

九十二年度環保署/國科會空污防制科研合作計畫
期末報告

農牧部門溫室氣體排放量測與監測技術之研究--台灣地區現行

耕作制度對水稻田和旱田甲烷氣體排放減量之影響

**Effects of Current Cultivation Systems on Flux and Mitigation of
Methane from Paddies and Uplands in Taiwan (I)**

計畫類別：整合型計畫

執行單位：嘉南藥理科技大學、行政院農委會台南區農業改良場

計畫編號：92NSC-EPA-Z-041-001

執行期間：92年4月1日至92年12月31日

計畫總主持人：楊盛行（台灣大學生化科技系）

子計畫主持人：劉瑞美（嘉南藥理科技大學環境資源管理系）

研究人員：陳世雄（嘉南藥理科技大學環境資源管理系）

陳文雄（行政院農委會台南區農業改良場）

林經偉（行政院農委會台南區農業改良場）

聯絡方式：台南縣仁德鄉二仁路一段60號

嘉南藥理科技大學環境資源管理系

TEL：(06)2660035 FAX：(06)2660606

E-Mail:mrmliou@mail.chna.edu.tw

中華民國九十二年十二月三十一日

目 錄

摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
一、前言.....	3
二、文獻探討.....	5
三、材料與方法.....	10
四、結果與討論.....	14
五、結論與建議.....	17
六、對空污防治之重要成效.....	19
七、參考文獻.....	21

中文摘要

本子計畫與其他子計畫共同進行探究「台灣地區現行耕作制度對水稻田和旱田甲烷排放減量之影響(I)」，分別於台灣北部(桃園區農業改良場，主要由子計畫三負責)，中部(台南區農業改良場嘉義分場，主要由子計畫二負責)，與南部(高雄區農業改良場旗南分場，主要由子計畫三負責)等農業試驗單位，進行現行不同耕作制度對水稻田和旱田甲烷排放減量之影響。希能由不同耕作制度對水旱田溫室氣體排放量之影響研究中，獲致合理的田間管理技術，提供農業栽培下良好之溫室氣體減量技術，透過農政單位之宣導與推廣，有效將減量技術落實於我國之田間管理上。所進行之三種耕作制度為水田-水田、水田-旱田、旱田-旱田。在2003年第二期稻作之結果顯示，台灣北部之水田-水田、水田-旱作與旱田-旱田制度之土壤甲烷排放係數為59.6、0.29與0.39 kg ha⁻¹ season⁻¹；而台灣中部之水田-水田、水田-旱作與旱田-旱田制度之土壤甲烷排放係數為143.2、19.6與0.56 kg ha⁻¹ season⁻¹；台灣南部之水田-水田、水田-旱作與旱田-旱田制度之土壤甲烷排放係數為0.05、0.04與0.001 kg ha⁻¹ season⁻¹，各試驗處理中以水田-水田連作區有較大的甲烷釋出通量。農田土壤CH₄之釋出以水田-水田耕作制度最多，以旱田-旱田最少，其排放量與土壤氧化還原狀態、植物生長狀態有極密切關係。經數次不同耕作系統下水-旱田之甲烷排放資料之分析與統計，耕作制度對農田土壤甲烷釋出有極大之影響，利用輪作制度可降低農田土壤之甲烷排放量，藉由排放量與栽培管理對農業生產影響之比較，可提供研擬農業部門溫室氣體減量技術之參考以助尋求農業耕作體系之甲烷減量對策。

關鍵詞：水田、旱田、甲烷、耕作制度、釋放、減量

Abstract

This subproject 2 will cooperate with the subproject 3 to determine methane emission under the current cultivation systems in order to provide the successful mitigation strategies from paddy and upland fields in Taiwan area. The current cultivation systems in the test fields, including paddy - paddy, paddy - upland, upland - upland, and the test fields are located in northern Taiwan (Tao-yuan District Agricultural Improvement Station, mainly conducted by subproject 3), central Taiwan (Chia-yi Branch Station of Tainan District Agricultural Improvement Station, mainly conducted by subproject 2), and southern Taiwan (Chi-nan Branch Station of Kaohsiung District Agricultural Improvement Station, mainly conducted by subproject 3). The approach will provide the data for the studies of global change and agricultural production, it is therefore necessary to explore much more effective mitigation strategies following a better understanding of the processes involved in methane emission from agricultural cultivation. The preliminary results of this study showed that the CH₄ emission flux from three test soils was the highest under paddy - paddy cultivation system, and the lowest under upland - upland cultivation system; and the CH₄ emission flux was strongly dependent on soil redox condition and plant size. The seasonal methane emission in the second crop season in northern Taiwan with the cultivation systems of paddy-paddy, paddy-upland, and upland-upland were 59.6, 0.29 and 0.39 kg CH₄-C ha⁻² season⁻¹, 143.2, 19.6 and 0.56 kg CH₄-C ha⁻² season⁻¹ in the central Taiwan, and 0.05, 0.04 and 0.001 kg CH₄-C ha⁻² season⁻¹ in the southern Taiwan, respectively. It was shown that rotation cultivation system should significantly inhibited production and emission of methane in the rice cultivation. Successful mitigation strategies for greenhouse gases require overall understanding of agricultural management on fluxes of greenhouse gases. The suggestions of methane mitigation for rice cultivation will be further discussed after all the sampling and analysis of greenhouse gas are estimated. The investigation will provide the data for estimation of the mitigation potentials in agricultural systems in Taiwan.

Keywords : Paddy, Upland, Methane, Cultivation system, Emission, Mitigation

一、前言

溫室效應所造成之影響甚鉅,除地球暖化及溫度升高外,更造成水源不足、冰山溶解、海平面上升、蒸散作用增加等嚴重後果,溫室氣體的減量已是全球的趨勢。地球氣候的溫室效應現象和溫室氣體的排放有密切的關係,依照 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 的評估,全球平均氣溫的本世紀將以加速的速度上升,克服氣候暖化的現象與趨勢已使國際間普遍共識,大氣中主要之溫室氣體二氧化碳,甲烷和氧化亞氮各以每年 0.4、0.6 和 0.25% 的速度增加(IPCC, 2001)依照 IPCC 估計當溫度每上升 1°C,植物生長區將往南極移動 200-300 公里。而台灣為海島型國家,缺乏足夠的生態緩衝縱深,若台灣的生物往北方或高海拔地區遷移受限制或速度太慢時,屆時將導致生物物種難以存活而消失,能存活的生物其適應能力也面臨極大的考驗。

溫室效應氣體中,二氧化碳、甲烷與氧化亞氮之產生與釋放,均與土壤有直接關係(Kimura et al.,1991),其中甲烷吸收輻射的能力是二氧化碳之 30 倍 (Kimura et al., 1991; Wang et al., 1976), 甲烷在大氣中之含量雖遠小於二氧化碳,但其對地球增溫所產生之影響卻隨人類文明進步而大幅增加(Bartlett and Harriss, 1993)因此,甲烷在大氣中消長的情況,深受土壤因子之影響。土壤中,80 %之甲烷是在還原環境下,由一群極端厭氣之甲烷菌(Methanogens)分解有機物所產生(Ehhalt and Schmidt, 1978),因此常發生於濕地土壤中。影響土壤釋出甲烷的因子主要分為土壤、氣候、植生與人類活動等方面(Yagi and Minami, 1990; King et al., 1990; Lindau et al., 1993; Kludze et al.,1993; Sass et al.,1994; Trolldenier, 1995)。因此利用農業栽培管理技術,將可使農業生態系中所生成之甲烷總量下降,而達到甲烷減量之目標。

農業生產生態系統中,田間栽培管理與耕犁會導致土壤溫室效應氣體(CO₂, N₂O, or CH₄)排放增加,其主因施肥與土壤耕犁作用增加土壤微生物降解作用速率與植物殘體分解效應,Aselmsnn 與 Crutzen(1989)估計全球每年從自然溼地可釋放出 40~160 Tg 的甲烷,而從水稻田釋出的甲烷則有 60~140 Tg 左右。輪作制度為台灣耕作制度中經常使用之耕作方式,一般為避免一些短期性作物產生連作障礙,並且可避免營養失衡與病蟲害傳遞及同種間有毒分泌物的危害。但目前為配合政府水利灌溉計畫政策及維持土地永續發展,可視經營需要而進行休耕、種植綠肥或短期休閒,因此本計畫為配合將來之氣候變遷及政策發展,尋求台灣現行耕作制度溫室氣體之間量策略,降低因農業耕作可能引致地球溫暖化效應。

為了解全球變遷的現況及其影響,目前科技先進國家都非常重視相關研究,如有關酸性

物質沉澱問題，美國在過去十年就花了將近六億元的經費進行國家酸性沉降評估計畫。1991 年度美國用於地球變遷研究的經費就高達十億美金，其他如歐洲、日本、加拿大等國也投注了大量的經費和人力積極進行相關之地球環境變遷研究。聯合國氣候變化綱要公約(FCCC)第三次締約國大會於 1997 年 12 月 11 日簽下「京都議定書」，包括美國、歐聯、日本等 38 個國家或地區，訂出明確二氧化碳減量標準，以降低人類活動所排放之溫室氣體。反觀我國過去三、四十年來快速的經濟與科技發展下，台灣地區自然環境早已發生巨大的改變，溫室氣體的排放、地層下陷、森林砍伐、土壤流失、土石流、野生動物滅絕、垃圾掩埋、畜產廢棄物等環境污染現象都非常嚴重，不論是政府或人民也都日益察覺到自然環境的維護已是經濟發展必須慎重考慮的事情，為了工業化和社會經濟發展對環境所造成之衝擊，以及了解台灣地區自然生態環境對全球變遷的反應敏感度，進行台灣地區的大氣環境變遷研究是非常重要而且迫切的課題。前行政院長蕭萬長先生在京都會議結束後一週之內，於 86 年 12 月 15 日召集各部會首長，針對全球氣候變化綱要公約，要求經濟部、環保署、農委會研擬因應對策，在 87 年 5 月底前提報行政院，納入整體經建計畫執行，並重新檢討產業結構，並於 87 年 5 月 25 日-26 日召開全國能源會議，提出無悔環保政策除了減少工業生產時之二氧化碳排放，節約能源、推動全民造林外，另外如何降低廢棄物處理、垃圾掩埋、畜牧養殖和農業生產時之溫室氣體排放並有效回收利用為當務之急。行政院國家科學委員會永續發展委員會也提出了全球變遷對我國環境衝擊研究規劃，希望從溫室氣體與減量研究及大氣化學場研究等方面瞭解我國在工業、農業、交通、環保等方面之溫室氣體排放情形和減量之可行對策。

民國九十年國內學者亦曾依溫室氣體實測資料及農作物栽培面積，估算我國農田生產時之排放量。結果顯示：2000 年台灣水稻田之栽培總面積為 339,601 公頃，甲烷全年釋出總量估計為 25,678 公噸，氧化亞氮全年釋出總量估計為 762 公噸，唯整合性資料不足，說服力較弱；為加強減量溫室氣體之進行，擬觀測現行不同農耕制度溫室氣體排放量，以利說明農耕土壤溫暖潛勢而進行本研究，本計畫擬分別於台灣北部（桃園區農業改良場），中部（台南區農業改良場嘉義分場），與南部（高雄區農業改良場旗南分場）等農業試驗單位，同時進行現行不同耕作制度對甲烷排放通量之影響。並將彙整之結果，研發本土可行之農業部門溫室氣體（氧化亞氮及二氧化碳）之減量技術，此等結果將可進一步提供政府有關單位研擬國內可行之農業部門溫室氣體減量管制策略之參考，以供我國各界因應聯合國氣候變化綱要公約之參考。

二、文獻探討

甲烷之溫室效應氣體比重僅次於二氧化碳，約佔 12-15%，估計在二十一世紀時將增加至 15-25%(IPCC, 1992)。而甲烷進入大氣主要有二個途徑：(1)在厭氣條件下分解生質而產生甲烷，(2)化石燃料燃燒或天然氣直接逸出(Cicerone 和 Oremland, 1988)。甲烷之主要來源有微生物在厭氧環境下分解有機質而產生甲烷，甲烷菌將有機酸、二氧化碳、一氧化碳等轉變生成甲烷。甲烷生成作用佔全體甲烷來源之 80%，其他如水稻田每年釋出 20-150 Tg、溼地釋出 100-200 Tg、草食性動物腸內發酵釋出 65-100 Tg、白蟻和其他昆蟲釋出 10-50 Tg、生質燃燒釋出 20-80 Tg、垃圾掩埋釋出 20-70 Tg、海洋和其他來源釋出 46-170 Tg。至於非生物性甲烷主要來自礦坑、天然氣和化石燃料等釋出 70-120 Tg，佔全部甲烷釋出量之 20% (Watson 等, 1992)。依照 IPCC 方法估算，1990 年全球人為甲烷排放量為 3.50×10^8 公噸，稻米耕作為 6.50×10^7 公噸(佔 18.57%)、畜牧養殖為 9.40×10^7 公噸(佔 26.86%)、掩埋場為 2.70×10^7 公噸(佔 7.71%)、廢水處理為 3.50×10^7 公噸(佔 10.00%)、油氣系統為 5.10×10^7 公噸(佔 14.57%)、礦業為 3.00×10^7 公噸(佔 8.57%)和其他為 4.80×10^7 公噸(佔 13.72%)(IPCC, 1992)。甲烷之基本性質之敘述如下：

1. 工業化前之濃度：0.65ppm
2. 目前濃度：1.72ppm
3. 目前增加速率：0.9% per year
4. 在大氣中存在期限：10 years
5. 每一分子對 CO₂ 而言之輻射效應：30 倍
6. 主要自然界來源：濕地(wetland)、苔原(tundra)、白蟻(termites)、野生反芻動物 (wild ruminants)、海洋(ocean)和淡水(freshwater)
7. 主要人為(anthropogenic)來源：水稻田、採煤、天然氣、石化工業、家畜反芻、生質燃燒、動物廢棄物、都市廢水處理場、天然氣和填土
8. 主要削弱者 (匯)：大氣 (對流層和平流層) 移除、土壤去除和與 OH 基反應

甲烷之源與匯之情形，詳如表一所示。

溫室氣體中 CO₂、CH₄ 及 N₂O 之產生與釋放，均與土壤有直接的關係(Kimura et al., 1991)，其中 80% 之甲烷是在還原環境下，由一群極端厭氣之甲烷生成菌(methanogenic bacteria)分解有機物所產生(Ehhalt and Schmidt, 1978)，水田中有機物之來源有稻根、根

分泌物、稻草殘體、脫落細胞、老化根及綠肥作物等，這些物質的存在對土壤微生物之活性有促進作用。因此甲烷得的生成常發生在浸水土壤(如：水稻田中之有機質材厭氣分解)、反芻動物的消化過程與棄置垃圾時有機廢棄物的發酵過程等(Bouwman, 1990)，約有 40%左右的甲烷是由濕地所釋出(Whiting and Chanton, 1992)，因為濕地土壤終年或大部份時間都處於浸水狀態，土壤孔隙呈現飽滿水分狀態，水中之氧氣擴散速率較大氣中慢 10000 倍，土壤極易變成厭氣狀態、有機物含量豐富、氧化還原電位低，容易產生甲烷(Frenzel et al.,1992)。Aselmann 與 Crutzen(1989)估計全球每年從自然濕地可釋放出 40~160 Tg 的甲烷，而從水稻田釋出的甲烷則有 60~140 Tg 左右。陸稻因用旱田栽培，無淹水，故無明顯之甲烷釋出，其產量約僅佔全球稻米之 10%，而則僅佔 15%。而全球水稻年收穫面積在 1980 年約為 123.2 百萬公頃，且 90%以上位於亞洲(Neue et al., 1990)，故水稻田甲烷釋放量之測定極為值得重視。

表一、大氣中甲烷的主要來源 (Watson 等，1992) (Tg CH₄/year)

Sources	Mean	Range
Natural		
• Wetlands	115	100-200
• Termites	40	10-50
• Ocean	10	5-20
• Freshwater	5	1-25
• CH ₄ Hydrate	5	0-5
Anthropogenic		
• Coal Mining, Natural Gas & Pet. Industry*	100	70-120
• Rice Paddies*	60	20-150
• Enteric Fermentation	80	65-100
• Animal Wastes*	25	20-30
• Domestic Sewage Treatment*	25	
• Landfills*	30	20-70
• Biomass Burning	40	20-80
Sinks		

Atmospheric (Tropospheric+ Stratospheric) Removal*	470	420-520
Removal by Soils	30	15-45
Atmospheric Increase	32	28-37

*indicates revised estimates since IPCC1990.

影響水稻田釋出甲烷的因子主要分為土壤、氣候、植生及人類活動等方面，均會影響甲烷生成菌的活動(Yagi and Minami, 1990; King et al., 1990; Lindau et al., 1993; Wang et al., 1993; Kimura et al., 1993; Kludze et al., 1993; Yang et al., 1994; Yang and Chang, 1997; Yang and Chang, 1998; 王等人, 1998)，利用各影響因子的配合，應有助於找出甲烷的減量對策。

氣候方面之因子主要為溫度之高低和雨量之多寡，例如：氣溫下降會抑制土壤中甲烷生成菌之活性；降雨量增加則會提高土壤地下水位而阻礙其通氣性而利於甲烷生成，Yamane and Sato(1961)指出大多數的甲烷生成菌為中溫菌(mesophile)，其最適當之生長溫度範圍為 30~40°C，而 Yang and Chang(1998)指出台灣水稻田土壤之甲烷生成量，於 15 至 37°C 的範圍中與溫度呈正相關，通常水田中甲烷生成之最大值約出現於 35°C，當溫度低於 20°C 時，則甲烷之生成率極低。

植生方面則因可直接提供產生甲烷所需要之碳基質，並透過水稻之 Aerenchyma 氣胞組織傳送至大氣中(Kludze et al., 1993)，以減少甲烷產生後在土壤中便被消耗的機會(Bender and Conrad, 1994)；水稻的生長期亦會影響甲烷的釋出，Lindau 與 Bollich(1993)即指出甲烷之最大釋出量出現於插秧後 30~50 天，也就是水稻之分蘗期。

人類活動的影響主要是來自土地利用方式之改變、添加有機物、灌水與施用化學肥料等行為。Denier van der Gon and Neue(1995)比較菲律賓粘土水田添加綠肥對甲烷釋出量之影響，其中添加 20 ton/ha 的處理約為施用尿素的兩倍，且以插秧後兩週內添加綠肥之影響最大；Delwiche and Cicerone(1993)以石英砂做水稻盆栽試驗，以稻桿、纖維素與木質素做為不同之碳源，結果顯示添加纖維素所釋出之甲烷量最高，木質素則最低，可知碳源之分解難易程度對甲烷之釋放有極大的關係。Watanabe(1994)以盆栽研究施用稻草對水稻田甲烷釋出之效應，發現施入位置(包括：上層、下層或均勻分配)不同，以施入下層者的甲烷釋出量最大。田間施入稻草 6~9 ton/ha，可增加甲烷釋出量 1.8~3.5 倍；施用堆肥 12 ton/ha，可增加甲烷釋出量 0.35~0.58 倍，種植於泥炭土的甲烷釋出量

較一般礦質土高(Yagi, 1990 ; Kimura et al., 1992 ; Watanabe, 1994)。

土壤因子則包括：pH 值、氧化還原電位(Eh)、水勢能、有機物含量、溫度等，例如：氧化還原電位對濕地土壤中甲烷的生成有極大之影響，因為甲烷生成菌為絕對厭氣菌(obligate anaerobes)，氧化還原電位是隨著 pH 值的改變而有所不同，甲烷生成菌是一種對酸極度敏感的細菌，在 pH 5.75 以下與 pH 8.75 以上時，甲烷之產生幾乎被抑制，當土壤 pH 值維持中性時，甲烷之產生量為最高(Wang et al., 1993)。水田土壤處於還原狀態下，並無其他多餘的無機電子接受者，故有機物之多寡對甲烷之釋出量有極大之影響。Shannon 與 White(1994)指出泥炭地的平均地下水位在 15 cm 以內時，地下水位之高度與甲烷之釋放量才有明顯的正相關，因為甲烷之生成主要分佈於有機物較多之表土中，當地下水位較深時對甲烷之產生則不構成影響。

依據台灣省農業年報(1997)台灣地區水稻栽培面積約為 36 萬公頃，為本省重要糧食作物，多採濕田耕作栽培方式，稻穀產量高，台灣南部水稻田土壤主要為粘板岩沖積土或粘板岩混合砂頁岩沖積土，栽培一期作為 1 月至 7 月；二期作為 5 月至 12 月，受各地區之氣候及土壤條件影響，其水稻品種、肥料及農藥使用略有不同，產量亦有所差異，此均與甲烷生成菌之活性有關，估計每一期稻作之甲烷釋放量，台灣北部為 4.15~20.7 g/m² (呂等人, 1998)；台灣中部為 0.22~10.45 g/m²；台灣南部為 2.16~10.17 g/m²(王與謝, 1997)；台灣東部為 1.2~18.8 g/m²(彭與黃, 1998)，本省之水稻甲烷產生與逸釋量在過去之研究中已有初步成果，唯整合性資料不足，說服力較弱；為加強減量溫室氣體之進行，擬觀測現行不同農耕制度溫室氣體排放量，以利說明農耕土壤溫暖潛勢而進行本研究，本計畫分別於台灣北部（桃園區農業改良場）、中部（台南區農業改良場嘉義分場）與南部（高雄區農業改良場旗南分場）等農業試驗單位，同時進行現行不同耕作制度對甲烷排放通量之影響。並將彙整之結果，研發本土可行之農業部門溫室氣體（氧化亞氮及二氧化碳）之減量技術，此等結果將可進一步提供政府有關單位研擬國內可行之農業部門溫室氣體減量管制策略之參考，以供我國各界因應聯合國氣候變化綱要公約之參考。

三、材料與方法

(一) 試驗地點、田間管理與管理

- 1.台灣北部：桃園區農業改良場（主要由子計畫三賴朝明教授負責）。
- 2.台灣中部：台南區農業改良場嘉義鹿草分場及義竹工作站（主要由子計畫二劉瑞美副教授負責）。
- 3.台灣南部：高雄區農業改良場旗南分場（主要由子計畫三趙震慶教授負責）。

(二) 台灣現行耕作制度

- 1.制度一：水稻-水稻。
- 2.制度二：水稻-旱作或旱作-水稻。
- 3.制度三：旱作-旱作。

(三) 田間管理及採樣

北、中、南三試區管理與採樣分別由賴朝明、劉瑞美、趙震慶三位教授與各試驗區田管理單位協調田間管理之協助，並分別負責該地點之採樣工作及試驗田田間栽培管理資料之收集及基本土壤性質之測定提供；田間栽培管理資料，包括：栽培曆、作物品種、施肥種類與量、施用農藥種類與量、灌溉資料等；基本土壤性質，包括：土壤質地、pH、全氮、有機質、比導電度等。三處試驗地點將均採用密閉罩法（closed chamber method）採樣，每一田區，以四個採樣罩逢機採樣。水稻田於施基肥後插秧前(時)、分蘗盛期、孕穗期、乳熟期、收穫期等採樣五次，旱作則配合水稻田之採樣同時採樣。今年第一期作將屆乳熟期或收穫期，若可能則採乳熟期及收穫期兩次(或僅採收穫期一次)，故連同兩作間之休閒期，今年共可採樣 7-8 次。每次採樣於上午 10-11 時或下午 4-5 時(冬季 3-4 時)；每一採樣罩分別於三個時間(0、30、60 分鐘)採樣三種氣體(CH_4 , N_2O , CO_2)，各採三重複。採完氣體樣品後分送給各氣體分析負責人儘速分析之。

1.氣體採樣方法如下：

(1) CH_4 採樣方法：

2 mL 氣體樣品瓶採樣前先抽為真空狀態，採樣氣體樣品時，以 10 mL 針筒抽取 10 mL 氣體，注入 8 mL 氣體樣品使氣體樣品瓶呈負壓狀態，即完成採樣。

(四) 溫室氣體樣品之分析：

每個試驗地點之田間溫室氣體採樣後，由採樣負責人負責將溫室氣體樣品分送分析負責人分析之。氣體以氣體色層分析儀(Shimadzu GC-14B)附火燄離子檢出器(flame

ionized detector), 分析管柱為 3 公尺長之 propark N, 攜帶氣體為氮氣, 分析條件氮氣之流速為 70 mL/min, 注入器與分析管柱之溫度為 125 與 50°C, 氣體注入量為 0.5 mL, 滯留時間為 57 秒, 分析結果與已知濃度之標準氣體比較, 可求出樣品甲烷濃度。

(五) 溫室氣體釋放通量之估算

甲烷釋出率之計算, 由 Rolston(1986)所提之公式計算,

$$\text{甲烷濃度(ppmv)} = (\text{Cstd}/\text{Astd}) \times \text{Asamp} \times (\text{Vsamp}/\text{Vstd})$$

Cstd 為標準甲烷氣體濃度(ppmv); Astd 為標準甲烷氣體濃度 GC 峰之積分值; Asamp 為待測氣體濃度 GC 峰之積分值; Vsamp 為打入 GC 之氣體待測氣體樣品體積; Vstd 為打入 GC 之標準氣體體積。再由甲烷濃度估算單位時間、單位面積的甲烷釋放通量。

$$\text{甲烷釋放通量} (\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}) = (\text{Cf}-\text{Ci}) \times \text{V} \times [273.15/(22.4 \times \text{T})] \times [16/(\text{Ab}/\Delta t)]$$

Ci 為利用甲烷收集箱所得之起始氣體樣品濃度; Cf 為利用甲烷收集箱所得之終結氣體樣品濃度; V 為收集箱有效體積(m³); Ab 為收集箱之底面積(m²); T 為採樣當時之氣溫(凱氏溫度); Δt 為起始樣本與終結樣本收集時間之時間差。

(六) 環境因子的測定

測定土壤氧化亞氮及二氧化碳釋放通量之同時亦測定其環境影響因子(1)氣溫、(2) 罩內溫度、(3)土表下 10cm 之土溫、(4)新鮮土樣之無機態氮(NH₄⁺-N, NO₃⁻-N)含量、(5) 總體密度(旱田)、(6)Eh(水田)及(7)pH(水田)。(6,7 兩項可選擇性測定)

(七) 土壤性質分析

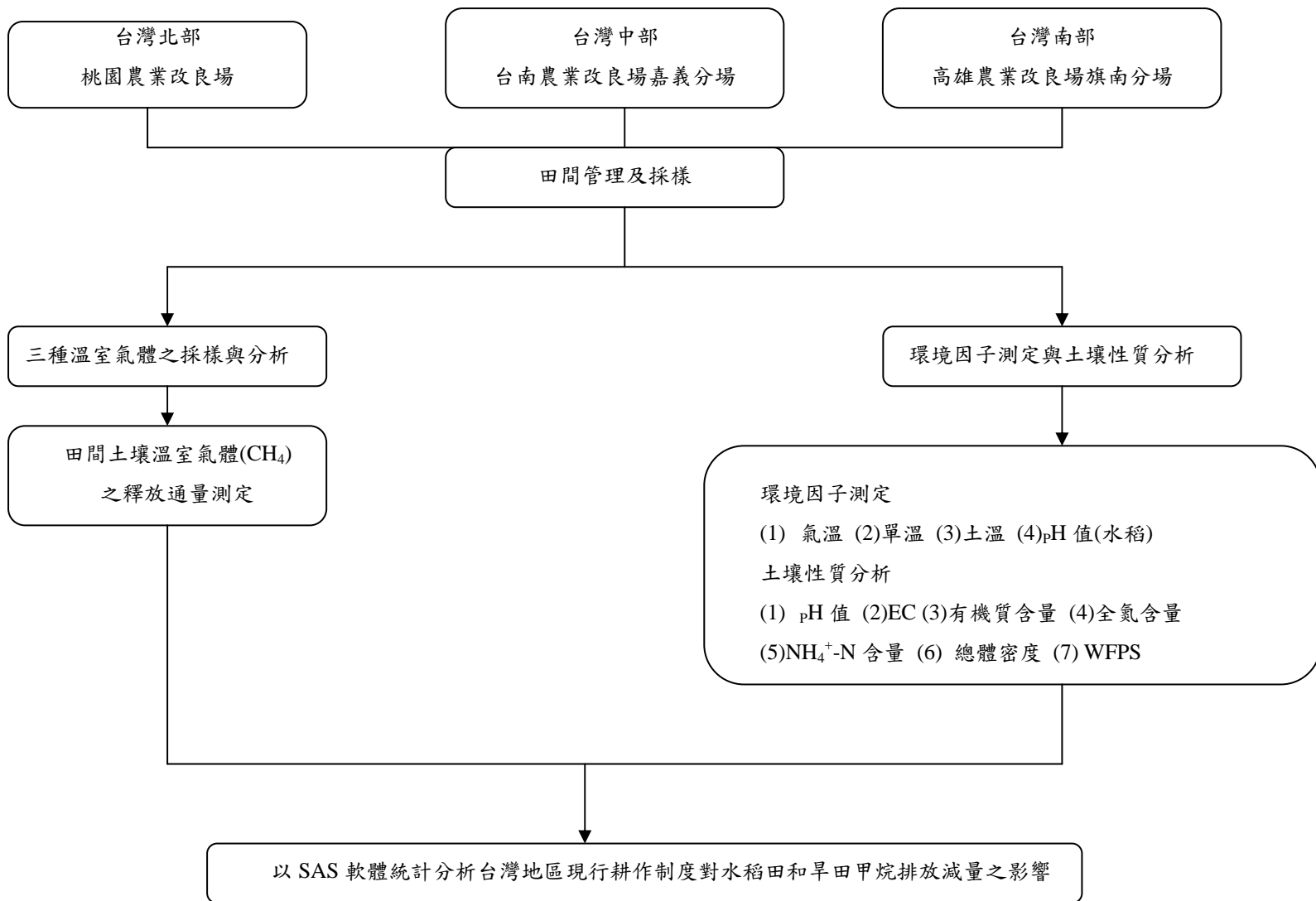
- 1.比導電度(EC): 以電導度計測之。
- 2.酸鹼度 (pH值): 以玻璃電極測定之。
- 3.有機質含量: 以 Walkley-Black 法測定(Nelson, 1982)。
- 4.全氮含量: 以 Kjeldahl 法測定(Bremner, 1982)
- 5.無機態氮(NH₄⁺-N, NO₃⁻-N)含量: 可現場測定, 以土壤: 2 N KCl=1: 10抽出測定之(Keeney and Nelson, 1982)。
- 6.質地: 以 Bouyoucos 比重計測定之。
- 7.總體密度: 以 Blake(1986)方法測定。
- 8.水分充滿孔隙率(Water filled pore space, WFPS)以下式計算之(Flessa and Beese, 1995):
水分充滿孔隙率(%)=(重量含水量×總體密度/總孔隙率)100%。

(八) 統計分析

以 SAS 統計軟體之簡單相關分析及逐步回歸分析, 探討土壤甲烷通量與本研究測

定之環境影響因子及土壤性質之關係。

本研究之試驗流程圖示於圖一。



圖一、試驗流程圖

四、結果與討論

本研究選取台灣北部（桃園區農業改良場）、中部（台南區農業改良場嘉義分場）與南部（高雄區農業改良場旗南分場）等農業試驗單位，同時進行現行不同耕作制度對甲烷排放通量之影響。該三地點之土壤基本性質之變動示於表二至表四。於 2003 年二期作種植水稻及其他旱作作物，試驗期間參考農業改良場推薦方式管理，試驗期間參考農業改良場推薦方式管理，各試驗處理與栽培曆分述如下：

1. 旱田—旱田：

台灣北部：田菁綠肥—空心菜-芥菜。

台灣中部：蘆筍-蘆筍。

台灣南部：蔬菜-田菁綠肥

2. 水田—水田：

台灣北部：水稻-水稻。

台灣中部：前三年(89 二期—92 一期)二期均為水田，水稻-水稻。

台灣南部：水稻-水稻。

3. 水田—旱田或旱田—水田：

台灣北部：水稻-葉用甘藷

台灣中部：綠肥-水稻。

台灣南部：甜玉米-水稻。

田間之栽培曆隨試驗地區之氣候條件而異，樣區之大小與肥料管理示於附錄一，而在試驗期間各試驗田區之土壤物理化學性質變動之分析結果可提供進行農田土壤溫室氣體之釋出與土壤環境因子之相關性統計分析，進而提供國內對溫室氣體之管制與排放減量之參考，在各試驗區之土壤分析資料中顯示，不同作物生長季節有不同之田間水分管理，其中土壤水分之變動對土壤中無機氮形式有所影響。

影響水稻田甲烷釋放之因子，包括：土壤類型、土壤 pH 值、土壤氧化還原電位、土壤溫度、水分境況、肥料、硫酸鹽含量、水稻品種與栽培管理方式等(Neue et al.,1997; Sass and Fisher Jr., 1997)。在水稻的栽培系統中，以旱作植物進行輪作(如：小麥、油籽或豆科植物等)可減少因長期連作水稻而導致的土壤毒性物質之累積(Ponamperuma, 1978)，並可降低水稻栽培之甲烷釋放量進而提高稻穀產量，並可降低水稻栽培之甲烷釋放量進而提高稻穀產量。本研究則於 2003 年一期稻作收穫期(5 月底)開始進行氣體採

樣與測定，比較不同耕作制度對土壤甲烷釋放量之影響，田間 CH_4 釋放通量八次採樣結果顯示，最高釋放通量為 $10000 \text{ CH}_4\text{-C g ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 出現在中部試區之水稻-水稻(連續水田)試區之分蘗盛期(表五)，係因中部試驗區過去連續三年均以水田方式管理之土壤，土壤呈現高度浸水且又為高溫時期，田間土壤水分含量較高且前作植物殘體已翻犁至土壤中，且植物正值生長盛期，故有較高之甲烷釋放通量，北部與南部試驗田區之趨勢亦相似。由田間紀錄顯示採樣時期氣溫與盆溫均高，且田區淹灌浸水中，可能係因為試區土壤受到灌溉水及氣罩內水蒸氣分壓影響導致負值產生。於分蘗盛期至孕穗期結果顯示，水稻-水稻與水稻-旱田試驗區，地上部均有水稻植株，而旱田-旱田試區除第一次採樣時外，第二、三、四次採樣時期，地上部均種植田菁，當地上部有植生存在時，三試區均因植物光合作用明顯降低 CH_4 的通量。Cicerone 等人(1983)指出水稻生長期中，開花期之甲烷釋出量約佔總釋放量之 76~93%，推測其原因乃是在淹水狀態下，當水稻生長至開花期時，土壤根圈分泌物較多，微生物之活性也較高，而台灣的一期稻作，開花期(約插秧後 8 周)之甲烷釋出量約佔總量之 30~43%；二期作則約僅佔 1~13%，因二期稻作的開花期已呈現氣溫下降的趨勢，故佔總甲烷釋出量之比率甚低，顯示栽培季節與溫度的變化對水稻田土壤甲烷釋出量之消長有極大影響。

中、南部之旱田-水田之試驗區土壤目前種植水稻，藉由水稻之輸送仍可測定到甲烷形成與釋出，但明顯低於水田-水田之試驗區，各試驗區之休閒期的土壤 CH_4 釋放通量則均趨於 0(表五)，由田間紀錄顯示採樣時期氣溫與盆溫均高，且田區淹灌浸水中，對水田甲烷之生成有較有利之環境條件，水稻於分蘗盛期至乳熟期均有甲烷產生，且水稻-水稻與旱田-水稻試驗區，地上部均有水稻植株，藉由水稻植株之輸送，均可測定出甲烷之釋出，相較於旱田-旱田試區之甲烷釋放通量則明顯較低，顯示乾燥之土壤有顯著降低土壤中甲烷之生成與釋出，北部水田-旱田之試驗區土壤目前種植甘藷，土壤呈現乾燥狀態，故土壤之甲烷釋出量亦相對較低。土壤浸水後，表土數 mm 至 1cm 深度仍可維持氧化狀態，較深處的土壤則維持還原狀態(洪，1983)，有機質被土壤微生物分解後，經數個連續性生化作用，成分中具高氧化還原電位基質之氫接受者，當基質被逐一耗盡而使 Eh 值降低，土壤中 NO_3^- 、 NO_2^- 、 Mn^{2+} 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 與 H^+ 等依其氧化還原電位順序做為電子接受者，分別與有機物作用，生成 N_2 、 Mn 、 Fe 、 S 、 CH_4 與 H_2 ，浸水土壤之還原電位隨浸水時間增加而降低，當土壤 Eh 值達 -150mV 時，有利於甲烷生成。故本研究中的旱田-旱田試區在各耕作制度中的甲烷釋出量最低，而利用輪作旱作作物在中、北部試區中對甲烷釋出通量有明顯的抑制效果，惟目前之結果僅為一季稻

作之結果，獲致更具代表性之結果，應待第一期稻作之研究結果完成後再予以做適當之結論。

Cicerone 等(1988)指出水稻田之甲烷釋出具有季節性變化，本研究中的甲烷釋出通量除受土壤水分與植物生長狀態之影響外，環境溫度對田間甲烷之釋出亦有極大之影響，由中部之測定資料顯示，二期作水稻之插秧期至孕穗期之大氣溫度屬高溫狀態，採樣時之土壤溫度 27.5~38°C，對甲烷形成菌之活性有提高之效果，進入水稻之乳熟期與黃熟期時，為降低水稻無效分蘗，進行土壤排水，故雖土溫仍維持高溫狀態，但因土壤之氧化還原電位較高，故甲烷釋出量甚低。由表五之數據結果顯示，土壤 CH₄ 釋放通量介於 0 ~ 10000 CH₄-C g ha⁻¹ day⁻¹ 之間，其大小順序分別為水稻-水稻試區 > 水稻-旱田試區 > 旱田-旱田試區，由田間紀錄顯示，插秧期水稻-旱田試區田間正在持續灌溉中而水稻-水稻區為前一日即開始灌溉，故可以說明水稻-水稻試區於此次採樣有一個劇烈的峰值出現，主因土壤中碳素經微生物轉型進行所致。

在 2003 年第二期稻作之結果顯示，台灣北部之水田-水田、水田-旱作與旱田-旱田制度之土壤甲烷排放係數為 59.6、0.29 與 0.39 kg ha⁻¹ season⁻¹；而台灣中部之水田-水田、水田-旱作與旱田-旱田制度之土壤甲烷排放係數為 143.2、19.6 與 0.56 kg ha⁻¹ season⁻¹；台灣南部之水田-水田、水田-旱作與旱田-旱田制度之土壤甲烷排放係數為 0.05、0.04 與 0.001 kg ha⁻¹ season⁻¹，各試驗處理中以水田-水田連作區有較大的甲烷釋出通量。因此，為降低水田耕作系統釋放之甲烷，且在可節約水資源的前題下，本試驗結果可建議以輪作制度來減低因水稻栽培而造成之甲烷釋放，減低對環境之衝擊。此等結果將可進一步提供政府有關單位研擬國內可行之農業部門溫室氣體減量管制策略之參考，以供我國各界因應聯合國氣候變化綱要公約之參考。

五、結論與建議

1995 年農業排放佔全球能源使用碳排放的 4%，但其中 20% 以上的人為溫室氣體排放主要來源為 CH₄ 和 N₂O，以及土壤所產生之 CO₂。自 IPCC 第二次評估報告以來，能源部門之能源效率有少量提高之情形，本報告提出我國各主要農業生產地區具代表性各類土壤之土壤性質(包括：土壤質地、pH、有機質、全氮、銨態氮、硝酸態氮含量、比導電等)。並針對我國主要農作制度(含水稻-水稻、水稻-旱作與旱作-旱作等)，實測其甲烷排放通量，估算其季節變化及我國農田生產時之甲烷排放量。結果顯示：2000 年台灣水稻田之栽培總面積為 339,601 公頃，甲烷全年釋出總量為 25,678 公噸，氧化亞氮全年釋出總量為 1,779 公噸。2000 年台灣旱作栽培總面積為 333,474 公頃，甲烷全年釋出總量為 1,362 公噸，氧化亞氮全年釋出總量為 4,038 公噸。由於台灣水稻田採間歇性灌溉，因而 2000 年甲烷之總釋放量遠低於 IPCC (1996) 以連續浸水栽培方法估算所得之 125,569 公噸為低。最後提出針對我國國情及現況，參考國外之經驗，提出適合我國推廣之溫室氣體減量技術，結果顯示，適合台灣推廣之甲烷溫室氣體減量技術為：

由亞、歐、美、澳等地區國家之減量對策，參考其減量方法，國內在農業生產其溫室氣體排放減量方面，可朝下列方向減量：

1. 採行間歇性灌溉、曬田或輪作

(1).在分蘖盛期之後，採用間歇性灌溉、降低甲烷釋放量。(2).在開花及乳熟期，可採短期曬田、提高土壤 Eh、降低甲烷釋放量。(3).以輪作或休耕減少長期水稻栽培之甲烷釋放量。

2. 採用腐熟堆肥

(1).使用腐熟堆肥，既可提高土壤有機質含量、改良土壤物化及生物性質，又可降低對甲烷釋出之影響。(2).降低化肥使用、避免水質優養化和地下水污染。(3).減少使用後因含有機酸對作物生長不良。(4).使用 C/N 低之堆肥。

3. 研發合適生物製劑

(2).研發合適甲烷生成抑制劑、降低農業生產時溫室氣體排放。

4. 改良品種

(1).培育低溫室氣體排放作物品種。(2).培育低水分需求品種，耐旱性高。(3).提高

單位面積作物生產量。

5. 改進施肥技術

(1).探討每一作物品種最適施肥量，避免過量使用肥料。(2).探討最佳使用肥料種類，如緩效性肥料。(3).探討最佳施用方法，如深層施用。(4).施用合適生物肥料。(5).調節無機和有機肥施用比例。

農民對溫室氣體減量技術的利用性有極高的不確定性，因為減量技術的使用可能需要額外的成本，因此，可能需要透過特殊的因應政策來消除經濟上之障礙。

六、對空污防治之重要成效

本研究為「農牧部門溫室氣體排放量測與監測技術之研究」中子計畫之一，研究重點為尋求台灣地區現行耕作制度對水稻田和旱田之甲烷釋放與減量對策，本研究團隊從過去之研究中，已完成田間水分管理、氮肥型態、水稻品種與水稻殘體處理方法對台灣南部水稻田甲烷釋放量之影響研究，根據研究結果提出之可行的水稻田甲烷減量對策如下：

1. 水分管理

全期維持田間土壤表面 10 ~ 15 公分湛水，是許多國家慣用的水稻田水分管理方式，由 1998 年的研究資料中顯示，於分蘗盛期進行 7 至 10 天的排水，並於栽培期間採間歇式灌溉，可有效降低甲烷釋放量，並且對水稻無效分蘗的抑制與提高稻谷產量有利，此種水分管理方式亦可節省水源之浪費，應為可行之水稻田甲烷減量對策之一(黃等人, 2000)。

2. 氮肥管理

根據 1999 年的觀測資料中顯示，施用硫酸銨可有效降低水稻田甲烷釋放量，推測可能與硫酸鹽的存在，使得硫酸還原菌的族群數增加，硫酸還原菌與甲烷生成菌競爭養分，而抑制甲烷產生，若能配合深施之施肥方法將為更有效的水稻田甲烷減量方法(Liou et al., 2003)。

3. 水稻品種

水稻田甲烷釋放量中，約有 90% 的甲烷是經由水稻植株的氣胞組織傳輸，根據 1999 年的觀測資料中顯示，水稻品種對甲烷釋放之影響並不顯著，然水稻品種甚多，未來若能配合農藝學上的水稻育種，進行篩選甲烷傳輸能力較差且稻米產量與品質均佳的水稻品種，對我國溫室氣體之減量應具貢獻(Liou et al., 2003)。

4. 水稻殘體之處理方法

由過去之研究結果顯示，將稻草殘體自土壤中移除對浸水稻田之甲烷有減量之效益，浸水稻田甲烷減量對策中，可從養分管理方式著手，如：少用有效性碳含量高的有機物做為堆廐肥或綠肥，使用木質素含量高的植物或將堆廐肥充分腐熟，減少揮發性醇與酸，使甲烷菌的可利用碳源減少，而降低甲烷釋放量，若能將有機質材進行堆肥化或腐植化，增加質材之穩定性、降低碳氮比並保留較多的氮素，且在田間施用之便利性增高，將可符合環保需求並兼顧降低甲烷釋出之問題(Liou et al., 2003)。

5. 輪作或休耕制度

比較三種耕作制度分別為水田-水田、水田-旱田、旱田-旱田。結果顯示，農田土壤 CH_4 之釋出以水田-水田耕作制度最多，以旱田-旱田最少，其排放量與土壤氧化還原狀態、植物生長狀態有極密切關係。

本研究的試驗是於田間實際進行的，減量對策之執行上並無困難，惟減量對策提出後，需藉各農業單位協助宣導觀念，以落實執行現階段所提出之可行的水稻田甲烷減量對策，以減少因水稻種植而釋出的甲烷，降低對地球環境之衝擊，期使地球得以永續發展。擬定的減量策略應先經過可行性評估，對於可行的策略，或現階段立即可執行的策略，應明確訂出時程、執行者、監督者，以及可供檢驗的指標，以便逐年評估執行效果。

七、參考文獻

- 台灣省農業年報。1995。台灣省政府農林廳。
- 王銀波、謝學武。1997。台灣中、南部水稻田、旱田、濕地、林地、及坡地土壤甲烷之釋放及其影響因子。p.99-121。呂世宗等人編。台灣地區大氣環境變遷。台大全球變遷中心。台北。
- 王銀波、趙震慶、譚鎮中、楊盛行、賴朝明、黃山內、劉瑞美。1998。作物生產對台灣地區溫室效應氣體之產生量與減量措施。pp.121-140。氣候變遷對農作物生產之影響。台灣省農試所。台中。
- 呂世宗、柳中明、楊盛行。1998。台灣地區大氣環境變遷(III)。台大全球變遷中心。台北。
- 洪崑煌。1983。水田土壤 Eh 值之測定。中國農業化學會誌。21:171-177。
- 於幼華。1980。環保小百科。台灣英文雜誌社出版。p.18-19。
- 柳中明。1997。京都氣候的談判的爭議點。全球變遷通訊雜誌。16:14-15。
- 黃山內。1992。水田甲烷之產生與逸出。台灣地區空氣污染與農業氣象對作物生產影響研討會論文集。p.241-250。
- 黃山內、林經偉、劉瑞美。2000。全期湛水與間歇灌溉處理對台灣水稻田甲烷釋放之影響。土壤與環境。3:217-226。
- 劉瑞美、林經偉、黃山內。1999。不同有機質肥料對台灣水稻田甲烷釋放之影響。中華農業氣象。6:139-148。
- 楊盛行、鐘仁賜、林家慶、張義宏、王麗惠。1993。臺灣地區水田土壤甲烷氣體之產生。大氣品質與農業經營之關係研討會論文集。p.177-190。
- 鄔宏潘、張正賢、林俊隆。1998。農牧業溫室氣體減量策略規劃及衝擊評估(二)。環保署技術報告。
- 彭德昌、黃山內。1998a。東部水田土壤甲烷氣體之釋放及其影響因子。pp.314-332。台灣地區大氣環境變遷(三)。台灣大學全球變遷中心與農化系。台北。
- 彭德昌、黃山內。1998b。台灣東部水田土壤甲烷氣體之釋放及其影響因子。pp.35-46。花蓮區農業改良場農業彙報第 16 輯。
- Aselmann, I. and P. J. Crutzen. 1989. Global distribution of natural freshwater wetlands and

- rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. *J. Atmos. Chem.* 8:307-358.
- Bartlett, K. and R. C. Harriss. 1993. Review and assessment of methane emission from wetlands. *Chemosphere.* 26:261-320.
- Bender, M. and R. Conrad. 1994. Microbial oxidation of methane, ammonium and carbon monoxide, and turnover of nitrous oxide and nitric oxide in soil. *Biogeochem.* 27:97-112.
- Blackmer, A.M., J.M. Bremner, and E.L. Schmidt. 1980. Production of nitrous oxide by ammonia-oxidizing chemoautotrophic microorganism in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 40:1060-1066.
- Bouwman, A. F. 1990. Agronomic aspects of wetlands rice cultivation and associated methane emission. *Biochem.* 15:65-88.
- Braatz B.V. and K.B. Hogan. 1991. Sustainable rice productivity and methane reduction research plan. U.S. Environmental Protection Agency office of Air and Radiation.
- Cicerone, R.J., Oremland, R.S. 1988. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles* 2, 299-327.
- Delwiche, C. C. and R. J. Cicerone. 1993. Factors affecting methane production under rice. *Global Biogeochem.* 7:143-155.
- Denier van der Gon, H. A. C. and H. U. Neue. 1995. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochem.* 1:68-128.
- Dickinson, R. E. and R. J. Cicerone. 1986. Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature* 319:109-115.
- Ehhalt, D. H. and U. Schmidt. 1978. Sources and sinks of atmospheric methane. *PAGEOPH.* 116:452-464.
- Flessa, H. and Beese., F., 1995, "Effects of sugarbeet residues on soil redox potential and nitrous oxide emission", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59,1044-1051.
- Keeney, D. R. and Nelson, D. W., 1982, "Nitrogen-inorganic forms" , 634-698, *In: A.L. Page* (ed.), *Methods in soil analysis, part 2, chemical and microbiological properties.* (2nd ed.) Agron monogr. 9. SSSA, WI, USA.
- Kimura, M., H. Murakami, and H. Wada. 1991. CO₂, H₂ and CH₄ production in rice rhizosphere. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37:55-60.
- King, G. M., P. Roslev, and H. Skovgaard. 1990. Distribution and rate of methane oxidation in sediments of Florida Everglades. *Appl. Environ. Microbiol.* 56:2902-2911.

- Kludze, H.K., R.D. DeLaune, and W.H. Patrick, Jr. 1993. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:386-391.
- Lindau, C.W., P.K. Bollich, R.D. Delaune, A. R. Mosier, and K.F. Bronson. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded Louisiana rice fields. *Biol. Fertil. of Soils.* 15:174-178.
- Liou, R.M., Huang, S.N., Lin, C.W. and Chen, S.H.. 2003. Methane emission from fields with three various rice straw treatments in Taiwan paddy soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Waste* 38(4): 511-527.
- Liou, R.M., Huang, S.N., and Lin, C.W. 2003. Methane emission from fields with differences in nitrogen fertilizers and rice varieties in Taiwan paddy soils. *Chemosphere* 50:237-246.
- Minami, K., S. Ohnishi, and S. Fukushi. 1983. The emission of N₂O from soils through nitrification. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutri.* 54: 277-280.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E., 1982, "Total carbon, organic carbon and organic matter", *In: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, 539-580, Ed. By Page, A.L. Amer. Soc. Agronomy, Wisconsin.
- Neue, H.U., P. Becker-Heidmann and H.W. Scharpenseel. 1990. Organic matter dynamics, soil properties, and cultural practices in rice lands and their relationship to methane production. p.457-466. *In* A.F. Bouwman(ed.) *Soil and the greenhouse effect*. John Wiley and Sons, N.Y. 87.
- Ponnamperuma, F.N. 1983. Straw as a source of nutrients for wetland rice. *In* *Organic Matter and Rice*. International Rice Research Institute, pp. 117-136. Los Banos, Laguna, Philippines,
- Ramanth V., R. J. Cicerone, H. B. Singh, and J. T. Kiehl. 1985. Trace gases trends and their potential role in climate change. *J. Geophys. Res.* 90:5547-5566.
- Rolston, D.E., 1986. Gas flux. *In: Klute, A.(Ed.), Methods of soil analysis*, 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Wisconsin, pp.1103-1119.
- Sass, R.L., F.M. Fisher, S.T. Lewis, M.F. Jund, and F.T. Turner. 1994. Methane emissions from rice fields: effect of soil properties. *Global Biogeochem. Cycle* 8:135-140.
- Schutz, H., A. Holzapfel-Pschorn, R. Conrad, H. Rennenberg, and W. Seiler. 1989. A 3-year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane

- emissions rates from an Italian rice paddy field. *J. Geophys. Res.* 94:16405-16416.
- Trolldenier, G. 1995. Methanogenesis during rice growth as related to the water regime between crop seasons. *Biol. Fertil. Soils.* 19:84-86.
- 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.
- Yagi, K., Minami, K., 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutri.* 36, 599-610.
- Yang, S.S., C.C. Lin, E.H. Chang, R.S. Chung and S.N. Huang. 1994. Effect of fertilizer, soil type, growth season on methane production and emission in the paddy soils of Taiwan. *J. Biomass Energy Soc. China.* 13:68-87.
- Yang, S.S. and H.L. Chang. 1997. Effect of fertilizer application on methane emission/production in the paddy soils of Taiwan. *Biol. Fertil. Soils.* 25:245-251.
- Yang, S.S. and H.L. Chang. 1998. Effect of environmental conditions on methane production and emission of paddy soil. *Agri. Ecosyst. Environ.* 69:69-80.

表二、桃園區農業改良場土壤物理化學性質之變動

Table 2. Changes in the physical and chemical properties of soils of Taoyuan District Agricultural Improvement Station, Taoyuan.

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
<u>Jul. 9, 2003 (Harvesting stage of rice)</u>			
PH	5.1~5.2	5.4~5.5	7.0~7.6
EC (dS m ⁻¹)	1.02±0.15	0.59±0.24	0.85±0.18
OM (g C kg ⁻¹ soil)	34.2±0.7	27.8±1.2	19.2±7.1
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.40±0.19	1.27±0.03	0.95±0.07
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	42.0±17.4	48.1±9.2	46.9±7.0
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	132±41	156±30	168±26
BD (g cm ⁻³)	1.08±0.10	1.27±0.04	1.43±0.04
WFPS (%)	71.4±5.2	81.3±8.9	77.7±19.9
<u>Jul. 28, 2003 (Fallow stage of rice)</u>			
PH	5.0	5.1~5.3	5.2~5.5
EC (dS m ⁻¹)	0.95±0.54	0.94±0.10	0.75±0.16
OM (g C kg ⁻¹ soil)	25.8±3.2	30.1±1.7	28.4±1.5
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.31±0.44	0.68±0.09	1.09±0.08
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	49.3±5.8	53.1±4.3	49.4±3.4
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	612±141	667±82	762±81
BD (g cm ⁻³)	1.09±0.17	1.13±0.02	1.28±0.07
WFPS (%)	41.5±13.0	29.8±2.5	32.0±5.9
<u>Aug. 15, 2003 (Transplanting stage of rice)</u>			
PH	5.2~5.3	5.1~5.6	5.4~6.0
EC (dS m ⁻¹)	1.14±0.17	1.68±0.53	1.62±0.50
OM (g C kg ⁻¹ soil)	60.4±7.3	54.0±4.3	52.4±4.4
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.65±0.13	1.70±0.09	1.26±0.10
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	112±28	79.7±5.6	125±25
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	132±32	169±41	202±36
BD (g cm ⁻³)	ND	1.22±0.03	1.30±0.17
WFPS (%)	ND	73.4±5.4	25.4±30.8

ND= Not detected.

表二、桃園區農業改良場土壤物理化學性質之變動（續）

Table 2. Changes in the physical and chemical properties of soils of Taoyuan District Agricultural Improvement Station, Taoyuan (continued).

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
<u>Sep. 4, 2003 (Active tillering stage of rice)</u>			
pH	5.2~5.5	5.3~5.9	5.0~6.0
EC (dS m ⁻¹)	1.23±0.22	1.20±0.48	1.17±0.33
OM (g C kg ⁻¹ soil)	32.9±4.7	31.2±2.1	28.2±8.9
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	2.45±0.16	2.28±0.10	1.89±0.18
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	83.9±7.0	62.5±4.0	61.5±11.2
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	263±77	375±56	314±50
BD (g cm ⁻³)	ND	1.09±0.12	1.28±0.04
WFPS (%)	ND	39.2±7.9	44.1±6.7
<u>Sep. 29, 2003 (Panical initiation stage of rice)</u>			
pH	5.1~5.3	4.8~6.0	5.2~6.1
EC (dS m ⁻¹)	0.65±0.12	1.17±0.75	1.28±0.41
OM (g C kg ⁻¹ soil)	57.6±3.4	63.1±9.8	56.8±9.9
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	2.48±0.79	1.79±0.03	1.57±0.17
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	64.0±6.3	63.3±7.9	63.3±6.4
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	300±78	315±124	271±74
BD (g cm ⁻³)	ND	1.19±0.08	1.29±0.11
WFPS (%)	ND	74.9±6.6	35.7±9.4
<u>Oct. 17, 2003 (Milky stage of rice)</u>			
pH	5.2~5.5	4.9~5.4	5.2~6.2
EC (dS m ⁻¹)	0.83±0.04	1.13±0.46	0.68±0.13
OM (g C kg ⁻¹ soil)	45.0±6.5	58.7±16.4	55.9±6.9
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	2.20±0.08	1.89±0.11	1.32±0.07
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	76.5±17.9	61.8±3.5	51.7±28.9
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	417±93	506±59	530±66
BD (g cm ⁻³)	ND	1.22±0.04	1.23±0.08
WFPS (%)	ND	62.2±3.0	33.4±4.6

ND= Not detected.

表二、桃園區農業改良場土壤物理化學性質之變動（續）

Table 2. Changes in the physical and chemical properties of soils of Taoyuan District Agricultural Improvement Station, Taoyuan (continued).

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
	<u>Harvesting stage of rice</u>		
pH	5.3-5.4	5.6-5.9	5.3-6.2
EC (dS m ⁻¹)	0.71-0.80	0.51-0.81	0.70-0.94
OM (g C kg ⁻¹ soil)	32.2±8.22	21±6.26	16.1±8.65
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.68±0.46	0.97±0.12	1.04±0.10
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	118.61±0.95	109.3±13.5	110.5±10.2
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	171.6±31.96	167.2±23.5	212.1±31.35
BD (g cm ⁻³)	1.03-1.3	1.1-1.28	1.08-1.45
WFPS (%)	68.3-94.6	52.6-68	23.6-44.5
	<u>Fallow stage</u>		
pH	4.8-5.0	5.2-5.4	4.4-5.1
EC (dS m ⁻¹)	0.99-1.66	0.67-1.33	0.44-1.12
OM (g C kg ⁻¹ soil)	45.7±10.0	47.7±2.47	23.9±13.1
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.72±0.11	1.64±0.09	1.76±0.13
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	138.2±27.4	121.8±19.1	120.7±14.2
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	135.5±64.4	93.8±9.66	157.5±30.0
BD (g cm ⁻³)	1.03-1.33	1.05-1.2	1.07-1.27
WFPS (%)	57.6-93.6	33.8-44.9	52-66.6

ND= Not detected.

表三、台南區農業改良場土壤物理化學性質之變動

Table 3. Changes in the physical and chemical properties of field soils of Tainan District Agricultural Improvement Station, Tainan.

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
<u>May 28, 2003 (Harvesting stage of rice)</u>			
pH	7.3~7.5	6.0~6.5	7.1~7.6
EC (dS m ⁻¹)	0.90±0.11	0.65±0.20	0.21±0.09
OM (g C kg ⁻¹ soil)	14.8±1.0	14.4±1.5	13.5±2.6
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.35±0.10	1.18±0.08	1.33±0.24
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	8.5±2.2	26.5±3.1	13.5±1.6
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	134±4	84.0±2.2	105±46
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.30±0.06
WFPS (%)	ND	ND	ND
<u>Jun. 25, 2003 (Fallow stage of rice)</u>			
pH	5.7~5.9	5.7~5.6	6.7~7.7
EC (dS m ⁻¹)	0.88±0.21	0.71±0.12	0.24±0.10
OM (g C kg ⁻¹ soil)	14.6±0.7	14.2±0.5	11.1±1.8
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	8.2±0.9	28.0±6.4	31.3±1.0
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	77.1±24.1	195.4±90.0	387.5±137.0
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.39±0.13
WFPS (%)	ND	ND	ND
<u>Jul. 15, 2003 (Transplanting stage of rice)</u>			
pH	5.9~6.4	7.4~7.7	6.2~7.5
EC (dS m ⁻¹)	1.18±0.19	0.83±0.20	2.8±2.1
OM (g C kg ⁻¹ soil)	32.9±0.7	33.9±1.1	19.1±1.2
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	76.0±11.9	51.9±2.8	11.8±1.08
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	142±53	102±51	313±202
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.30±0.17
WFPS (%)	ND	ND	ND

ND= Not detected.

表三、台南區農業改良場土壤物理化學性質之變動（續）

Table 3. Changes in the physical and chemical properties of soils of Tainan District Agricultural Improvement Station, Tainan (continued).

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
<u>Aug. 26, 2003 (Active tillering stage of rice)</u>			
pH	7.1~7.4	6.2~6.8	6.2~7.5
EC (dS m ⁻¹)	1.37±0.19	1.36±0.03	1.81±1.02
OM (g C kg ⁻¹ soil)	24.2±1.82	27.1±2.59	12.7±2.3
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	66.9±10.2	51.7±4.2	56.4±15.8
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	88.3±25.9	80.1±4.06	90.3±24.6
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.39±0.13
WFPS (%)	ND	ND	ND
<u>Sep. 22, 2003 (Panical initiation stage of rice)</u>			
pH	6.3~6.6	7.1~7.2	6.1~7.2
EC (dS m ⁻¹)	0.61±0.06	0.68±0.04	5.54±0.51
OM (g C kg ⁻¹ soil)	27.1±1.3	26.9±2.6	20.6±2.0
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.23±0.03		
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	50.0±0.96	46.0±2.0	59.3±5.5
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	75.2±3.4	80.4±2.2	74.1±4.9
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	ND
WFPS (%)	ND	ND	ND
<u>Oct. 6, 2003 (Milky stage of rice)</u>			
pH	6.19-6.58	6.29-6.66	7.03-7.20
EC (dS m ⁻¹)	1.18-2.32	1.11-1.62	1.69-2.36
OM (g C kg ⁻¹ soil)	40.5±7.42	40.5±6.25	35.9±8.9
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.26±0.07	1.32±0.04	1.17±0.11
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	8.2±0.78	9.25±1.59	5.5±0.7
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	76.2±8.08	69.9±4.43	688±104
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	ND
WFPS (%)	ND	ND	ND

ND= Not detected.

表三、台南區農業改良場土壤物理化學性質之變動（續）

Table 3. Changes in the physical and chemical properties of soils of Tainan District Agricultural Improvement Station, Tainan (continued).

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
	<u>Oct. 27, 2003 (Harvesting stage of rice)</u>		
pH	6.18-6.32	6.29-6.64	6.89-7.13
EC (dS m ⁻¹)	0.89-1.24	0.61-0.71	1.08-2.01
OM (g C kg ⁻¹ soil)	28.9±1.68	35.7±2.1	21.4±2.36
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.16±0.09	1.18±0.07	1.09±0.09
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	11.24±1.48	12.2±0.54	11.3±1.59
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	134±17.8	161.5±19.7	970±56.5
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	ND
WFPS (%)	ND	ND	ND
	<u>Fallow stage of rice</u>		
pH	6.21-6.35	6.37-6.52	6.89-7.12
EC (dS m ⁻¹)	0.53-1.05	0.64-1.03	0.89-1.37
OM (g C kg ⁻¹ soil)	28±0.80	29.6±0.42	16.1±0.79
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.14±0.10	1.23±0.09	1.1±0.06
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	9.27±0.55	10.5±0.71	8.5±0.62
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	175±14.4	207.7±21.3	889±71.4
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	ND
WFPS (%)	ND	ND	ND

ND= Not detected.

表四、高雄區農業改良場土壤物理化學性質之變動

Table 4. Changes in the physical and chemical properties of soils of Kaoshiung District Agricultural Improvement Station, Kaoshiung.

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
<u>May 26, 2003 (Fallow stage of rice)</u>			
pH	6.8~6.9	6.9~7.1	7.2~7.7
EC (dS m ⁻¹)	ND	ND	ND
OM (g C kg ⁻¹ soil)	19.7	19.7	36.4
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	1.14	1.15	1.94
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	3.27±0.81	6.06±5.83	2.10±1.40
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	3.50±2.10	3.30±1.72	10.5±3.7
BD (g cm ⁻³)	1.38	1.32	1.44
WFPS (%)	92.4	62.8	79.7
<u>Jun. 2, 2003 (Transplanting stage of rice)</u>			
pH	6.9~7.3	6.8~7.1	6.9~7.4
EC (dS m ⁻¹)	ND	ND	ND
OM (g C kg ⁻¹ soil)	21.3±3.8	18.7±1.1	28.2±1.4
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	16.8±12.2	42.9±3.2	7.00±1.40
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	4.20±2.97	2.57±2.52	24.5±7.4
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.57
WFPS (%)	74.3	100	65.9
<u>Jul. 11, 2003 (Active tillering stage of rice)</u>			
pH	6.7~6.9	6.9~7.1	7.2~7.4
EC (dS m ⁻¹)	ND	ND	ND
OM (g C kg ⁻¹ soil)	18.3±1.1	23.7±0.8	25.4±2.5
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	22.4±6.10	11.2±3.96	3.73±2.14
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	0.93±1.06	0.70±0.69	5.60±3.96
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.51
WFPS (%)	100	100	65.2

ND= Not detected.

表四、高雄區農業改良場土壤物理化學性質之變動（續）

Table 4. Changes in the physical and chemical properties of soils of Kaoshiung District Agricultural Improvement Station, Kaoshiung (continued).

Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
<u>Aug. 4, 2003 (Panical initiation stage of rice)</u>			
pH	7.1~7.3	6.8~7.4	6.9~7.2
EC (dS m ⁻¹)	ND	ND	ND
OM (g C kg ⁻¹ soil)	16.4±0.7	19.8±2.2	32.7±3.1
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	7.70±2.97	6.30±4.95	7.00±1.98
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	0.10±0.11	0.10±0.11	1.40±1.10
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.47
WFPS (%)	100	100	93.3
<u>Aug. 28, 2003 (Milky stage of rice)</u>			
pH	6.6~6.9	6.4~6.8	6.7~6.9
EC (dS m ⁻¹)	ND	ND	ND
OM (g C kg ⁻¹ soil)	21.8±3.01	24.6±0.61	29.8±5.14
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	16.48±3.11	9.16±4.13	7.86±1.98
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	0.73±0.51	0.94±4.22	28.5±3.7
BD (g cm ⁻³)	ND	ND	1.42
WFPS (%)	100	100	79.7
<u>Sep. 29, 2003 (Harvesting stage of rice)</u>			
pH	6.4~7.1	6.6~7.4	6.3~6.8
EC (dS m ⁻¹)	ND	ND	ND
OM (g C kg ⁻¹ soil)	17.3±0.82	19.7±3.42	22.2±1.43
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	5.38±2.82	7.91±4.12	13.2±4.07
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	24.2±2.79	11.08±8.46	14.5±2.41
BD (g cm ⁻³)	1.42	1.48	1.37
WFPS (%)	84.5	92.2	84.3

ND= Not detected.

表四、高雄區農業改良場土壤物理化學性質之變動（續）

Table 4. Changes in the physical and chemical properties of soils of Kaoshiung District Agricultural Improvement Station, Kaoshiung (continued).

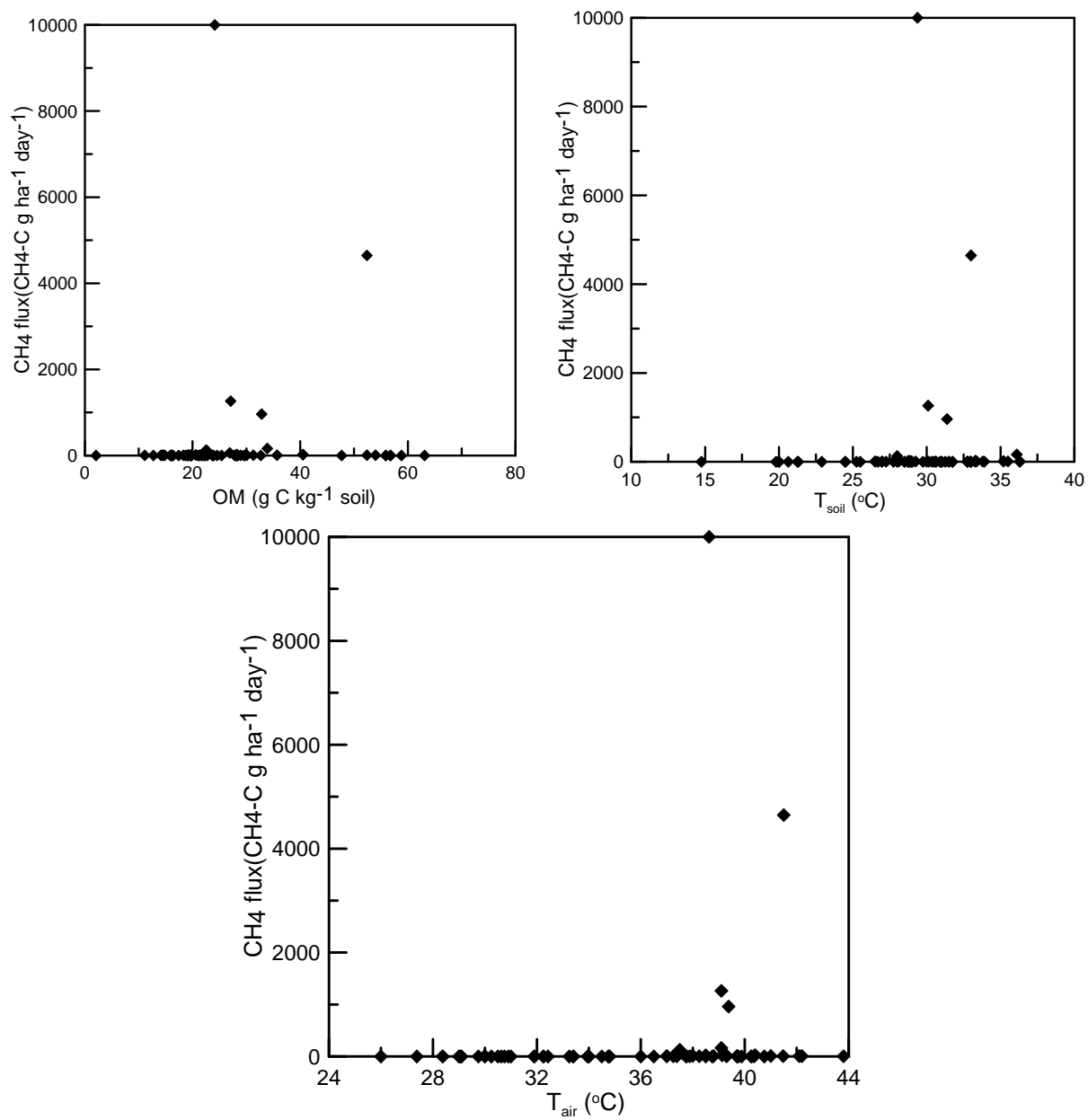
Parameter	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
		<u>Fallow stage of rice</u>	
pH	6.2-6.8	6.7-6.9	6.3-6.7
EC (dS m ⁻¹)	ND	ND	ND
OM (g C kg ⁻¹ soil)	15.9±1.79	21.8±2.37	19.25±1.59
Total N (g N kg ⁻¹ soil)	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺ (mg N kg ⁻¹ soil)	9.25±1.99	8.0±0.58	7.28±1.85
NO ₃ ⁻ (mg N kg ⁻¹ soil)	19.5±2.72	20.8±1.54	20.5±4.47
BD (g cm ⁻³)	1.37-1.42	1.36-1.42	1.34-1.38
WFPS (%)	72.6-84.2	78.4-84.2	70.8-76.4

ND= Not detected.

表五、台灣地區現行耕作制度對水稻田和旱田甲烷排放之影響

Location	Cultivation system	Growth stage of plant*								Mean
		H	F	T	AT	PI	M	H	F	
		CH ₄ flux (CH ₄ -C g ha ⁻¹ day ⁻¹)								
Taoyuan	Paddy-Paddy	5.56	0	4646	24.3	0.02	0.01	0.001	0.014	584.5
	Paddy-Upland	2.7	8.1	5.9	6.03	0.02	0	0.001	0.005	2.84
	Upland-Upland	14.2	8.6	5.9	2.2	0.01	0.01	0.002	0.002	3.87
Chaiyi	Paddy-Paddy	5.6	2.6	961	10000	128	22.5	3.59	0	1390.4
	Paddy-Upland	6.7	2.9	163.1	1263.8	61.2	21.1	6.23	0	190.63
	Upland-Upland	10.1	2.7	0.001	1.59	13.1	7.01	9.11	0	5.45
Kaoshiung	Paddy-Paddy	0.001	0.001	3.13	0.07	0.005	0.015	0.01	0	0.40
	Paddy-Upland	0.001	0.001	0.67	1.91	0.006	0.015	0.008	0	0.33
	Upland-Upland	0.001	0.014	0.001	0.03	0	0.013	0.005	0	0.01

* : H=Harvesting stage, F=Fallow stage, T=Transplanting stage, AT=active tillering stage, PI=panical initiation stage, M=milky stage, Mean = mean of CH₄ fluxes at all stages of plant



圖二、土壤有機質、土溫與氣溫與甲烷釋放量之相關分析

附表一、桃園、台南及高雄區農業改良場試驗作物之栽培管理

Appendix 1. The Management of experimental crops in Taoyuan, Tainan, and Kaoshiung District Agricultural Improvement Station.

Management	Cultivation system		
	Paddy-paddy	Paddy-upland	Upland-upland
<u>Taoyuan District Agricultural Improvement Station</u>			
Area (ha)	0.60	0.15	0.13
Crop	Rice-rice	Rice-sweet potato	Sesbania-vegetable
Seeding or transplanting date of 2nd crop	Aug. 5, 2003	Aug. 5, 2003	Aug. 5, 2003
Fertilizer	CF No. 5 ⁺ (325 kg)	CF No. 39 (40 kg)	CF No. 39 (80 kg)
Harvest date of 2 nd crop	Nov. 14, 2003	Nov. 14, 2003	Nov. 14, 2003
<u>Tainan District Agricultural Improvement Station</u>			
Area (ha)	0.05	0.10	0.05
Crop	Rice-rice	Soybean-Rice	Asparagus— Asparagus
Seeding or transplanting date of 2nd crop	Jul. 17, 2003	Jul. 17, 2003	--
Fertilizer (kg ha ⁻¹) (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	120-32-40	120-32-40	— [‡]
Harvest date of 2 nd crop	Oct. 27, 2003	Oct. 27, 2003	Oct. 27, 2003
<u>Kaoshiung District Agricultural Improvement Station</u>			
Area (ha)	0.50	0.50	0.30
Crop	Rice-rice	Sweet corn-Rice	Vegetable -sesbania
Seeding or transplanting date of 2nd crop	May. 29, 2003	May. 29, 2003	Jun. 18, 2003
Fertilizer (kg ha ⁻¹) (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	800-375-150	800-375-150	CF No. 1 (400~600)
Harvest date of 2 nd crop	Sep. 29, 2003	Sep. 29, 2003	Sep. 29, 2003

⁺CF is Compound Fertilizer produced by Taiwan Fertilizer Company.

[‡]— = No fertilizer or no data.