

行政院國家科學委員會補助
大專學生參與專題研究計畫研究成果報告

* ***** ***** *
* 計 畫 *
* : 以生命週期評估探討大豆與綠藻之碳足跡研究 *
* 名 稱 *
* ***** ***** *

執行計畫學生：黃立雯
學生計畫編號：NSC 100-2815-C-041-005-E
研究期間：100年07月01日至101年02月28日止，計8個月
指導教授：楊英賢

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學環境資源管理系

中華民國 101年03月31日

100 年度 國科會大學生專題研究補助專案

題目：以生命週期評估探討大豆與綠藻之碳足跡研究

大學生：嘉南藥理科技大學 環境資源管理系 大四學生 黃立雯

指導老師：嘉南藥理科技大學 環境資源管理系 楊英賢 副教授

中華民國一〇一年三月三十一日

目錄

摘要	4
一、前言	4
二、研究目的	5
三、文獻回顧	6
3.1 綠藻介紹應用	6
3.1.1 綠藻培養系統	8
3.1.2 綠藻在能源與環境的應用	9
3.1.3 綠藻運用於糧食替代	15
3.1.4 綠藻在產業運用	16
3.2 大豆介紹與應用	16
3.2.1 大豆栽培	17
3.2.2 大豆運用於健康食品	18
3.2.3 大豆運用於替代能源	18
4.1 生命週期評估	19
4.2 個案系統範疇界定	20
4.3 生命週期盤查與資料處理	23
4.4 碳足跡分析	26
五、結果與討論	27
5.1 盤查結果說明	27
5.2 綠藻盤查與結果分析	27
5.3 大豆盤查與結果分析	28
5.4 綠藻與大豆之碳足跡比較	28

5.5 綜和討論	29
六、結論與建議	29
參考文獻	32

摘要

工業革命以來，人類大量的使用化石燃料、濫伐森林、使用含氯、氟的碳化物及農工活動頻繁等，增加溫室氣體（Greenhouse Gas, GHG）大量排放，造成全球暖化(global warming)與氣候變遷，全球溫度上升造成農獲量也因乾旱或洪水而減少，為了改善全球暖化與糧食危機，尋找低碳能源並能兼顧糧食問題將成為世界各國刻不容緩的重要議題。本研究以減碳背景與考量糧食問題，擬以生命週期評估探討農產個案，並以綠藻與大豆為選擇比較個案，以生命週期評估能源角度與碳足跡分析，進行大豆與藻類的生命週期盤查，本次個案研究結果顯示，從搖籃到大門之碳足跡比較，結果顯示，個案大豆蛋白質產品之碳足跡低於綠藻，其中以運輸階段較高為 1.753 TonCO₂-eq.，整體來說以同樣生產 1 公噸蛋白質而言，大豆仍是較具環境友善性的。

關鍵字：生命週期評估、碳足跡、大豆、綠藻

一、前言

全球暖化氣候的變遷，也間接影響到糧食短缺的問題，著作《氣候戰爭》的格溫·戴爾（Gwynne Dyer）曾提到，只要全球氣溫上升一度，農作物就會減少 10%；最新的資料顯示，全球平均溫度已經比工業革命前的水平高出了攝氏 0.7 度(維基百科)。氣候暖化對人類造成影響的衝擊之一，糧食短

缺，世界人口的日益增加，但種植糧食作物的面積有限，能源價格也會隨糧食的短缺而導致價格高漲，為此尋找替代能源與糧食為現今世界各國的重要議題之一。

綠藻作為替代能源選項及具有未來開發潛能，其主要原因是藻類具有高生產量特性，並且綠藻含有高量的脂質和蛋白質，其營養成分透過生物合成同時固定二氧化碳，因此，綠藻本身的價值不只於糧食供給，還有二氧化碳固定效果。根據綠色植物生成生物量統計，平均每公噸綠色植物(如木材)大約可以固定 0.4 公噸的二氧化碳(林俊成等人，1999)，若藉著造林來固定大量的二氧化碳，相比於目前溫室氣體排放所造成的全球暖化顯得緩不濟急。至於，綠藻乃具有高生產量特性，其光合作用效率高於陸生植物，且培養所需的土地面積相對低於造林，對於全球有限土地資源的條件下，綠藻固碳作用並將其產生的生物體加以利用，是目前尋求替代能源之具有潛力的選項之一。

綠藻在應用方面，主要以二氧化碳為碳源，藉由光合作用進行碳固定並產生大量可再利用的生物質量(闕壯群，2009)，提供糧食之生物質。至於，綠藻作為在環境應用價值，包括替代能源形式，利用含高脂質成分之綠藻，經由萃取轉化為生質柴油或產氫；此外，綠藻本身具有固碳效果，其生物質含豐富蛋白質與醣類將可供作糧食，相關綠藻生物體可進一步加工為各種食品加工材料，對於糧食供給將有所助益，例如綠藻含豐富蛋白質，其價值可類似於大豆，將具有糧食替代性。因此，綠藻的應用將具有環境與糧食等兩方面的價值，對於糧食提供與減碳議題將具有其未來發展的潛力。

二、研究目的

在人口爆炸的時代，為因應及解決糧食短缺的未來，同時探討減少資源與節能減碳的價值，將以碳足跡角度探討綠藻與大豆之差異。因此，本

研究目的在探討大豆與綠藻之碳足跡，應用生命週期評估為方法，並以蛋白質觀點分析能源消耗及碳足跡的影響，預期完成以下研究目標：(一) 以生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)方法分析個案產品從搖籃到大門階段之能資源投入與污染產出。(二) 比較產品碳足跡。

三、文獻回顧

3.1 綠藻介紹應用

綠藻在植物界中歸類於綠藻植物門，綠藻的體型微小，細胞約為 2-8 微米(μm)，形狀為球形或橢圓形，由於細胞非常微小，無法直接用肉眼觀察，需藉由高倍以上的顯微鏡才能可看見，雖體積微小，但藻類中幾乎涵蓋了人體所需要的養份；綠藻包含原核以及真核藻類；分布範圍廣且生長快速，在溫度、陽光、水分與營養鹽充足之生長環境下，綠藻可以在一日之內完成一次以上的細胞分裂，具有快速的繁殖能力與旺盛的生命力，因此，綠藻被認為是未來重要的糧食來源之一。至於綠藻的分類可依據色素、細胞壁、細胞核種類、儲存物種類、鞭毛而分為藍綠藻門(Cyanophyta)、綠藻門(Chlorophyta)、輪藻門(Charophyta)、裸藻門(Euglenophyta)、金黃藻門(Chrysophyta)、甲藻門(Pyrrhophyta)、隱藻門(Cryptophyta)、褐藻門(Phaeophyta)、紅藻門(Rhodophyta) (沈曉瑄，2009)，而主要常用的綠藻種類以表 3.1 進一步說明之。

目前藻類的來源主要有兩種途徑，一是收集湖泊、河灣、水庫或池塘等富營養化水體中天然生長的大量浮游藻類；其二是，人工戶外養殖製備，這也是獲取藻類生物質最主要和最有效的方法。第一次有計劃地大量培養綠藻在第一次世界大戰期間德國哥庭根大學林納德教授，為解決糧荒而開始研究天然綠藻糧食化的綠藻培養實驗；此外，世界衛生組織也曾研究如何大量生產技術以供應人類食糧需求，並稱綠藻為“二十一世紀最佳食品”；在二次大戰之後，以美國、德國為主的光合成學者也相繼投入綠藻的研究。在日本方面，最早由宮田教授於 1959 年成立了研究所，開始大量培養綠藻並製成食品銷售。目前，綠藻相關技術的研究是極受各界注目的研究焦點，同時綠藻也是極受歡迎的綠色食品 (沈曉瑄，2009)。

表3.1常用綠藻及其有效成分

主要藻種	主要有效成份	主要功能
小球藻	蛋白質、脂質、維他命、礦物質、維生素、核酸。	1、作為營養添加劑，提供高含量的蛋白質、葉綠素、維生素、礦物質、核酸。 2、主要功能為： (1)增強人體免疫功能 (2)抗病毒感染和增殖 (3)抑制癌細胞增殖 (4)迅速修復機體損傷 (5)排除體內毒素 (6)抑制血壓血糖上升 (7)降低血清膽固醇含量 3、作為食用色素提取物 4、飼料—魚蝦開口餌料 5、化妝品原料
螺旋藻	蛋白質、維生素、藻藍素、GLA、礦物質、胺基酸	1、功能包括抗輻射損傷、抗菌、抗癌作用、降低膽固醇、提高鐵的生物有效性及調理貧血症。
血球藻	蝦紅素	1、鮭、鱒養殖魚餌料添加劑。
隱甲藻	特殊油質 DHA	1、人體補充 DHA 的良好來源。
紫球藻	藻紅素、特殊油質 AA	1、功能：A:抗腫瘤 B:抗病毒 C:降血脂 D:抗輻射 E:抗菌

(資料來源：闕壯群，2009；經本研究整理)

3.1.1 綠藻培養系統

一般而言，藻類培養系統可分為開放式養殖及光合反應器的培養兩個主軸，其選擇需要考慮許多因素，如綠藻的生物特性、氣候狀況、目標產物種類、土地、人工、能源、用水、營養源等各項成本(林志生等人，2010)。

開放式綠藻培養系統包含大型池、開放式槽體、圓形培養池及跑道型培養池，開放式藻類培養系統之利用方式，主要利用戶外的太陽光作為光合作用的光源進行培養，這種培養的方式在大規模培養條件，較密閉式系統容易且成本也低廉許多，但開放式綠藻培養系統最大問題是無法有效控制環境因子，容易受到外界的因素影響，如氣候、溫度與天氣等影響，且藻類生長所達到的細胞密度較低(綠藻產率低)，品質上也容易受到其它藻種、細菌的汙染、水蒸發量大與二氧化碳的損失率等影響，且不是所有藻類都可以開放培養。因此，欲採用開放式系統培養，其藻種必須不容易受到雜菌汙染且對環境的變化敏感度較低，或是設置培養池的環境因子變化不大(Schpepr,1998)。開放式培養系統在目前的應用雖較為廣泛，但在培養操作上還是有一定的難度需要去研究克服的。

密閉式綠藻培養系統包括了可以在發酵槽、培養袋、平板光生化反應器及管型光生化反應器內培養，依據應用上的不同，需要的系統也會不同。密閉式的系統在戶內或是戶外都可以實施，與開放式系統不同的是，密閉式系統在培養環境上控制較容易，物種不易受汙染，目前各類的發酵槽性能及應用亦十分發達，故微生物培養之細胞濃度一般都比開放式系統來的高，可達 20~100g/L(賈有元，2004)產率也較開放式系統高，品質較為穩定，在後製過程分離純化的成本也較少，但缺點是相對於開放式系統，密閉式系統造價和運轉成本所需的成本較高，規模不易增加，因此，密閉室系統通常適用於培養生產高單價產物的物種，(Radmer,1994;謝志鴻等人，2009)。目前藻類生產系統在未來還有相當大的發展空間，而藻類的發展也會隨著綠藻培養的技術性經濟可行性，而更進一步發展。

表 3.2 開放式綠藻培養系統與密閉式綠藻培養系統分析比較

培養方式	優點	缺點
開放式養殖	1、在規模增加上容易。 2、成本較低廉。	1、容易受到外界的因素影響。 2、藻類生長細胞密度較低(產率低)。 3、易受到其它藻種汙染。 4、水蒸發量大。 5、二氧化碳損失率受培養系統深淺影響。 6、不是所有藻類都可以開放培養。
封閉式養殖	1、在戶內戶外都可以實施。 2、物種不易受到汙染。 3、微生物培養之細胞濃度較高(產率較高)。 4、品質穩定。 5、後製過程分離純化的成本較少。	1、整體成本高。 2、耗用能源。 3、規模上不易增加。

(資料來源：賈有元，2004；經本研究整理)

3.1.2 綠藻在能源與環境的應用

(一)綠藻生質能

生質能是由生質物轉換而成，主要分為生質柴油、生質酒精等。早期以玉米、大豆等農作物作為原料，但其栽種需要大量的土地面積，且長久下來會影響農作物糧食的供應量，後來的生質能發展趨勢就偏向於產量與生產速率快的生物質如綠藻。綠藻作為生質能優勢，主要為綠藻的生物質量經過乾燥之後，可以像木材燃燒產生能量，並且比木材燃燒的產能更高(陳芃，2010)。綠藻轉換為生質能，經過萃取藻體的油脂經轉酯化反應後，

就可製成生質柴油，在相同的栽培面積，養殖藻類提供的生質能可比黃豆產製的生質能來的多(闕壯群，2009)，以綠藻產製的可行性很高，主要的原因在於綠藻的生長速率很快，理論質上來說經過 24 小時的培養後，生物量會多出一倍，若培養週期在生長對數期，培養時間更可縮短至 3.5 小時，便可有等倍的生物量。系統利用營養鹽的部份，成本通常不高，若以每年培養 100 噸綠藻(乾)的規模，每噸乾藻所需營養鹽成本約為 3000 美元。從發電廠可取得成本低廉的 CO₂。當綠藻培養至一定濃度後進行收集，經過收集的培養液仍殘留營養鹽，可回收供綠藻再利用，萃取剩下的藻渣，可回收製成動物飼料或其他高價值綠藻商品的來源，其獲取的利潤可以支付生質柴油生產成本(范繼中，2009)。

綠藻製油並不是一個新的構想，在 19 世紀美國就已經有對藻類能源的研究，研究以化石燃料產生的廢氣生產高含脂微藻，雖然這一計劃後來因為研究經費減少、藻類製油成本過高，於 1996 年計劃中止(林哲毅，2008)。但是，在將近二十年的研究計畫中，已篩選出 300 餘種具有發展生質柴油潛力之藻種，發展出許多操控藻類成長的因素及其生長系統工程技術；1984 年 Hill 和 Feinberg 曾提到利用藻類生產油脂產量預估可達 72,000 公升/公頃-年，其潛力更可達 130,000 公升/公頃-年(Hill et.al.,1984)，亦即藻類的油脂生產速度比陸生植物快 45~220 倍。再者藻類在不同的生長條件下，藻體細胞的脂質含量會有差異。影響藻類脂質含量的因素，包括物理因子與化學因子。在化學因子方面，主要是營養鹽，改變營養鹽的成分可能會影響藻細胞的脂質含量，研究結果指出(*Chlorella* sp.)細胞處在低氮營養的環境下，其脂質含量比控制組的高。而(*Stephanodiscus minutulus*) 在矽、磷等營養鹽的供給受到限制時，脂質含量會高於未受限制的培養藻細胞時所需的二氧化碳濃度，也會改變細胞的脂質含量。在物理因子方面，澳大利亞科學家曾探討包括角毛藻、紅色隱藻、隱藻及(*Prymnesiophyte*)等 4 種藻屬，在不同培養溫度下的生長變化差異。研究結果顯示不同的藻種，最大脂質含量的最適溫度也不盡相同，除了溫度以外，光照強度也會影響藻細胞的脂質含量，西班牙的科學家研究光照強度對海洋擬綠球藻生長狀況

的影響，發現細胞的增殖率隨著光照強度的增加而增大，細胞脂質的含量卻降低。雖然如此，科學家仍然認為以脂質的單位產率而言，光照強度仍對細胞總脂質產量有正面的幫助(陳振正等人，2009)；Yamaberi 等人在 1998 年指出海洋綠藻中的 *Nannichloris* 屬，其藻體中含有大量的胞內脂質 (intracellular lipids)，在氮源受限制的條件下，以 CO₂ 為氮源，藻體內脂質含量會增加。以氮受限的培養基培養的藻體所含的脂質較不受限的培養基高，Takagi 等人在 2006 年利用相同的藻種，在不同鹽度(NaCl)與氮限制的環境中以 CO₂ 曝氣培養，探討脂質於藻體中所佔的比例，發現培養基 NaCl 濃度為 0.5M 與 1M 時，分別對數生長時期中間及結束時，藻密度皆約 1g/L，脂質含量均可達 70%；由 DSouza 等人在 2000 年的研究指出，在氮源限制下會造成碳水化合物的累積，綠藻 *Tetraselmis suecica* 以 CO₂ 氣體培養，在氮受控制的條件下，藻體內的脂質含量反而降低，而變成碳水化合物的累積。

目前以綠藻為主的第三代生質燃料廣受世界矚目，西元 2006 年 11 月，美國綠色能源科技公司和亞利桑那公眾服務公司在亞利桑那州建立了可與 1040 兆瓦電廠煙道氣相連接的商業化系統，利用煙道氣的二氧化碳，大規模光合成培養微藻，並將微藻轉化為生質能，其產率可達到每年每英畝提供 5000 至 10000 加侖生物柴油和相當量生物乙醇的水平((Hudong 互動百科)；此外，2007 年美國現有 115 家生質柴油工廠，產能為每年 865 百萬加侖；在未來三年內，美國生質柴油產能將超過 20 億加侖/年，由美國能源部聖地亞國家實驗室與美國國內十幾家實驗室聯盟，宣布了由國家能源局支持的“微型曼哈頓計劃”，計劃在 2010 年實現綠藻製備生物柴油的工業化。(Hudong 互動百科)；全球石油巨擘 Exxon Mobil 則在 2009 年積極投入發展藻類生質燃料發展，許多外國的生質能源公司，都以可快速生長的藻類所產的藻油或藻類多醣，做為生質柴油、生質乙醇等的發展選項(潘崇良，2010)，而在台灣工研院及成功大學，皆已著手進行相關高油脂綠藻類之開發研究(林哲毅，2008)。

這種生物能源的熱潮，來自於因應溫室效應氣體排放減量的國際公約

以及對原油價格的高漲和逐漸匱乏的憂慮(劉文宗, 2011), 全球能源供應量中石化燃料占了 85%以上, 而科學家指出, 全球石油的蘊藏量只剩下大約四十年左右蘊藏量不多, 而台灣更是缺乏能源自主性, 根據能源局資料在 99 年進口能源依存度高達 99.30%; 能源進口總值高達 453.36 億美元, 平均每人負擔進口值達 69,317 元(經濟部能源局, 2010), 對進口石油的依賴程度更接近 100%, 但在發展綠藻產業上由於台灣是海島型國家, 擁有了特殊的優渥地理條件, 綠藻可以在海水培養, 由於每公頃海洋面積每年可產 750 噸(乾重 50 噸)的綠藻, 每公噸乾燥綠藻可產生 320 公升乙醇, 因此每年每公頃海洋面積可生產 16,000 公升生質乙醇(潘崇良, 2010), 利用海洋培養綠藻的優點, 還能夠減少土地的利用和耗用水資源的優點, 再利用環境控制下, 提升藻類油脂及碳水化合物含量, 進而生產生質柴油同時進行藻類固碳作用, 因此, 近年來已朝向相較之下比較不爭地、且不影響糧食的供應的綠藻作為替代能源未來解決方案(陳幸慧, 2009), 在自產能源不足的情況下, 若低成本處理萃取藻油的技術能有所突破(陳芄, 2010), 及藻類製油的成本上能控制到理想範圍, 將能提高藻類製油是否能成為台灣自主能源發展及全球普遍化的發展關鍵。

(二)綠藻產氫

氫氣為一種乾淨的能源, 氫氣的熱值很高, 燃燒時可產生較高密度的能量及水, 不會產生溫室氣體, 是一種潔淨的能源。如果能發展具有一定技術性產氫技術, 將可解決部分石油燃料將匱乏的問題, 近年來世界各國皆積極的發展產氫的技術(張嘉修, 2009)。

綠藻於產製氫氣方面, 在1942年, 芝加哥大學的科學家Hans Gaffron 與 Jack Rubin 觀察到在缺氧狀態, 同時沒有二氧化碳存在下, 綠藻可產生氫氣。在往後60年的時間, 許多人努力想開發此途徑做為氫氣的來源, 一直沒有突破。直到1999年, 由UC Berkely的Melis 教授和美國國家再生能源實驗室(NREL)的Seibert等研究員發表他們從1997 年開始進行的系列實驗室結果, 才又大幅提昇人們對這方面研究的熱衷(王鈞鎔等人)。

化石能源的匱乏對世界永續發展十分不利, 因此能尋找替代化石能源

之新能源，為各國極需努力發展的方向，雖氫氣為一種潔淨能源，然而目前在經濟考量下，仍然需要依賴化石能源轉換為清潔無污染的氫能源，未來如果能從再生資源或廢棄資源方面透過技術轉化取得氫氣，將是發展氫能與氫能經濟需要的突破瓶頸。

(三)綠藻固碳技術

綠藻在固定二氧化碳方面，在近十年來的研究甚多，在 1990 年日本國內的地球環境產業技術研究機構(Research Institute of Innovative Technology for the Earth, RITE)就開始著手利用綠藻來進行 CO₂ 固定的研究，目的是在大自然中篩選有高效率光合作用的綠藻微生物，並進而增進 CO₂ 的固定能力與生產藻體之生物質；日本東京電力公司在今日經濟(1995)中指出，微細藻類、藍藻具有四倍於熱帶雨林對 CO₂ 的吸收及固碳能力，其研究單位海洋生物研究所，在藻類的尋找與篩選上已有不錯的成果，發現 *Chlorococcum littorale* 可以在 40 % 以上的 CO₂ 濃度下成長(Kodama et. al., 1993)，而 *Cyanidium caldarium*、*Galdieria partita* 和 *Cyanidioschyzon merolae* 甚至可以在 100 % CO₂ 的情況下成長 (Kurano et.al., 1995)，對於二氧化碳利用將具有很大的發展潛力。

綠藻節省能源與固碳方式，一般在光合作用所必須使用的二氧化碳可以利用燃燒化石燃料的煙道(周明顯，2009)，在製程中的水資源再利用，Oswald 和 Golueke 在 1960 年首先提出的以廢水來培養藻類，同時製造氧氣以供廢水淨化處理的概念，同時也解決了藻類在培養過程耗費水資源的問題，進一步將藻類以厭氧發酵程序轉化為甲烷以供發電的使用；此外，法國在 1967 年他們的石油研究所和墨西哥的廠商合作，研究利用製造小蘇打後的廢水生產螺旋藻的可行性，研究證明這種半天然的螺旋藻工業化生產方式是可行的，於是在 1973 年螺旋藻生產工廠正式建成投產，年產量達 150

公噸，成為當時世界最大的螺旋藻企業(Oswald et al., 1960)。

綠藻固碳的方法可以透過各種藻類養殖技術的開發，並控制各種培養方式及操作條件，希望使其固碳效率提高；Chlorella sp.T-1 此藻種可以忍受煙道氣中會抑制生物微藻生長的 SO_x、NO_x 等有害物質；另外，國外已有利用燃煤電廠排放之二氧化碳養殖綠藻的研究(陳芃，2010)。

台灣南部某一燃煤發電廠(Coal-fired plant)之煙道氣(Flue gas)通入戶外開放式水道(Outdoor open raceway pond)為例，在變化煙道氣中二氧化碳(Carbon dioxide, CO₂)濃度與水道水流速度下，探討螺旋藻(*Spirulina maxima*)增殖(Growth)及 CO₂ 固定效能，研究結果約年固碳量則為 51.53ton CO₂ ha⁻¹ y⁻¹(賴文亮等人，2009)。

工業發展之後，溫室氣體所造成氣候變遷及化石能源的匱乏，是當前所要面臨的問題。綠藻可利用工業排放的二氧化碳做為生長碳源，利用工業廢水培養綠藻，達到固碳、減碳的目的並可利用藻體做為能源，因此，目前各國將綠藻固定二氧化碳作為減緩溫室氣體的方式之一。

表 3.3 綠藻固碳文獻回顧

作者	內容	年份
Allen	從 Lemonade Spring 及 Yellowstone National Park 分離出耐高酸藻種 <i>Cyanidium</i> sp.，因其生存於酸性溫泉，故對高溫和酸度都有很高的忍受力。	1959
Oswald et al.	利用廢水培養藻類，同時製造氧氣以供廢水之氣化處理的概念。	1960
Kurano et.al.	發現 <i>Chlorococcum littorale</i> 可以在 40 % 以上的 CO ₂ 濃度下成長，而 <i>Cyanidium caldarium</i> 、 <i>Galdieria partita</i> 和 <i>Cyanidioschyzon merolae</i> 甚至可以在 100 % CO ₂ 的情況下成長，十分具有固碳效益。	1995
Maeda	成功篩選出耐高溫和 high 濃度二氧化碳的藻	1995

	類 <i>Chlorella</i> sp.T-1, <i>Chlorella</i> sp.T-1 能在 35°C 和 15% 二氧化碳濃度下生長，並將 <i>Chlorella</i> sp.T-1 此藻類用在處理燃煤火力發電廠的煙道氣， <i>Chlorella</i> sp.T-1 也可以忍受煙道氣中會抑制生物生長的 SO _x 、NO _x 等有害物質。	
Sakai	從日本溫泉中分離出一種單細胞綠藻，可以在 42°C、40% 濃度的二氧化碳環境下生長。	1995
Michiki	分別對 13 種藻類進行研究，其中 <i>Chlorella</i> sp.(UK001) 及 <i>Chlorella</i> sp.(A-2) 容忍溫度能高達 40°C 之溫度， <i>Chlorella</i> sp.(H-84) 與 <i>Synechococcus Lividus</i> 則可容忍高達 60% 濃度的二氧化碳。	1996
周明顯	在以二氧化碳培養綠藻產製生質柴油篇中，綠藻節省能源與固碳方式，一般在光合作用所必須使用的二氧化碳可以利用燃燒化石燃料的煙道。	2009

(資料來源：本研究整理，2012)

3.1.3 綠藻運用於糧食替代

綠藻的研究早在第一次世界大戰期間德國的糧食匱乏為憂，於是德國著名的哥丁根(Gottingen)大學，林度挪教授的研究為解決糧食危機，開始從事綠藻作為糧食之研究工作，不過德國戰敗，以致林度挪教授的研究，被迫停止。第二次世界大戰期間，該大學的哈托爾教授，又寄望於延至綠藻為大宗糧食，以供給德國需求。詎料當時英、美聯軍的飛機猛烈的轟炸，該大學受損至鉅，不得不再停止研究工作（沛德富希望國際有限公司）。

綠藻可提供某種程度的糧食替代方面，主要是因為藻類成分的含量比例，蛋白質 60%、碳水化合物 15%、油脂 8%、水 5%、纖維 5% 及熱量 360 ~ 400 (Kcal/100g) 和礦物質等(黃悌儀，2000；潘崇良，2010；闕壯群)。綠藻不僅含有蛋白質比例高的優勢條件，再加上綠藻生長得快速，使得綠藻被認為是未來糧食危機的解決方法選項之一。

藻類被用來做為開發食品的研究已經很長一段時間，然而，真正人類商業化培養藻類技術的發展，是近幾十年才開始發展，藻類由於含高成分之蛋白質，並具有完整食物中胺基酸組成，這些綠藻的胺基酸成分能提供所有動物，也包含人類，足夠的必需胺基酸。綠藻的醣類組成多元，而且豐富，占總細胞乾重的 12~57%（行政院國家科學委員會）。這些醣類包含澱粉、葡萄糖、蔗糖等，藻類脂質含量占總細胞乾重的 8%，主要包含甘油及醣類脂化的飽和與不飽和脂肪酸，可以見得綠藻具備所有的營養素可供工作為食物。

在國內外，綠藻以不同的形式商品化，把綠藻添加入休閒食品中，像是餅乾、糖果等。屬於綠藻的小球藻是最早培養的綠藻，具有可以使免疫系統正常化、促進免疫力，抗氧化成分，可以延緩衰老、有效降低血液中的膽固醇含量和高血壓。它還富含核酸，可加速修復細胞組織，幫助細胞再生，排除體內積聚的重金屬、有害農藥及環境污染物，抗腫瘤等。綠藻也可做為太空食品（行政院國家科學委員會）。

3.1.4 綠藻在產業運用

目前國際藻類能源相關的產業依其成立的性質，大致可分成四類，第一類:因應減碳或再生能源開發目標而成立的新興公司，例如美國 GreenFuel Technologies 公司。第二類:公司本來營運為能源相關事業，例如石化、天然氣及生質能源（特別是生質柴油）相關產業。第三類:公司本來營運為藻類培養相關的事業，擁有大規模藻田，而所培養藻類的用途為生物餌料、營養補充劑或健康食品等，因應時勢轉為藻類生質能源的開發公司之發展目標。第四類:公司本來營運為農業、水資源、酵素等等相關產業，發現其關鍵技術可應用於藻類生質能源開發，因而擴展產業之應用範圍(林志生等人，2010)。這種生物能源的熱潮，來自於因應溫室效應之溫室氣體減排，若能以低成本處理萃取藻油的技術能有所突破(陳芄，2010)，及藻類製油的

經濟性和技術可行性上能控制到理想範圍，將是微藻產業發展的重大突破。

3.2 大豆介紹與應用

大豆，又稱為黃豆，(學名為 *Glycine max* L.Merrill) ，屬蝶形花科，短日照，為一年生草本植物。大豆對於生長環境的適應性很強，加上大豆本身的經濟性、營養價值與具有多種功能性如大豆蛋白之乳化性、保油性、保水性、膠著性、黏性及成膜性等，故自古以來大豆一直是東方人食物中重要的蛋白質和脂肪來源之一(林宜璇，2008)。大豆依種皮的顏色及食品或其他產業的應用而有不同的品種，其營養價值高加上取得容易，為日常食品中蛋白質的主要來源之一。

目前大豆製品原料仰賴主要由美國進口，約占全世界大豆產量的63%，成為全球大豆產量最高的國家，台灣亦有部分地區栽培大豆，國內栽培大豆的面積由台灣光復後 20,000 公頃開始逐年增加，至民國 50 年高達 60,000 公頃，在民國 73 年大豆種植面積在之後 10 年間維持在 3000 至 5000 公頃左右，政府以每公斤 25 元的價格收購，每公頃的收購量為 2,500 公斤。然而由於美國、阿根廷與巴西等地為大豆的生產大國，在其低價的經濟優勢衝擊下，國產大豆無競爭力，因而種植面積開始下降，民國 81 年大豆收穫面積首次降至 4,195 公頃，民國 87 年大豆收穫面積更降至 600 餘公頃，目前更明顯低至 100 餘公頃(林宜璇，2008)。

3.2.1 大豆栽培

大豆在種植栽培上，最適生長溫度以 25-30°C 為宜。大豆的春作耕種達收成日需 150-160 天，夏作栽培日約 125-135 天可以收成，冬作時間較短僅需 94-104 天便可收成。在品種上的選擇我國主要的栽培品種為高雄選 1 號、高雄 2 號及高雄 5 號(曾富生等人，1996)。在栽培上的肥料量使用，每公頃播種量約為 40~90 公斤，適度施用肥料，有助於其生育及提高產量；在肥

料的使用上每公頃化學肥料(N-P₂O₅-K₂O)施用量為(20~40-40~90-30~75)公斤。收穫時期可利用豆類聯合收穫機採收，乾燥以利用日光曝曬或種子乾燥機乾燥風乾，而台灣過去則以利用日光曝曬為主，適宜貯藏種子含水率以9~11%左右最為理想。貯藏將種子曬乾且冷涼後，置於乾燥陰涼處或低溫處5~10°C貯存為宜(曾富生等人，1996)。

3.2.2 大豆運用於健康食品

大豆的營養價值高，可以提供良好的蛋白質和熱量，一般來說大豆的固形物中含有約35~40%的蛋白質，20%的脂質(行政院衛生署，2003)以及34%的碳水化合物(Fukushima,1991；謝孟荔，2004)，在用途上極為廣泛，台灣飲食習慣也以大豆作為日用主要食物之一，以補充植物性蛋白質，大豆除了作為油料、副食和糧食直接食用外，經由加工過程，還可分為傳統的大豆加工食品、大豆油和大豆蛋白等三大類產品，大豆加工食品包含非發酵製品像豆腐、豆干、油豆腐、豆芽、豆奶、醬油、豆鼓等；發酵製品如味噌、醬油、納豆、豆腐乳等均以大豆為原料(莊子毅，2009)。大豆蛋白是製作素食食品、調味料和飼料的來源。大豆油除了做為食用油脂，其所含的營養成分還具有許多生理機能，具有健康促進的功效，可開發附加價值甚高的副產品，如大豆卵磷脂、大豆異黃酮素、維他命E、礦物質等供為食品或醫藥品等健康物質，其中鐵質不但比穀類或其他豆類多，且容易為動物所吸收(Liu,1999；關羽峻，2009)。大豆比其他任何傳統的農作物，營養價值高，大豆的營養功能方面，含飽和脂肪酸且不含膽固醇且幾乎不含澱粉，亦不含乳糖，可適合乳糖不耐症之患者食用；大豆蛋白質具降低膽固醇及減少心血管疾病的功效極高；大豆中所富含的異黃酮，具有許多生理活性，如抗發炎、抗腫瘤等(Wang et al.,1997；Davis et al., 1998)。根據流行病學調查結果顯示，亞洲地區之心血管疾病罹患率較低，推測可能是亞洲地區的飲食習慣，攝取較多大豆食品有所關聯(Roberts,1995)，古代中國藥草家也提及大豆具有一些藥效，如腎疾病、皮膚病、腳氣病、腹瀉、血毒病、便秘及貧血症等療效(戴蔭方等人，1995)。此外，在動物實驗與人體試驗中

(Nagata et al.,1981 ; Carroll and Kurowska,1995)也證實大豆中的蛋白質可以降低血膽固醇濃度，並且可以有效的預防心血疾病發生。美國食品與藥物管理行政局(Food and Drug Administration, FDA)也在 1999 年許可於大豆加工食品上標示「每天攝取 25 公克大豆蛋白、低飽和油脂和膽固醇，有助於預防心血管疾病的發生」(FDA,1999)；此外，與大豆相近的毛豆，根據日本五明紀春教授研究指出，毛豆蛋白質分解所產生之胜(peptides)具有降血壓及鎮痛、神經興奮抑制、催眠等作用；而皂素(saponin)則具有降低血液中脂肪而防止血栓之作用；並含豐富之異黃酮成分(王玉芬，2008)。因此，常食用毛豆與大豆對身體保健是有很大的助益的(曾富生等人，1996)，顯然大豆為重要的糧食作物之一，且大豆已成為健康的重要食品。如：美國已正式核准豆漿製品上可標示降低膽固醇的訴求；歐盟將大豆蛋白確認為無膽固醇、低熱量、高蛋白、安全營養食品。因此，從糧食角度，大豆是我們生活相當重要的營養來源。

3.2.3 大豆運用於替代能源

大豆在工業的應用上也可生產肥皂、甘油、硬化油等重要原料，在急於開發能源的時代中，大豆也能萃取油脂轉化變為柴油提供新的能源，但應考慮到與民爭食、爭地的情況下，目前以大豆製程生質柴油已逐漸被綠藻等較不為與民爭地的替代能源取代。

四、研究方法

4.1 生命週期評估

本研究的應用方法主要為生命週期評估法，而生命週期評估方法乃源自國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)ISO14040 及 ISO14044 (2006)，以作為產品環境改善之評估工具，主要內容包括：(1) 生命週期原理及架構(principles and framework)，(2)生命週期目的訂定 (goal and scope)、系統範疇界定(boundary definition)及生命週期盤查分析(life

cycle inventory)，(3)生命週期評估：包括資料歸類(classification)、特徵化(characterization)、標準化(normalization)及權重(weighting)等不同階段環境衝擊分析及(4)生命週期評估闡釋 (life cycle interpretation)。

生命週期之溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 推估原理，採用生命週期系統範疇，包括個案原料階段、製造階段、使用階段及棄置階段之溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 排放量推估，即所謂碳足跡(Carbon Footprint, CF)。其推估方法採用 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)方法推估溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG)，以 100 年風險係數，估計溫室效應潛勢(Global warming potential, GWP)，其特徵化係數根據 IPCC2007 公告係數。其特徵化係數分別為，Carbon dioxide (CO₂=1)、Methane (CH₄=25)、Nitrous oxide (N₂O=298)。溫室效應潛勢之計算為個別排放係數 (*mi*) 與溫室效應潛勢特徵化係數(*GWPI*)之乘積總和，而主要溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) *GWP* 計算公式如下：

$$GWP = \sum_i (mi \times GWPI)$$

4.2 個案系統範疇界定

在正式進入資料盤查作業流程前，首先需界定出研究個案之系統範疇後，並選定個案評估之功能單位。為了要完整評估及比較大豆與綠藻產品之生命週期，本研究需盤查大豆及綠藻產品生命週期從搖籃到大門資料，其中綠藻的系統範疇，只包含種植階段，無運輸階段，因為根據 2011 年經濟部工業局資料統計，綠藻(*Chlorella*)在台灣是世界排名生產率第一產品，佔了世界總生產率的 51%，以致在綠藻(*Chlorella*)的運輸階段以在台灣國內生產並無海上運輸得過程，而在台灣國內的公路運輸，因複雜度太多資料取得困難，且相對於海上運輸來講陸上運輸是微不足道的，因此在本研究

不納入計算，而綠藻的生產階段包含能源使用等以(IDEMAT2001、simapor 7-ETH-ESU96、IFA 2010 greenhouse_gas Holba (2009) reports 資料庫之研究數據進行評估計算；大豆的系統範疇則包含了製造階段與運輸階段，根據行政院農糧署資料統計，台灣國內 99 年大豆生產量只有 204 公噸，在自產率低的情況下予以將運輸階段列入計算，大豆生產所需原油從國外經由船運輸入，肥料使用計算依據財務局 99 年度統計資料，採進口比例高的國家，包含巴西(35%)、阿根廷(5%)、美國(60%)及台灣(0.008%)國內肥料各國在施用肥料上的資料數據，在加總各國平均計算肥料使用量，後續流程包括農業機械、水資源耗用能源皆在國內進行。；此外，為了能有效盤查及個案比較，本研究設定功能單位，將以蛋白質觀點為功能單位，以一公噸蛋白質產出為功能單位，建立兩種產品之生命週期評估系統範疇。

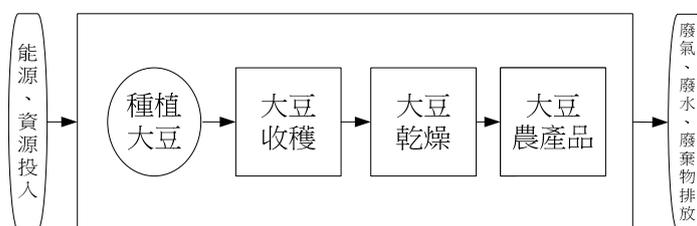


圖 4.1 大豆農產品製造流程

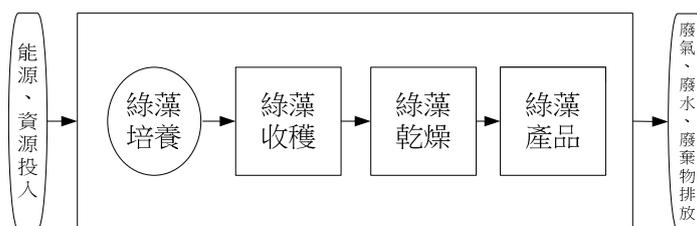


圖 4.2 綠藻農產品製造流程

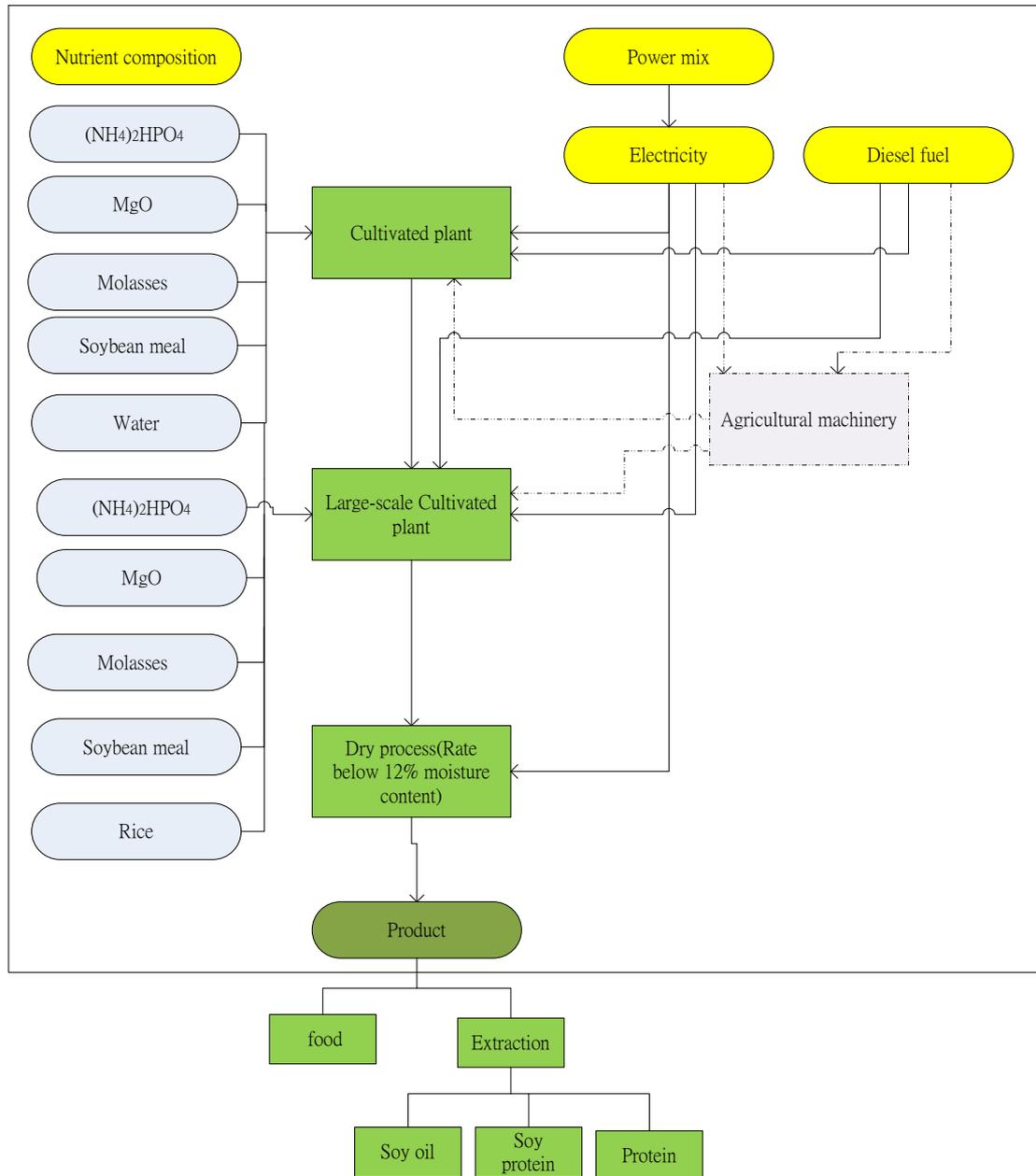


圖 4.3 綠藻個案供應鏈系統範疇

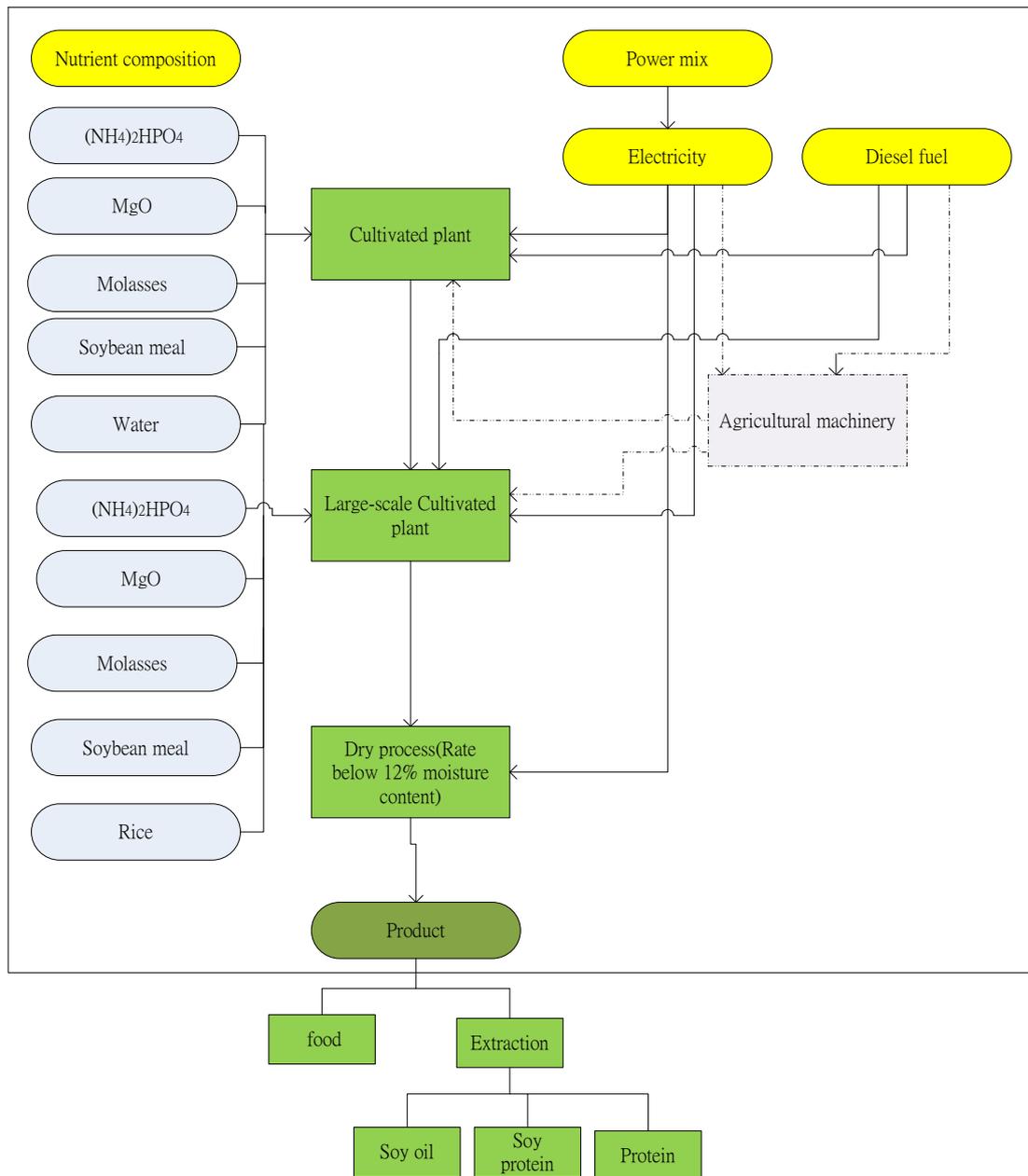


圖 4.4 個案供應鏈系統範疇（大豆）

4.3 生命週期盤查與資料處理

當個案完成系統範疇界定後，下一個作業是系統範疇盤查，而本研究盤查方向為大豆與綠藻產品之投入與產出數據，即盤查以每公噸蛋白質大豆

與綠藻作為單位的生命週期階段之能源、資源耗用及污染排放，生命週期盤查範疇如表 4.1、4.2 所示，內容詳細說明於下面段落。

表 4.1 生命週期評估個案盤查範疇

製品	項目	階段	內容
大豆	I	運輸	依據長榮海運得知運輸距離，再引用生命週期評估軟體 Simpro7.0，計算油輪航行過程耗用燃料油並排放污染。
		原料	原料取得過程包含下面三個程序。
	1.	水資源	水資源處理過程會排放二氧化碳。
		肥料	肥料製造過程會耗用電力並排放溫室氣體（Greenhouse Gas, GHG）。
3.	農業機械	農業機械使用過程會耗用柴油及電力並排放污染。	
綠藻	I	運輸	在此盤查清單範疇中綠藻是以台灣國內做養殖，因此在本研究不納入計算。
		原料	原料取得過程包含以下三個程序。
	1.	水資源	水資源處理過程會排放二氧化碳。
		營養鹽	肥料製造過程會耗用電力並排放溫室氣體（Greenhouse Gas, GHG）。
	3.	農業機械	農業機械使用過程會耗用柴油及電力並排放污染。

(資料來源：本研究整理，2012)

一、原料階段

在綠藻方面，本研究將綠藻設定在台灣生產，因為根據 2011 年經濟部工業局資料統計，綠藻在台灣生產率佔了世界總生產率的 51%，以致在綠藻的原料階段包括營養鹽、農業機械、水資源能源數據，應該參考台灣的盤查資料庫；在大豆方面，依據行政院農糧署數據統計，台灣大豆自產率不足，在自產率低的情況下，肥料使用計算依據財務局 99 年度統計資料，

採進口比例高的國家，包含巴西(35%)、阿根廷(5%)、美國(60%)及台灣(0.008%)國內肥料各國在施用肥料上的資料數據，在加總各國平均計算肥料使用量，在水資源與農業機械使用方面因文獻不易取得，而普遍大豆用水量及農業機械使用能源差異不大，因此引用台灣資料庫作為評估計算。

二、 乾燥製程階段

在綠藻方面，本研究將綠藻設定在台灣種植培養，但因國內資料庫數據難以取得，故引用國外資料庫做盤查計算，大豆在乾燥製程階段因國外資料庫取得困難，而普遍各國大豆農業機械使用能源差異甚小，因此引用台灣行政院農糧署之資料庫作為盤查計算。

三、 運輸階段

大豆運輸方面，包括航運類型及航行距離資料，航運類型方面，引用自生命週期評估軟體 Simapro7.0，1995~1999 年建置完成的 IDEMAT 2001 歐洲盤查資料庫，此資料庫內容為承載 1kg 貨物並航行 1km 之投入與產出數據(如表 4.2 示)，而本研究的單位計算是以一公噸大豆中所含的蛋白質(35%)作為單位，需再利用 IDEMAT 2001 歐洲盤查資料庫，再換算為一公噸大豆中所含之蛋白質(35%)。航行距離方面，是利用經濟部能源局(2010)原油進口國與比例，運輸距離引用長榮海運(2011)資料庫，盤查大豆進口國家原油輸出港口至我國高雄港口之距離後(如表 4.3 示)，再輸入各國原油進口重量比例，最後計算出輪船經加權後之平均航行距離(km)，再根據平均航行距離乘以 IDEMAT 2001 資料庫之投入與產出資料，相乘所得到的數值即為大豆運輸階段所採用。

而在台灣國內，因為公路運輸過於複雜資料庫取得不易，目前無法精細計算出，且相對於海上運輸來講是微不足道的，所以在本研究國內運輸不納入計算。

表 4.2 大豆之蛋白質 運輸盤查清單

Category	Unit	Amount
Input		
Heavy Fuel Oil	kg	7.35E-06
Diesel	kg	6.30E-07
Output		
CO ₂	kg	2.33E-05
SO ₂	kg	3.70E-07
SO _x	kg	1.13E-09
NO _x	kg	4.42E-07
VOC	kg	1.29E-09
COD	kg	6.30E-12
Oil waste	kg	1.03E-07

(資料來源：IDEMAT, 2001；經本研究整理)

表 4.3 大豆各進口國家港口對港口之距離

進口 國家	進口 比例	進貨 港口	卸貨 港口	港口距離 (nmi)	平均距離 (km)
美國	60.46%	Dammam	Kaohsiung, TW	5,367	1,4512
巴西	34.52%	Rio De Jan Eiro	Kaohsiung, TW	10,260	
阿根廷	4.78%	Rosario	Kaohsiung, TW	10,591	
加拿大	0.16%	Vancouver	Kaohsiung, TW	5,545	
中國大陸	0.02%	Fuzhou	Kaohsiung, TW	240	
印度	0.02%	Chennai	Kaohsiung, TW	3,239	
澳大利亞	0.04%	Fremantle	Kaohsiung, TW	3,387	
台灣	0.008%			-	
其他	0.002%			-	

(資料來源：經濟部能源局，2010；長榮海運，2011；經本研究整理)

4.4 碳足跡分析

本章小節將探討二大部分，第一部分為綠藻產品於製造階段，其溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 排放變化情形，本研究以綠藻一公噸中含蛋白質做為功能單位，盤查個案產品生命週期製造階段溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 以分析碳足跡，綠藻產品盤查階段包括種植階段及乾燥製程階

段，盤查數據主要來自 SimaPro 軟體、台北翡翠水庫水足跡資料庫、IDEMAT, 投入產出資料庫、IPCC, 2006。

大豆產品包括種植階段、乾燥製程階段及海上運輸階段，個案產品溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 盤查數據主要來自 SimaPro 軟體、台北翡翠水庫水足跡資料庫、IDEMAT, 投入產出資料庫、IPCC, 2006、行政院農糧署。

五、結果與討論

5.1 盤查結果說明

本研究為了比較蛋白質規模探討大豆與綠藻之碳足跡，因此將大豆及綠藻產品同樣列為評估個案，評估過程引用 SimaPro7.0 軟體之 FOOD DK 資料庫、IPCC 等資料庫及相關模擬與盤查資料，計算個案所產生的碳足跡，將評估結果互相比較以評價出各別產品之碳足跡，進一步探討產品之碳足跡結果差異。

5.2 綠藻盤查與結果分析

綠藻產品盤查階段包括原料階段，大豆產品包括原料、製造及海上運輸階段。個案產品 GHG 盤查數據主要來自 SimaPro 軟體之 FOOD DK 資料庫、IDEMAT，投入產出資料庫以及 IPCC, 2006。將產品生命週期之 GHG 數值，經 IPCC(2007)之 GWP 係數轉換之後，結果由表 4.3 所示，綠藻個案生命週期碳足跡較高(如表 4.3 所示)，綠藻個案蛋白質之溫室氣體潛勢在種植階段為 1.753 TonCO₂-eq.；收穫乾燥階段之溫室氣體排放為 0.11 TonCO₂-eq.；海上運輸階段之溫室氣體排放則為 1.54 TonCO₂-eq.

表 4.3 個案蛋白質之溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 潛勢

LCA Stage	Unit	Chlorella	Soybean
Planting stage	TonCO ₂ -eq.	1.753	0.212
Harvested dry	TonCO ₂ -eq.	2.948	0.110
Transport	TonCO ₂ -eq.	-	1.540
LCA	TonCO ₂ -eq.	4.701	1.860
Protein LCA	TonCO ₂ -eq.	7.835	5.310

(資料來源：本研究室整理，2012)

5.3 大豆盤查與結果分析

大豆之搖籃到大門之碳足跡，種植階段與收穫乾燥階段分別為 0.212 TonCO₂-eq.與 0.110 TonCO₂-eq.，運輸階段為 1.540 TonCO₂-eq.，整體生命週期為 1.86 TonCO₂-eq.。若以蛋白質為功能單位，其溫室氣體潛勢之差異，大豆之碳足跡為 5.310 TonCO₂-eq.明顯較綠藻之碳足跡低。主要大豆透過大面積種植，因此相關投入控制已趨於最佳狀態，至於綠藻其產能方面仍然較低，相關技術仍在發展中。

5.4 綠藻與大豆之碳足跡比較

從搖籃到大門之碳足跡比較，結果顯示 (表 4.3)，個案若以重量進行碳足跡比較，其中綠藻與大豆分別為 4.701 TonCO₂-eq.及 1.860 TonCO₂-eq.，結果顯示綠藻之碳足跡約為大豆之 2.5 倍。進一步探討蛋白質為功能單位，個案大豆蛋白質產品之碳足跡低於綠藻，其中以運輸階段較高為 1.753 TonCO₂-eq.，整體來說以同樣生產 1 公噸蛋白質而言，大豆是較具環境友善性的。

5.5 綜和討論

影響大豆與綠藻蛋白質之碳足跡差異主要有以下幾點：

- 1.在種植階段大豆使用的農機械投入能源，主要來自於柴油，而綠藻使用的農機械投入的能源則主要來自於電力。
- 2.在乾燥階段大豆使用的農機械投入能源，主要來自於柴油；綠藻使用的農機械投入的能源則主要來自於電力。
- 3.在運輸階段則因為台灣國內大豆自產率不足，而須計算到海上運輸階段投入能源，所排釋出的溫室氣體，而綠藻則因為在台灣佔了世界總生產率的 51%，所以在此盤查清單範疇中以國內養殖做為模擬情境，並無海上運輸階段，以至於大豆在運輸階段佔了個案生命週期排碳量最高之階段。

六、結論與建議

本文旨在以蛋白質規模探討大豆與綠藻之碳足跡研究，以綠藻及大豆產品作為比較，其具體結論與建議如下：

1. 整體綠藻與大豆之碳足跡比較，以綠藻較大豆為高，其值為 7.835 TonCO₂-eq.
2. 本研究礙於大豆相關之 LCA 之國外文獻較少，盤查清單取得限制，對於現況國內盤查及複雜的國際供應鏈盤查，將是一項高難度的工作，這將影響到環境盤查資料取得及資料的穩定度，對於未來生命週期評估將是重要關鍵，資料的完整性與資料品質問題，將直接影響到整個研究的成果與價值，未來若能朝此方向進一步努力將可使此研究成果更為完整。
3. 目前大豆透過大面積種植，相關投入控制已趨於最佳狀態，至於綠

藻其產能方面仍然較低，相關技術仍在發展中，未來若在相關技術進一步提升，則綠藻應用於蛋白質之價值將可以進一步提升。

參考文獻

1. Allen, M.B.,(1959), Studies with *Cyanidium caldarium*, an anomalously pigmented chlorophyte, *Journal of Archly Mikrobiologie*, 32, 270~277.
2. Apline(2011)，螺旋藻綠藻小球藻，<http://knol.google.com/k/螺旋藻綠藻小球藻#>。
3. Appenzeller,T., National geographic 中文版, 2004, February.
4. Carroll K.K. and Kurowska E.M.,(1995)Soy consumption and cholesterol reduction,1995,Review of animal and human studies. *J Nutr*,125:594s~597s.
5. D'Souza, F.M.L., and Kelly, G.J.,(2000) Effects of a diet of a nitrogen-limited alga(*Tetraselmis suecica*)on growth, survival, *Journal of Aquaculture*, 181, 311~329.
6. Davis J.N., Singb B., Bhuiyan M. and Sarkar F.H.,(1998)Genistein-induced upregulation of p21WAF1, downregulation of cycline B,and induction of apoptosis in prostate cancer cells, *Nutr Cancer*, 32:123~131.
7. Food and Drug Administration,(1999) Food labeling,health claims,soy protein,and coronary heart disease, *Fed Reg*, 57:699~733.
8. Fukushima D.,(1991) Recent progress of soybean protein food:foods, chemistry,technology and nutrition., *Food Rev. Int.*, 7:323~351.
9. Hill, A.M., Feinberg, D.A.,(1984) Fuel products from Microalage, Report No. SETI/TP-21-2348; National Renewable Energy Laboratory; Golden. CO.
10. Hirata S., Hayashitani M., Taya M.,TONE S., (1996)Carbon Dioxide

- Fixation in Batch Culture of *Chlorella* sp. Using a Photobioreactor with a Sunlight-Collection Device, 1996, *Journal of fermentation and bioengineering*, vol.81, No.5., 1~6.
11. Kodama, M., Ikemoto, H., and Miyachi, S., (1993), A new species of highly CO₂-tolerant fast-growing marine microalga suitable for high-density culture, *J. Mar. Biotechnol.*, 1~25.
 12. Kurano, N., Ikemoto, H., Miyashita, H., Hasegawa, T., Hata, H., and Miyachi, S., (1995), "Fixation and Utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis", *Energy Convers. Mgmt*, 36, 689~692.
 13. Liu, K.S., (1999) "Soybeans", 1999, Aspen publishers.
 14. Maeda, K., Omata M. and Karube I., (1995) CO₂ Fixation from the Flue Gas on Coal-fired Thermal Power Plant by Microalgae, *Journal of Energy Conversion and Management*, 36, 717~720.
 15. Michiki, H., (1996) Biological CO₂ fixation and utilization project., *Fuel and Energy Abstracts*, 37~216.
 16. Nagata C., Tanaka K. and Sugano M., (1981) Further Studies on the hypocholesterolemic effect of soybean protein in rats, *Br J Nutr.*, 45:233~241.
 17. Oswald, W.J., and Golueke C.G., (1960) Biological Transformation of Solar Energy., *Adv Appl Microbiol*, 2~262.
 18. Radmer, R. J., and Parker, B. C., (1994) Commercial Applications of Algae—Opportunities and Constraints, *Journal of Applied Phycology*, 6~98.
 19. Roberts W.C., (1995) Preventing and arresting coronary atherosclerosis., *Am heart J*, 130(3), 580~600.
 20. Sakai, N., Sakamoto Y., Kishimoto N., Chihara M. and Karube I., (1995) *Chlorella* Strains from Hot Springs Tolerant to High Temperature and High CO₂, *Journal of Energy Conversion and Management*, 36~696.

21. Schpeper, T., (1998) Bioprocess and Algae Reactor Technology, *Journal of Apoptosis*, 1~56.
22. Shiraiwa Y., (2003) Physiological regulation of carbon fixation in the photosynthesis and calcification of Coccolithophorids, *Bioresource Technology*, 1~6.
23. SimaPro 7.0, IDEMAT 2001(1990-1994).
24. Tapie, P., Bernard, A., (1987) Microalgae Production: Technical and Economic Evaluation, *Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 32, 873~855.
25. Ugwu H., Aoyagi H., Uchiyama H., Photobioreactors for mass cultivation of algae, 2008, *Bioresource Technology*, 1~8.
26. Wang W., Higuchi C.M. and Zhang R., (1997) Individual and combinatory effects of soy isoflavones on the in vitro potentiation of lymphocyte activation, *Nutr Cancer*, 29~34.
27. Watanabe Y., Saiki H., (1997) Development of a Photobioreactor incorporating *Chlorella* sp. for removal of CO₂ in stack gas, *Energy Convers. Mgml*, Vol.38., 499~503.
28. Widjaja A., Chien C., Ju Y., (2009) Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, *Bioresource Technology*, 165~328.
29. Xiong W., Gao C., Yan D., Wu C., Wu Q., (2010) Double CO₂ fixation in photosynthesis-fermentation model enhances algal lipid synthesis for biodiesel production, *Bioresource Technology*, 2287~2293.
30. Xu H., Miao X., Wu Q., (2008) High-density fermentation of microalga *Chlorella protothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production, *Biotechnological Products and Process Engineering*, 29~36.
31. Yamaberi, K., Takagi M. and Yoshida T., (1998) Nitrogen depletion for intracellular triacylglyceride accumulation to enhance liquefaction

- yield of marine microalgal cells into a fuel oil, *Journal of Marine Biotechnology*, 6, 44~48.
32. 王玉芬(2008)，超微細化研磨對國產大豆原料之機能性成分的影響，國立台灣大學生物資源暨農學院農業化學系碩士論文，p13。
 33. 王鈺鎔，許湘琴(2010)，綠藻產氫技術發展。
 34. 王槐榮(2006)，簡介日本林業在防止地球溫暖化所採對策，放眼天下雜誌-台灣林業，Vol.32, No.3, 1-2。
 35. 行政院國家科學委員會(2011)，微藻產業，
<http://web1.nsc.gov.tw/ctpd.aspx?xItem=8524&ctNode=76&mp=8>。
 36. 行政院農業委員會農糧署(2009)，農耕用機器設備及農地搬運車用油基準，
<http://www.afa.gov.tw/public/laws/2009115183685334.doc>。
 37. 行政院農糧署糧食儲運組(2011)，高雄港進口雜糧(大豆、玉米)大盤價格表，
http://www.afa.gov.tw/GrainStatistics_index.asp?CatID=139。
 38. 行政院衛生署(2003)，基本成分表，
<http://www.doh.gov.tw/FoodAnalysis/ingredients.htm>。
 39. 行政院環保署(2012)，CO₂台灣產品碳足跡資訊網，
<http://cfp.epa.gov.tw/>。
 40. 行政院環保署(2012)，含氟溫室氣體管制策略說明，
<http://cfp.epa.gov.tw/>。
 41. 吳明炘(2003)，半導體超純水製程之生命週期評估，中華大學科技管理碩士論文，22-36。
 42. 李育明、張毓盈(2002)，台灣地區電力供應之生命週期盤查分析，能源季刊，32卷，2期，29-44。
 43. 沈宜蓉(2010)，綠藻減碳 打造綠色世紀新紀元，YUAN Magazine 低碳生活專輯。
 44. 沈曉瑄(2009)，綠球藻(*Chlorella*)的發現，海洋科技大學養殖研究所，<http://ind.ntou.edu.tw/~b0232/chlorella.htm>。

45. 沛德富希望國際有限公司(2012)，認識綠藻，
<http://www.betterfull.com/chlorellinterduce.html>。
46. 周明顯(2009)，以二氧化碳培養綠藻產製生質柴油。
47. 季平(2010)，全球暖化天災頻傳糧食供給引憂慮，中央廣播電臺，
http://news.rti.org.tw/index_newsContent.aspx?nid=254073&id=2&id2=2。
48. 林志生，邱聖壹(2010)，光生物反應器於綠藻培養之研究與產業化的進展，農業生技產業季刊 動物與水產生技第 22 期，p45。
49. 林坤信(2009)，水道式養殖螺旋藻對煙氣中二氧化碳之利用與藻水中有機物成分之分析，碩士學位論文，大仁科技大學環境管理研究所，5。
50. 林宜璇(2008)，大豆之 isoflavone conjugates 及相關水解酵素之研究，國立台灣大學生物資源暨農學院農業化學系碩士論文，14。
51. 林俊成，李國忠(1999)，森林資源碳吸收效果與京都議定書，台大森林學研究所。
52. 林哲毅(2008)，以綠藻生產生質柴油之未來發展，
http://www.taiwan-biodiesel.com/ch/article_detail.php?AID=178。
53. 范繼中，林呈翰(2009)，利用綠藻產製生質柴油，行政院農業委員會水產試驗所電子報。
54. 高效施肥(2006)，平衡施肥對優質大豆產量和品質的影響，(2006)，<http://www.ipni.net/ppiweb/bcc.nsf/>。
55. 張嘉修(2009)，生質氫能，科學發展。
56. 莊子毅(2009)，聚醣類賦形劑在乳酸菌粉生產之應用，碩士學位論文，朝陽科技大學生化技術研究所，p51。
57. 許順珠(1996)，LCA 資料品質之實施架構(上)，ISO 14000 速報，18 期。
58. 郭紋秀(2009)，結合生命週期評估及因素分解之研究：以火力發電廠個案為例，國立成功大學環境工程碩士論文，5~46。
59. 陳芄(2010)，從微小變為顯著-綠藻引領第三代生質燃料發展，能

- 源報導。
60. 陳幸慧(2009)，以藍綠菌 *Thermosynechococcus* sp.CL-1 固碳與生質能潛能組成分析之研究，國立成功大學環境工程學系碩士論文，3~40。
 61. 陳振正，邱俊彥，廖少威，賴文亮(2009)，藻類產製生質柴油，科學發展, 438 期，12~17。
 62. 曾富生，吳詩都(1996)，農藝，三民書局。
 63. 黃世德(2005)，光學元件製造業之生態效益分析研究，朝陽科技大學環境工程與管理碩士論文，26~49。
 64. 黃悌儀(2000)，綠藻對大白鼠體內脂質代謝的影響，台北醫學院保健營養學研究所碩士論文，18。
 65. 楊致行(1997)，生命週期評估之整體趨勢及概念，工業技術研究院化學工業研究所生命週期評估研討會。
 66. 楊鏡堂，萬曉明，許妙行，陳建志，游宗翰，黃如蕙，蔡佳玲，黃郁棻，林佑俊(2008)，我國前瞻能源技術探討，國科會專題研究計畫。
 67. 經濟部工業局(2011)，2011 中華民國工業簡介，
<http://www.moeaidb.gov.tw/>。
 68. 經濟部能源局(2010)，中華民國 99 年能源統計手冊。
 69. 賈有元(2004)，綠藻 *Chlorella pyrenoidosa* NCHU-6 之最適異營培養條件暨培養方法之研究，國立中興大學食品科學研究所碩士論文。
 70. 維基百科(2011)，全球暖化，
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A8%E7%90%83%E6%9A%96%E5%8C%96>。
 71. 劉文宗(2010)，生質柴油發展與工業化設計，永續產業發展月刊 NO.35。
 72. 潘崇良(2010)，利用綠藻生產生質能源，科學發展，448 期，26~30。
 73. 蔡雯雯(2011)，以生命週期評估與生命週期成本探討塑木之生態

- 效益研究，碩士學位論文，嘉南藥理科技大學，39~89。
74. 賴文亮，李崇垓，蘇惠美，陳曉薇，林坤信，王柏雄(2009)，綠藻固定煙道氣中二氧化碳之效益—以大林火力發電廠為例，永續產業發展雙月刊第 35 期，1~5。
 75. 賴明伸(1997)，生命週期評估之內容架構，工業技術研究院污染防治專案成果報告。
 76. 戴蔭方，劉成軍，張超良，曹慶榮，李保真(1995)，藥用蔬果，度假出版社。
 77. 謝志鴻，吳文騰(2009)，綠藻—綠色生質能源，科學發展，433 期，1~4。
 78. 謝孟荔(2004)，乳酸菌與雙叉桿菌發酵豆奶之抗致突變性，國立台灣大學食品科技研究所碩士論文。
 79. 闕壯群(2009)，綠藻類固碳工程，科學發展，433 期，1~5。
 80. 闕壯群(2009)，綠藻食品與生活保健，遠東生技。
 81. 關羽峻(2009)，大豆蛋白對於餵食高膽固醇飲食倉鼠之血脂質與肝臟脂質的影響，碩士學位論文，台北醫學大學，15。