

近年來隨著新興生物技術的研發與突破，不論在藻類的基因體定序研究或基因改造藻類的開發上，都已有所斬獲，自18世紀起藻類逐漸多元化，到現今開發各項藻類商業應用市場，以及替代能源的興起，讓許多企業投入藻類生質柴油的開發，例如石油巨擘埃克森美孚公司，亦預計進行量產測試，隨著生物技術的進步，跨領域的應用將就此展開，亦催生出藻類的無限商機。

藻類應用 商機無限

全球水產藻類發展現況與趨勢

劉翠玲·許嘉伊

藻類為地球上重要植物之一。從生命之初，藻類便藉由吸收二氧化碳與光，轉換釋放出氧氣，供給大氣中重要元素；另藻類每年生產約520億噸的有機碳，相當於地球每年碳排放量之一半。在海洋中，藻類則是扮演食物鏈中最初級的供應者，全球現已知約有30萬種藻類品種，但僅有數十種被現今商業化開發與生產。

在生物學分類上，藻類可略歸類為數個真核門(eukaryotic phyla)，且型態多元，包括球菌、阿米巴型(amoeboid)、膠狀群體(palmelloid)、群聚(colonial)、變形體(plasmodium)、絲狀體(filamentous)、間質型(似組織結構)(parenchymatous)和葉狀體(thalloid)等，另有某些藻類發展出類似維管束植物的葉片、根和枝幹等較複雜之結構。大小可從單一細胞到巨大的多細胞有機體，最小的真核藻是青綠藻(*Ostreococcus tauri*)其細胞直徑小於1 μm ，而褐藻綱(Phaeophyceae)的大型巨藻(*Macrocystis pyrifera*)則是最大的海藻，可長到60公尺高，而成為海藻森林的主要生物。

以藻類生技為主的產業，每年約產出千萬噸的藻類作為各種商業化應用，包括食品、飼料、添加劑、化妝品與色素等，且目前仍以傳統培養技術的生產為主，新興基因改造技術的運用則多處於研發階段。

18世紀開始應用多元

人類最早使用藻類是以食物來源為主，微藻的食用紀錄可追溯到2000年前，中國使用念珠藻度過飢荒；而大型藻當作食物的紀錄，則記載於四世紀的日本和六世紀的中國。

18世紀開始，藻類的應用逐漸多元，從昆布(Laminaria)、大型巨藻(Macrocytis)和墨角藻(Fucus)等褐藻萃取出碘和碳酸鈉，同時定點種植這些藻類的活動也展開；1860年代，Alfred Nobel利用矽藻土(Diatomaceous earth)發明黃色炸藥(dynamite)，矽藻土即由矽藻細胞壁上二氧化矽化石所組成，可吸收液狀硝化甘油，將其轉為固體，提升硝化甘油之穩定性。隨著對藻類的研究發展，十九世紀含有多醣的褐藻膠(hydrocolloids)開始用於工業；1940年代微藻變得更為重要，成為海洋生物的食物來源；1948年後，藻類的應用急遽發展，從德國開始擴展到美國、以色列、日本和義大利，主要利用藻類作為生物質(biomass)，生產蛋白質和脂肪等營養物質。

藻類的應用現況

以藻類生技為主的產業，每年約產出千萬噸的藻類作為各種商業化應用，包括食品、飼料、添加劑、化妝品與色素等，且目前仍以傳統培養技術的生產為主，新興基因改造技術的運用多處於研發階段；以下係針對藻類生技的應用現況進行介紹。

(一) 人用保健食品

微藻因含有高品質的蛋白質、維生素、脂溶性化合物、纖維素、脂質等營養素，被廣泛開發為保健食品，機能訴求包括抗氧化、提

升免疫力、調整腸胃道功能和參與脂質代謝等，其中以綠藻(Chlorella)及螺旋藻(Spirulina)類的保健產品為大宗。此外，藻類中的某些成分更被用於癌症藥物開發研究，根據美國Algosolutions資料顯示，目前人用保健藻類消費市場約有770億美元。

大型藻類在許多亞洲國家已經被用來食用，包括在中國、日本、韓國、菲律賓等，其中，最大的生產國是中國，每年約生產濕重500萬公噸的藻類。舉例來說，紫菜屬(Porphyra spp.)的紫菜(nori)，被用於壽司製作，在亞洲已成年銷售額10億美元的產業。此外，被當作食品的還包括礁石蕁(Ulva spp.)、海帶(Laminaria spp.)、裙帶菜(Undaria spp.)、角叉菜(Chondrus crispus)、蕨藻(Caulerpa spp.)、棕藻(Alaria esculenta)、紅藻(Palmaria palmata)、龍鬚菜(Gracilaria spp.)等，由於藻類含有多種天然的維他命、礦物質及必須脂肪酸，因此對人類健康有益。

由於人類、動物及較高等的植物缺乏合成長鏈 ω 3多元不飽和脂肪酸的酵素，故必須由飲食中補充該脂肪酸，除了從魚及魚油中補充多元不飽和脂肪酸外，另也可從微藻中獲得。藻類中由寇氏隱甲藻(Cryptothecodinium coh-nii)生產的二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)現已商品化，而其他的項目也顯現出產業化製造的潛力，如利用螺旋藻(Spirulina)生產 γ -次亞麻油酸(γ -linolenic acid)、紫球藻(Porphyridium)獲得的花生四烯酸(arachidonic acid)，及從擬球藻(Nannochloropsis)、三角褐指藻(Phaeodactylum)生產二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)等，其中以DHA

與EPA對於嬰幼兒腦部和視力發育及成人的心血管系統扮演重要角色。歐洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)近期對於DHA發表健康聲明，認為食用DHA和穩定血中三酸甘油酯正常濃度有相關性，並對腦部功能和視力保護有其助益。Frost & Sullivan公司估計歐洲海洋與藻油的 ω 3市場，2008年約3.23億美元，2013年將達5.25億美元。

(二) 動物飼料

許多研究結果顯示，藻類適合作為飼料添加劑，其中以微藻中的螺旋藻為主，而綠藻也被廣泛使用，用於貓、狗、觀賞魚、觀賞鳥、馬、家禽、母牛、種公牛等動物飼料。此外，石蓴、紫菜、紅藻、龍鬚菜、棕藻等大型藻同時也曾被用於前述動物的飼料中。這些藻類可以增加傳統飼料(conventional feed)的營養成分，因此對動物的生理機能有所幫助。

(三) 水產養殖

微藻於水產養殖中被當作餌料(live feeds)，可添加於雙殼貝類(例如牡蠣、扇貝、蛤蠣、貽貝)的生長階段，使用於鮑魚、甲殼動物及某些魚類的幼年期(larval stage)與青年期(juvenile stage)早期，也用於培養水產食物鏈中的浮游動物。此外，藻類被用於水產養殖必須具備一些條件，例如合適的大小以便被食用、可快速成長至高濃度階段、有良好的營養組成。此外，藻類生長必須不易影響養殖環境，故不能含有毒素，且容易被消化。

(四) 化學品與藥品

目前藻類在化學品的發展主要是應用其脂肪酸、色素、維他命及其他生物活性化合物，例如三角褐指藻用於食品添加劑，長耳盒形藻

(*Odontella aurita*)用於藥品、化妝品及嬰兒食品。

大型藻類中，石花菜、龍鬚菜與凝花菜(*Gelidiella* spp.)等藻類細胞壁萃取出無分支多醣，可用於瓊脂膠體(hydrocolloid agar)材料，成為微生物學、分子生物學、醫學實驗室，常用的標準培養基(agar)。此外，瓊脂也被當成許多食物(例如冰淇淋、湯、糖霜、果凍)、藥品與飼料中的膠凝劑，或素食者的吉利丁(gelatin)替代物，以及作為釀酒工業及其他發酵工業用的澄清劑，也被用於幫助排便。

另一種被廣泛利用的瓊脂多醣——鹿角菜膠(carrageenan)，則是從卡帕藻(*Kappaphycus* spp.)、麒麟菜(*Eucheuma* spp.)、瓊枝(*Betaphycus gelatinum*)等大型紅藻萃取得得，常被使用於食品加工過程，以作為膠凝劑、安定劑、定形劑、增稠劑、稠化劑等。

褐藻膠(alginate)為藻膠酸(alginic acid)之鹽類化合物及其衍生物，是從海帶、昆布、巨藻(*Lessonia* spp.)、泡葉藻(*Ascophyllum nodosum*)等大型褐藻的細胞壁萃取出來。褐藻膠類多醣是食品加工過程中，增稠劑、安定劑、乳化劑與膠凝劑的主要來源。此外，褐藻膠也是製造織物印染染料、乳膠漆、焊條所需的材料和義肢與牙科之模具製造；因為具有吸水特性，褐藻膠被用於瘦身輔助品，並被用於製造紡織品與紙類。藻酸鈣(calcium alginate)被使用在多種醫療產品上，包括燒傷敷料，以促進傷口癒合，並減輕敷料移除時的疼痛感。由於藻酸鈣具有生物相容性，且因為與二價離子形成交聯，因此也被用於細胞固定與包埋應用。

另外，商品化的產品尚有綠藻純化的多醣被用作為膳食補充品，紫球藻純化的多醣

被用於藥品、化妝品與營養品。由藍綠藻(cyanobacterium)巨大鞘絲藻(Lyngbya majuscula)萃取的物質，則被作為藥品中的免疫調節劑。

(五) 色素

藻類的色素不只有葉綠素(chlorophylls) (光合作用色素)，還含有其他色素，其主要是用來提高光能利用效率，與保護藻類避免受到陽光傷害。從商業化的角度來看，類胡蘿蔔素(carotenoids)與藻膽蛋白(phycobiliproteins)為最重要的成分。

類胡蘿蔔素為一種常見的脂溶性色素，除了顏色本身的用途外，類胡蘿蔔素還是維他命A前驅物，也是生物抗氧化劑，可以保護細胞與組織免於受到自由基的傷害，被大量用於藥品、保健食品、膳食補充品、化妝品與飼料添加劑。目前生產 β -類胡蘿蔔素與其他種類胡蘿蔔素的主要藻類為杜氏鹽藻(Dunaliella salina)。

藻膽蛋白是由蛋白質與藻膽色素(phycobilins)以共價鍵結合而成，是一群色彩鮮豔且具有螢光的水溶性色素，該蛋白會捕捉特定波長的光能，並將其傳遞至葉綠素，以提升光合作用的效率。由螺旋藻與紫球藻中純化而得的藻紅蛋白(phycoerythrin)與藻藍蛋白(phyocyanin)，屬於安全無毒的蛋白質色素，可以作為口香糖、糖果、甜食、冰品、乳製品等食品、藥品與化妝品的著色劑。藻膽蛋白不僅被當作色素使用，在生化實驗研究中則被用來當作螢光標記物質。

(六) 矽藻土

矽藻土(diatomite)為一種商業化重要的矽藻(diatom)衍生物，屬於一種沉積岩，由石化的外殼及矽藻的細胞壁組成。矽藻土的應用廣泛，

包括過濾、吸收劑(油、水、化學品)、水泥與混凝土添加劑、顏料與塑膠之填充劑、園藝的培養土與土壤調節劑、水耕法的培養基、輕質建材、貓砂、熱絕緣體、耐火材料，以及用於炸藥等。由於其多元應用，矽藻土產量從1900年的3,280噸，已增加到2005年200萬噸。

(七) 肥料

大型藻類被作為肥料已經有多年歷史，而現今大型藻類萃取物及懸浮液的應用，已經比大型藻本身及海藻粉更加廣泛。例如膨石藻(Phymatolithon spp.)、昆布、泡葉藻(Ascophyllum nodosum)等海藻，被用於製造肥料、園藝用的土壤調節劑。

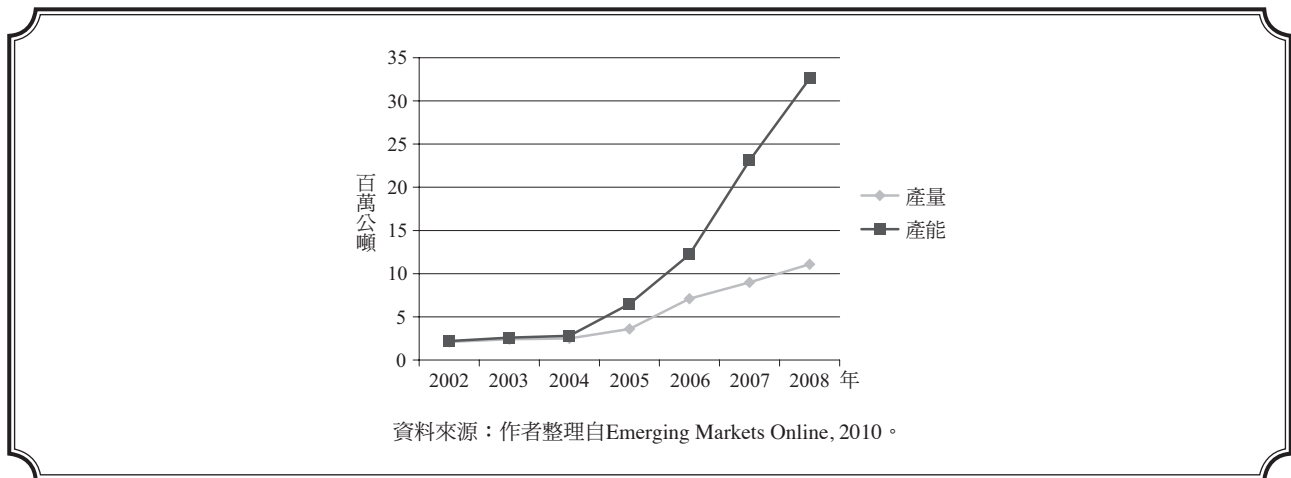
(八) 水質處理

藻類可被應用於廢水處理，以減少汙水及農業廢水中的氮、磷含量，此外，還可用於移除工業廢水中的有毒重金屬。這類型的藻類，對於培養條件必需具有很大的容忍度(例如高鹽度)，像是綠藻中的石蓴即適合用於減少水中的氮、磷含量；而大型海藻中的海帶、馬尾藻、昆布和石蓴也被證實為可吸附銅、鎳、鉛、鋅、鎘等重金屬。

(九) 化妝品

藻類成分經常被作為化妝品的增稠劑、保水劑與抗氧化劑。目前坊間許多化妝品宣稱添加藻類的成分，可對皮膚與健康有益，像是鹿角菜膠、其他藻類多醣、藻類蛋白或脂質、維他命或其他元素等；有些公司則表示藻類萃取物可抑制膠原蛋白(collagen)與透明質酸(hyaluronic acid)的氧化變性，並具有防止老化的特性，但從科學的角度而言，有關藻類的功效仍須經過進一步證實與瞭解。

附圖 近年全球生質柴油產能與產量變化



觀察藻類可作為水與土壤的生物復育，並吸附環境中的重金屬，但以基因工程創造海藻品種的同時，也引來一些專家的憂慮，若基改超級海藻不慎落入自然生態系統裡，可能會出現過度生長，並影響水中生態。

未來應用潛力與趨勢

近年來隨著新興生物技術的研發突破，不論在藻類的基因體定序研究，或基因改造藻類的開發上，都已有所斬獲，故前述所提及的各項藻類商業應用，未來也可能會快速的被生物技術改良的藻類所取代，除可提高藻類生長密度，提升養殖環境耐受性，更重要的是利用基因改造藻類產生新的產品或衍生出特殊功能。

(一) 生質能源科技應用

隨著現今能源短缺、空氣汙染增加和全球暖化等現象發生，替代能源逐漸受到重視。藻類的應用潛力即是生產替代能源，其中利用大型

藻當作生物質(biomass)以生產甲烷作為能源是一方式，而矽藻因具有高產量且含豐富油脂，也可提煉出生質柴油。根據Emerging Markets Online(2010)資料顯示，美國與歐洲為生質柴油主要市場，從2005年開始兩地區便快速擴增生物精煉(biorefinery)產能(capacity)，但相對受限於原料作物（大豆、油菜籽等）的不足，使得產量成長速度不若產能（附圖）。而藻類的產油量最高可達10,000加侖／英畝，高於大豆的40~50加侖／英畝、油菜籽120~150加侖／英畝、麻瘋樹的175~250加侖／英畝、棕櫚的650加侖／英畝，加上藻類的生產不與農作物爭地之特性，遂成為生質柴油重要原料之一。

有鑑於替代能源商機，許多企業紛紛投入藻類生質柴油的開發，石油巨擘埃克森美孚公司(Exxon Mobile)於2009年宣布與合成基因體學公司(Synthetic Genomics Inc., SGI)合作發展藻類生質燃料，預計於5~6年內投資6億美元進行量產測試；2010年已完成溫室設施建立，進行藻類量產生質燃料之可行性測試，其中包含天

然及基改的藻類，若開發成功，每英畝藻類可年產2,000加侖的油。此外，以藻類作為生質燃料的實際應用性，亦在發展當中，2009年初，美國大陸(Continental)航空公司已試飛過部分動力來自藻類生質燃料的飛機，試飛結果良好。目前數十家企業和許多大學研究室，都致力於將海藻成為生質能源的來源，其利用基因改造工程或化學性誘發突變等技術來提高海藻的功能。擁有培育超級海藻實驗室的藍寶石能源(Sapphire Energy)公司表示，他們已改變超過4,000個海藻品種的基因結構，就是要馴化出一種具經濟價值的植物。

然而以基因工程創造海藻品種同時，也引來一些專家的憂慮。由於海藻在自然界中扮演重要的生態角色，除了製造氧氣外，也是海洋食物鏈的底層。若基改超級海藻不慎落入自然生態系統裡，可能會出現過度生長，影響水中生態，即使有企業堅持尋找合適和培育自然品種的海藻，但如何養殖海藻仍然是一大問題。由於海藻繁殖速度快並能隨風散播，未來相關管理機構，將要針對基因改造海藻到底是在開放式養殖池，或封閉的生物反應器內培育等制定規範。

利用藻類生產氫氣也備受重視，以氫氣產生能源係使其充分燃燒或使用燃料電池(fuel cell)，最終產物僅有水，兼具環保目的。現有許多研究計畫正對這些藻類做最適化開發，如透過基因改造技術使衣藻增加產氫效率，而具體改良的策略包括在篩選高產氫效率的突變株、基因改造捕光複合體(light harvesting antennae complexes)、對產氫酵素的最適化開發等。目前衣藻已被確認可每天在每平方公尺培

養區域中產生10mol(20g)的氫氣，一旦該高產率效果可大規模生產，對於以氫氣作為再生能源來源將是非常有效率。

(二) 水和土壤的生物復育(Bioremediation)

鉛(lead)、鎘(cadmium)和汞(mercury)為主要汙染土壤和水源的重金屬，在工業產品製造過程，包括塑膠製造、電鍍(electroplating)、鎳鎘電池(Ni-Cd battery)生產、採礦和熔煉等產業，持續釋放大量重金屬於環境中。生物復育(Bioremediation)便是利用(微)生物，讓環境恢復原始條件的一種方式。藻類可吸收環境中的重金屬如鎘，並引起重金屬壓力反應，然而高濃度重金屬也會阻礙藻類主要代謝(如光合作用、生長)，最終導致細胞死亡。野生衣藻在其快速複製期對於高濃度的鎘具有耐性，而研究發現額外表現蛾豆(mothbean)P5CS基因的基改衣藻，則可生長於更高濃度的重金屬環境中。相較野生細胞，基改細胞可展現四倍之多的鎘結合能力，此外表現該基因也讓細胞可在一般致死鎘濃度中快速生長，該研究的發現將使利用藻類復育汙染地區和水源，踏出顯著的第一步。

(三) 分子農場(Molecular farming)之應用

利用藻類分子農場的想法，是希望由此生產高價分子以用於藥品或工業，通常這些物質是無法或很難在其他系統中生產，或需要高額生產成本。其中一個應用實例即是利用藻類系統大規模生產抗體，目前衣藻已被證實可成功表現人類IgA單株抗體，但要達到高表現量和簡單純化抗體的目標，仍需進行最適化開發。此外，在傳統的抗體生產系統中，可能會因寄主動物細胞的免疫系統而影響抗體表現，此現象

在藻類中因無免疫系統而不受干擾。

藻類亦被證實適合用於合成疫苗，Sayre (2001)等人研究顯示杜氏鹽藻已可穩定表現B型肝炎表面抗原基因，由於杜氏鹽藻可作為營養補充品，故無須純化該抗原，完整的藻體可直接當作疫苗的傳遞工具。其他計畫尚包括以藻類生產魚類傳染性皮下及造血組織壞死病毒(hematopoietic necrosis virus, IHNV)疫苗，該疾病造成美國每年30%的鱒魚死亡，要達到免疫目的只要簡單餵魚吃藻類即可。微藻也同時可用於表現殺蟲蛋白，如綠藻中的小球藻屬於蚊子幼蟲孑孓的食物之一，若將墨蚊有關抑制胰蛋白酶的多肽(hormone trypsin-modulating oostatic factor, TMOF)基因轉殖到綠藻中，一旦表現TMOF的綠藻被孑孓吃下，將會促使其在72小時內死亡。由於許多疾病如瘧疾、登革熱和西尼羅熱(west Nile fever)都是藉由蚊子傳播，對於熱帶國家若利用基改藻類消滅蚊子，可能為一便宜的替代方案。

對進一步藻類生物技術的應用，許多研究者正從多樣化藻類品種中做篩選，以發掘有效的有機物質，如二次代謝物、抗真菌或抗細菌等生物分子、藻類毒素，或是藥物活性成分以作為候選藥物。

應運而生的跨領域市場

綠藻與人類的關係開始於數千年前的食用目的，隨著對藻類的研究累積，更將應用領域擴展到保健食品、添加劑、肥料、水質處理、化妝品，甚至藥品等，對人類生活、動物營養以及環境保護扮演重要角色。而未來隨著生物技術的進步，跨領域的應用將就此展開，藻類在

生質能源開發、環境復育，以及新興藥物研發備受矚目，而相關產品未來極具發展空間，讓藻類的應用充滿無限商機。

(作者均為台灣經濟研究院生物科技產業研究中心助理研究員)

■ 參考文獻

1. Algrosolutions, <http://algrosolutions.com/index.html>.
2. Armin Hallmann(2007) Algal Transgenics and Biotechnology, *Transgenic Plant Journal* 1:81~98.
3. Algae Industry Magazine, <http://www.algaeindustrymagazine.com/>.
4. Emerging Markets Online(2010) Algae 2020 Biofuels Market Survey and Commercialization Outlook.
5. Sayre RT, Wagner RE, Sir poranadulsil S and Farias C (2001) Transgenic algae for delivery antigens to animals. Int. Patent.
6. 劉翠玲(2010)，「全球保健食品市場現況」，*農業生技產業季刊*，23:1~8。
7. 農業生技產業資訊網 <http://agbio.coa.gov.tw/>。