69.7%。清晨測定值多較中午之測定值為低，經查其溫度包括地溫、氣溫與

水溫均有明顯之不同，亦即清晨之溫度均較中午為低，可能是造成甲烷產生與逸釋量增減之主因。第二期作水稻生育期間之溫度係由高而低，其甲烷之測定值亦隨之改變，而第一期作則相反，第二期作於水稻插植後即可測得大量之甲烷，而第一期作甲烷之逸釋量在水稻生長初期所測得之數值則是非常低或無法檢測，明顯與溫度有密切之關係，此一溫度之效應頗值得再詳加探討。

- 3.富里試區甲烷之釋放率，第二期作平均為 $6.38 \text{ mg CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，第一期作為 $3.56 \text{ mg CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，較吉安試區第二期作之 $0.45 \text{ mg CH}_4/\text{hr.m}^2$ ，及第一期作之 $0.66 \text{ mg CH}_4/\text{hr.m}^2$ 為高，二者相差極大，水稻產量富里試區較吉安試區為高，土壤性質一為片岩與粘板岩混合沖積土，另一為片岩沖積土，pH 與質地均相差甚大，甲烷之產生與釋放，顯受氣候、土壤與水稻生育之影響，則有待進一步探討。
- 4.不論第一期作或第二期作，稻草掩埋處理均比稻草移除者產生與釋放較多量之甲烷，稻草掩埋確實可增加甲烷之產生與釋放量，但吉安試驗區之數值均較低，尚無法評估到底稻草中有機碳化合物究有多少之碳轉變為甲烷。
- 5.不論第一期作或第二期作，增施氮肥處理區之甲烷釋放率均較一般（推荐）氮肥施用區為高，兩者相差平均達 69.7%，而稻穀之產量並未明顯增加，顯見稻田水稻栽培依推荐量施肥，不但可提高肥料效率且可減少甲烷之釋逸，有待積極利用此結論教導農民採用合理施肥，一方面可減少施肥量，節省能源並可減少因種植水稻而產生對大氣變遷之壓力。
- 6.一日中稻田甲烷之逸釋量以中午時分最多，晚間與清晨較少，再度證明甲烷之釋放與溫度有密切相關。
- 7.稻田土壤甲烷之產生率，以土壤深度 3-6cm 處為最多，0-3cm 次之，而 6-9cm 較少，此與水稻根圈之位置有關。

參考文獻

- 1.台灣省政府農林廳 1996 台灣農業年報（民國 85 年版）p.24-39.台灣省政府印刷廠。
- 2.Armstrong, J. and W. Armstrong. 1988. A preliminary study of soil oxidizing sited internal gas transport pathways. *New Phytol.* 108: 373-382.
- 3.Bartlett, K.B., D.S. Bartlett, R.C. Harriss and D.I. Sebacher.1987. Methane emissions along a salt marsh salinity gradient. *Biogeochemistry* 4:183-202.
- 4.Blake, D.R. and F.S. Rowland. 1988. Continuing world wide increase in tropospheric methane. 1978-1987. *Science* (Washington, D.C.). 239: 1129-1131.
- 5.Bouwnan, A.F. 1991. Agronomic aspects of wetland rice cultivation and associated methane emission. *Biochemistry* 15:65-88.
- 6.Burke, L.M.and D.A. Lashof. 1990. Green house gas emissions related to agriculture and land-use practice. In: B. A. Kimball(ed.). *Impact of Carbon Dioxide, Trace Gases, and Climate Change on Global Agriculture*. ASA Spec. Pub. 53, ASA, CSSA, and SSSA, P.27-43. Madison,WI.

7. Conard, R. and F. Rothfuss. 1991. Methane oxidation in the soil surface layer of a flooded rice field and the effect of ammonium. *Biol. Fertil. Soils* 12:28-32.
8. Dickinson, R.E. and R. J. Cicerone. 1986. Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature* 319:109-115.
9. Ehleringer, D.H. and U. Schmidt. 1978. Sources and sinks of atmospheric methane. *PAGEOPH* 116:452-464.
10. Frenzel, P., F. Rothfuss and R. Conrad. 1992. Oxygen profiles and methane turnover in a flooded rice microcosm. *Biol. Fertil. Soils* 14:84-89.
11. Greenwood, D.J. and D. Boodman. 1964. Oxygen diffusion and aerobic respiration in soil spheres. *J. Sci. Food Agric.* 15:579-588.
12. Holzappel-Pschorn, A. and W. Seiler. 1986. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. *J. of Geophysical Research* 91:11803-11814.
13. Huang S.N. 1989. Production and emission of methane from experimental paddy soils. *Taichung DAIS, Special Publ.* 20:16.
14. Inoko, A. 1984. Compost as a source of plant nutrients. In: *Organic Matter and Rice*. IRRI, Los Banos. Laguna.
15. Jacobsen, P., W.H. Patrick Jr. and B.G. Williams. 1981. Sulfide and methane formation in soils and sediments. *Soil Science* 132:279-287.
16. Kimura, M., T. Minoda and J. Murase. 1993. Water-soluble organic materials in paddy soil ecosystem. Effects of temperature on contents of total organic materials, organic acids, and methane in leachate from submerged paddy soils amended with rice straw. *Soil. Sci. Plant Nutr.* 39(4): 713-724.
17. Lindau, C.W., P.K. Bollich, R.D. Delaune, A.R. Mosier and K.F. Bronson. 1993. Methane mitigation in flooded Louisiana rice fields. *Biol. Fertil. of Soils*. 15:174-178.
18. Manabe, S. and R.T. Wetherald. 1987. Large scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. *J. of Atmospheric Science* 44:1211-1235.
19. Ponnampetuna, F.N. 1985. Chemical kinetics of wetland rice soils relative to soil fertility. P.71-89. In: *Wetland Soils: Characterization, Classification and Utilization*. Proceedings of Workshop IRRI. 1984. IRRI. Los Banos.
20. Ramanathan, V., R.J. Cicerone, H.B. Singh and J.T. Kiehl. 1985. Trace gas trends and their potential role in climatic change. *J. of Geophysical Research* 90:5547-5566.
21. Seiler, W., A. Holzappel-Pschorn, R. Conrad and D. Scharffe. 1984. Methane emission from rice paddies. *J. of Atmos. Chem.* 1:241-268.
22. Wang, W.C., Y.L. Yung, A.A. Lacis, T. Mo and J.E. Hansen. 1976. Green house effects due to man-made perturbations of trace gases. *Science* 194:685-690.

23. Wang, Z.P., R.D.Delaune, P.H. Masscheleyn and W.H. Patrick, Jr. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:382 385.
24. Yagi, K.and K, Minami.1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36:599 610.