土壤與環境，民國八十九年十二月，第三卷，第四期，第363頁至第378頁
Soil and Environ., December 2000, Vol. 3, No. 4, p363-p378.

土地利用改變對台灣農地土壤有機碳存量之影響評估
Impact Assessment of Shifts of Land Use on Soil Organic Carbon Storage of Cultivated land in Taiwan

陳琦玲 Chiling Chen　林木連* Mulien Lin　郭鴻裕 Horngyuh Guo　江志峰 Chifang Chiang　劉滄琴 Tsangsen Liu　朱戩良 Chienliang Chu

ABSTRACT

This study is to evaluate the effect of the shifts of land use on soil organic carbon storage of cultivated land in Taiwan. The soil fertility survey data were used to evaluate soil organic carbon storage of cultivated land in Taiwan, and soil organic carbon contents were compared among different types of land use. On the base of soil survey data during 1978-1982, the storage of soil organic carbon on the surface soil (0-20 cm) of cultivated land in Taiwan is 27.5 Tg, calculated by 850 thousand hectares of cultivated land in 1998, assuming that the majority of cultivated land has reached to equilibrium under the same long-term cultivation. This amount is 93 % of carbon released from energy source in 1990. The organic carbon storage of surface soil (0-20 公分) is about 30-40 % of the organic carbon storage to a depth of 100 cm. The survey data shows that paddy field obviously can accumulate more organic matter; therefore, the storage of surface soil (0-20 公分) organic carbon can be added 4.7 Tg if the current upland field is shifted to paddy field. But there is 5.5 Tg carbon released from soil if paddy field is shifted to upland field, showing that the surface soil (0-20 公分) organic carbon of cultivated land in Taiwan is between 22.0 to 32.2 Tg. According to the result of long-term experiments, the time for equilibrium on shifts of land use is 30 years. Nevertheless, the carbon amount stored or released by upland field shifted to paddy field or paddy field shifted to upland field is about 0.5 % and 0.6 % of carbon released from energy source.

Key Words : Land use, Cultivated land, Soil organic carbon storage

摘　要

本研究之目的係利用土壤肥力調查資料估算台灣農地土壤有機碳存量，並評估土地利用改變對農地土壤有機碳存量之影響，藉此評估土壤有機碳存量之變動量佔能源部門釋出碳量之百分比，以了解土壤有機碳之變動量對溫室氣體減量之重要性。依據 1959-1967 年間全省農田肥力測定所調查之 78 萬公頃耕地的土壤有機質分析結果，估算全省農地表土 (0-20 公分) 的有機碳存量爲 21.7 Tg (太克，10^{12} g)，此碳量爲 1990 年能源部門釋出碳量 (29.5 Tg) 的 74 %。若以 1978-1982 年間之調查資料爲基礎，又假設大部分農地在長久相同耕作下

行政院農委會農業試驗所 ◦ Department of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute
*Corresponding Author

已達平衡，以 1998 年的耕地面積 85 萬公頃，計算台灣農地土壤的表土 (0-20 公分) 有機碳存量爲 27.5 Tg，此碳量爲1990年能源部門釋出碳量 (29.5 Tg) 的 93%。表土 (0-20 公分) 有機碳存量，約佔土壤一公尺深存量的 30-40% 左右。依調查資料顯示水田明顯可累積較多的有機質，因此若使現有的旱田轉作水田，則全省表土 (0-20 公分) 有機碳存量可再增加 4.7 Tg 碳量，但若將水田轉作旱田則表土 (0-20 公分) 有機碳可再釋出 5.5 Tg 之碳量，顯示台灣農地表土 (0-20 公分) 有機碳約在 22.0-32.2 Tg 之間。根據長期試驗結果顯示，土地利用改變所需的平衡時間約 30 年，因此，旱田轉作水田或水田轉作旱田，每年表土 (0-20 公分) 所貯存或釋出的碳量，約是能源部門釋出碳量的 0.5%與 0.6%。

關鍵字：土地利用、農地土壤、有機碳存量

前　言

土壤有機質不僅是土壤肥力之指標，也是生物圈中一重要的有機碳庫，據估計全球有機碳庫約有 1200 Pg (10^{15} g)，而大氣 CO_2 碳量爲 740 Pg (Batjes,1992)。在環境因素的變動中，扮演著來源 (source) 與貯存庫 (sink) 之角色 (Van Breemen and Feijtel, 1990)。有機質在土壤中的分解與腐植質的合成爲一緩慢且複雜的動態過程，在個別的土壤環境中達到平衡，使其含量穩定。此平衡狀態易因周圍環境的改變而破壞，再逐漸達到另一平衡水準。土壤水分含量的變化，耕作的交替，和氣象條件的變動，都是使土壤有機質平衡狀態改變的可能原因 (Zinke *et al.*, 1984)，因此，土壤有機質的含量則取決於每年的投入量與其分解速率。氣候變遷可能影響土壤溫度與水分或改變植物生長及地下部殘留，而影響土壤有機質的分解與聚積，而土地利用與管理可能對土壤有機碳存量的影響更大。台灣地處亞熱帶和熱帶地區，有助於土壤微生物的繁殖與生長，土壤有機質的分解速率快速，相對於溫帶與寒帶土壤有機碳存量相對含量偏低 (Raich and Potter, 1995;Ping *et al.*, 1998)。然而，因爲農地面積大，不同因子所引起之土壤有機碳存量的變動仍值得關切。

根據郭等人 (1995) 之分析，土地利用、氣候與土壤性質爲影響本省農地土壤有機質含量之主要因子。本研究之目的係進行歷次土壤調查資料之整理與分析，選擇較完整的調查資料，概略估計台灣農地土壤有機碳存量，並評估土地利用改變對農地土壤有機碳存量之影響，藉此評估土壤有機碳庫之變動量佔能源部門釋出碳量之百分比，以了解土壤有機碳之變動量對溫室氣體減量之重要性。

材料與方法

一、全省農田土壤有機碳存量之估算

台灣地區的土壤調查始於 1910 年代日本人所進行的耕地調查，至今八十餘年，其中全面性較詳細的肥力調查，共有四次 (表一)。第一次爲 1949-1950 年間之全省地力測定，第二次爲 1959 年開始之台灣省農田肥力測定計畫，第三次爲 1978 年 7 月開始之台灣省土壤肥力能限分類規範調查研究計畫，第四次爲 1992 年開始之台灣省農田土壤環境品質及生產力調查計畫。比較前述歷次土壤調查的採樣密度、分析項目與方法，選擇資料較完整者，分析與計算台灣地區土壤有機碳的貯存量。

依據前述選擇合適的土壤調查資料，以各採樣點的代表面積在假設每公頃表土有 2.6×10^6 kg 土重 (假設表土平均總體密

表一、台灣地區歷次土壤調查採樣密度之比較
Table 1. Comparison of the sampling density in soil surveys in Taiwan.

Soil survey	Period	Samples	Representative area (ha/sample)	Soil depth of sampling (cm)
Taiwan soil fertility	1949-1950	1000	600	0-20, 20-50
Soil test for the cropland of Taiwan	1959-1967	78635	10	0-20
Taiwan paddy soil capability classification	1978-1982	5730	105	0-20, 20-40*
Soil environment quality and productivity survey for crop land of Taiwan	1992-	100000	6.25	0-15, 15-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150

*Subsoil (20-40cm) were sampled, but were not analyzed.

度爲 1.3 g/cm^3)，計算全省農地土壤有機碳的存量。前三次的土壤調查均以重鉻酸氧化法測定土壤有機質含量。第四次則以高溫灰化法測定土壤有機質含量 (Ben-Dor and Banin, 1989)。

二、不同土地利用形態之土壤有機碳含量

爲探討不同土地利用下之土壤有機碳存量，係從以往的土壤調查資料進行分析，另外調查比較幾處不同氣候區下不同土地利用形態之土壤有機碳含量。

1. 土壤資源資料庫資料之整理與分析

歷次的土壤調查報告資料只有 1978-1982 年由林家棻先生主導者，才有土地利用記錄，且只分析表土 (0-20 公分) 有機碳含量。故以此次調查資料爲基礎，分析各縣市不同土地利用形態之表土 (0-20 公分) 有機碳含量。土地利用形態包括：雙期作水田、輪作田與永久旱田 (蔗田、茶園)。只是土壤調查工作大部份都在農閒時進行，因此有些採樣點並未記錄作物種類，水田耕作亦未詳細記錄爲雙期作水田或輪作田，因此以水利會出版之灌溉區圖 (將灌區繪於二萬五千分之一的地形圖上) 及農林廳各縣市農地利用綜合規劃報告 (農林廳, 1990) 補之，但因原調查資料只有記錄村名，並沒有詳細記載地點坐標，因此若一村中有兩種以上之耕作方式則不能分辨之。因此，同一村落之田區雙期田與輪作田都存在時，因不能確定是何者，而都計爲輪作田。此外，灌區圖上並沒有村界甚至沒有村名，因此，資料比對工作相當困難且耗時。

2. 不同土地利用形態之土壤有機碳比較

由於前述土壤肥力調查報告資料，只有表土 (0-20 公分) 有機碳含量，因此根據目前正在進行之土壤調查工作，選擇幾處可供同一氣候形態下，不同土地利用形態之土壤有機碳貯存量比較之地點，至田間調查並採樣分析土壤有機碳含量以進行比較。爲使採樣點具有代表性，不同土地利用形態之土壤樣本 (0-30 cm) 採取 20-30 個樣本。調查之地點如下：

(1) 桃園台地舊有茶園與石門水庫新灌區，從 1964 年水庫啓用後，由旱田轉成水田，此地點屬雨量豐富之亞熱帶溼潤區。此次採樣主要在中壢與龍潭地區。中壢地區茶園採樣涵蓋面積約 1 ha，牧草地約 8 ha，水田則因面積小且分散而沒有採樣，茶園與牧草地分別採7 與7 個點。龍潭地區水田採樣涵蓋面積約300 ha，茶園約 6 ha，牧草約 2 ha。水田、茶園與牧草地分別採

30、14 與 4 個點。採樣區土壤屬紅壤，質地爲細質地。

(2) 竹東地區亦屬雨量豐富之亞熱帶溼潤區。採樣主要分布於竹東大圳沿圳之水田及附近地勢較高，引不到水源之旱地，水田採樣面積約 200 ha，旱田約 3 ha，主要是山坡之竹林與柑桔園。水田與旱田分別採 25 與 15 個點。採樣區土壤屬於砂頁岩沖積土紅壤，質地爲中質地。

(3) 台南新化畜產試驗所原有旱田，與建所後，將原旱田轉爲種牧草者。氣候是屬亞熱帶溼潤區，但雨量少於桃園地區。水田採樣涵蓋面積約 200 ha，蔗園約 6 ha，牧草則採畜試所之牧草地約 9 ha。水田、蔗園與牧草地分別都採 30 個點。採樣區土壤屬砂頁岩沖積土，旱田質地爲粗質地，水田質地爲中質地。

(4) 屏東墾丁地區之水田、旱田與牧草地，氣候屬熱帶溼潤區，但乾、雨季分明。水田採樣涵蓋面積約 1000 ha，旱田約 700 ha，栽種作物有花生、玉米及芒果、荔枝園，牧草則採畜試分所之牧草地約 3 ha。恆春附近農田原都是雙期作水田，現大部份都改爲水稻-洋蔥輪作。水田、旱田與牧草地分別採 20、15 與 20 個點。此地區土壤是砂頁岩、泥岩沖(堆)積土，質地爲中質地。

爲探討不同土地利用形態下之土壤有機碳在土層中之存量，故各採樣區均逢機取樣，採取 0-15、15-30、30-50、50-70、70-90 cm 的土壤樣本。各地區的採樣點數如圖四所示。有機碳之分析採重鉻酸氧化法 (Nelson and Sommers, 1982)。土壤總體密度測定採樹脂覆膜法 (Blake and Hartge, 1986)，不同的土地利用各採三個剖面，但本次調查僅測定 0-15、15-30、30-50 公分之總體密度，下層土壤乃依據土壤調查資料設爲 1.5 g/cm^3 (向, 1988)，以估算土壤有機碳存量。

結果與討論

一、台灣地區歷次的土壤肥力調查回顧

台灣地區的土壤調查始於 1910 年代日本人所進行的耕地調查，至今八十餘年，其中全面性較詳細的肥力調查，共有四次(表一)，第一次爲 1949-1950 年間，由席連之與張守敬先生主導之全省地力測定 (席與張，1951)，該次調查土壤樣本採集的區域，以可耕地爲限，平均六平方公里或六百公頃中有一代表性的樣本，每一採樣點採表土 (0-20 公分) 與底土 (20-50 公分) 樣本，以當時台灣有六十多萬公頃的可耕地(應是以平地耕地計算)，全省共採一千餘點。土壤特性之測定包括土壤質地、pH、有機質與植物營養元素含量，其中有機質以 Wilde 氏的比色法 (Wilde, 1942) 測定，此方法的原理和重鉻酸氧化法一樣，其準確度亦不下之。當時亦繪製五十萬分之一的全省土壤有機質分佈圖。

第二次爲台灣省農田肥力測定計畫，於 1959 年開始，由曾憲鼎先生主持，王接皇先生協助，至 1965 年 7 月林家棻先生接續 (林，1967)，歷時8年，採樣乃按照該縣 1/4800 地籍圖及當地之地形、地勢，以每 10 公頃農地劃爲一單位，採取代表性之表土 (0-20 公分) 混合樣本一個，同時將採樣地點、地形、地勢、灌排水情形、作物種類、生長情形及施肥數量等，詳填於土壤資料表上。不過現在這些資料都已遺失。該計畫共計採取土壤樣本 78,635 個，以每 10 公頃採取一個樣本計算，相當於 786,350 公頃，按農林廳編農業年報 (1966) 中記載，本省耕地面積除基隆、台北、台中、台南及高雄等省轄市及澎湖外，爲 860,656 公頃，兩者相差約 7 萬餘公頃，其中可能因部分台糖自營農場，未採取土壤樣本，或因部分地區擴建關係，或因地形限制，

採取樣本密度超出 10 公頃範圍等等原因所致。該計畫共完成 15 縣之農田肥力分佈圖，其比例尺均爲 1/100,000，每縣計有土壤質地、pH 值、有機質、有效磷與有效鉀等 5 種，其中土壤有機質之測定乃採用霍克萊與白來克氏修正法 (Modified Walkeley and Black method) (Black,1965)。當時的農田肥力分佈圖，乃由繪圖人員，將分析資料依照採樣號碼，填寫於原採樣底圖上 (即 1/4,800 地籍圖) 後著手繪圖，其步驟先將 1/4,800 地籍圖，依其經緯度移於方格紙上後，縮小爲 1/25,000 之鄉鎮圖，再縮小爲 1/100,000 之縣農田肥力分佈圖，更縮小爲 1/500,000 全省農田肥力分佈圖，縣農田肥力分佈圖經由複印機複印後，依照肥力等級分別予以著色。不過，將所繪製的縣有機質分佈圖輸入 Arc/Info 地理資訊系統電腦後，所計算的面積爲 1,349,000 公頃，與實際調查的面積相去甚遠，故所繪製的土壤有機質分佈圖僅可視爲示意圖，不能用於全省農地有機碳存量之計算。

第三次爲台灣省土壤肥力能限分類規範調查研究計畫，本調查係屬行政院科技聯繫小組重點計畫之一，由農發會補助經費，農試所林家棻先生主辦 (林，1981-1984；1985a,b)，合作機構除農林廳農產科及所屬場所外，尚有國立中興大學、國立屏東農專以及臺灣糖業研究所。該計畫自 1978 年 7 月開始，至 1982 年 6 月止，共計完成 15 縣 (澎湖縣除外) 田間調查工作，在第二期水稻收割後採取土壤樣本，採取土壤剖面及表底土樣本各 5,730 個，代表耕地面積估計達 6,059 km^2，每一樣本約代表 105 ha，調查樣本數目所代表之土類，土系及面積如表二。依據當時的航測調查資料 (行政院農業委員會，1980)，該次調查應主要是平地之耕地。該計畫雖採表土和底土樣本，但因工作量太大，故僅分析表土 (0-20 公分) 樣本，分析項目包括：土壤質地、酸鹼度 (pH 值)、有機質、陽離子交換容量 (CEC)、有效磷與有效鉀等。在採樣時記錄作物種類，此部分資料與分析結果一併建檔。該次土壤調查雖然採樣點不及第二次調查多，但記錄資料較詳細且已建立電腦檔案。

第四次爲台灣省農田土壤環境品質及生產力調查計畫，此計畫源於農委會已退休技正王新傳先生之構想，認爲台灣地區人口稠密，工商發達對於農地生產環境衝擊甚大，需要有一完整的監測系統以控制農地品質。另一方面台灣農地的集約耕種，對於土壤地力的影響頗大，同時也需要加以監測，供爲防範地力衰退之問題，以達永續性之高度作物生產。此計畫之經費除了省府公務預算外，亦有農委會之補助。於 1992 年開始進行，由農試所郭鴻裕先生主持，各區農改場、中興大學與台灣

表二、土壤肥力能限調查所採樣本數目代表之土壤類別及其面積之百分比
Table 2. Percentage of area and soil types of cropland sampled in the soil capability classification.

Item	Soil Capability Classification	Detailes soil survay	Percetage (%)
Sampling No.	5730	–	–
No. of soil group	89	94	95.0
No. of soil series	764	1040	73.5
Estimated area (km^2)	6068.8	8233.2	73.5

(Source：林,1981)

大學，均有工作人員參與採樣與樣品之分析。整個計畫之執行，可分爲點 (基標土系) 監視與面 (網格) 監視兩個工作重點。基標土系之調查以土系 (或土相) 爲最小單位，進行土壤各種基本性質之調查。網格調查則以每 6.25 公頃 (250 公尺 ×250 公尺) 爲一單位，全省性的採取土壤剖面層次樣本 (如表一)，供土系判斷及土壤分析之用，並依鄉鎮撰寫各鄉鎮之土壤品質及生產力調查報告。土壤樣本的分析包括土壤質地、酸鹼度 (pH 值)、有機質、陽離子交換容量 (CEC)、總氮、有效性磷、有效性鉀等項目，其中有機質分析採用高溫灰化法 (Ben-Dor and Banin, 1989)，與前幾次土壤調查之分析方法不同。此計畫受限於人力與經費之不足，截至目前爲止，僅完成預計採樣點 (100,000) 之 25% 的採樣工作，故還不能應用於全省農地有機碳庫之計算。

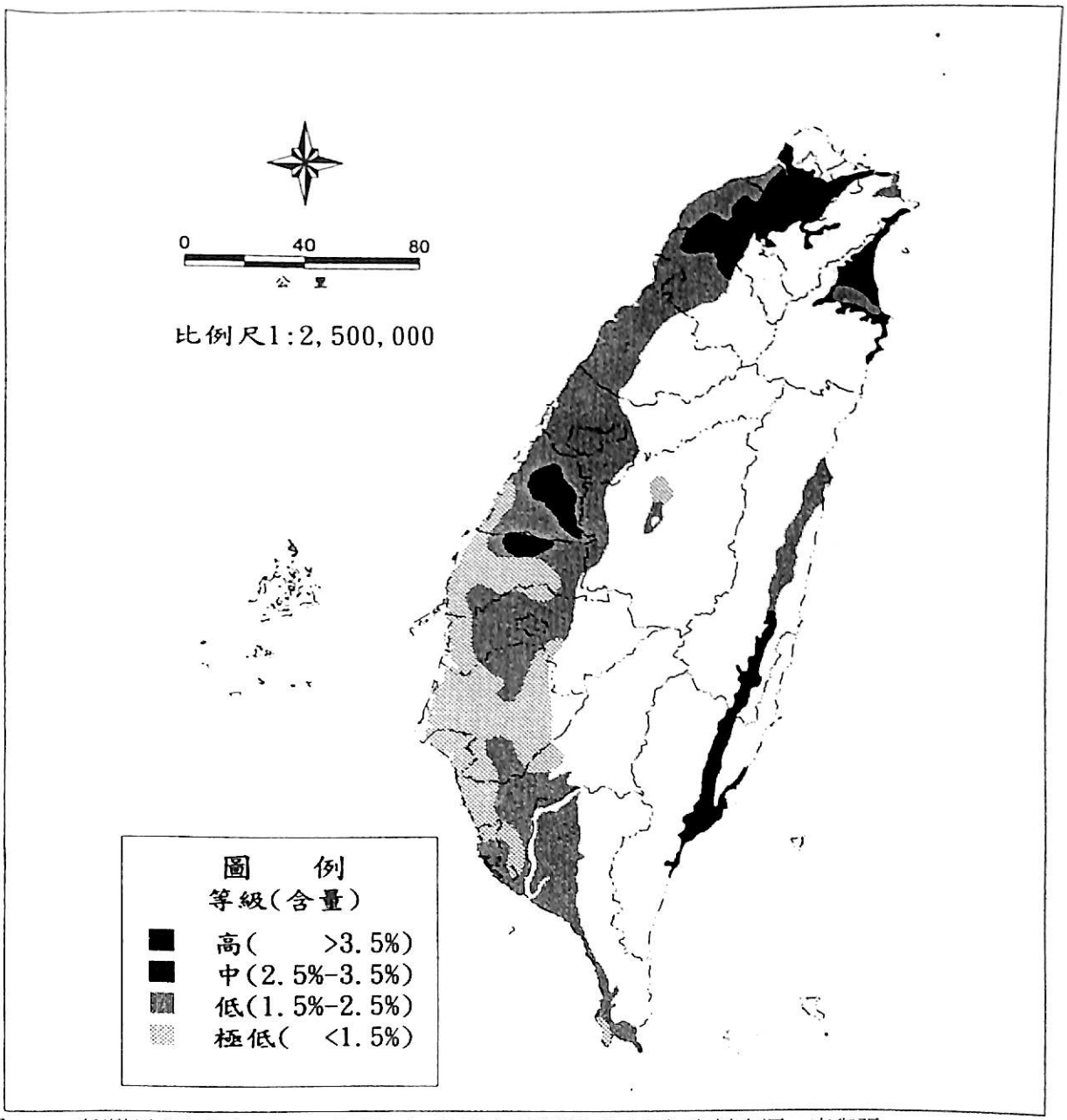
二、全省農田土壤有機碳存量之估算

比較歷次土壤肥力調查資料，除了第四次調查因未完成，而不能提供全面性農地土壤有機碳存量的資料，其他三次均可提供相當的資訊，只因採樣密度及當時繪圖工具不足，全面性的評估有相對的誤差。

1949-1950 年間的全省地力測定，曾以人工繪製全省表土 (0-20 公分) 與底土 (20-50 公分) 有機質分佈圖；比例尺爲 1：500,000，1959-1967 年間的全省農田肥力測定，亦曾以人工繪製各縣市表土 (0-20 公分) 有機質分佈圖，比例尺爲 1：100,000。將兩次的分佈圖輸入地理資料系統，繪製比例尺 1：2,500,000 之全省表土 (0-20 公分) 有機質分佈圖如圖一、圖二。雖然兩次調查採用的有機質分級不同，但從等級分佈圖，顯示兩次調查土壤有機質分佈大致相似，足見十年間土壤有機質的變動量，應不至太大。只是 1959-1967 年間的土壤調查採樣密度較密，可得較準確之分佈圖。

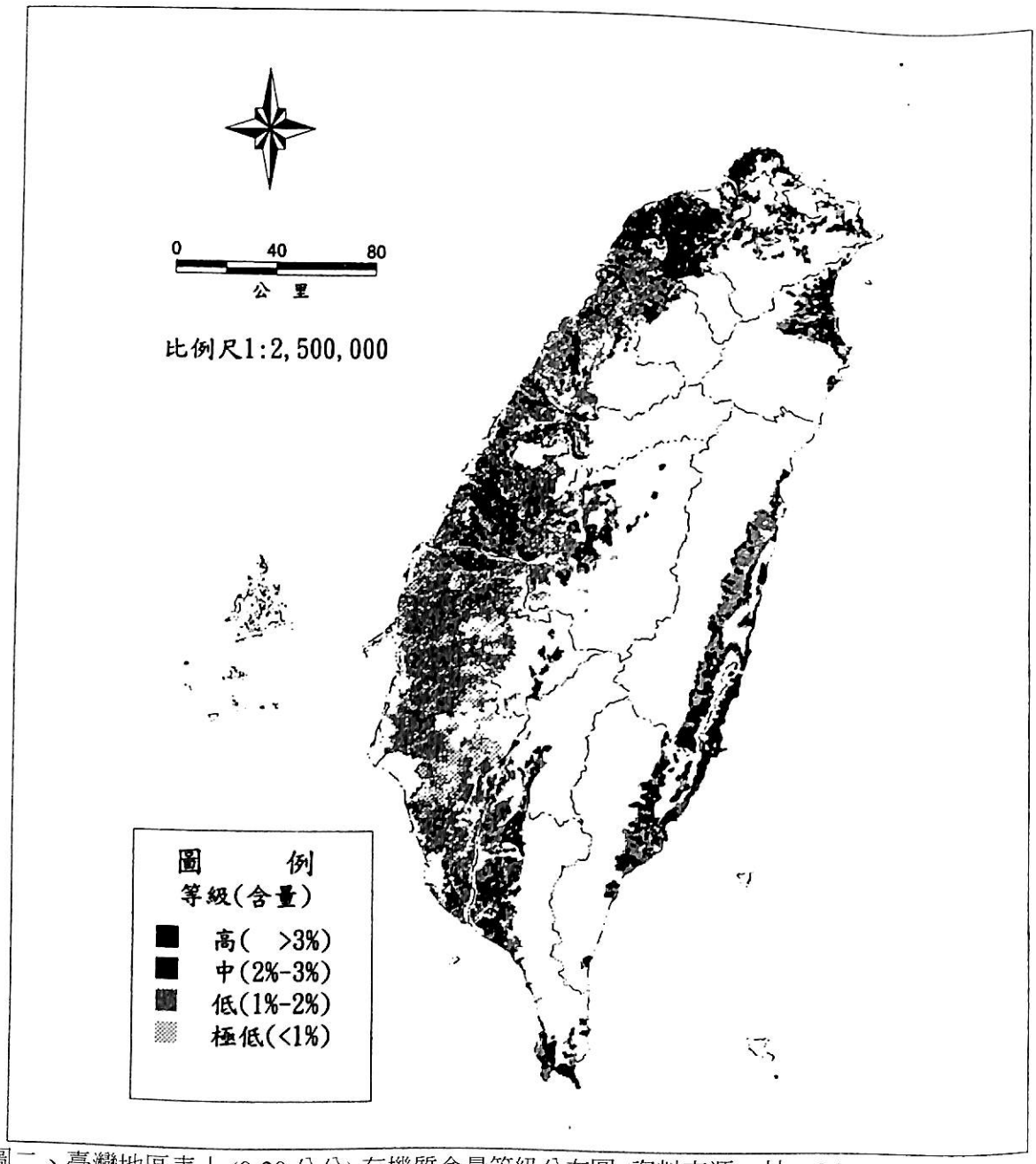
由於前人歷次土壤調查人工繪製的土壤有機質分佈圖，比例尺小，故誤差大，僅能作爲示意之用不能作爲有機碳存量之估算。最近一次全省農田土壤調查工作，雖然採樣密度最大，但僅完成 25%。故僅能以前人完成之土壤有機質測定值直接估算。在前述三次的土壤調查工作，以 1959-1967 年間之土壤調查採密度最爲密集，調查面積亦較廣，已佔當時耕地面積之 91%。以該次的土壤調查結果作爲基礎，估算全省農田土壤有機碳存量。依據調查分析結果，各縣市土壤有機質的含量如表三。若以當時採樣密度，以一採樣點代表 10 公頃計算，78,635 個樣本代表台灣地區農田 78.6 萬公頃的表土 (0-20 公分)。若分別以 0.75、1.5、2.5 與 3.5% 爲土壤有機質極低、低、中、高等級之平均值，以 1.3 g/cm 爲表土 (0-20 公分) 的平均總體密度 (即每公頃 0-20 公分表土爲 2.6×10^6 kg 重)，乘上調查當時土壤有機質各等級的分佈面積，並以土壤有機質含58% 有機碳計算，即估得當時臺灣地區表土 (0-20公分) 有機碳存量爲 21.7 Tg (太克，10^{12} g)。按此估值，台灣耕地之有機碳總貯存量佔 1990 年能源部門釋出碳量 29.5 Tg (楊與方, 1995) 的 74%。以歷年全省土地利用變化情形 (圖三)，雖然 1967 年至今耕地面積變化不大，但由於第二期作水田有較多面積轉作旱作，因此推測目前的土壤有機碳存量應較 1960 年間縮小。

若以 1978-1982 年間之調查資料爲基礎估算農地有機碳存量，則因當時土壤調查總面積約爲 60 萬公頃，僅爲當時耕作面積 (約 90 萬公頃) 的 67%，因此在假設大部份農地在長久相同耕作下已達平衡，以 1998 年 85 萬公頃爲農地面積，來估算台灣地區



圖一、臺灣地區表土 (0-20公分) 有機質含量等級分布圖 (資料來源：席與張, 1951)
Fig. 1. Organic matter content of surface soils (0-20 cm) in Taiwan. (Source: Hsi and Chung, 1951)

農地表土有機碳存量。估算方法乃以當時各縣市雙期作水田與輪作田之平均土壤有機質 (表四) 與 1998 年各縣市水田面積 (農業年報，1998) 之乘積的總和，作爲水田之有機質存量，各縣市各種旱作之平均土壤有機質 (表四) 與 1998 年各縣市旱田面積



圖二、臺灣地區表土 (0-20 公分) 有機質含量等級分布圖 (資料來源：林, 1967)
Fig. 2. Organic matter content of surface soils (0-20 cm) in Taiwan. (Source: Lin, 1967)

(農業年報，1998) 之乘積的總和，作爲旱田之有機質存量，並以 1.3 g/cm 爲表土 (0-20 公分) 的平均總體密度 (即每公頃 0-20 公分表土爲 2.6×10^6 kg 重)，且土壤有機質中含 58%有機碳計算，則台灣地區農地表土 (0-20公分) 的有機碳存量爲 27.5 Tg。此碳量爲

表三、本省農田表土 (0-20 公分) 有機物含量之分配百分比與其估計面積
Table 3. Distribution of organic matter content in surface soil (0-20 cm) of crop land in Taiwan.

County	No. of Samples	Very Low (VL) <1%		Low (L) 1% −2%		Middle (M) 2% −3%		High (H) >3%	
		%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)
Taipei	3593	3.48	1250.4	25.83	9280.7	41.89	15051.0	28.81	10351.4
Taoyuan	5511	0.67	369.2	9.62	5301.6	52.33	28839.1	37.38	20600.1
Hsinchu	5283	16.37	8648.3	55.82	29489.7	25.01	13212.8	2.80	1479.2
Miaoli	5249	18.54	9731.6	54.32	28512.6	24.63	12928.3	2.51	1317.5
Taichung	4623	13.37	6181.0	55.55	25680.8	28.27	13069.2	2.81	1299.1
Changhua	6697	7.64	5116.5	45.20	30270.4	42.59	28523.5	4.57	3060.5
Yunlin	8675	19.80	17176.5	66.57	57749.5	12.52	10861.1	1.11	962.9
Nantou	3420	19.94	6819.5	55.34	18926.3	21.43	7329.1	3.39	1159.4
Chiayi	7087	21.15	14989.0	69.03	48921.6	8.55	6059.4	1.27	900.0
Tainan	9673	29.24	28283.9	66.08	63919.2	4.40	4256.1	0.28	270.8
Kaohsiung	5286	10.35	5471.0	62.85	33222.5	23.97	12670.5	28.3	1495.9
Pingtung	6740	4.72	3181.3	35.71	24068.5	46.25	31172.5	13.32	8977.7
Taitung	2845	2.07	588.9	27.94	7948.9	39.54	11249.1	30.44	8660.2
Hualien	2443	7.66	1871.3	45.72	11169.4	32.95	8049.7	13.67	3339.6
Ilan	1510	0.58	87.6	32.52	4910.5	53.58	8090.6	11.32	1709.3
Total	78635	—	109766.0	—	399372.2	—	211362.0	—	65583.6
%	100	14.0		50.8		26.9		8.3	

(Source：林, 1967)

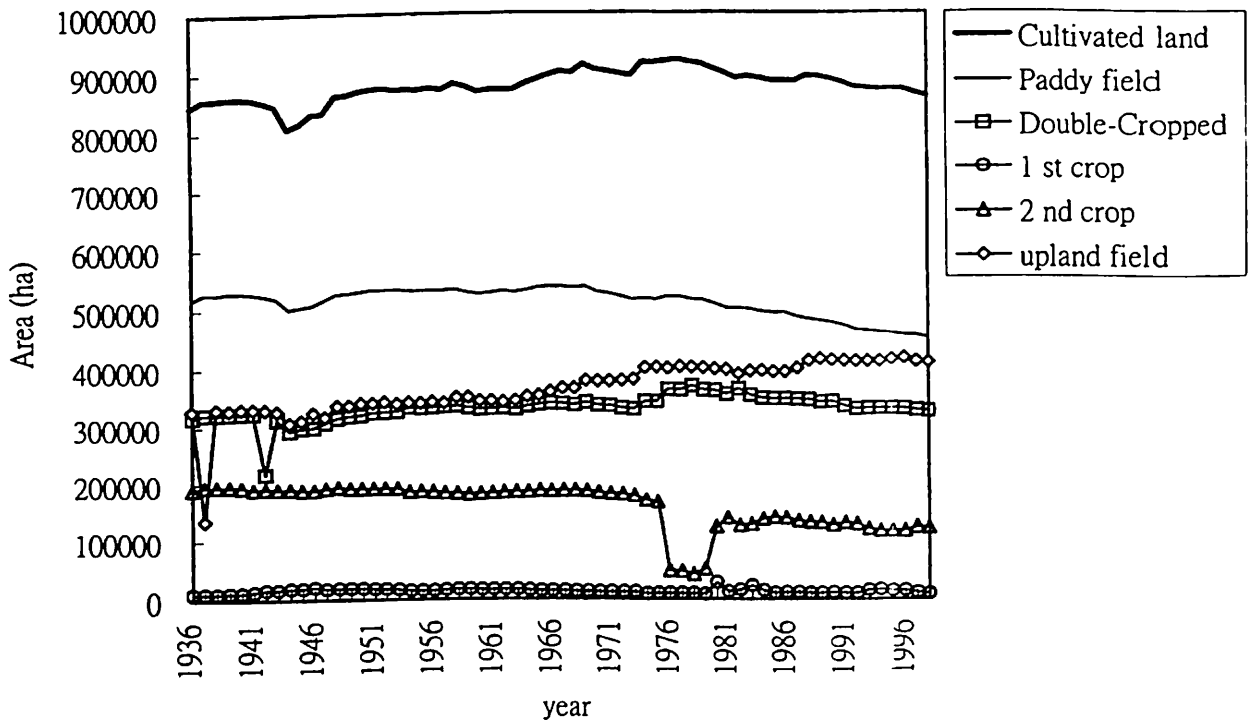
1990 年能源部門釋出碳量 (29.5 Tg) 的 93 %。

Chen 與 Hseu (1997) 曾以 100 個耕地土壤剖面樣本，估算台灣耕地整個土壤剖面的有機碳庫總量，依據其估計 0-30 公分土層 61 Tg 之有機碳存量，比目前本研究估得之 0-20 公分含 21.7 Tg 及 27.5 Tg 之有機碳存量，相去甚遠，除了估算之土層厚度不同外，其估算不同土類之面積分布，應是差異的主要原因。

三、不同土地利用形態之土壤有機碳含量

1. 土壤調查資料庫資料之整理與分析

雖然 1978-1982 年間土壤調查資料中，土地利用之記錄不夠詳盡者，已經由水利會灌區圖與農林廳各縣市農地利用綜合規劃報告之補充，但仍未能完全釐清確實的土地利用，不過根據 5,433 個調查樣本之有機質分析結果 (表四)，各縣市不同的土地利用形態明顯影響土壤有機質含量，水田明顯可累積較多的土壤有機質，雙期作水田之土壤有機質含量又高於輪作田。至於輪作田有機碳含量與雙期作田相近，及嘉義、台東、花蓮縣輪作田之土壤有機質稍高於雙期作田，可能是因同一村落之田區雙期田與輪作田都存在時，因不能確定是何者，而都計爲輪作田之故，但整體而言，水田之表土有機碳存量均高於旱田。苗栗縣兩處栽種牧草地，表土有機碳存量較高，但仍不及水田者。



圖三、台灣地區耕地土地利用變遷圖 (資料來源：臺灣農業年報, 1936-1998)
Fig. 3. Shift of land uses for cultivated land in Taiwan (Source: Taiwan Agricultural Yearbook, 1936-1998)

在旱作中，各縣市之蔗田的平均有機碳含量，除了新竹外，都與其他旱作之平均值相近，顯示不同旱作作物之耕作，對表土有機碳之含量之影響相近，而且蔗田之有機碳含量甚至可作爲旱作者代表，茶園則較沒有規律，但比蔗園可保持較多的有機質。

在假設 1978-1982 年間土壤調查時，大部份農地在長久相同耕作下已達平衡時，可估算土地利用改變，對土壤有機碳存量的影響。其中旱田轉作水田可貯存碳量之估算，乃以旱田面積乘上水田與旱田土壤有機碳含量差值得之。而水田轉作旱田所釋出之碳量，則以水田面積乘上水田與旱田土壤有機碳含量之差值得之。藉此估算方法，若使現有的 (以 1998 年計算) 旱田轉作水田，則全省表土 (0-20 公分) 有機碳存量可再增加 4.7 Tg 碳量，但若將水田轉作旱田則表土 (0-20 公分) 有機碳可再釋出 5.5 Tg 之碳量，顯示台灣農地表土 (0-20 公分) 有機碳約在 22.0-32.2 Tg 之間。根據台灣幾處長期試驗結果顯示，在土壤環境下，土地利用改變所需的平衡時間約 30 年 (陳與連, 1995)，因此，旱田轉作水田或水田轉作旱田，每年表土 (0-20 公分) 所貯存或釋出的碳量，約是 1990 年能源部門釋出碳量的 0.5% 與 0.6%。

根據 1949-1950 年間與 1959-1967 年間兩次土壤調查所繪製的台灣地區表土 (0-20 公分) 有機質含量分佈圖 (圖一、圖二)，可大致看出其分佈，受氣候區之影響，除了東部地區不同外，一般而言，北部地區較中部地區之有機質含量高，中部地區又較南部地區之有機質含量高。

表四、依據林等(1984)調查資料計算各縣市不同土地利用形態之表土(0-20 公分)有機質含量
Table 4. Organic matter content of surface soil (0-20 cm) under different land use in Taiwan. Data calculated from Lin (1984)

County	OM* (% Mean ±SD)						Total samples
	Two cropping rice	Rotation cropping	Sugarcane	Tea	Grass	Other upland cropping	
Taipei	3.9 ±1.0 (16)**	3.4 ±1.1 (178)	- -	3.0 ±0.5 (10)		2.3±0.8 (27)	231
Ilan	3.3 ±0.8 (176)	3.3 ±1.0 (139)	- -	- -		1.7±0.7 (23)	338
Taoyuan	3.0 ±0.7 (108)	2.8 ±0.8 (129)	- -	2.01 ±0.5 (5)		2.9±0.8 (32)	274
Hsinchu	2.4 ±0.7 (51)	2.4 ±0.6 (153)	2.0 ±0.4 (2)	- -		0.7±0.3 (3)	209
Miaoli	2.3 ±0.8 (162)	2.3 ±0.7 (189)	0.9 ±0.3 (2)	1.5 ±0.6 (5)	1.7±0.4 (2)	1.2±0.8 (70)	428
Taichung	2.7 ±0.8 (83)	2.6 ±0.6 (116)	1.6 ±0.6 (38)	-	-	1.5±0.4 (6)	273
Changhua	2.8 ±0.8 (134)	2.6 ±0.7 (109)	1.8 ±0.6 (15)	-	- -	1.8±0.8 (106)	364
Nantou	2.2 ±0.4 (47)	2.1 ±0.5 (66)	1.7 ±0.5 (9)	2.1 ±0.3 (3)		1.8±0.6 (63)	188
Yunlin	2.8 ±0.9 (68)	2.0 ±0.9 (291)	1.4 ±0.5 (62)	-	- -	1.4±0.5 (158)	579
Chiayi	1.8 ±0.5 (46)	1.9 ±0.7 (220)	1.5 ±0.5 (104)	-	- -	1.6±0.8 (181)	551
Tainan	2.2 ±0.8 (20)	1.9 ±0.5 (142)	1.4 ±0.4 (108)	-	- -	1.47 ±0.4 (150)	420
Kaohsiung	2.2 ±0.7 (20)	2.2 ±0.9 (67)	1.4 ±0.5 (26)	-	- -	1.3±0.5 (99)	212
Pingtung	2.9 ±1.1 (231)	2.7 ±1.0 (476)	1.9 ±0.8 (62)	-	- -	1.6±0.7 (169)	938
Taitung	2.7 ±0.5 (6)	3.1 ±1.2 (113)	2.3 ±1.1 (27)	-	- -	2.5±0.9 (46)	192
Hualien	2.6 ±1.0 (23)	2.7 ±0.9 (110)	1.5 ±0.7 (64)	2.6 ±0.3 (3)		1.8±1.0 (64)	264
Total	1191	2498	519	26	2	1197	5433

* Organic carbon=Organic matter X 0.58

**Samples

2.四處採樣區不同土地利用形態之土壤剖面有機碳比較

由各採樣區不同土地利用之土壤剖面有機碳含量分佈圖 (圖四) 顯示，除了竹東在 70-90 cm 之有機碳較上層者略爲提高外，一般而言，有機碳在土層中之分佈隨土層深度遞減。採樣範圍較廣之地區水田表土 (0-15 公分) 有機碳含量多寡之次序(表五)，桃園>恆春>台南，與 1978-1982 年土壤調查結果相同，顯示此次調查雖然採樣範圍不大，仍然具有代表性。旱作則因作物種類不同，而稍有差異。

根據農業年報 (1988) 的調查資料，顯示台灣牧草地的面積不大，約只佔耕地面積的 1% 左右。從本次三處 (桃園、台南、恆春) 土壤剖面有機碳含量 (圖四) 顯示，牧草與水稻一樣，可累積較多的有機質，但因地區而有程度上的差異。桃園地區的牧草地僅表土 (0-15 公分) 的有機碳高於旱作 (茶)，表土以下則與旱作 (茶) 相近，台南亦相同。而桃園與台南還不及水稻田累積較多的有機碳。此結果與 1978-1982 年間苗栗縣兩處栽種牧草地之調查結果相同，總體而言，雙期作水田較牧草，可累積較多的有機質。但恆春畜試所的牧草地土壤整個剖面的有機質均高於水稻，此因恆春地區的水田，大部份都是水稻與洋蔥的輪作田，因此其土壤剖面有機碳含量不如雙期作水田豐富。

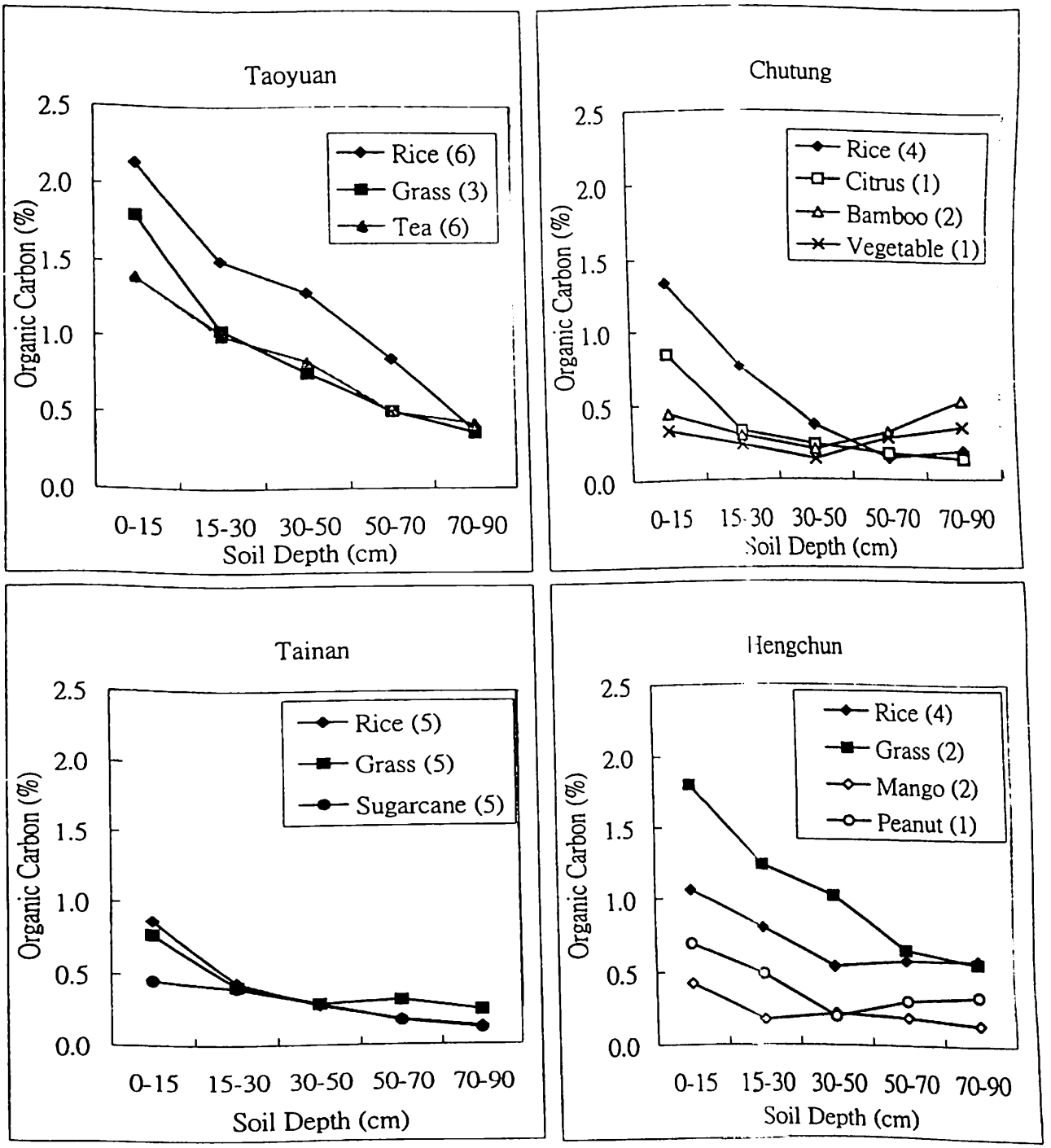
除了牧草地以外，由本次調查結果，明顯看出水田較旱田可明顯累積較多的有機碳，除了台南地區，水、旱田表土 (0-15 公分) 以下的有機碳含量相近外，其它三個地區的水田土壤全剖面均較旱田含有較高的土壤有機碳。

由本次採樣點之總體密度與土壤有機碳含量，所計算之土壤一公尺內之有機碳存量範圍在 3.2-15.4 kg/m/m^2，顯示土地利用受區域氣候與土壤的影響相較於 Chen 等 (1992) 所估算有機碳存量之 10-14.7 kg/m/m^2，顯示更大的範圍。根據本研究估算結果，顯示相同土地利用下各地區的土

表五、四個採樣區不同土地利用之表土 (0-15 公分) 和底土 (15-30 公分) 有機碳含量之比較
Table 5. Comparison of organic carbon content in surface soil (0-15 cm) and subsoil (15-30 cm)under different land uses among four sampling locations.

	Soil organic carbon (%)									
	Rice		Sugarcane		Tea		Grass		Other Upland	
County	Surface soil	Subsoil	Surface soil	Subsoil	Surface soil	Subsoil	Surface soil	Subsoil	Surface soil	Subsoil
Taoyuan	2.2±0.5 (30)	1.8±0.4 (30)			1.5±0.3 (21)	1.1±0.2 (21)	1.9±0.2 (11)	1.0±0.3 (11)		
Chutung	1.3±0.3 (25)	0.7±0.3 (25)							0.7±0.4 (15)	0.5±0.3 (15)
Hengchun	0.6±0.2 (20)	0.4±0.2 (20)					1.4±0.4 (20)	1.0±0.3 (18)	0.4±0.1 (10)	0.4±0.2 (10)
Tainan	0.8±0.2 (29)	0.4±0.2 (29)	0.5±0.2 (30)	0.5±0.3 (30)			0.6±0.2 (29)	0.3±0.1 (28)		

(Numbers in parentheses are numbers of sampling.)



圖四、各採樣區之不同土地利用土壤剖面的有機碳含量比較

Fig. 4. Comparison of organic carbon content in soil profiles under different land uses among sampling locations.

(Numbers in parentheses of legends are numbers of sampling.)

表六、各採樣區不同土地利用之土壤剖面有機碳存量之比較

Table 6. Comparison of organic carbon storage in soil profiles under different land uses among sampling locations.

(1) Taoyuan

	Rice (n*=6)		Tea (n=6)		Grass (n=3)	
Soil Depth (cm)	OC (kg/layer)	%	OC (kg/layer)	%	OC (kg/layer)	%
0-15	3.84	25.0	2.50	23.4	3.23	29.4
15-30	3.49	22.7	2.33	21.8	2.41	21.9
30-50	3.86	25.1	2.47	23.2	2.24	20.4
50-70	2.52	16.4	1.49	14.0	1.50	13.6
70-100	1.66	10.8	1.88	17.7	1.62	14.7
sum	15.37	100.0	10.67	100.0	11.00	100.0

(2) Chutung

	Rice (n=4)		Bamboo (n=2)	
Soil Depth (cm)	OC (kg/layer)	%	OC (kg/layer)	%
0-15	2.47	39.0	1.22	26.6
15-30	1.50	23.7	0.94	20.4
30-50	1.09	17.3	0.93	20.1
50-70	0.42	6.7	0.71	15.5
70-100	0.84	13.3	0.80	17.3
sum	6.33	100.0	4.60	100.0

(3) Tainan

	Rice (n=5)		Surgarcane (n=5)		Grass (n=5)	
Soil Depth (cm)	OC (kg/layer)	%	OC(kg/layer)	%	OC(kg/layer)	%
0-15	1.88	39.2	0.99	27.4	1.67	30.3
15-30	0.98	20.5	0.84	23.3	0.93	16.8
30-50	0.82	17.2	0.81	22.3	0.87	15.7
50-70	0.53	11.0	0.48	13.3	0.95	17.2
70-100	0.58	12.1	0.49	13.7	1.10	19.9
sum	4.80	100.0	3.62	100.0	5.52	100.0

(4) Hengchun

	Rice (n=4)		Mango (n=2)		Grass (n=2)	
Soil Depth (cm)	OC (kg/layer)	%	OC (kg/layer)	%	OC (kg/layer)	%
0-15	2.27	22.6	0.91	28.5	3.63	25.7
15-30	1.94	19.2	0.43	13.5	3.03	21.5
30-50	1.60	15.9	0.65	20.5	3.06	21.7
50-70	1.71	16.9	0.56	17.7	1.93	13.6
70-100	2.56	25.4	0.63	19.8	2.47	17.5
sum	10.08	100.0	3.18	100.0	14.12	100.0

* : No. of samples

壤有機碳存量有相當大的差異，以水稻爲例，其範圍介於 5-15 kg/m/m^2 之間，其它作物差異亦大。然而，除了牧草外，同一氣候區仍顯示水田較旱田可儲存較多的有機碳，特別是氣候較潮濕或質地較細的土壤其差異更加明顯，顯示土地利用改變對土壤總有機碳存量有相當的影響。相對於一般旱田，牧草則可儲存較多的有機碳量，在台南與恆春甚至高於水稻，台南地區乃因底層土壤有機碳含量較高，而恆春地區則如前所述，乃因水田樣本採自水旱輪作田。

由本次採樣測值顯示，台灣農地土壤在一公尺深內，有 23-29% 的有機碳存於 0-15 公分，有 42-63% 的有機碳存於 0-30 公分內，與 Chen 和 Hseu (1997) 所得之結果相近，顯示此次採樣具有代表性。因此，以前土壤肥力調查資料估算表土 (0-20 公分) 有機碳存量，約佔土壤一公尺深存量的 30-40% 左右。

結　論

相對於能源部門每年釋出之碳源，土壤有機碳的存量所佔的比例低。然而針對土壤本身有機碳存量，土地利用爲重要的影響因子之一。若將水田轉作旱田，將會釋出原存於土壤中之有機碳，部份地區釋出碳量甚至超過原存於土壤中有機碳量之一半。若將水田轉種牧草則可維持雙期作水田與水旱輪作田間之土壤有機碳存量，部份地區亦可能高於雙期作水田之土壤有機碳存量。

誌　謝

本研究承國科會空污費科技計畫 (NSC88EPA-Z-055-001) 經費補助，謹誌謝忱。

參考文獻

行政院農業委員會。1980。台灣地區農業區域發展初步規劃總報告。行政院農業委員會。

向爲民。1988。本省沖積土壤密實性研究。台灣省農業試驗所民國77年年報。pp.96-97。

林家棨。1967。台灣省農田肥力測定。台灣省農業試驗所試驗報告第二十八號。

林家棨。1981-1984。土壤肥力台灣省土壤肥力能限分類規範調查研究。農試所民國70-73年年報。

林家棨。1985a。土壤肥力：地區間稻穀產量的差異。台灣省農業試驗所民國74年年報。p.67。

林家棨。1985b。土壤肥力：土壤類別間稻穀產量的差異。台灣省農業試驗所民國74年年報。p.67。

席連之、張守敬。1951。台灣省土壤調查及肥力測定報告書。台灣肥料有限公司叢刊第五種。

陳琦玲、連深。1995。台灣若干土壤有機質肥料分解、聚積之模擬及有機質肥料施用基準之試驗定。有機質肥料合理施用技術研討會專刊。pp.171-188。

郭鴻裕、朱戩良、江志峰、吳懷國。1995。台灣地區土壤有機質含量及有機資材之施用狀況。有機質肥料合理施用技術研討會專刊。pp.72-83。

楊任徵、方良吉。1995。台灣地區人爲溫室氣體統計－能源部門。工研院能資所研究報告。

臺灣省政府農林廳。1990。各縣市農地利用綜合規劃報告。台灣省政府農林廳。

臺灣省政府農林廳。1936-1998。臺灣農業年報。臺灣省政府農林廳。

Batjes, N.H. 1992. Organic matter and carbon

dioxide. pp. 97-148. In: Batjes, N.H. and Bridges, E.M. (Ed.) A review of soil factors and processes that control fluxes of heat, moisture, and greenhouse. Technical paper 23. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.

Ben-Dor, E. and A. Banin. 1989. Determination of organic matter content in arid-zone soils using a simple "loss-on-ignition" mothod. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 20:1675-1695.

Black, C.A. (ed.). 1965. Methods of soil analysis Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy.

Blake, G.R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk Density. pp371-373. In: A. Klute. (ed.) Methods of soil analysis. Part 1- Physical and mineralogical methods. (2nd ed.) Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Chen Z.S., H.C. Chiang, H.Y. Guo and H. Eswaran. 1992. The carbon content and pedogenic processes of soils in Taiwan. Soils and Fertilizers. pp. 41-55.

Chen, Z.S. and Z.Y. Hseu. 1997. Total organic carbon pool in soils of Taiwan. Proceedings of the National Science Council, R.O.C. Part B: Life Sciences. 21(3):120-127.

Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1982. Total Carbon, organic carbon, and Organic matter. pp. 539- 577. In: A.L. Page (ed.) Methods of soil analysis. Part 2-Chemical and Microbiological Properties. (2nd ed.) Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Ping, C.L., G.J. Michaelson, W. M. Loya, R.J. Chandler and R.L.Malcolm. 1998. Chapter 12: Characteristics of soil organic matter in Arctic ecosystems of Alaska. pp.157-167 In: R. Lai, J.M. Kimble, R.F. Follett, B.A. Stewart. (ed.) Soil Processes and the carbon cycle. CRC Press, New York.

Raich, J.W. and C.S. Potter. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soil. Glob. Biogeochem. Cycles. 9(1):23-26.

Van Breemen, N., and T. C. J. Feijtel. 1990. Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic systems. pp.195-220. In: A.F. Bouwman (ed.) Soils and greenhouse effect. John Wiley & Sons, Chichester, England.

Wilde, S.A. 1942. Rapid colorimetric determination of soil organic matter. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 7:393-394.

Zinke, P.J., A.G. Stangenberger, W.M. Post, W.R. Emmanuel and J.S. Olson. 1984. Worldwide organic soil carbon and nitrogen data. ORNL/TM-8857, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee.