

面臨未來全球人口爆炸性成長、可耕地減少、氣候變遷加劇等因素，為滿足全體人類對糧食作物之需求，使用快速有效益的作物育種技術，必將成為未來農業上的主流趨勢。環視基因改造技術的發展，儘管在法規的重重限制下，仍持續有產品上市，這代表著其對於育種效率之提升及跨物種的功能應用，極具「農業升級」和「植物工廠」跨領域發展之潛力，而分子標誌輔助技術則可大大縮短傳統育種的時程，因此二者將是未來植物生技的發展主軸。

前瞻植物生技 未來發展趨勢

余祁暉

全球人口急遽成長，地球暖化日趨嚴重，永續發展成為顯學，使得植物資源的開發與應用，成為了21世紀解決糧食安全和能源安全的重要手段。其中，又以基因層次相關的平臺應用技術：基因改造技術(Genetic Modification)及分子標誌輔助技術(Marker Assisted Selection; MAS)二個育種技術為提升植物價值的主要關鍵。

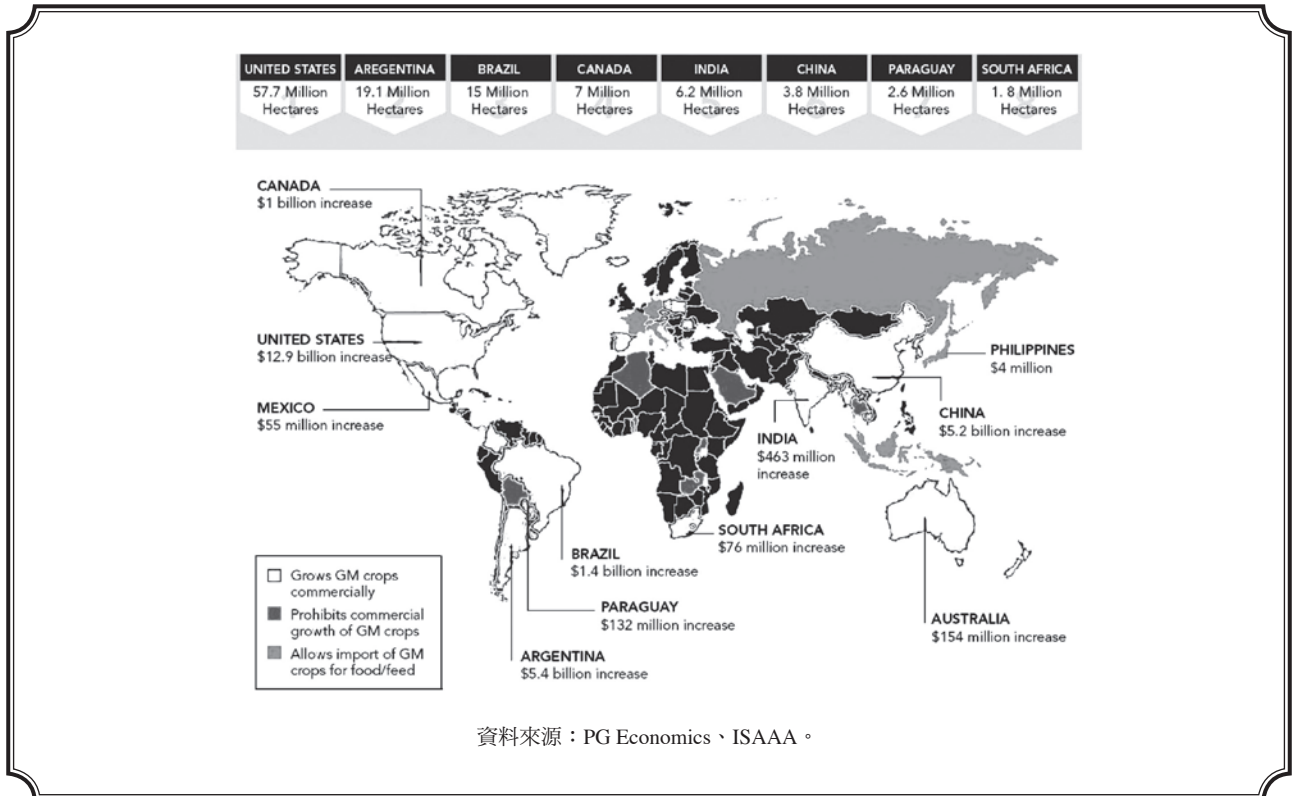
植物資源的應用起源於農業，因此植物生技目前以農作物、植病診斷和林業上的應用較為常見，但也由此衍生至製藥、機能性食品、能源及工業等，造成產業的量變與質變。

基改農作物具有解決糧食安全問題，又可衍生至醫療保健、能源和工業，所以ISAAA預估種植面積將會以每年10%成長，至2015年基改大豆與基改棉花仍將是發展重點作物。

植物生技於農業的發展現況

在農作物部分，面臨未來全球人口爆炸性成長、可耕地減少、氣候變遷加劇等因素，為滿足全體人類對糧食作物之需求，使用快速有效益的作物育種技術，必將成為未來農業上的主流趨勢。依聯合國農糧組織(FAO)統計，目前有88個國家進行約2,600個與作物有關的生技研究，其中36%是使用基改技術。且國際農業生物技術應用推廣協會(International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, ISAAA)指出，基改作物不但能增加產

圖1 全球基改作物發展概況及增加農民收益分析



量並降低成本，提高農民收益至少約268億美元（圖1），亦有增加農業管理彈性、減少農藥使用、提升產物品質等助益。

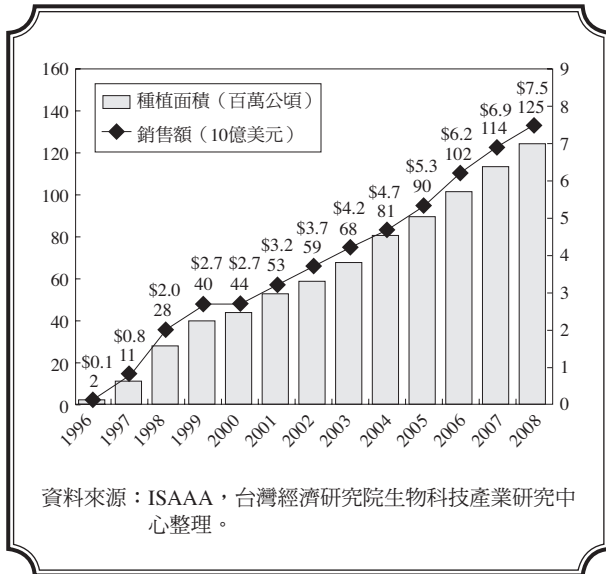
目前全球約一成的農地種植基改作物，依ISAAA統計，2008年底基改作物實際種植面積達1.25億公頃（圖2），年成長率9.4%，從基改種子上市以來已成長74倍。而市場規模達75億美元，年成長率8.7%，約占全球22%的商用種子市場，或全球14%的植物保護市場規模。估計2009年市場規模將提升至83億美元，年成長率超過10%。

基改作物要成功上市需經過嚴謹的開發程序，而各國不同產品法規的制定，也反應每個

國家對於基因改造種子的接受程度。2008年已有55個國家核准基因改造種子上市（圖1），而其中農民可在當地直接種植的有25國，顯示這些國家對於發展基因改造科技的態度最為積極；另外30國則只開放食品及飼料的使用及進口，相信在民眾普遍能接受基因改造作物之時，將成為第二波推升基因改造種子需求的助力。

全球基改作物種植以大豆、棉花、油菜及玉米等四種大宗作物，約占了全球基改植物種植面積的九成，其中以總體產值及全球種植面積來看，基改大豆皆為基因改造種子之最大宗，在2007年已占全球70%的大豆種子市場；其他

圖2 1996~2008年全球基改種子概況



基改作物如棉花、玉米和油菜則分別占該類種子市場銷售之46%、24%及20%。而統計至2009年10月（表1、表2），目前全球共種植了120種品系的基改作物，其所利用的基因性狀以耐除草劑以及抗蟲二種為主，共占了84%。

在林業部分，因林木生長週期長，且基因複雜度高，因此發展進程較農作物慢，性狀應用多延續作物已發展成熟的抗蟲和耐除草劑為主。開發中國家發展林業生技的情形，依FAO資料庫統計，非基改生技和基改技術的研究案數各為810件和46件，其中非基改生技以微體繁殖(micropropagation)技術為主，其占了51%，而GM林業研究以抗病蟲害為主，占了54%。目前除了2004年中國基改抗蟲楊樹商業種植外，其於多在研究階段，從2000~2007年全球約有387件基改樹種的田間試驗案，但與1987~2000年只有93件比較，相關研究成長幅度大。

而植物病蟲害檢測相關的生物技術發展，其

在減少農損部分扮演重要的角色，據估計農業病蟲害在2004年造成美國的農損金額約有330億美元，而以農業為重要經濟活動的開發中國家，因無法負擔植保支出，所以農損金額一定高於已開發國家。目前雖已有954種植物疾病可診斷，但多是以實驗室為主，需專業技術與設備才可完成診斷，無法在田間便完成即時診斷作業。

植物生技於農業的未來發展趨勢

因基改農作物具有解決糧食安全問題，又可衍生至醫療保健、能源和工業，所以ISAAA預估種植面積將會以每年10%成長，至2015年，基改大豆與基改棉花仍將是發展重點作物，但因中國、巴西和印度的玉米和油菜種植各占全球33%和50%，所以若其大規模採用基改技術，將可快速增加此二種作物的全球基改種植比例。

基因性狀應用趨勢則可從田間試驗案的申請情形，看出未來發展方向。依美國農業部動植物檢疫局(Animal and Plant Health Inspection Service, APHIS)田間試驗核准數（圖3），整體而言仍以抗殺草劑性狀為主，但市場主流在2005~2006年時，由抗殺草劑性狀轉為提升產品品質性狀（如保鮮熟控及提高營養成分等），而農藝性狀種子（提升產量及抗寒等）在此四年內則呈現穩定的成長，此兩類性狀在田間試驗的申請數在2007年累計超過1,000案，預計未來此二類性狀種子將會有更多產品上市。至於在2004年前的二大主流：耐除草劑性狀及抗蟲性狀，也因多種性狀整合之基改種子的發展，而在2007年產生田間試驗需求反彈，預計在此

表1 2008年全球基因改造作物栽種概況

	種植面積 (百萬公頃)	占全球基改作物 種植面積比率	種植面積 年增率	占全球該作物之比率	產值* (億美元)	產值/面積比* (美元/公頃)
大豆	65.8	53%	12%	70% (64%)	26	44.4
棉花	15.5	12%	3%	46% (43%)	9	60
玉米	37.3	30%	6%	24% (24%)	32	90.9
油菜	5.9	5%	7%	20% (20%)	2	36.4

注：1.括弧內為前一年資料。

2.*為2007年資料。

資料來源：ISAAA，台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

表2 全球種植基改作物之基因性狀分析

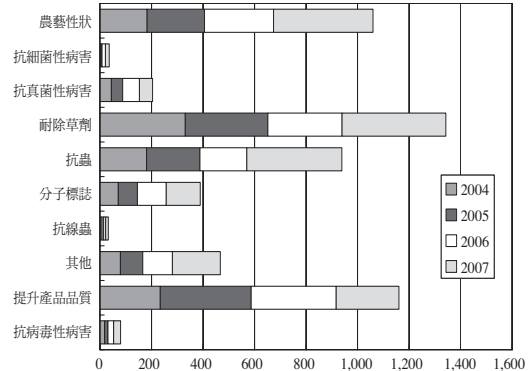
基因性狀	品系數
耐除草劑	45
耐除草劑+繁育控制	9
抗蟲	17
抗蟲+耐除草劑	27
抗蟲+抗病毒	2
抗蟲+成分改良/新增	1
抗病毒	5
成份改良/新增	6
延熟保鮮	6
花色	2

資料來源：Agbios，台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

趨勢下，任何的基因性狀應用未來都會結合此二種基因性狀，以強化農民生產效率，並滿足各方面的需求。

在未來，耐除草劑和抗蟲性狀將延伸至其他作物，如大麥、甜菜、花生、豌豆、馬鈴薯、稻米和紅花。而目前的主要基改作物也將在2010年有提升營養成分及農藝抗逆境性狀的商品化品種上市，預計2015年其他作物也將有相關性狀產品上市，如苜蓿、蘋果、棉花、高苳、馬鈴薯、稻米、蕃茄和小麥。值得一提的

圖3 APHIS基改種子田間試驗案核准數（性狀別）



資料來源：APHIS of USDA、台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

是中國在2009年底核准抗蟲基因水稻的轉基因生物安全證書（生產應用），因此其將繼全球第一個商業化種植基改植物的國家（1992年首先大量種植基改抗病毒菸草）後，再次成為第一個商業化種植主食作物的國家。

而從各國政府對基改種子發展的態度來看，G8高峰會（附注）、歐盟和世界衛生組織(WHO)皆對外聲明基因改造技術對於解決糧食危機的重要性，而開發中國家的中國、印度、阿根廷、巴西和南非，更展現其積極發展的態

度，未來將成為引導全球使用基改種子的五個主要國家。此五國人口共26億，占全球人口40%，且其中有13億人口依賴農業為生，面對貧瘠的土地和資源，透過基因改造科技可以快速強化其農業發展。其中，中國、巴西和印度三國政府投入基改研究相當積極，分別每年投入6億、5億和1億美元。

在林業部分，抗蟲的基因性狀應用仍是最主要的開發方向，但主要林業國家，如加拿大和紐西蘭，為避開基改林木之生物安全疑慮，將以分子標誌輔助技術為主要發展方向。而預計在2012年將有生長快速的基改樹種上市，2015年也會用於造紙和生質酒精的低木質素基改樹種上市。除此之外，因熱帶和亞熱帶的林木栽種效率較好，所以也會朝向發展可於熱帶生長的基改溫帶林木，並以生長較快的松樹和桉樹為主要開發對象。

而在植物病蟲害檢測領域，使用基因晶片診斷疾病的成本和技術門檻仍相當高，但預計在2015年將有主要作物的多疾病診斷基因晶片上市。

一般預期利用植物生產蛋白質可以降低藥物製造成本，惟業界考量優點與風險後，大抵朝向開發動物疫苗、小眾的孤兒藥及生技學名藥等開發時程較短、研發經費較低的項目，以加快植物生產藥物上市的腳步。

植物生技應用於醫療保健產業的發展現況與未來發展趨勢

為了有效生產蛋白質藥物、酵素、飼料添

加劑、抗原、抗體等物質，已經有多種蛋白質表現平臺經被開發利用，例如大腸桿菌、酵母菌表現平臺、動物細胞表現平臺等。若考量到蛋白質修飾的影響，雖以動物細胞表現系統較佳，但動物細胞培養及基轉動物的成本高，產能擴充性較低，且隱藏著傳播人畜共通傳染病的風險，因此植物成為新的蛋白質生產工廠開發標的。其中以美國的發展最為積極，該國防先進研究計畫署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)於2009年投入1,200億美元發展植物製藥平臺。而相對於發酵槽等工廠硬體設備，植物被認為具有產能調整的便利性，可以隨著需求擴大與減少栽種，而且種子本身亦為良好的儲存工具，便於運輸。目前相關的產品開發簡述如下：

1. 新城雞瘟(Newcastle disease)疫苗

美國Dow Agrosciences以基因改造菸草細胞生產新城雞瘟病毒的HN蛋白質，已於2006年1月通過美國農業部(USDA)核准，為全球第一個基因改造植物細胞技術所產生的動物疫苗。

2. 抗HepB表面抗原抗體

古巴遺傳工程與生物技術中心(Center for Genetic Engineering and Biotechnology Center)利用基因改造菸草製造單株抗體，用於純化B型肝炎疫苗Heberbiovac-HB的活性物質(active pharmaceutical ingredient, API)，但該抗體本身不作為藥物或疫苗使用，已於2006年獲得古巴藥品質量控制中心(CECMED)及生物安全中心核准。

3. 葡萄糖腦甘脂酵素(glucoocerebrosidase)

以色列Protalix Biotherapeutics公司運用其ProCellEx™蛋白質表現系統，於胡蘿蔔細胞

中表現人類葡萄糖腦苷脂酵素，將用於治療高雪氏症(gaucher disease)。由於該藥物適應症經美國食品暨藥品管理局(FDA)認可為孤兒藥，因此該計畫不需進行臨床二期試驗，直接進入臨床三期試驗。目前該計畫於臨床三期試驗階段，且呈現正面試驗結果。

4.人類胰島素

加拿大SemBioSys公司利用基因轉殖紅花(safflower)生產人類胰島素，目前仍處於臨床前試驗階段，但美國FDA已通過其適用505(b)(2)非新成分新藥產品審查規範，將可縮短臨床試驗期程。

一般預期利用植物生產蛋白質可以降低藥物製造成本，然而，如果是基改植物生產，則需符合各國的生物安全規範，加上為了去除酚類化合物(phenolic compounds)、色素等植物特殊物質，純化製程亦為關鍵步驟，這些要求都會使成本增加。此外，植物特殊的醣基化(glycosylation)可能引發人類過敏，未來則需利用基因工程克服此困難。綜合考量上述之優點與風險，業界朝向開發動物疫苗、小眾的孤兒藥及生技學名藥(follow-on biologics, biosimilars)等開發時程較短、研發經費較低的項目，以加快植物生產藥物上市的腳步。

而在機能性食品發展中，利用基改技術可增加植物中的營養成分，如omega-3等，但嚴謹的基改產品法規規範，使得以植物生技取得營養物質的成本仍高於傳統模式，但預計在2012~2015年間仍有以高營養為訴求的基改作物上市。除此之外，開發中國家因主食較已開發國家集中，因此較具成本效益發展基改機能性食品，預計在政策的支持下，2015年將有增加

維他命A、E、葉酸、鐵、鈣或高蛋白的基改主食作物上市。

植物生技於工業的發展現況與未來發展趨勢

透過基改技術可增加特定植物中生物聚合物(biopolymer)之產量，開發出具環保功能的生物材料，2008年已利用柳枝稷(switchgrass)生產出占其植物總重3.7%的PHB聚脂，但仍需提升至總重的5%才具有生產效益。而生物聚合物的發展受限於生物質(biomass)相對於原油的價格優勢，但在永續發展的觀點上，政策將獎勵以廢棄型生物質和非食用作物為主的植物生技研發。

植物生技在生質能源的應用仍少，雖全球生質能源的專利數由2002年的147件成長到2007年的1,045件，但與植物生技相關者在2006年和2007年則各只有59件和51件。目前基改相關研究仍以大宗糧食作物提升其油脂或澱粉等含量為主，應用於大豆、油菜、玉米、小麥等作物，分別占其田間試驗總數21%、19%、3%及2%。而以基改技術減少林木及草中的木質素以提升纖維性酒精的生產效率的研究仍不多，現階段降低木質素含量的研究多應用於非能源領域，如造紙。未來以非食用及非農地種植的植物，如林木及草，最具發展前景，目前印度和中國分別以麻瘋樹和甜高粱發展生質能源，其易栽種的特性，預計在2012年將開發完成，而在2015年也將有用於生質能源的低木質素基改桉樹和松樹上市。

基因改造技術的發展，儘管在法規的重重限制下，仍持續有產品上市，這代表著其對於育種效率之提升及跨物種的功能應用，極具「農業升級」和「植物工廠」跨領域發展之潛力，

表3 OECD預測2015生物科技運用於農業發展——植物

技術領域	目前現況	2015年發展預測
植物新品種	從1996年開始，基改作物已經在全球24個國家種植，主要為大豆、棉花、玉米及油菜。有超過75%的品種包含耐除草劑或抗蟲的性狀，此外非基改生物技術也廣泛應用在各類作物上	到2015年預估全球有將近一半的作物生產會運用到生物技術。除了四個主要基改作物之外，增產、抗逆境及品質改善等性狀也會出現在其他作物上，例如稻米、小麥、馬鈴薯、蕃茄……等；分子標誌輔助技術(Marker Assisted Selection)會被廣泛應用，並開發其他商業化之非基改作物；一些新的基改樹種也開始商業化生產
植物病理診斷	目前在已開發國家有上百種處於實驗室階段的植物診斷技術，大多用於植物疾病預防；24小時即時診斷技術目前僅能應用在單一病原體診斷	運用基因晶片之低成本、即時且多病原體同時診斷技術已經可以在田間使用，而此技術並可應用於大量之植物病原體，且可應用於重要之商業化作物中

資料來源：OECD、台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

而分子標誌輔助技術，則可大大縮短傳統育種的時程，因此二者將是未來植物生技的發展主軸（表3）。在產業發展上，平臺技術的跨產業應用需將相關產業鏈進行整合，如纖維素酒精在上游農業的特用植物品種開發，要能和中下游工業的微生物酵素研發整合，唯有產業發展模式配合改變重新組合，未來植物生技產業才會有更突破性的發展。而對於以農立國的台灣來說，深厚的農業技術研究基礎，如何與先進的植物生技更密切結合，以建立高科技農業實力，將是未來台灣能否在全球植物生技產業中占有一席之地的重要關鍵。■

（作者為台灣經濟研究院助理研究員）

■ 注釋

八國集團高峰會，包括美國、日本、德國、法國、英國、義大利、加拿大和俄羅斯，2008年7月於日本北海道召開。

■ 參考文獻

- 1.AGBIOS. From www.agbios.com
- 2.APHIS. From www.aphis.usda.gov
- 3.Burrill & Company (2009) *Biotech 2009: Life Sciences Navigating the Sea Change*, Burrill Life Science Media Group LLC: USA.
- 4.FAO. From www.fao.org
- 5.ISAAA. From www.isaaa.org
- 6.OECE(2009) *The Bioeconomy to 2030*, Ch3~4, Organization for Economic Co-operation and Development: Paris.
- 7.OECD. From www.oecd.org
- 8.USDA. From www.usda.gov
- 9.“全球農業生技產業趨勢分析—代表性個案研究”，台灣經濟研究院。
- 10.余祁暉(2009)，“全球農業生技產業發展現況與趨勢”，*農業生技產業季刊*，第17期，頁1~11。
- 11.許嘉伊(2009)，“2009全球農業生技年會”，*農業生技產業季刊*，第20期，頁77~84。
- 12.農業生技產業資訊網，From agbio.coa.gov.tw。