

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫四：農業部門溫室氣體總量管制及其效益與成本評估

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2621-Z-002-018-

執行期間：93 年 08 月 01 日至 94 年 09 月 30 日

執行單位：國立臺灣大學農業經濟學系暨研究所

計畫主持人：徐世勳

共同主持人：陳吉仲

計畫參與人員：周磊，黃奕強

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 27 日

農業部門溫室氣體總量管制及其效益與成本分析

- 以發電用的能源作物為例評估休耕農地種植能源作物的可行性

摘要

台灣由於農產品生產過剩，且加入世界貿易組織 WTO 後，國內農產品又相對地較不具有競爭力，因此至民國 93 年時已有 27 萬公頃以上的農地參與休耕。本研究探討農業部門溫室氣體總量管制及其效益與成本分析，並以發電用的能源作物為例評估休耕農地種植能源作物的可行性。具體而言，本研究以數學規劃所建立的台灣農業部門模型，模擬將台灣現有的休耕農地來種植能源作物來和煤混合燃燒發電時，對台灣溫室氣體減量之貢獻以及相關的經濟分析。

模擬結果顯示，若以能源作物取代台灣電力公司 10 % 的煤礦來混合燃燒發電，則需要有 331 千公頃的農地來種植能源作物，如此政府可減少 2,299 百萬元的進口煤礦支出，並可減少 4,885.6 千公噸的二氧化碳排放，此貢獻相當於我國於民國 91 年時需削減的二氧化碳排放量之 20 % 左右。

假設在為每公噸的二氧化碳之碳稅補貼金額為 5,500 元時，則可計算出種植能源作物的農民每年每公頃的總收益將會介於 82,204 元到 96,092 元之間，和現今每年每公頃的休耕補貼金 90,000 元差異不大，因此農民將有種植能源作物的意願。此時將會有 163.5 千公頃的休耕地會種植能源作物，且可減少 2.66 百萬公噸的二氧化碳之排放，這大約為民國 91 年時台灣地區的二氧化碳排放量之 1.11 %，而若以公元 2000 年做為我國的減量基準，則此 2.66 百萬公噸的二氧化碳之減少，將可貢獻我國於民國 91 年時所需削減的二氧化碳排放量之 11.68 %，並可為政府節省 1,739.15 百萬元的財政支出。

關鍵詞：休耕、台灣農業部門模型、能源作物、碳稅

Benefits and Cost Assessment of Greenhouse Gases Emission Control in Taiwan's Agriculture Sector

The purpose of this study is to assess the possible benefits and costs of greenhouse gases emission control, e.g., planting energy crops on set-asides fields, in Taiwan's agricultural sector using Taiwan Agricultural Sector Model (TASM). The TASM is formulated in a multi-product partial equilibrium framework based on the previous work of Baumes (1978), Burton (1987), McCarl and Spreen (1980), Chang et al. (1992), Coble et al. (1992) and Tanyeri-Abur et al (1993). Agricultural sector model has been applied to evaluate the impacts of domestic and trade policy change as well as the technology adoption on the allocation of resource, agricultural production and welfare distributions. The empirical structure has been adapted to Taiwan and used in a number of policy-related studies, e.g., Chang and Chen (1995) and Chang (1999). The current version of TASM accommodates more than 100 commodities for 4 major production regions that can be further divided into 15 sub-regions.

Keywords: Set-asides, Taiwan Agricultural Sector Model (TASM), Energy crops,
Carbon Taxes

目錄

一、前言	4
二、能源作物的介紹	6
三、台灣農業部門模型與資料庫	13
四、台灣種植能源作物的益本分析	19
五、結論與討論	27
參考文獻	29
計畫成果自評	32
附錄	33

一、前言

根據 1996 年時聯合國政府間氣候變遷專家委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）的預估，人類的活動會持續地增加溫室氣體的濃度，如果不採取任何的防治措施，在二十一世紀結束時，全球的平均溫度將比現今升高 1 至 3.5℃，每十年至少將增加 0.1 至 0.3℃（IPCC, 1996; Houghton, 1990），而海平面將上升 15 至 95 公分（吳俊賢等，2001）。

台灣地區在 1990 年時溫室氣體總排放量約為 149 百萬公噸，其中以二氧化碳排放量佔 82.9 % 最高，而排放來源則以石化能源燃燒使用時所排放的二氧化碳量最高，約佔全部二氧化碳總排放量的 91 %（約 113 百萬公噸），世界排名第 25；每人平均排放量為 5.57 公噸，世界排名第 23（楊任徵，1998）。在台灣二氧化碳排放量與能源需求皆呈現不斷的上升趨勢下，到 1995 年時能源部門的二氧化碳排放量成長至 162 百萬公噸，世界排名第 24 位，約佔全球總排放量的 0.5 %，每人平均排放量提高至 7.60 公噸，預測每十年的二氧化碳排放量平均成長率約為 6.2 %（陳雄文，1998），而 2003 年時台灣地區經由能源部門所排放的二氧化碳更急速地增加至 251 百萬公噸，每人平均排放量為 11.10 公噸，因此台灣已屬於二氧化碳高排放國家。

再根據行政院環境保護署在 1998 年的統計資料顯示，發電業、鋼鐵業、石化業、水泥業及運輸業是排放二氧化碳較多的產業，其中又以台灣電力公司之二氧化碳排放量最多，佔有台灣地區二氧化碳總排放量的 1/3 左右。而就所有的發電技術中，火力發電均會釋出大量二氧化碳，其中又以燃煤的排放量為最多，燃油次之，燃氣排放最少，因此在台灣如果能夠有效地減少火力發電中燃煤的使用量，就能夠藉以減少全國大比例的二氧化碳排放。

而由於二氧化碳等溫室效應氣體，會引起全球暖化的問題，近年來國際各國為了因應溫室效應氣體減量的行動，於是對於可再生能源（Renewable Energy）的使用更加重視，而其中又以生質能（Biomass）的運用最被重視，生質能泛指

所有的有機可再生物質，為已加工或未加工的動植物材料，其主要是以植物於生長期間吸收水、二氧化碳透過葉綠素吸收陽光，藉由光合作用來儲存太陽能，再運用可行的技術將太陽能轉換成電力、熱能或轉變成固、液、氣態燃料。相關的例子包括：農作物與農業殘渣（玉米、黃豆、乾草、蔗渣、稻桿、稻穀、用過的植物油）；樹木與林業廢棄物（木屑、落葉、修剪過的殘枝）；動物性廢棄物（動物屍體、排泄物）；都市垃圾（垃圾掩埋場的沼氣、下水道的沼氣）；工業有機廢棄物（有機污泥、廢紙、廢橡膠）；快速成長的能源作物（Energy Crop）（柳樹、白楊、芒屬植物）等。

就目前世界各國發展生質能的情況，可歸納生質能的優點有經濟和環保兩層面，就經濟發展面而言，生質能不若石化能源一般蘊藏分布不均且儲存容易，每個國家皆可發展適於該國的生質能，因此在資源較為短缺的國家，可降低石油、煤礦等石化能源的進口依賴，增加可再生自產能源。況且由於生質能本身的運輸成本極高，因此某些先前的轉換措施可能必須先在農村地區處理，可藉以增加農村的工作機會，改善農村經濟。

就環境保護面而言，第一可緩和氣候變遷延緩地球溫暖化的趨勢，減少溫室氣體的排放，由於石化能源的使用將產生二氧化碳，而生質能的生長過程能吸收二氧化碳存在於大氣中的量，因此將減緩全球暖化現象。第二由於生質能含硫量低，因此當其和煤礦混合燃燒時將減低酸雨的產生，可減少土壤中的金屬離子被雨水所侵蝕並可降低水污染。第三是廢物利用，減少農業廢棄物的使用壓力充分利用廢棄物資源，轉換為可用之能源。第四是可維護生態系統的正常運作。

在 1980 年代初期，再生能源已逐漸被重視，而 1990 年代又因環境保護的關係，使得再生能源普遍地被認為比石油、煤礦、天然氣和核能更具使用的優勢。Jefferson（1996）指出，再生能源佔全球初級能源供應量之 18%，而生質能之利用約佔所有再生能源中的 55%（約全球初級能源的 9.9%）。Hall et. al.（1982）也指出在開發中國家生質能的使用約佔其總能源消費的 43%。再根據吳耿東和李宏台（2002）的研究指出，目前生質能為全球第四大能源，僅次於石油、煤礦

與天然氣，目前係最廣泛使用的再生能源。另外根據 Ralph 和 Sims (2001) 指出，在美國每年藉由生質能所生產的電力已多於紐西蘭國內每年的用電總需求量。

由於目前大多數的先進國家其糧食生產過剩但溫室氣體的排放量卻在增加，由於能源作物具有眾多環境面的好處，因此種植能源作物也可為糧食生產過剩的國家提供一個轉移農地使用的考量方案。台灣雖未名列於京都協議書的規範國中，但基於世界一家的責任與國際間的壓力，因此應及早規劃相關的減量措施。而在台灣地區由於現今的糧食生產過剩，同時要進入世界貿易組織 (World Trade Organization , WTO) 又面臨著農業生產成本相較於國外為高，無法與國外進口農產品競爭。而以台灣目前溫室氣體的排放現況來看，火力發電廠燃燒煤礦發電時，所產生的二氧化碳為最大，因此如果能夠在以不影響經濟發展的前提下，政府可考量是否能夠運用現有的休耕農地來種植能源作物做為農地使用上的政策方案，多鼓勵休耕農民栽種能源作物再賣於火力發電廠以取代現今的煤礦發電，甚至可以考量能否藉由政府的補貼來鼓勵休耕農民種植能源作物，期望能以最少的社會成本來達到溫室氣體減量的目標，希望如此一來不僅可做為溫室氣體減量的因應方案並兼顧多重環境面的利益，又可紓解加入世界貿易組織 WTO 後對台灣農業的衝擊，更有效地運用農地，希望能否因此增加農村工作機會確保農民收益，即是期望能兼顧農業所應有的生產、生活、生態之三生功能。因此本文的研究目的在於評估台灣種植能源作物以做為發電燃料的可行性分析。

二、能源作物的介紹

在眾多的生質能中，被各國所普遍視為最具發展潛力的為能源作物(Energy Crop)，能源作物大都是指能夠快速成長、易於栽種和採收，是高單位面積生產，並易於轉換為發電和運輸用途之燃料作物皆謂之。主要是栽種於農業用地和牧場，而非種植於具有高度生態價值的土地（如森林、溼地等）。廣義的能源作物

包含有傳統的農作物（玉米）草本的多年生植物（芒屬植物），收成後類似乾草但並非是用來當作草料而是當作能源在使用，其殘株可再生長。另外短期輪作木質作物（如白楊、柳樹），生長期約 3 到 10 年一循環，其殘幹可再生長。

能源作物具有雙重角色，一為可和森林一樣於生長期間吸收溫室氣體，直接減少溫室氣體（GHGs sink），另一方面可於收成後替代石化能源的使用，間接減少溫室氣體（GHGs mitigation）。能源作物在生長期間由於自身的光合作用需要二氧化碳以助其生長，因此能源作物能夠藉由其固碳的功能，將碳以某種形式儲存於所收成的產品，因此當燃燒能源作物用以發電使用時，所釋放出的二氧化碳將被正在成長中的能源作物所吸收，如此形成一個封閉的溫室氣體之循環。根據 Kline 等（1998）研究指出，以芒屬植物或相關的短期輪作之木質作物取代石化能源發電時，將減輕二氧化碳釋放於大氣中的量，因為當燃燒生質能時所排放出的二氧化碳可於能源作物種植期間藉由光合作用回收，大約可消除 95 % 以上的二氧化碳放射，形成一個可再回收利用的體系。Ralph 和 Sims（2001）的研究可知，當一百萬公頃農地用於種植短期作能源造林即能源作物（約 4 到 6 年為一期）收成後全部用於生產生質能取代煤礦時，則每年可減少 8 至 10 百萬公噸的溫室氣體放射，其中每公頃林地每年所能減少 8 至 10 公噸的溫室氣體皆是來自於短期作造林（能源作物）的收成。

而能源作物不像石化能源為不可再生的耗竭性資源，會因使用而減少。草本的多年生植物和短期輪作木質作物，如經由適當的經營管理與肥料使用，給予適當的維護，其生命可長達 15 到 20 年，甚至可能更久，可永續地提供能源為可再生能源，而其收成的物質皆可用於發電。又由於大多數的能源作物皆為多年生植物，因此其收穫的情況是用砍伐的而非連根拔起，如此完全無損根的結構而其網狀的根系既深且廣佈，因此也具有可固定土壤中的碳之功能。總括來說，能源作物成長期間所吸收的二氧化碳僅略少於當其用於燃燒發電時所釋放出來的，因此種植能源作物對於減輕空氣中的二氧化碳有其實質上的效益。

就台灣目前的現況而言，如果能夠大面積種植能源作物，則栽種能源作物將

可能會有許多的優點，約略可分為兩個層面來討論，分別為經濟層面和環境層面，整理如表 1。

表 1. 台灣種植能源作物的優點

經濟層面的優點	環境層面的優點
a. 可減輕政府對石化能源進口的依賴，減少財政支出，穩定貿易收支。	a. 能源作物具廣大而延伸的根系，能夠穩固土壤減輕侵蝕，又可幫助新土壤層的建立，安定河床減少洪水的產生。
b. 能源作物為可連續多年生的植物，因此可不斷地供應能源製造。	b. 提供水滲透的管道進入土壤形成地下水而不流失，可涵養地下水，並且能源作物可過濾農業化學肥料的殘留，以防止土壤中的化學物質進入地表水或地下水，有利於水質的改善保護水質。
c. 經由溫室氣體的排放量減少，可防止全球的溫度上升，間接地減少水的蒸發量，節省水資源，對水資源短缺的台灣有所貢獻。	c. 提供野生動物往來兩處生態系之間的通道、走廊，如森林、溼地間的緩衝器。
d. 由於台灣的糧食生產過剩且農業的生產成本高，無法和國外農產品競爭，因此種植能源作物可提供政府於政策上的運用，減緩 WTO 的衝擊，做為產業結構的調整方案。	d. 提供野生動植物的棲息地和庇護所，穩定應有的天然生態系統。
e. 增加農村工作機會，由於能源作物的體積龐大，因此先前的處理措施適宜在農田附近來完成。	e. 減輕風化對土壤直接侵蝕的影響。
	f. 藉由有機質的增加改善土壤品質，能源作物之栽培能夠減緩農地土壤營養物質流失的困擾。
	g. 相較於傳統的農作物，能源作物的種植可拉長輪作幅度，不但有利於減低病蟲害，更可藉以減少除草劑和殺蟲劑的使用。
	h. 生長期間可將廢水或爛泥轉換為有用的生質能。
	i. 能源作物的使用可減少石化燃料的使用，藉以減少溫室氣體的排放，淨化空氣吸收二氧化碳。

資料來源：本研究整理

而能源作物有待技術克服的地方為單位熱值較低、水分含量較高、用地面積廣大，而較大的問題在於運輸成本，由於能源作物收成後的體積龐大，因此需要極大的運輸成本，故能源作物轉換工廠（如火力發電廠）應設置在栽培能源作物

之附近，以減少運輸成本。

歐、美等先進國家，都積極的在研發能源作物的運用技術，已有許多國家都有大量種植能源作物的情形。以美國為例，在美國生質能發電系統當中，燃燒木材的發電廠是為主流，佔有 88 % 之多。而美國能源部門所選擇未來可發展的能源作物，主要為多年生的柳樹、白楊與芒屬植物。美國早於 1978 年即探索能源作物的研究，根據 Schneider 和 McCarl (2001) 的研究指出，在美國當能源作物在沒有任何補貼的時候，即是在減少溫室氣體的價值為零時，其將不具有競爭力，唯有當其吸收每公噸溫室氣體的價值為 40 美元時，種植能源作物才具有和其他的農業政策互相競爭的能力；而當具有 70 美元的價值時，則種植能源作物的政策具有支配其他農業政策的力量。

根據密西根生質能研究計畫 (Michigan Biomass Energy Program) (2002) 的報告指出如果使用美國的農地 3,500 萬英畝去種植能源作物藉以取代煤礦的發電之使用，則預計每年將會為美國減少 6 % 的二氧化碳之排放，而如果將 90 % 的煤礦和 10 % 的柳樹混合燃燒，將能夠減少 10 % 的氮氧化物 (NO_x) 及二氧化硫 (SO₂) 的排放。

根據 Daniel 等 (2000) 的研究報告指出，在美國種植相同的能源作物於傳統耕作農地或是種植於閒置農地或牧場用地，其所需的成長時間都是相同的。

在美國主要的能源作物從種植到採收所需歷時的時間如下：

1. 柳樹 (Willow)，可成長 22 年，從種植後的第 4 年開始採收，往後約每三年可採收一次 (第 4,7,10,13,16,19,22 年)，而採收量在第 4 年僅有最大產量的 60 %，其餘往後每三年約可完全採收 100 %。
2. 白楊 (Poplar)，10 年可採收的地區有 Lake States、Corn Belt、North Plains 以及 Northeast。8 年可採收的地區有 Southeast、South Plains。6 年就可採收的地區有 Pacific Northwest。
3. 芒屬植物 (Switchgrass)，播種一次可種植 10 年之久，而如果期間沒有犁除的話，則成長期間，每年可收穫數次。播種以後頭一年可收穫最大產量的 30 %；

第 2 年可增加至最大產量的 67 % ；而第 3 年至第 10 年可完全收穫 100 % 。

在美國短期輪作的能源作物如柳樹、白楊、桉樹等樹種，經 6~7 年便可收成，每英畝土地平均每年可生產 10~14 公噸的木材。而就現今美國運用能源作物發電的技術言，以一座 100 百萬瓦發電廠的廠區為中心，若在 6 哩半徑內遍植該類樹種，則可完全供應該發電廠之需。就經濟成本而言，美國計畫利用柳樹、白楊及桉樹等木材為火力發電廠的燃料，再以捆樹燃燒的方式，來減少人力和時間，每度電成本約計 5 美分（吳俊賢等，2001）。

在歐洲已有英國、法國、德國、奧地利、義大利等國在大規模商業化種植能源作物以生產生質柴油，例如英國以 61 萬公頃的農地種植芒屬植物。又以德國為例，為減少糧食生產過剩，每年約有 10 % 的農地需休耕，政府給予補貼，但休耕農地可同時領取補貼並種植能源作物銷售。近年來，德國用於種植能源作物的面積漸漸上升，1999 年達到 75 萬公頃，佔該國可耕地面積的 6 %，佔全部休耕地一半。德國並也興建多座發電廠，其所用之燃料為柳樹、白楊、芒屬植物及稻桿的混合物。學者認為，長期來看全世界的農地面積約可減少 25 %（陳載永、陳合進，2002），不必作為生產糧食之用，如此則歐盟可空出 3 千萬公頃，德國可空出 430 萬公頃栽植能源作物，以環境可接受的及永續性的形式來生產能源與變化性植物，增加農民收益。而在瑞典則種植柳樹用以發熱發電，柳樹可高單位地進行無性生殖，增強對霜的抵抗力，加強對害蟲和鐵銹的防禦力。在奧地利與北歐國家中，生質能約佔他們國內主要能源的 30 % 之多（Ralph and Sims，2001）。

根據密西根生質能研究計畫（2002）指出，能源作物可單獨的使用亦可和煤礦混合燃燒用於現今的鍋爐。又根據 Richard 等（2002），生質能的發電效率大致上介於 33 % 到 37 % 之間，而民國 90 年時台電公司燃煤發電的發電效率為 36.42 %，由於發電效率相近，故以少許比例的能源作物和煤礦混合燃燒能適用於現存的鍋爐。

而在傳統石化能源與再生能源的成本比較方面，各種發電方式之成本可以由

表 2 看出，就以整體社會所需負擔的環境成本來看，傳統石化能源較再生能源為高；而就發電成本來看，傳統石化能源則較再生能源略低；但就以加總環境成本與發電成本之後的總發電成本來看，再生能源較傳統石化能源為低。其中燃煤發電的總發電成本介於 5.6 至 8.8 US \$ /kWh。而燃燒再生能源中的能源作物(木材)發電，其環境成本為 0 至 0.7 US \$ /kWh，總發電成本為 4.6 至 7.7 US \$ /kWh，在所有發電方式中，其總發電成本略高於水力發電，而比其他所有的發電方式為低。因此若加入環境面的考量後，則總發電成本燃燒能源作物是低於燃燒煤礦的。

表 2 傳統石化能源和再生能源總發電成本之比較

單位：美元/千瓦小時 (US \$ /kWh)

能源 種類	發電種類	環境成本 【A】	發電成本 【B】	總發電成本 【A】+【B】
傳統 石化 能源	煤 (1.2 % 硫)	5.7	3.1	8.8
	煤 (1.1 % 硫,AFBC)	2.8	3.1	5.9
	煤 (IGCC)	2.5	3.1	5.6
	石油 (2.2 % 硫)	6.7	3.9	10.6
	石油 (1 % 硫)	3.8	3.9	7.7
	石油 (0.5 % 硫)	2.7	3.9	6.6
	天然氣	1.0	6.1	7.1
	天然氣 (SCR)	0.7	6.1	6.8
	核能	2.9	2.8	5.7
再生 能源	廢棄物能源	4.0	3.6-7.2	7.6-11.2
	太陽能	0-0.4	6.0-8.0	6.0-8.0
	風力能	0-0.1	5.0-7.0	5.0-7.1
	生質能 (木材)	0-0.7	4.6-7.0	4.6-7.7
	水力	0-0.2	3.6-7.2	3.6-7.4
	地熱	-	-	5.7-7.5

註：AFBC(Atmospheric Fluidized Bed Combustion); IGCC(Integrated Gasified Combined-cycle); SCR (Selective Catalytic Reduction)

資料來源：環境成本 - Public Power Weekly,Oct.1990,by NYSERDA and DOE.
發電成本 - ”新能源及潔淨能源研究開發規劃總報告”，經濟部能源委員會，1999 年 5 月。

邱錦松等，2000；吳俊賢等，2001。

民國 91 年時台灣地區的總發電量為 1,659.0 億度 (表 3)，其中火力發電量

為 1,215.3 億度，佔全台總發電量的 73.3 % 之多，而在所有的火力發電中又以台灣電力公司燃煤發電量時所佔有的比例為最大，根據統計民國 91 年時台灣電力公司燃煤發電量(不含民營之麥寮、和平等電廠及汽電共生發電部份)約佔台灣電力公司總淨發購電量的 33.3%，約為 552.7 億度。以民國 92 年 7 月為例，台灣火力發電佔全台總發電量的 69.7 %，其中又以台灣電力公司燃煤所佔的比例為最大，約為全台總發電量的 31 %，如表 4 所示。

表 3 民國 91 年台灣總發電量之情形

項目	發電量 (億度)	構成比 (%)
民國 91 年台灣發電量合計	1,659.0	100.0
水力	63.6	3.8
火力	1,215.3	73.3
核能	380.1	22.9
風力	0.08	0.01
購電	311.2	18.8
託營水力	5.6	0.3
民營水力	0.1	0.0
民營火力	221.4	13.3
汽電共生	84.1	5.1

資料來源：台灣電力公司網站

(http://www.taipower.com.tw/home_2_2.htm)

民國 91 年，台灣電力公司 1 公噸的煤礦之進口價格為 29.39 美元，而發電用煤礦之總進口量為 22,631,896 公噸，以台灣電力公司目前的發電技術而言，平均燃煤一公噸可發電 2,442 仟瓦小時，況且九十一年度台灣電力公司燃煤發電機組的二氧化碳 (CO₂) 平均排放量為 884 公克/仟瓦小時 (g/ kWh)，由此可知，在民國 91 年當年經由台灣電力公司燃煤發電所排放出來的二氧化碳為 4,885.6 萬公噸，產生了大量的二氧化碳之排放，所以本研究希望藉由現有的休耕農地，探討鼓勵休耕農民種植能源作物，收成之後賣於台灣電力公司作為火力發電的燃料，取代某比例的燃煤發電之可行性，期望如此一來可因應加入世界貿易組織對

台灣農業的衝擊，並減少政府用於休耕補貼以及用於進口煤礦的財政支出，更期望可以減輕台灣地區二氧化碳的排放量，為國際間日益嚴重的溫室效應之現象做些實質上的貢獻。

表 4 民國 92 年 7 月台灣發電來源各類別所佔之比例

項目	發電量（百萬度）	構成比（ % ）
台電公司	14,024	78.9
水力	643	3.6
火力	9,866	55.5
燃油	1,797	10.1
燃煤	5,525	31.1
燃氣	2,544	14.3
核能	3,515	19.8
風力	0	0.0
購電	3,751	21.1
託營水力	59	0.3
民營水力	4	0.0
民營火力	2,519	14.2
燃煤	1,938	10.9
燃氣	581	3.3
汽電共生	1,169	6.6
合計	17,775	100.0

資料來源：台灣電力公司網站(http://www.taipower.com.tw/home_2.htm)。

三、台灣農業部門模型與資料庫

本研究之主要目的在分析現有的休耕農地種植能源作物時的經濟及環境影響，其中包括對農民收益的影響、溫室氣體排放的影響。由於農民在使用農地時會有下列三種選擇，第一是種植傳統農作物來賺取其利潤；第二是參與農地休耕以領取補貼金；第三是種植能源作物，其收成後可賣給火力發電廠賺取收益。農民可由這些方案中選擇一個利潤最高的項目進行農地的使用。然而能源作物的市

場價格若不夠高時，可能無法吸引農民來耕種，因此政府為鼓勵農民種植能源作物，此時可能就須由政府提供獎助金，以增加農民參與種植能源作物的意願。由於其範圍涉及到所有的農畜林產業，因此必須要考慮到整個農業部門，故需建立一套以農業部門模型（Agricultural Sector Model，以下簡稱 ASM）為理論基礎的模型。再者由於 ASM 是最早用數學規劃方法所形成的部門模型，其所需要的資料為橫斷面的資料，相對地其較時間序列資料易於蒐集。此外尚因 ASM 含有多種農民可選擇的耕作方案（種植傳統農作物、能源作物或參與休耕等），而除了多種生產活動可選擇外，並也考慮到了多個生產要素，亦即可用資源的分配問題，故農業部門模型 ASM 適於本研究使用。

Takayama and Judge (1964) 是首先將 Samuelson(1952)的價格內生化理論應用到空間均衡模型中，假設完全競爭市場價格內生化前提下，運用線性的供需函數推導出生產者與消費者在完全競爭市場的均衡價格、產出與消費。而 Duloy 和 Norton(1975)使用可分性規劃(Separable Programming)將 Takayama 和 Judge (1964) 所設計出的二次規劃轉成線性規劃，並運用電腦加以求解，使得農業部門模型 ASM 的範圍得以擴展並更具實用性。McCarl 和 Spreen (1980) 更詳細地介紹此類數學規劃模型在市場價格內生化下所具有的理論特性，並指出其在建立部門模型和政府從事各種農業政策分析上的可行途徑。而在國內張靜貞 (1993) 首先將數學規劃的方法應用在農業部門模型，張靜貞和陳吉仲 (1995) 以相關的農業政策與生產結構的變動來探討台灣農業部門的相關福利之變動情形。目前張靜貞(2004)等人已建立台灣的農業部門模型，有關詳細的部門模型之介紹請參考張靜貞(2004)等人的研究。

農業部門模型及理論架構的基本型態，可用數學式表示如下，假設農業部門模型中有 i 個農產品 (Q_i)， $i=1,2,\dots,I$ ，其分別在 k ($k=1,2,\dots,K$) 個地區經由生產活動 X_{ik} 生產，此模型中各個生產活動 X_{ik} 係以生產面積為計算單位，在每個地區 k 生產農產品時，生產活動必須使用土地 (L_k)、勞動 (R_k)、其他資源 (O_k) 等生產要素。設產品之可積分逆需求函數 (Integrable inverse demand function)

存在並寫成下式：

$$P_i^Q = \psi(Q_i), i=1\dots I$$

假設各個生產要素之可積分逆供給函數亦存在，寫成如下：

$$P_k^L = \alpha_k(L_k), k=1\dots K$$

$$P_k^R = \beta_k(R_k), k=1\dots K$$

$$P_k^O = \omega_k(O_k), k=1\dots K$$

其中 P_i^Q 、 P_k^L 、 P_k^R 、 P_k^O 分別為商品與各種生產要素（土地、勞動、其他要素）之價格。

本節應用現有的台灣農業部門模型來加以修改，建立一加入能源作物後的經濟模型來估計出種植能源作物的供給函數，由於農民在決定其土地利用時，其所面對的選擇方案有三種，第一是從事農作物的耕種，第二是休耕，第三則是從事能源作物的種植，理性的農民是從這三項方案中選擇利潤最高者來生產，因此經濟模型的建立就須考量這三種不同的生產活動。而農民是否會參與種植能源作物，農民本身的土地及勞動條件亦是重要因素之一，因此模型之建立時須將土地、勞動等所有可能的生產要素一併考量。

由於農業部門模型已廣泛應用於政策、貿易、與資源等方面的評估(Chang et al, Adams et al, Chen and McCarl)，其範圍包含了農產品市場與要素市場。基本上，根據空間均衡概念所建立的部門模型係遵守完全競爭市場的法則，由供需共同決定了市場交易量及均衡價格，在市場為完全競爭時，會有許多的生產者和消費者，而且個別的生產者和消費者只能在既定的價格下作決定，是典型的價格接受者。個別消費者在預算限制與價格給定的條件下，追求自身效用極大，所求得之需求量为價格、所得等變數的函數，再經由每個消費者的需求之加總即為市場的需求線。同理，生產者(或農民)在給定的生產技術與市場價格下生產，且追求極大利潤時，會將其資源如土地與勞動做最適的分配，此時所求得之供給量为價

格、技術等變數的函數，再加總所有生產者的供給即可求得市場的供給線。

模型是在農產品市場和要素市場皆為完全競爭市場的前提假設下，分別給定一組需求和供給，再透過供需均衡求得競爭性的均衡解，而此均衡價格即為供給線與需求線之交點，供需曲線與縱軸所夾之面積即為消費者剩餘與生產者剩餘之總和，此面積是為社會福利，亦即為需求線下的總面積減去供給線下的總面積，且在供需相交點的同時社會福利亦達最大。因此本研究的經濟模型之目標函數為追求社會福利之極大值，但是須受到產品市場與要素市場的供需均衡式之限制，以及資源有限的限制，可用下列的數學式表示之：

目標函數為：

$$\begin{aligned}
 MAX : & \sum_i \int \psi(Q_i) dQ_i - \sum_i \int ED(Q_i^M) dQ_i^M - \sum_i \int EXED(TRQ_i) dTRQ_i - \sum_i [tax_i * Q_i^M + outtax_i * TRQ_i] \\
 & + \sum_i \int ES(Q_i^X) dQ_i^X - \sum_k \int \alpha_k(L_k) dL_k - \sum_k \int \beta_k(R_k) dR_k - \sum_k \int \omega_k(O_k) dO_k - \sum_i \sum_k C_{ik} X_{ik} \\
 & + \sum_k GP * AL_k + \sum_i TP_i * GQ_i - \sum_j \sum_k ECC_{jk} * EC_{jk} + \sum_j \sum_k (ECG + ECP_j * Y_{jk}) * EC_{jk}
 \end{aligned} \tag{1}$$

限制式為：

$$Q_i + Q_i^X + GQ_i - \sum_k Y_{ik} X_{ik} - (Q_i^M + TRQ_i) \leq 0, \text{ for all } i \tag{2}$$

$$\sum_i X_{ik} + AL_k + \sum_j EC_{jk} - L_k \leq 0, \text{ for all } k \tag{3}$$

$$\sum_i f_{ik} X_{ik} - R_k \leq 0, \text{ for all } k \tag{4}$$

$$\sum_i g_{ik} X_{ik} - O_k \leq 0, \text{ for all } k \tag{5}$$

其中， C_{ik} 為第 k 地區中，生產第 i 種產品生產活動的每單位變動生產成本。

ECC_{jk} 為第 k 地區中，生產能源作物生產活動的每單位變動生產成本。

Y_{ik} 為第 i 種產品在第 k 地區中，生產活動中所生產的每單位面積產量。

Y_{jk} 為能源作物在第 k 地區中，生產活動中所生產的每單位面積產量。

f_{ik} 為第 k 地區中，生產第 i 種產品每單位面積所需的勞動。

g_{ik} 為第 k 地區中，生產第 i 種產品每單位面積所需的其他要素。

X_{ik} 為第 k 地區中的產品 i 的生產面積。

EC_{jk} 為第 k 地區中的能源作物的生產面積。

AL_k 為 k 地區之休耕面積。

Q_i 為產品 i 的消費量。

GQ_i 為政府對產品 i 的收購量。

Q_i^M 為產品 i 的進口量。

TRQ_i 為產品 i 的配額外之進口量。

Q_i^X 為產品 i 的出口量。

L_k 為第 k 地區中的土地供給量。

R_k 為第 k 地區中的勞動供給量。

O_k 為第 k 地區中的其它要素供給量。

$\psi(Q_i)$ 為產品 i 的國內逆需求函數。

$ED(Q_i^M)$ 為產品 i 的進口逆需求函數。

$ES(Q_i^X)$ 為產品 i 的出口逆需求函數。

$EXED(TRQ_i)$ 為產品 i 配額外的進口逆需求函數。

$\alpha_k(L_k)$ 為 k 地區的土地逆供給函數。

$\beta_k(R_k)$ 為 k 地區的勞動逆供給函數。

$\omega_k(O_k)$ 為 k 地區的其他要素逆供給函數。

tax_i 為進口產品 i 的進口關稅或配額內的關稅。

$outtax_i$ 為進口產品 i 的配額外關稅。

GP 為每公頃休耕補貼之金額。

ECG 為每公頃農地種植能源作物時，政府之補貼金額即碳稅補貼。

ECP_j 為能源作物之價格。

TP_i 為產品 i 之收購價格。

(1)式為模型的目標函數，代表著消費者剩餘和生產者剩餘之極大化，亦即由需求線下之面積扣除供給線下之面積，因此目標函數等於國內和進口需求線下之面積加上出口的收益（即出口量乘上出口價格）後，再扣除勞動供給（包含雇用勞動供給線下的面積與農家自有勞動量乘上自家勞動工資）、土地供給（分別計算農作物用地、畜產用地、林業用地和能源作物用地各土地供給線下的面積）

要素購買成本及加工成本，最後再加上農民在參與休耕、稻穀收購和種植能源作物下的收益。(2)式為農產品市場的供需均衡式，由 Kuhn-Tucker 條件所導出的影子價格將代表著產品的市場價格。另外(3)至(5)式為土地、勞動、及其它要素的限制式，需求量須小於或等於供給量，其中(3)式的土地限制式表示某一地區各種作物之耕種面積加上休耕的面積並加上種植能源作物的面積，不能超過該地區的可耕地面積。此處模型的土地限制式中各縣市之土地為一平均的概念，並未考量到土地品質之差異，如邊際的土地與較好的土地(或等則)在單位面積成本及產出上的差異。

從模型的均衡式可得知理性的生產者會在產品的邊際價值等於購買生產要素的價格條件下來購買生產要素，並在產品的價格等於產品的邊際成本之條件下來出售所生產的產品。因此在模型中產品的供給所對應的是使用生產要素的邊際成本之加總，而購買要素的引申需求所對應的則是產品的邊際價值之加總。故在上述的數學式中，除了可顯示出產品的需求線和要素的供給線外，其亦隱了含產品的供給線和生產要素的需求線。

上述模型的設定已包含政府的四種農業政策之相關變數，第一是政府的保價收購政策；第二是水旱田利用調整後續計畫（休耕）；第三是種植能源作物的政策；第四是貿易政策，其中有關稻米的進口貿易政策中，本研究係採用了限量及關稅配額(TRQ)兩種不同的進口方式來模擬。此四種政策的變動將使得農業部門中的產品市場之均衡價格與數量以及要素市場之均衡價格與數量產生變動，進一步將影響到農民的福利、消費者的剩餘與政府的財政支出，更名為台灣溫室氣體的排放減量有所貢獻。模型中使用國外三種較適於做為發電燃料用的能源作物（即芒屬植物、白楊、柳樹），而所引用的生產量、售價與生產成本等資料（表5）主要是根據國外學者 Ugarte、Schneider 和 McCarl 等的研究所換算而來的，至於目前國內較易於取得的甘蔗、甘藷、甜高粱等能源作物，由於其用於發電的效益較低即產電量較少，因此暫不於本研究中所使用。

表 5 美國地區種植能源作物平均每年的生產成本與收益

單位：乾燥後的公噸數/每英畝/每年(dt/acre/yr)、電力售價 2.58 美元/
百萬英國熱量單位(price=\$2.58/MBtu)、美元/每英畝/每年(\$
/acre/yr)

	美國地區 (平均 NE.APP.CB.LS 四地區)		
	芒屬植物 Switchgrass	白楊 Poplar	柳樹 Willow
生產量 Mature Yield (dt/acre/yr)	5.37	4.15	4.68
收入 Revenue (\$ /acre/yr)	153.43	104.34	95.06
種子成本 Seed Cost (\$ /acre/yr)	2.16	12.34	31.90
氮肥 Fertilizer N (\$ /acre/yr)	26.24	2.13	6.41
磷肥 Fertilizer P (\$ /acre/yr)	0.45	0.71	0.00
鉀肥 Fertilizer K (\$ /acre/yr)	0.63	0.50	0.00
酸橙肥 Fertilizer Lime (\$ /acre/yr)	3.25	1.03	0.00
收穫前化學肥料 Chemical (\$ /acre/yr)	1.46	3.43	4.01
收穫前勞動 Labor (\$ /acre/yr)	1.66	1.52	0.33
收穫前可變機械 Mach Var (\$ /acre/yr)	2.57	2.03	0.37
收穫前固定機械 Mach Fixed (\$ /acre/yr)	3.70	2.70	0.54
借款利息 Interest OPI (\$ /acre/yr)	1.62	15.33	10.69
收穫成本 Harvest Cost (\$ /acre/yr)	58.59	43.66	42.88
收穫後化學肥料 Chemical (\$ /acre/yr)	2.84	2.62	0.57
收穫後勞動 Labor (\$ /acre/yr)	0.10	0.39	0.10
收穫後可變機械 Mach Var (\$ /acre/yr)	0.20	1.49	0.33
收穫後固定機械 Mach Fixed (\$ /acre/yr)	0.30	2.58	0.57
總成本 Total Cost (\$ /acre/yr)	105.79	92.45	98.70
收益 Returns (\$ /acre/yr)	47.64	11.89	-3.64

註：能源作物的生長年限分別為 Switchgrass= 8.96yr、Hybrid Poplar= 10yr、
Willow=22yr。

資料來源：Daniel et al. (2000).

四、台灣種植能源作物的益本分析

本研究的主要目的是分析利用休耕農地種植能源作物的可行性，由於台灣的農業生產成本較國外高，且在加入世界貿易組織(WTO)後，國內市場加速開放使台灣的農產品，尤其是稻米生產過剩，政府為了維護農民應有的收益，鼓勵農民

參與休耕並給予補貼，政府從民國 86 年實施「水旱田利用調整計劃」(休耕、轉作、造林)，並於民國 90 年施實「水旱田利用調整後續計劃」，參與休耕的農民可接受到每公頃每期 27,000 元至 45,000 元的補貼，其中若參與種植綠肥的一般性休耕農民可領取 45,000 元的休耕補助費用，由於此休耕的補助對某些農民而言，其利潤可能不輸於種植水稻，因此至民國 93 年的休耕地面積已達到 27 萬公頃。

由於種植能源作物要具有經濟效益的前提是需要大面積的生產，因此政府可效法德國的情況多加運用現有的二十幾萬公頃之休耕農地，鼓勵參與休耕的農民種植能源作物，此不但可減少溫室氣體的排放，更可以解決農地利用率不高的困擾。目前政府所實施的休耕補貼政策並不符合世界貿易組織的綠色措施之規範，是處於灰色地帶的補貼。為了兼顧經濟面的發展與環境面的維護，並減緩加入世界貿易組織的衝擊同時達到綠色措施的要求與京都協議的規範，政府可考量鼓勵休耕農民種植能源作物，給予碳稅補貼，如此對農地的使用及環境的維護將比現今休耕種植綠肥來得有實質效益，再者能源作物收成品可用於取代煤礦發電，對於仰賴煤礦進口的我國而言，亦可減少政府的財政支出。

台灣電力公司進口發電用煤礦在民國 91 年時為 22,631,896 公噸，而每公噸煤礦進口價格為 29.39 美元，如果以當年的匯率 34.58 台幣來計算，則民國 91 年時進口煤礦的總支出為 22,996 百萬台幣。就發電量而言，每公噸的煤礦可產生 2,442 千瓦小時的電，因此民國 91 年時台電公司藉由進口煤礦所製造的發電量為 55,267 百萬千瓦小時，約台灣當年總發購電量 (1,659 億千瓦小時) 的 33.3 %。而就溫室氣體排放量而言，民國 91 年時台電公司燃煤發電機組，每產生 1 千瓦小時的電所產生的二氧化碳 (CO₂)、硫氧化物 (SO_x) 和氮氧化物 (NO_x) 分別為 884 公克、0.569 公克和 0.678 公克，因此民國 91 年時，台灣經由台電公司燃煤發電所製造的各種溫室氣體之排放量分別為二氧化碳 48,856.1 千公噸、硫氧化物 31.4 千公噸、氮氧化物 37.5 千公噸 (表 6)，而就二氧化碳的排放比例，約佔有民國 91 年時全台灣使用能源時的二氧化碳總排放量 (240,684 千公噸) 20

% 之多。

表 6 民國 91 年時台灣電力公司燃煤發電的情況

每單位個別	
每公噸煤礦進口價格（美金/公噸）	29.39
每公噸煤礦所能產生的電量（kWh/公噸）	2,442
生產每度電的二氧化碳排放量（公克/kWh）	884
生產每度電的硫氧化物排放量（公克/kWh）	0.569
生產每度電的氮氧化物排放量（公克/kWh）	0.678
整體總合	
總煤礦進口量（公噸）	22,631,896
進口煤礦的總支出（百萬台幣）	22,996
總產電量（MW）	55,267
總二氧化碳排放量（公噸）	48,856,108
總硫氧化物排放量（公噸）	31,447
總氮氧化物排放量（公噸）	37,471

註：kWh - 仟瓦小時、MW - 百萬瓦。

資料來源：台灣電力公司、本研究整理。

依據 Walsh (1998) 和密西根生質能研究計畫 (2002) 的報告內容指出，綜合歐、美等先進國家的情形，並考量地理環境上的限制、技術上的可行性、發電效益、高產量和低成本等因素，目前較被國外所推廣使用的能源作物主要是為草本作物如芒屬植物 (Switchgrass) 和白楊 (Poplar) 柳樹 (Willow) 等短期木質作物，而本研究即以這三種較被廣泛運用的能源作物為模擬對象。根據 Ugarte 等 (2000) 的研究指出，芒屬植物、白楊和柳樹這三種能源作物的生長年限分別為 8.96 年、10 年和 22 年，而平均每年的生產量分別為 13.276 公噸/公頃、10.249 公噸/公頃和 11.552 公噸/公頃。

就技術層面而言，將能源作物和煤礦混合燃燒是適用於現今鍋爐之使用的。生質能的發電效率約介於 33 % 到 37 % 之間 (Richard, 2002)，是和單獨燃煤發電時的發電效率相近的 (民國 90 年時台電公司燃煤發電的發電效率為 36.42 %)，因此本研究將單獨燃煤發電與混合燃燒發電的發電效率視為相同的，故僅

需比較能源作物和煤礦之間的熱值，即可知道要取代某一比例的煤礦發電，所需要的能源作物之用量。而根據 Bain 和 Amos(2003)指出，煤礦的熱值約為 13,370 Btu/lb (英國熱量單位/磅)，而能源作物當中的芒屬植物之熱值為 7,806 Btu/lb，白楊和柳樹的熱值分別為 8,920 Btu/lb 和 8,457 Btu/lb，因此可知能源作物和煤礦之間的熱值比分別為芒屬植物 58.38 % (1 單位的芒屬植物所能產生的電力僅需要 0.58 單位的煤礦就能夠產生)、白楊為 66.72 %、柳樹為 63.25 %。

根據 Olsen (2001)、Plunkett 等 (2003) 研究顯示，就以現今的發電技術而言，若要將能源作物和煤礦混合燃燒，最好的混燒比例為混合 10 % 的能源作物，國外許多的實驗也都以 10 % 的混燒比例做為研究的基礎，因此本研究的模擬即先以 10 % 的混燒比例為主軸。

在台灣要種植這三種能源作物各自所需的規模大小經由計算後如表 7 所示，就民國 91 年時台電公司燃煤發電機組若要以 10 % 的三種能源作物分別來取代煤礦用於混合燃燒發電，則這三種能源作物各自所需要的種植面積最多為 330,966 公頃，約全台灣可耕地面積的 39 %。而以台灣目前的農地使用狀況來看，在民國 93 年時水旱田利用調整後續計畫的面積總計約 27 萬多公頃，因此在台灣地區若要種植能源作物來取代某一比例的煤礦混合燃燒發電，基於土地資源上的限制較為可行的混燒比例應為 10 % 以內的情形。

根據 Pope 等 (2000)、密西根生質能研究計畫 (2002) 及 Plunkett 等 (2003) 的研究指出，能源作物和煤礦混合燃燒的時候，所能減少的二氧化碳之排放量即為能源作物取代等量的煤礦所能減少的二氧化碳排放量，例如取代 10 % 的煤礦使用時將可減少這 10 % 的煤礦所排放的二氧化碳，因為燃燒能源作物所排放的二氧化碳已於能源作物成長時完全百分之百地被吸收。Hanegraff (1998)、Kline 等 (1998)、Schneider 和 McCarl (2001) 也認為能源作物於燃燒發電時，所排放的二氧化碳至少有 95 % 以上的排放量是於能源作物生長時經由葉綠素在陽光的照射下所吸收，所以總括而言混合燃燒時所能減少的二氧化碳之排放量幾乎可視為是等量的。

表 7 民國 91 年時台灣要種植三種能源作物各自所需的規模大小

單位：％、公噸(ton)、公頃(ha)

能源作物取代 5 % 的煤礦發電				
所減少的煤礦使用量(ton)		1,131,594.8		
能源作物別	熱值比(％)	需求量(ton)	種植面積(ha)	佔可耕地的比例(％)
芒屬植物	58.38	1,938,326	146,002	0.1723
白楊	66.72	1,696,035	165,483	0.1953
柳樹	63.25	1,789,083	154,872	0.1828
能源作物取代 7 % 的煤礦發電				
所減少的煤礦使用量(ton)		1,584,232.72		
能源作物別	熱值比(％)	需求量(ton)	種植面積(ha)	佔可耕地的比例(％)
芒屬植物	58.38	2,713,657	204,403	0.2412
白楊	66.72	2,374,450	231,676	0.2734
柳樹	63.25	2,504,716	216,821	0.2559
能源作物取代 10 % 的煤礦發電				
所減少的煤礦使用量(ton)		2,263,189.6		
能源作物別	熱值比(％)	需求量(ton)	種植面積(ha)	佔可耕地的比例(％)
芒屬植物	58.38	3,876,652	292,005	0.3446
白楊	66.72	3,392,071	330,966	0.3906
柳樹	63.25	3,578,165	309,744	0.3656

資料來源：本研究整理。

由 Bain 和 Amos (2003) 的研究可知，本研究所評估的三種能源作物和煤礦的熱值比分別為，芒屬植物 58.38 %、白楊 66.72 %、柳樹 63.25 %，因此若要以這三種能源作物個別取代民國 91 年時台電公司燃煤發電中 10 % 的煤礦，以混合燃燒發電，則其結果將如表 8。就需求量而言，芒屬植物、白楊和柳樹各自分別為 3.88、3.39 和 3.58 百萬公噸，而就所需的種植面積，各自為 292、331 和 310 千公頃，所能減少的二氧化碳排放量經由替代 10 % 的煤礦來計算，得知為 4.89 百萬公噸，約佔民國 91 年台灣地區能源部門所排放的二氧化碳量（240.68 百萬

公噸)之 2.03 %。而若要以 1990 年時增加 90 % 的二氧化碳為我國的減量基準(即 215.52 百萬公噸為基準)，則將貢獻我國於民國 91 年時所需削減的二氧化碳量(25.16 百萬公噸)之 19.44 %；若以 2000 年為我國的減量基準(即 217.91 百萬公噸為基準)，則將能貢獻民國 91 年時所需削減的二氧化碳量(22.77 百萬公噸)之 21.48 %。

表 8 三種能源作物於 10 % 混合燃燒時個別的情形

能源作物別	單位：公噸(ton)、公頃(ha)、每年(yr)		
	芒屬植物 (Switchgrass)	白楊 (Poplar)	柳樹 (Willow)
需求量(ton)	3,876,652	3,392,071	3,578,165
生產量(d ton/ha/yr)	13.276	10.249	11.552
種植面積(ha)	292,005	330,966	309,744
進口煤礦的減少量(ton)	2,263,190	2,263,190	2,263,190
進口煤礦的支出減少 (百萬台幣)	2,299.57	2,299.57	2,299.57
二氧化碳 CO ₂ 減少量(ton/yr)	4,885,611	4,885,611	4,885,611
硫氧化物 SO _x 減少量(ton/yr)	3,145	3,145	3,145
氮氧化物 NO _x 減少量(ton/yr)	3,747	3,747~5,620	3,747~5,620

資料來源：本研究整理。

由於要以能源作物取代煤礦發電來減少溫室氣體排放，最好是需要大面積種植其效益才會顯著，因此溫室氣體的減量效益仰賴於能源作物種植面積的多寡，而種植面積的多寡則取決於農民種植能源作物時的收益，唯有當種植能源作物的利潤高於其他農作的利潤或者是休耕的補貼時，農民才會願意去栽種。就目前國外的例子來看，種植能源作物的利潤可能不會比其他作物高，但是能源作物卻有許多的正面之外部分效果，因此需要政府的補貼才可能推廣能源作物的種植。

目前種植綠肥的補貼金額為每公頃 45,000 元，若扣除翻耕費用，每公頃的淨利潤應有 41,000 元，因此農民一年兩期每公頃的休耕淨利潤約有 82,000 元。而根據 Ugarte 等(2000)的研究可知，芒屬植物、白楊和柳樹每公頃的年產量分別為 13.276 公噸、10.249 公噸和 11.552 公噸；其每年每公頃販售的收入分別

為 13,110 元、8,916 元和 8,122 元；而其每年每公頃的生產成本分別為 9,043 元、7,901 元和 8,433 元；故可知種植能源作物每年每公頃的利潤分別為，芒屬植物 4,067 元、白楊 1,015 元、柳樹 311 元，由此可知單就純粹種植能源作物用於銷售用途的經濟效益是相當低的，也就是說其原有的經濟誘因是極低的，農民並不會主動去種植，因此唯有當其加入環境維護面的考量，透過政府利用的補貼來提高其經濟誘因後才會有與其他農產品互相競爭的能力。

由上面數據可計算出能源作物的利潤加上政府的補貼金額至少要等於休耕的淨利潤(約每公頃每年 82,000 元)時，農民才願意種植能源作物，因此考量三種能源作物的利潤之外後，政府對芒屬植物每年每公頃補貼 77,933 元、白楊每年每公頃補貼 80,985 元、柳樹每年每公頃補貼碳稅 82,311 元時，農民才會有參與的意願。若將補貼的單位由公頃轉換為每公噸的二氧化碳時，則所補貼的金額為芒屬植物 4,657.79 元、白楊 5,486.18 元、柳樹 5,218.44 元，此補貼金額某種程度可視為碳稅。

本研究假設若政府的補貼金額為每公噸二氧化碳為 5,500 元，而此時農民的總收益每年每公頃將分別增加至 96,092 元、82,204 元、86,445 元，都是高於每年每公頃 82,000 元的休耕補貼利潤，就生產者追求較大利潤的因素考量下，農民將會考慮種植這三種能源作物。本研究將以台灣的農業部門模型來模擬在此補貼水準下的經濟影響。其實證結果整理於表 9 所示。

由表 9 可知在這三種能源作物當中，芒屬植物為最可能大量生產的能源作物，生產量為 1.55 百萬公噸，將使用 116.8 千公頃的休耕農地，而當其和煤礦混合燃燒用於發電時約可減少 1.94 百萬公噸的二氧化碳，此時政府所需支付的財政支出即碳稅補貼 8,984.23 百萬元，而此時政府所能減少的財政支出可分成兩方面探討，其中之一為可減少進口煤礦的支出 913.95 百萬元，另一方面為可減少用於休耕補貼的支出 9,459.36 百萬元。而就整體來看，政府若鼓勵參與休耕的農民種植這三種能源作物運用於台灣電力公司與煤礦混合燃燒發電，則將會有 163.5 千公頃的休耕地種植能源作物，總計能為台灣減少 2.66 百萬公噸的二氧化

碳，這些所減少的二氧化碳排放量約為民國 91 年時台灣地區使用能源時所排放的二氧化碳量（約為 240.68 百萬公噸）之 1.11 %。而若以 1990 年時增加 90 % 的二氧化碳為我國的減量基準（即 215.52 百萬公噸的二氧化碳排放量），則在民國 91 年時種植能源作物將可為台灣地區貢獻於民國 91 年時所需削減的二氧化碳量（25.16 百萬公噸）之 10.57 %；而若要以公元 2000 年的排放量為我國的減量基準（即以 217.91 百萬公噸的二氧化碳排放量為基準），則在民國 91 年時種植能源作物將能為台灣地區貢獻於民國 91 年時所需削減的二氧化碳量（22.77 百萬公噸）之 11.68 %，顯示台灣的農業部門若用於栽植能源作物取代些許比例的煤礦來混合燃燒發電，則將可為台灣的溫室氣體之減量有所貢獻。此外在經濟面的貢獻，將可為政府減少 1,739.15 百萬元之財政支出，其中包含須支付 12,752.64 百萬元之碳稅補貼給種植能源作物的農民，而能為政府減少 1,250.41 百萬元之煤礦進口與減少 13,241.38 百萬元之休耕補貼之支出。

表 9 台灣種植能源作物的可能影響

單位：公噸(ton)、千公頃(1000 ha)				
能源作物別	芒屬植物 (Switchgrass)	白楊 (Poplar)	柳樹 (Willow)	總計
生產量(ton)	1,550,661	224,792	286,253	2,061,706
種植面積(1000 ha)	116.8	21.9	24.8	163.5
CO ₂ 排放減少量 (百萬公噸)	1.94	0.33	0.39	2.66
種植期間 CO ₂ 的 儲存量 (Sink) (百萬公噸)	2.22	0.20	0.22	2.64
政府的財政支出 ---碳稅補貼 (百萬台幣)	8,984.23	1,753.90	2,014.51	12,752.64
【A】				

進口煤礦的支出 減少(百萬台幣)	913.95	153.19	183.27	1,250.41
【B】				
休耕補貼的支出 減少(百萬台幣)	9,459.36	1,773.61	2,008.41	13,241.38
【C】				
政府財政支出的 減少(百萬台幣)	1,389.08	172.90	177.17	1,739.15
【B】+【C】-【A】				

註：能源作物種植期間二氧化碳的儲存量（Sink）分別為芒屬植物
19 ton/ha/yr、白楊 9 ton/ha/yr、柳樹 9 ton/ha/yr。
資料來源：本研究整理。

五、結論與討論

隨著人口的不斷增加，環境的污染也隨之日益嚴重，導致了全球的氣候變遷異常，其中又以溫室效應造成「全球暖化」的問題最為全球所關切，世界各國於1997年簽訂了京都協議書，規範各國的溫室氣體排放量。而台灣地區溫室氣體的總排放量以二氧化碳的排放量佔絕大的比例，其中又以台灣電力公司燃煤發電時所排放的二氧化碳為主要來源。由於石化能源的使用會帶來環境的危害，因此歐、美等國正積極的研發可再生能源的運用，其中又以能源作物的使用兼具經濟面與環境面的好處，因此最為世界各國所重視，唯其種植能源作物的前提是需要在大面積的種植情況下效益才會顯著。而近年來政府為了因應加入世界貿易組織施實了水旱田利用調整計畫，鼓勵農民參與休耕給予補貼，民國93年時已有超過27萬公頃的農地是處於休耕狀態。因此在技術面的許可之下，政府可參考國外的情形，利用休耕地種植能源作物取代火力發電廠中某比例的燃煤發電，作為政策上的調整方案。

由國內外的文獻發現知種植能源作物的好處包括經濟和環境兩層面，在經濟面可減少石化能源的進口支出、永續地供應能源、節省水資源、作為產業結構的

調整與增加農村工作機會等優點；而在環境面則可穩固土壤減少侵蝕、改善地下水質、維護生態系統、有助生物多樣性、減輕風化對地表的侵蝕、減少殺蟲劑的使用、增加土壤有機質與減緩溫室效應等優點。

本研究之主要目的在於評估台灣利用休耕用地種植能源作物用以發電的可行性。綜合技術面的考量與台灣目前的農地使用情形，台灣若要種植能源作物以取代台電公司的煤礦混合燃燒發電，較為可行的混燒比例為 10 % 以內的情形，而其所需的種植面積最多為 331 千公頃。若以 10 % 的混合燃燒比例來評估，則可為台電公司減少 2,263.2 千公噸的煤礦進口亦即可減少 2,299.57 百萬元的進口支出，且約可減少 4,885.6 千公噸的二氧化碳之排放、減少 3.1 千公噸的硫氧化物之排放及減少 3.7 千公噸的氮氧化物之排放。而就以符合目前休耕、種植綠肥的補貼金額為每年每公頃 90,000 元的情況來衡量，則芒屬植物、白楊、柳樹所需要的最基本之碳稅補貼每年每公頃分別各自為 77,933 元、80,985 元、82,311 元，折合每公噸的二氧化碳之補貼分別為 4,657.79 元、5,486.18 元、5,218.44 元。

經由實證的模擬結果可知，若政府的政策是以鼓勵休耕種植能源作物來取代原有的休耕種植綠肥的情形，並以每公噸二氧化碳 5500 元的金額來補貼農民，則在農地的使用上將有 116.8 千公頃的休耕地種植芒屬植物、有 21.9 千公頃的休耕地種植白楊、有 24.8 千公頃的休耕地種植柳樹，共有 163.5 千公頃的休耕地種植能源作物，總計將可為台灣減少 2.66 百萬公噸的二氧化碳並可替政府部門減少 1,739.15 百萬元的支出。又由於一般而言能源作物的體積龐大，先前的處理措施適宜在栽種地區完成，如此可增加農村的工作機會，故整體而言，台灣地區若種植能源作物無論在經濟面或在環境面都將有所助益，將提高整體的社會福利，又可因此減緩加入世界貿易組織 WTO 的衝擊並達到京都協議的要求，且又有效的利用現有的休耕地。

參考文獻

中文部分

- 行政院環境保護署，國立台灣大學全球變遷研究中心，1998 年 6 月，「分析國際資料探討我國溫室氣體排放之合理減量空間」。
- 行政院環境保護署，國立台灣大學全球變遷研究中心，1998 年 6 月，「主辦『邁向二十一世紀：環境與能源研討會』」。
- 吳俊賢、林俊成、李國忠、魏名聰，2001 年 4 月，「栽種生質能源作物可增加再生能源使用與減緩溫室效應」，台灣林業，第 27 卷第 2 期，第 7-14 頁。
- 吳耿東、李宏台，2002 年 11 月，「生質物發電利用技術現況與發展」，臺電工程月刊，第 651 期，第 77-95 頁。
- 施信民、劉瓊芳，1998 年 11 月，「生質能利用簡介」，化工技術，第 6 卷第 11 期，第 116-121 頁。
- 陳雄文，1998 年，「氣候變化綱要公約發展趨勢及因應策略」，全國能源會議會議資料，經濟部，第 1-36 頁。
- 陳載永、陳合進，2002 年 3 月，「生質能源之利用與經濟性」，農政與農情，第 72-78 頁。
- 黃宗煌、黃瀕儀、于眾峰，2003 年 11 月，「能源作物轉作及應用推廣之可行性評估」，期末報告，國立清華大學永續發展研究室。
- 黃勝良，1994 年 3 月，「生質能的利用與發展」，臺電工程月刊，第 547 期，第 41-46 頁。
- 張靜貞，1993 年，「數學規畫在農業部門模型的應用」，台灣土地金融季刊，第 30 卷第 4 期，第 35-50 頁。
- 張靜貞、陳吉仲，1995 年，「農業保護政策與生產結構變動對臺灣農業部門福利分配之影響」，台灣土地金融季刊，第 32 卷第 1 期 (NO.123)，第 69-81 頁。
- 楊任徵、黃肇英、朱育華，1993 年，「台灣地區能源使用相關的二氧化碳排放量計算」，能源季刊，第 23 卷，第 2 期。
- 楊任徵，1998 年，「我國能源部門溫室氣體排放統計與分析」，工研院能資所研究報告。

英文部分

- Bain, R.L. and W.P. Amos, 2003, "Biopower Technical Assessment: State of the Industry and Technology", National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado. 「Online」 <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33123.pdf>.
- Biomass Co-Firing an efficient way to reduce greenhouse gas emissions, 2003, European Bioenergy Networks. 「Online」 <http://eubionet.vtt.fi>.
- Energy Crops and Their Potential Development in Michigan, 2002, A Report of Michigan Biomass Energy Program. 「Online」

- <http://www.michiganbioenergy.org/areas/Energycroppaper.pdf>.
- Hall, D.O., G.W. Bamard, and P.A. Moss ,1982, “ Biomass from energy in development counties ” ,Pergamon Press, Oxford.
- Hanegraff, M. C., E.E. Biewinga, and Gert van der Bijl, 1998, “ Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops ” , *Biomass and Bioenergy* Vol.15,No.4/5:345-355.
- Houghton, J.T., G.J. Jenkins, and J.J. Ephramus, 1990, “ Climate Change: The IPCC Scientific Assessment ” ,Cambridge University Press, Cambridge.
- Jefferson, M. 1996, “ Global prospects for renewable energy ” , WREC, p1-5.
- Kline, D., T. Hargrove, and C. Vanderlan, 1998, “ The Treatment of Biomass Fuels in Carbon Emission Trading Systems ” , Prepared for the Center for Clean Air Policy’s Greenhouse Gas Emissions Trading Braintrust. 「 Online 」
<http://www.ccap.org/m-pub-d.htm#AIRLIEPUB>, Washington.
- McCarl, B.A. and B.C. Murray, 2001, “ Harvesting the Greenhouse: Comparing Biological Sequestration with Emissions Offsets ” , Department of Agricultural Economics, Texas A & M University, College Station, TX.
- McCarl, B.A. and U.A. Schneider, 2000, “ U.S. Agriculture’s Role in a Greenhouse Gas Emission Mitigation World: An Economic Perspective ” , *Review of Agricultural Economics* 22,No.1:134-159.
- McCarl, B.A. and H.T. Spreen, 1980, “ Price Endogenous Mathematical Programming as a Tool for Sector Analysis ” , *American Journal of Agricultural Economics*,62(1):87-102.
- Olsen, A., 2001, ”Co-Burning Biomass Opportunities in Wisconsin A Strategic Assessment”, Final Report: For the Division of Energy Wisconsin Department of Administration, U.S. Department of Energy Contract.
- Plunkett, J. A. Shipley, D. Hill, and C. Donovan, 2003, ”Energy Efficiency and Renewable Energy Resource Development Potential In New York State”, Final Report: Prepared for New York State Energy Research and Development Authority.
- Pope, L. B., R. Joseph Eisele, and Michael L. Murphy, 2000 , “Biomass Gasifier Add-On For Coal and Oil Fired Utility Boilers”, Energy Products of Idaho-The Biomass-to-Energy company. 「 Online 」
<http://www.energyproducts.com/Documents/Green%20Power%20Paper>.
- Ralph, E.H. and Sims, 2001, “Bioenergy— a renewable carbon sink”, *Renewable Energy* ,22:31-37.
- Richard, L.B., and P. Ralph, 2002, “Biomass for heat and power”, *Forest Products Journal* Vol.52, No.2:12-19.
- Samuelson, P.A., 1952, “ Spatial Price Equilibrium and Linear Programming ” , *The*

American Economic Review 42:283-303.

- Schneider, U.A. and B.A. McCarl, 2001, "Economic Potential of Biomass Based Fuels for Greenhouse Gas Emission Mitigation " , Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University , Forthcoming in Special Issue of Environmental and Resource Economics.
- Schneider, U.A. and B.A. McCarl, 2001, " Greenhouse Gas Mitigation Through Energy Crops in the U.S. with Implications for Asian-Pacific Countries " ,Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.
- Takayama, T. and G.G. Judge, 1964, " Equilibrium Among Spatially Separated Markets: A Reformulation " ,*Econometrica* 32:510-524.
- Walsh, M.E., Daniel G. De La Torre Ugarte, S. Slinsky, R.L. Graham, H. Shapouri, and D. Ray, 1998, " Economic Analysis of Energy Crop Production in the U.S.-Location, Quantities, Price and Impacts on the Traditional Agricultural Crops " ,*Bioenergy 98: Expanding Bioenergy Partnerships*,Madison Wisconsin,October 4-8,vol.2:1302-1310.
- Ugarte, D. G. De La Torre, M.E. Walsh, H. Shapouri, and S.P. Slinsky, 2000, " The Economic Impacts of Bioenergy Crop Production on U.S. Agriculture " , Report prepared for the U.S. Department of Energy and the U.S. Department of Agriculture.

計畫成果自評

台灣由於農產品生產過剩，且加入世界貿易組織 WTO 後，國內農產品又相對地較不具有競爭力，因此至民國 93 年時已有 27 萬公頃以上的農地參與休耕。本研究探討農業部門溫室氣體總量管制及其效益與成本分析，並以發電用的能源作物為例評估休耕農地種植能源作物的可行性。具體而言，本研究以數學規劃所建立的台灣農業部門模型，模擬將台灣現有的休耕農地來種植能源作物來和煤混合燃燒發電時，對台灣溫室氣體減量之貢獻以及相關的經濟分析。模擬結果顯示，若以能源作物取代台灣電力公司 10 % 的煤礦來混合燃燒發電，則需要有 331 千公頃的農地來種植能源作物，如此政府可減少 2,299 百萬元的進口煤礦支出，並可減少 4,885.6 千公噸的二氧化碳排放，此貢獻相當於我國於民國 91 年時需削減的二氧化碳排放量之 20 % 左右。研究內容與原計畫相符，達成預期目標，研究成果並具學術與應用價值，極適合在學術期刊發表。

附錄一、 美國各地區能源作物發電之情形

1.美國各州每年用於生產發電原料的能源作物之產量

單位：乾燥後的公噸數 / 英畝 (Dry Tons / acre)

州別	Switchgrass	Hybrid Poplar	Willow
阿拉巴馬	5.14	4.45	
阿肯色	4.98	4.38	
康乃迪克	4.04		5.41
德拉威	3.59		
佛羅里達	3.59	4.50	
喬治亞	4.96	4.29	

資料來源：Schneider, U.A. ,and McCarl, B. A. , 2001。

2.美國各州把能源作物用於發電時所需的處理成本

單位：每 7 百萬兆英國熱量單位的千美元 (in \$ 1,000 per 7 Trillion Btu)

地區	Switchgrass	Hybrid Poplar	Willow
Northeast	1,476		1,455
Lake States	1,435	1,552	
Cornbelt	1,435	1,552	
Southeast	1,333	1,540	
Delta States	1,380	1,621	

資料來源：Schneider, U.A. ,and McCarl, B. A. , 2001。

3.美國能源作物用於發電時，所需的發電原料

單位：每 7 百萬兆英國熱量單位乾燥後的千噸數
(in 1,000 Dry Tons per 7 Trillion Btu)

	Switchgrass	Hybrid Poplar	Willow
全部地區	482.76	424.24	424.24

資料來源：Schneider, U.A. ,and McCarl, B. A. , 2001。

4.美國能源作物用於發電時，所能減少的溫室氣體放射量

單位：乾燥後每公噸能源作物的溫室氣體公斤數
(in kg CE per dry ton)

	Switchgrass	Hybrid Poplar	Willow
--	-------------	---------------	--------

全部地區	369.61	420.59	420.59
------	--------	--------	--------

資料來源：Schneider, U.A. ,and McCarl, B. A. , 2001。

5.美國能源作物用於發電時，所產生的電力售價

單位：每百萬英國熱量單位的美元（ in \$ per MBtu ）

	Switchgrass	Hybrid Poplar	Willow
全部地區	0.83	0.83	0.83

資料來源：Schneider, U.A. ,and McCarl, B. A. , 2001。