

微藻分離純化技術與發展

The Separation Technology of Microalgae and The Development

皮先覺¹、杜子邦²、朱麗萍¹、莊銓³、呂芳仁³、張學明⁴

工研院材化所(MCL/ITRI) ¹副研究員、²研究員、³副工程師、⁴主任

微藻以其生長快速的特點，吸引許多應用開發的研究，是目前主要的生質能研究項目之一，而微藻的分離純化技術發展，關係著微藻商業應用推廣的潛力。本文由微藻在環保意識崛起的角色談起，帶入分離技術在微藻生產程序中的角色，再由不同種類微藻的介紹及組成分析方法，切入微藻生質柴油的應用，最後探討產製生質柴油相關的微藻油脂之分離技術種類及其發展方向。

The rapid growth rate of microalgae has shown its renewable potential and attracted a lot of development on its bio-mass research. The progress and applications of microalgae are mainly affected by the development of microalgae separation technology. This article briefly introduces the act of microalgae in the environmental protection issue, the separation technology of microalgae production, the different species of microalgae, the analysis of crude lipid, crude proteins and water in microalgae, the fabrication of bio-diesel by microalgae and the separation technologies of lipid from microalgae and their development.

關鍵字/Key Words

微藻(algae)、分離(separation)、藻油(algae oil)

一、微藻與分離技術

(一)微藻固碳

二氧化碳是微藻類進行同化作用中最重要之無機碳來源，理論上每公斤二氧化碳約可長出0.57公斤的藍綠藻，並釋放出0.73公斤的氧氣，顯示微細藻類有很高的二氧化碳利用能力。Sawayama於1999年評估以100 MW火力電廠煙道氣排放之二氧化碳為碳源養殖微藻，如果二氧化碳利用率為30%，可使每年減量之二氧化碳達 1.5×10^5 公噸，配合選用可生產高附加價值產物的藻種，在藻類固碳時更可生產各種特用化學品，如生理活性物質、色素、脂肪酸等，更是一項生技產品的來源。不同於一般植物的採收方式，微藻係分散在水中的微小粒子，而所含的活性物質亦存在此微米級的細胞體內，且由強度大的細胞壁包圍。因為微藻細胞以微米尺度與環境接觸的關係，其分佈在藻體表面的細胞壁含量，較一般植物高出許多，因此微藻的採收、乾燥及微藻內有效成份的萃取，均必須用到許多化工分離純化的技術來克服及達成。而微藻分離純化技術的發展，是影響微藻商業應用率成長的重要因素之一。

(二)微藻種類

45億年前地球形成之初，大氣層主要由氮氣及二氧化碳組成，缺少臭氧隔絕紫外線下，造成地球表面溫度高且充滿毒性活性氧，99%以上的生物無法生存，唯有微藻靠著超強的抗氧化力生存下來，慢慢地生產氧氣，為地球帶來生物。已知最早的微藻為藍綠藻，屬於單細胞原核生物，於30億年前的

前寒武紀地層中發現其化石，擁有微藻特有的絲狀結構，是現今地球上最原始的物種。

微藻是生態系統中最主要的初級生產者，具有葉綠素、類胡蘿蔔素等光合作用色素，葉綠素直接吸收陽光及二氧化碳進行光合作用，產出的養分以澱粉形式儲存。類胡蘿蔔素包含胡蘿蔔素與葉黃素，屬於助吸光素，吸收陽光能量轉移給葉綠素，分擔光合作用需要的能量。葉綠素和類胡蘿蔔素分別吸收不同波長的光線，增加光合作用能耗的吸收。微藻具有種類多、數量大、繁殖快等特點，廣泛分佈世界各地，從炎熱的赤道到冰封的極地皆有足跡，主要分成9門：分別為藍藻、矽藻、甲藻、金藻、裸藻、黃藻、紅藻、褐藻、綠藻，擁有單細胞生殖器官、無根莖葉分化、無胚形成等結構，而微藻的區分主要是根據其光合色素、貯藏之養分、細胞壁、鞭毛、生殖方式等特徵。

藍藻為最古老的微藻門，唯一具有原核植物的藻類，具有光合作用色素及藻藍素，無鞭毛的構造成無法遊動，以細胞分裂繁殖。甲藻、矽藻、金藻、裸藻、黃藻為單細胞結構，具有鞭毛，可自由運動。藻體因為不同的色素呈現特別顏色，甲藻擁有甲藻黃素而呈黃綠到橙紅色，是水生動物主要餌料之一，但是甲藻會因為過量繁殖形成「赤潮」，使水中溶氧量急劇下降，並產生大量有毒物質，造成魚蝦貝類大量死亡，對漁業危害很大。

矽藻對工業有重大的貢獻，矽藻於上白堊紀和第三紀時發展旺盛，因而產生大量的海相沉積矽藻土，在化學工程上的應用有研磨劑、填充劑、催化劑載體、增光劑、過濾

吸附劑等原料。金藻本身含有大量金藻素而呈金黃褐色，含高量蛋白質、多醣體、維生素、水溶性纖維、礦物質，如富含DHA的等鞭藻具有機能性保健食品潛力；金藻和裸藻皆無細胞壁結構，金藻表面為矽質化的鱗片或囊殼，裸藻表面為原生質膜，裸藻為較低階藻種，適應能力差，大多數分佈在淡水，特別是在有機質豐富的水中，對水質非常挑剔，所以被視作水污染的指示生物。

黃藻門的植物多生長於淡水中，常在純淨、貧營養、溫度較低的水中生長旺盛，黃藻大多以人工培養成為養殖育苗中的餌料生物；紅藻與褐藻相同於金藻運用於食品，紅藻為多細胞體結構，也是唯一和藍藻相同沒有鞭毛的藻類，所含的藻紅素能吸收陽光的短波光線，因此紅藻可在水深100公尺以下存活，紫菜即是一種常見的紅藻，含有豐富的蛋白質。同為多細胞體結構的褐藻，許多種類都被人們利用為重要的經濟海藻，如海帶、裙帶菜、昆布、羊棲菜和鹿角藻等；在醫藥方面，褐藻用於如抗凝劑、止血劑和代用血漿等。褐藻酸鈉，對放射性銻(Sr90)及其它放射性同位素有阻吸作用，亦可阻止放射性銻在生物胃、腸道內的吸收。

每一門微藻都有特別的發展領域，而包含單細胞及多細胞的綠藻，是整個藻類中形態結構最多的一門，甚至為植物體系統進化的主幹。綠藻分佈很廣，有的寄生在動物體內或與真菌共生形成地衣。綠藻富含蛋白質，可供人食用和動物飼料，並作為研究藻類生理生化的材料及宇宙航行的供氧體。

綜合以上，微藻的優勢為生長力強、生長速度快、單位體積下含有高附加價值成

份，但是單一藻種無法擁有各項的優點，因此未來希望利用微藻培植的技術，將擁有附加價值含量高者之藻種，配合高生長速率或環境適應力佳的優勢藻種，取出兩者原生質，利用高分子劑融合法、電氣融合法等方式，培養出兼具高繁殖性及高脂肪含量之新穎藻類。另一方面，也有許多學者利用基因改質技術開發新穎的微藻。不同種類的微藻，由於密度與大小不同，適用的分離方法亦不同；對藻體的純度要求與後續的應用方法，則必須先加以考慮，例如密度比水大的藻體適合以沉澱法，而密度較小的則使用浮除法，顆粒較大的藻體適合用過濾法等。

(三)微藻養殖

藻類依碳源的提供分為自營、異營及混營生長方法。其中自營法是在光照下消耗無機碳源如二氧化碳進行光合作用；異營法是在黑暗條件消耗有機碳源進行生長。目前商業上藻類養殖多以自營方式為主，配合大氣中之二氧化碳為碳源，利用廣大的土地面積進行淺水平面式的養殖。然而異營法因不受光照因素限制，產量遠高於自營培養，只是相對的成本較高，並且不是所有藻類皆適合異營培養。

大規模培養藻類的養殖池有圓形池、渠道式及斜坡式三種形式。圓形池以旋轉臂式刮板攪動池底，以避免某些藻類沉澱於池底，並增加空氣溶於養殖水中；渠道式可以單一池或多池結合形式進行養殖，利用輪槳、螺旋槳及空氣幫浦增加池水攪動；斜坡式則將藻類懸浮液藉由幫浦抽取，以重力方式由上往下流動。大規模培養池為了提高光照強度，池深不超過30公分，生產過程均採

取較便宜之方式以降低成本。由於二氧化碳在水中之濃度很低，無法使水生藻類達到光合作用最大值。即便利用攪拌增加溶解，其溶於水之速度僅為每小時每平方公尺約0.4克以下，如要在單位面積、時間下生產1克乾燥藻體，則需提供約2克之二氧化碳。由於藻類生長速度快，因此藻類生物固碳的技術，是各國在控制溫室氣體排放的主要發展項目之一。

目前以藻類進行生物固碳的技術，由於不易將回收廢氣中的二氧化碳氣體有效地溶入大規模的培養池中，致使反應效率無法提高，成為微藻固碳技術的發展瓶頸。相較於大規模培養的開放式養殖，光生物反應器克服了光照、天候環境的限制，並且有效提高單位土地面積上的光合作用效率。反應器由底部打入的二氧化碳、回收廢氣經主體從頂部排出，藻液則由傳輸機運送至頂部後緩慢流下，與二氧化碳開始逆向接觸反應，此設備解決了氣體溶解的問題，不過設備的建立、清潔、保養等的高操作成本也限制了發展，導致目前光合生物反應器主要應用於高附加價值或食物化妝品添加物之生產。在純度的要求上，由於微藻生長會伴隨其它雜藻的生長，造成品種不純，是開放養殖池常見的問題。由於微藻與雜藻有時形體相當，難以達成高選擇性分離，若以光合反應器進行養殖，則可避免雜藻分離的困擾。

(四)微藻採收

微藻的採收係將藻體與養殖液分離的程序，目前生產上的微藻細胞培養液濃度低(<500mg/l)，且具有形體微小及與水密度相近的特徵，因此採收程序困難，導致微藻採收成本至少占總成本約30%。傳統的固液分離手

段雖然成本較低，但在品質與效率上並不理想，如絮凝沉澱法會污染產品、過濾法分離效率低等；目前工業上主要採用高速離心法，但能耗高為主要詬病處。微藻細胞培養時由於其生物量濃度通常較低，且細胞密度與水體相當，傳統的固液分離手段，如：離心、絮凝沈澱或過濾等，因效率低和成本偏高而不適用。由於微藻生物量濃度通常較低，且細胞密度與水相當，因此許多學者以浮除的方式來分離，浮除法中常用泡沫分離(foam separation)技術，又稱泡沫吸附分離技術(adsorptive bubble separation technique)，是根據表面吸附原理，由設備底部產生的鼓泡使溶質選擇性地聚集在氣/液界面，並借浮力上升至溶液主體上方形成泡沫層，達到分離、濃縮溶質和淨化液相主體的效果。

因為油脂比重小於水，因此針對含油量愈高的藻種，以泡沫分離之技術進行分離效率愈佳。由於胞內水的存在，因此就算將微藻胞外的水份完全去除，含水率還是達到70%以上。水份的存在容易造成藻體生菌腐壞，業界為了容易儲存、販售等目的，最終都以噴霧乾燥來乾燥微藻，但卻使成本增加。在微藻萃取的研究上，亦以乾藻體進行萃取探討為主，尤其萃取物為油脂類物質時，水會造成萃取的阻礙，降低萃取效率，但將藻體乾燥的能耗相當高，幾乎佔所萃取油脂輸出能量的20%以上，所以針對未乾燥的藻泥進行萃取，是目前藻類油脂萃取的一個重要研究方向。此外，亦有許多研究透過熱整合的安排降低能耗，例如排放二氧化碳的工廠之廢熱，可用來將固碳完成的微藻進行加熱乾燥，達到除水的效果。

二、微藻應用與分析

(一)微藻的營養特色

微藻被認為是有益健康的食材已有好幾世紀之久，包含中國已食用幾千年的髮菜，與非洲佳尼姆人用來維持強健體魄的「Dihe」，也就是藍藻菌曬乾的藻餅。微藻種類多，富含各種營養成份，具有增強免疫力、預防癌症、抗氧化、延緩老化等功能，廣泛應用在健康食品、食品色素、食品添加劑，也可作為綜合維他命的原料。

微藻的營養成份中蛋白質含量達60%以上，為魚肉類的3倍；纖維素含量可達8%以上，此外含有人體生長所需的維生素，如： β -胡蘿蔔素、藍藻素、葉黃素、維生素A與C及E，其中特別以 β -胡蘿蔔素及維生素B群最多，杜氏藻可含高達乾重12%的 β -胡蘿蔔素，含量比胡蘿蔔高出700多倍(表一)。微藻也含有多種礦物質，鐵質含量為菠菜的50倍，鈣質含量為牛奶的5倍，另外也有鉀、鎂、錳、碘等微量元素。許多藻類的產品即是透過分離純化來取得其營養成份。例如綠藻精是將葉綠素由綠藻中分離出來製作而成，由於綠藻所含組成，全都是可食用性的，所以這

▼表一 食品中胡蘿蔔素含量

營養成分	胡蘿蔔素含量(mg/100g)
胡蘿蔔	8.20
菠菜	4.20
柑橘	1.00
南瓜	0.73
杜氏藻	6,000.00

資料來源：日本食品標準成份表

類的分離純化主要著重在目標物的提取率，純度限制並不嚴苛。

(二)微藻分析方法

微藻為複雜的天然有機物，成分包羅萬象，附加價值高的成分包含多醣體、脂肪、蛋白質、纖維素、維生素，加上藻細胞中的水份及灰分，每一種成分皆有各自的分析方法，以下將針對微藻中含量較多的組成水份、粗脂肪、粗蛋白之分析方法進行介紹。

1.水分(moisture):

如前文所述，微藻採收後之含水率遠高於其它植物，而水份是分離微藻中活性成份的一大阻礙，因此要精確地操控微藻的分離純化，則必需了解水份因子的影響。微藻水份的量測，是將待測物置於100~110°C常壓恆溫乾燥箱中2小時或70°C、壓力<100mmHg之減壓恆溫乾燥箱中6小時，乾燥完成後冷卻30分鐘後秤重至恆量，所秤取之數據利用下列式(1)計算水份含量。

$$\text{水分(\%)} = [(W - W1)/(W - W0)] \times 100 \quad (1)$$

其中：

W0：坩堝恆重量 (g)

W：坩堝重 + 樣本重量 (g)

W1：W 乾燥至恆重的重量 (g)

2.粗脂肪(crude fat)：

根據藻的種類及生長環境不同，所含的粗脂肪量也不同，而在藻類生質柴油的研究中，即是利用粗脂肪轉換成為生質柴油，因此粗脂肪的含量即是一項重要的控制因子；粗脂肪的量測是將微藻置入濾筒內，先放入烘箱中在105°C下烘3小時，以脂肪抽出器

(SPC extraction apparatus or soxhlet)加入乙醚或正己烷於迴流管中，迴流速度每小時6次，萃取至少6小時以上，取出燒瓶置於烘箱中100℃下烘1小時以上，將溶劑去除，冷卻30分鐘秤重至恆量，再利用下列式(2)算出粗脂肪的含量。

$$\text{粗脂肪(\%)} = [(W - W_0)/S] \times 100 \quad (2)$$

其中：

W₀：燒瓶恆重量(g)

W：脂肪萃取後的燒瓶恆重量(g)

S：微藻的重量(g)

3. 粗蛋白(crude protein)：

微藻粗蛋白是食品加工上使用的營養成份之一，但在微藻生質柴油的製作上，卻是主要的雜質之一，也是微藻分離出粗脂肪後，主要純化去除的物質。粗蛋白的量測方法是將待測物、催化劑(K₂SO₄：CuSO₄·5H₂O=9:1)、濃硫酸加入分解管中，置於蛋白質分解爐中加熱至400℃分解成淡藍色，取出冷卻後加入蒸餾水及氫氧化鈉，再以全氮蒸餾器蒸餾出氮，用硼酸加入指示劑收集10分鐘後，以硫酸滴定至淡粉紅色，然後以式(3)計算出粗蛋白的含量：

$$\text{粗蛋白質(\%)} = (b - a) \times 0.1 \times 14.007 \times 6.25 / S \times 10 \quad (3)$$

其中：a：對照組的滴定體積(mL)

b：樣品的滴定體積(mL)

S：樣品的重量(g)

(三)微藻應用於生質柴油

美國能源部自1978年開始18年的水生物

種計畫(aquatic species program；ASP)，主要進行含高脂質藻類經大量培養後再轉製成生質柴油的研究，並探討利用藻類固定火力發電廠排放的廢二氧化碳氣體之效率。美國2007能源獨立和安全法案(EISA)，以減少溫室效應氣體為目的，規定於2022年後所生產每年360億加侖的燃料油中，必須包含210億加侖的生質柴油，加上石油價格逐年攀升的情況下，含有高油質的微藻類將會是生質能應用的明日之星。微藻具有生長快速、單位面積產能高、能將二氧化碳固定轉化為營養源等優點，但由於生產設備與製造成本相對較高，因此目前微藻養殖業末端產品主要做成高單價的健康保養品，若能建立高效的生產方式、低成本的採收分離方法及低能耗的粗脂肪萃取純化技術，以微藻為料源的生質柴油，將會是一項令人期待的再生能源。

目前研究微藻轉變為生質材油的途徑主要有兩種(圖一)：(1)透過高溫裂解過程裂解成為生質柴油；(2)對微藻中的粗脂肪進行萃取分離，再經脫膠、轉酯化等反應及純化過程，製得生質柴油。微藻細胞提取油脂前可先經過破壁過程，利用珠磨、高壓均質、高壓破壁等方法破碎細胞壁，利於進一步的油質萃取，經過萃取反應後會得到粗脂肪及藻渣，藻渣經過噴墨乾霧成為農業飼料或流經高溫的流體化床，將剩餘的油質經高溫裂解單元產製生質柴油。而粗脂肪必須經過精煉純化，其過程包含脫膠、脫色、脫酸、脫水得到高純度的三酸甘油酯，接下來的轉酯化反應，是將低碳醇如甲醇和三酸甘油酯反應，三個脂肪酸鏈會與甘油基斷開，並與甲醇結

合產生脂肪酸甲酯(圖二)。反應過程中會產生副產物甘油，10公噸的生質材油會伴隨1公噸的甘油產物，近年來甘油衍生物的利用備受重視，即是因為生質柴油的推廣所致。轉酯化反應中，為了加速反應速度與產物生成，常加入催化劑，包括酸性催化劑、鹼性催化劑、異質催化劑、解脂酵素等，也有不使用催化劑而直接將甲醇加至超臨界狀態，利用高溫高壓來克服能障的轉酯化反應。製程最後利用分子蒸餾，在不會破壞油質的環境下得到高純度的生質柴油，達到商用燃料的標準。

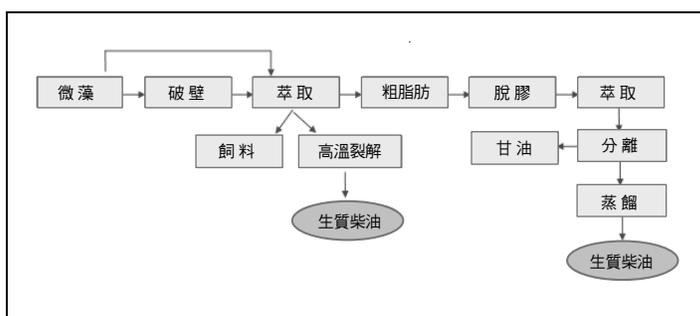
三、分離純化技術應用於微藻脂肪萃取

目前市面上的植物油，主要以壓榨及溶劑抽提的方法，進行油脂與物質的分離，再經過脫色、脫臭、沉澱等純化手段後，製得精製油如沙拉油(圖三)。其中溶劑抽提法即是實驗室常用的索式萃取(S Soxhlet extraction)，由於索式萃取所使用的溶劑對油脂類溶解度極佳，但對水幾乎不溶，而且密度比

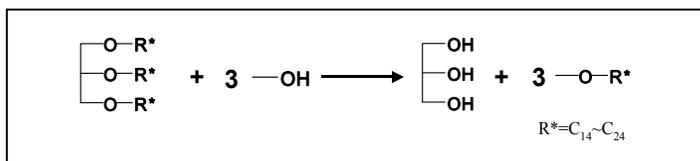
水小許多，所以水的存在會造成索式萃取上嚴重的阻礙。對於含水率高及細胞壁組成韌於一般植物的微藻，當然難以適用，也就是微藻油脂無法以目前植物油量產的分離方法達到規模經濟的生產。因此針對微藻油建立分離純化方法，也是微藻生質柴油的主要研究方向之一。

目前微藻油的分離方法主要有溶劑法、機械法及超臨界萃取法等，溶劑法是由成熟的商用萃取方法進行調整與修改，因此其放大生產所需的設備較完備，具快速商業化的優點。機械法主要是採用壓榨或高速高壓均質的方式，破壞微藻使油脂分離，然而此法存在分離效率不佳的問題；超臨界萃取法是目前最廣為研究的方法之一，因為超臨界萃取與清洗，在許多天然物的產品上，已有商業化發展的成果。最常使用的萃取介質為二氧化碳，其具有低毒性的優勢，符合當前綠色環保的需求，免除溶劑污染的疑慮，其萃餘物再利用價值高。

溶劑法包括前述的索式萃取法、混合溶劑萃取法、加速溶劑法及直接酯化法等。索式萃取法乃是用純溶劑(如正己烷)將化工單元蒸發、冷凝、萃取合而為一，實現最少溶劑使用量之多批次溶劑萃取的效果，只需將微藻置於濾筒內，將溶劑倒入下方蒸發瓶，



▲圖一 微藻提煉成生質柴油程序



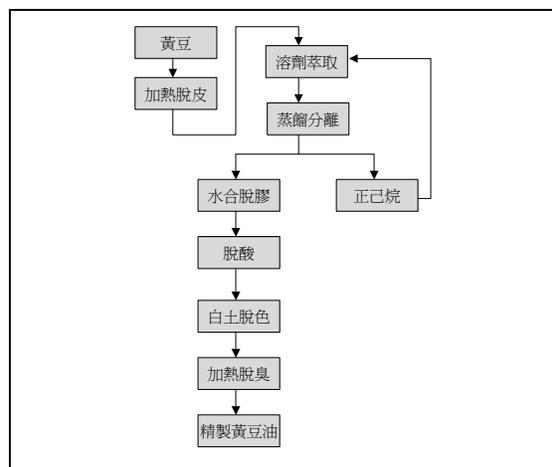
▲圖二 三酸甘油酯轉酯反應成脂肪酸甲酯之化學方程式

打開加熱與冷凝，即開始進行萃取，溶劑會不斷地反復進行萃取與蒸發冷凝，直到萃取結束，操作最為簡便。然而使用對油脂溶解度佳之正己烷與水不互溶，且密度比水小許多，因此微藻中的水含量，在這個萃取方法中造成極大的障礙，致使萃取效益不如一般植物油。混合溶劑法改善了純溶劑的缺點，選擇親水性的溶劑如醇類，搭配親油性的溶劑對微藻進行萃取，但由於水的存在會使兩溶劑產生分層，因此萃取時必須搭配劇烈的攪拌，才能提高萃取效果。許多研究學者採用超音波振盪的方式進行，除了使之均勻混合接觸外，亦可造成被溶劑侵蝕的細胞壁破碎的功效，此法可使微藻中粗脂肪的分離效果接近100%，因此目前許多研究對微藻粗脂肪的分析方法，即是採用混合溶劑法，然而超音波設備在放大設計上困難度高，造成大量生產的瓶頸。

加速溶劑法是利用高溫下，水的表面張力變小，溶劑對油脂的溶解度提升，溶劑分子動能增加對微藻胞壁的穿透力增加，油脂流動性增加，藻體結構變脆弱等特點，將微藻與溶劑密閉於高壓釜中，加熱至高溫完成萃取，操作簡單，但設備成本相較其它溶劑法高出許多。且過熱溶劑蒸汽在放大生產時，潛在侵蝕性與閃燃性，造成相當大的風險。直接酯化法是將微藻與低碳醇類如甲醇混合，並加入酸或鹼及催化劑，加溫進行轉酯化反應，將高分子量低極性的油脂，轉換為低分子量極性較高的脂肪酸甲酯，低分子量的脂肪酸甲酯之溶解度遠大於油脂，且可操作的溶劑範圍也變寬，可增加生質柴油的

產出效率，但此法相對於其它溶劑法，添加化學藥品量及種類均增加，不但會提高成本，萃餘物的再利用性亦最低。

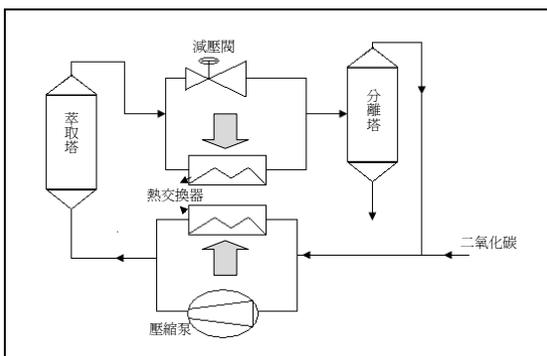
微藻油的分離技術上，機械法也是研究探討的項目之一，主要是採用壓榨或高速高壓均質的方式，破壞微藻使油脂分離。壓榨法是目前商用植物油主要的生產方法之一，也是植物油脂最古早的取油方法，其油脂提取率不高，一般只達2/3左右；微藻細胞如同堅韌的小圓球，其壓榨效率恐怕比一般植物更低。高速高壓均質法是透過攪拌葉片，快速旋轉或擠壓流體快速流動的方式，使微藻碰撞破碎，此法能有效造成微藻破壁，但設備成本較高。此外亦有國外公司OriginOil以量子切割(quantum fraction)的方式，在低能耗的前題下將微藻破碎，使油脂、藻渣與水產生分層而自然分離，然而並不適用於所有案例，不同的藻種油脂與藻渣的作用力不同，能自然分離的佔極少數，且分離效率包括等待分層的時耗及總脂肪的萃取率，均難以跟溶劑法相抗衡。



▲圖三 精製黃豆油的溶劑抽提與精製流程

相較於溶劑法與機械法，利用超臨界萃取法進行藻類油脂分離，是目前最廣為研究的方法之一，因為超臨界萃取與清洗，在天然物的產品上已有商業化發展的成果，最常使用的萃取介質二氧化碳，其低毒性的優勢符合當前綠色環保的需求，免除溶劑污染的疑慮，其萃餘物再利用價值高。將超臨界二氧化碳萃取應用於藻油的分離程序上，具有油脂與二氧化碳同為低極性物質的溶解度效益，超臨界二氧化碳的高穿透力及質傳效率的優勢，以及惰性不反應、安全不閃燃的特點。相較於溶劑法，超臨界可以達到相同萃取率的前題下，符合綠色製程的環境需求。相較於機械法，超臨界萃取同樣具有較昂貴的設備成本要求，且如純溶劑法所遭遇的困難，微藻中的水份會阻礙二氧化碳與藻油的接觸而降低萃取效率，因此超臨界萃取藻油技術，仍有許多值得探討與等待建立的技術。

如圖四所示超臨界萃取設備主要可分為三個功能單元：首先是圖中之壓縮泵，功能為超臨界二氧化碳流體發生單元，主要設備有二氧化碳氣體鋼瓶、冷凍機及高壓泵，動作時高壓泵壓縮液能使二氧化碳達到臨界壓力；其次是超臨界萃取單元，即圖四中之萃



▲圖四 超臨界二氧化碳萃取設備示意圖

取塔，主要有預熱蛇管、萃尿管、恆溫水槽及背壓閥等；預熱蛇管裝在萃尿管的前端，功能是讓流入已達臨界壓力的二氧化碳預熱至臨界溫度；背壓閥裝於出口端，使整個萃取過程能維持在恆壓。第三部分為減壓與分離單元，為圖中之分離塔，主要有膨脹槽，當超臨界二氧化碳完成萃取動作後流入膨脹槽，壓力瞬間下降，則有效物質與二氧化碳進行氣液分離，有效物質收集於槽底。為了克服超臨界萃取藻油的困難，許多學者透過對微藻進行前處理來提高萃取效率，包括微藻的破壁與乾燥、高溫蒸炒等，影響超臨界萃取藻油的因子，以共溶劑效應最顯著，其次為壓力因子、二氧化碳用量及萃取溫度等；目前以超臨界二氧化碳萃取乾燥藻粉的萃取率均相當高，然而所耗費的二氧化碳用量並無明確提示。因此在未來商業用途上，包括放大設備成本與萃取效益的估算、低能耗高效的濕藻泥萃取探討時，都是超臨界萃取應用於藻油分離技術上有待進一步研究的議題。

參考文獻

1. 劉清標, 「海洋微藻Isochrysis sp. CCMP 1324超微細結構與不飽和脂肪酸之生成」, 國立臺灣大學農業化學研究所博士論文, 2002.
2. 曾文爐, 李浩然, 李寶華, 叢威, 蔡昭鈴, 歐陽藩, 「螺旋藻泡載分離法採收的實驗室研究」, Vol.2, No.1, 40-44, 2002.
3. 吳佩芬, 「利用本土淡水藻類產製生質柴油之可行性評估」, 逢甲大學環境工程與科學系碩士論文, 2006.
4. 林哲毅, 「以微藻生產生質柴油之未來發展」, 能源報導, Apr, 11~13, 2008.
5. 謝志強, 「全球藻類生質燃料發展動向觀察」, 太陽光電與綠色能源智庫, Jul, 1-8, 2008.
6. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, BIOMASS PROGRAM, 「National Algae Biofuels Technology Roadmap(Draft)」, 2009.
7. 杜子邦, 「超臨界二氧化碳在聚合物中之吸收與擴散的量測及在合成導電性高分子摻合物之應用」, 台灣大學化學工程研究所碩士論文, 2002.
8. 張學明、杜子邦、黃功勛, 「超臨界流體技術於生醫材料中之應用」, 化工技術, vol.176, 154-166, 2007.