4

封面故事

育種輔以遺傳工程技術是好是壞？
基改作物的應許和反思

Take Home Message

- 基因轉殖作物從 1996 年開始在全球大面積種植，這些作物的主要特性為抗除草劑與抗蟲，占 99.9%。
- 基因轉殖作物被認為能抗逆境、增加產量、減少農藥等；但不僅缺乏實證，還發生「超級害蟲」、「超級雜草」等各種面向的爭議。
- 基因編輯作物逐漸上市，但有論文指出基因編輯可能產生預料外的其他改變，需要加以審查及評估風險。

郭華仁
臺灣大學農藝學系
名譽教授。

傳統育種創造出琳琅滿目的品種，對近代農業發展有很大貢獻。在 1990 年代以後，若干傳統育種輔以分子生物科技，包括分子輔助選種以及基因改造技術（簡稱基改技術）等。

基改技術採用遺傳工程（genetic engineering），將外來基因轉殖進入受體產生基因重組，結果通常會使受體表現出外來基因的特性，或者關掉受體的某個基因，使該基因特性無法表現。此新受體稱為基因改造生物，簡稱基改生物（genetically modified organism, GMO）。

第一代基改生物從 1970 年代開始以基因轉殖技術製造，至今仍在進行。第二代基改生物約從 2010 年開始製造，程序是先進行基因轉殖，轉殖基因在受體內形成修剪工具，以此工具處理受體的特定基因，稱為基因編輯；編輯結束後常把轉殖時帶進來的基因剃除，因此受體內可能不會帶有外來的基因。第一代可以簡稱為基轉基改，第二代則為基編基改。

第一個基改生物是1973 年轉殖入抗生素基因的大腸桿菌（*Escherichia coli*）；到了1982 年，美國食品藥物管理局（U.S. Food and Drug Administration, FDA）核准上市基改大腸桿菌合成的人類胰島素，目前已有不少基改菌用來製造藥物。此外，食品工業上的應用也很廣泛，主要由基改菌生產酵素進行食品加工，製作麵粉食品、乳製品、穀類飲料等，有些基改菌則可直接產生各類食品添加物。

第一個基改動物是 1974 年製造的基改鼠，之後有關基轉基改動物的研發雖然不少，但真正上市者較少，目前只有美國、加拿大兩國核准基改鮭魚、美國核准基改螢光魚的販售。日本近一兩年則上市了基編基改的鯛與河豚。

不過在基改生物中，目前以農作物的應用最廣，因此本文針對基改農作物加以討論。

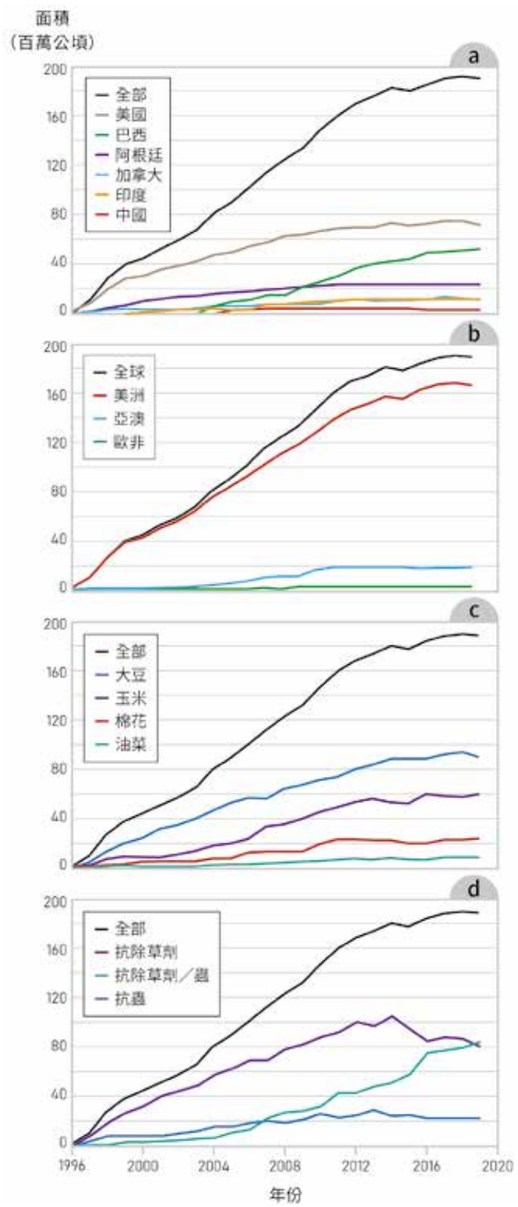
第一代基改作物的進展與現況

約從1996 年開始，全球大面積種植基轉基改作物。雖然一開始只有美國、加拿大、阿根廷三國生產，但後來許多國家陸續加入，至 2019 年總面積已達 1.9 億公頃。全球有 29 個國家在種植，而美國、巴西、阿根廷、加拿大、印度這前五大國就占了基改總面積的 90.8%（圖一 a）。若以地理區分，則是美洲最多，占 88.2%，亞澳與歐非僅占 10.2 與 1.6% （圖一 b）。

在去（2022）年10月，全球共有388 個基改品項得到某些國家的核准生產，品項最多的依次為玉米、棉花、大豆、油菜籽，分別占 34.8、14.7、10.3、10.1%，其餘 26 種作物者合計約 29.3%。這 388 個轉殖品項的特性以忍受除草劑及抵抗害蟲為主，合計占 71.8%。其他六類特性僅有 28.2%，分別為改變品質、控制授粉、抵抗病菌、忍受環境逆境、改變生長特性、抵抗線蟲等。

不過在實際生產的面積方面，在 2019 年以大豆、玉米、棉花、油菜為最大宗，分別占 48.3、32、13.5、5.3%，合計 99.1%（圖一 c）。而忍受除草劑作物占了 42.8%，抗蟲 12.5%，兩者兼具的有

圖一｜第一代基改作物的全球生產概況



（資料來源：ISAAA, https://www.isaaa.org/）

44.7%（圖一 d）；整體而言，全球基改作物最主要的轉殖特性就是抗除草劑與抗蟲兩類，占了 99.9%。

前述的基改作物品項如此龐大，到底是誰在研發？全球 70 個機構中，五大跨國農藥公司就占了 74%，其中孟山都（Monsanto）一家公司就占了 42%，其他依次為先正達（Syngenta）、拜耳（Bayer）、杜邦（DuPont）、巴斯夫（BASF）與道禮（Dow）。這些公司掌控了基改技術專利、基改種子、除草劑市場，可說是最大的贏家。

第一代基改作物的應許與爭議

這些公司或某些從事基改育種的學者認為，基轉基改作物有諸多好處，例如：一、可以對抗氣候變遷、提高產量，解決世界飢餓問題；二、可以減少農藥使用，解決環境問題；三、可以提高營養成分，解決營養不良問題。對於外界的疑慮，則稱基改作物可安心食用，並未聽聞有人吃基改食品生病、死亡，且基改食品經過政府審核，因此它的安全無虞。

不過 20 多年來全球種植基改作物的經驗告訴我們，對於上述的說法需要加以保留。

首先，關於基改作物的抗逆境，在五大公司所研發的眾多基改品項中，只有一項是耐旱的作物；而且美國農業部（United States Department of Agriculture, USDA）發布的訊息指出，這項作物的耐旱能力並不突出。在氣候變遷下耐旱特性是育種目標的重點，若基改技術真的有用，他們不會只推出一個沒效果的品項。

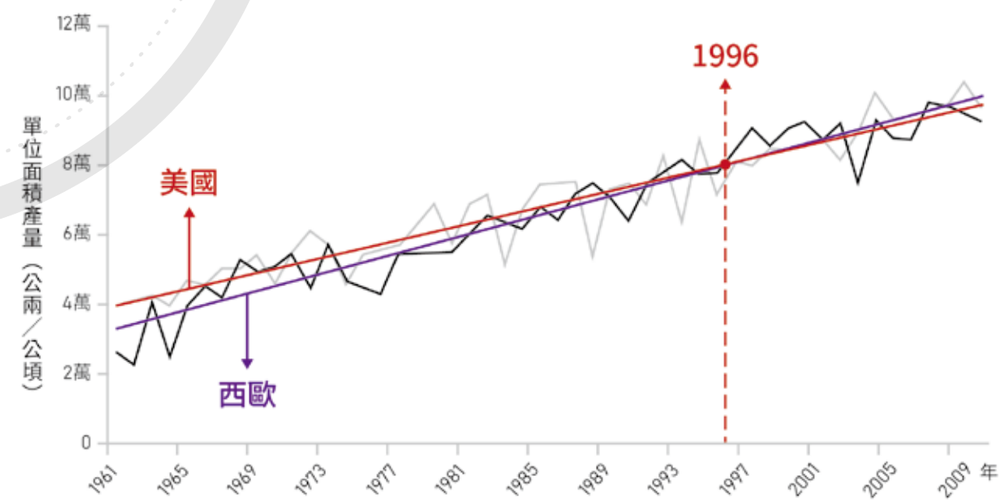
至於提高產量的問題，美國從 1996 年開始種基作物之後，玉米單位面積產量逐年增加（圖二），看似來自基改品項的貢獻。然而美國玉米產量早在 1996 年之前就一直在提升；而沒有種植基改玉米的西歐，早年的生產力還差美國一大截，但生產力仍然逐年增加，到了 2009 年已與美國並駕齊驅了。

實際上玉米生產力的提升向來都貢獻自傳統育種，基改玉米品項製造出來之後，還要用傳統育種的回交技術，將轉殖基因移入當時最高產的傳統品種，然後上市，所以傳統育種才是美國 1996 年之後產量提升的真正原因。針對玉米、大豆、油菜的比較也有類似的結果，歐洲非基改甜菜的增產率反而遠高於美國的基改甜菜。

關於節省用藥的好處，的確在抗蟲基改作物的本意是轉殖抗蟲毒蛋白基因到作物身上，使作物整株都含有抗蟲毒蛋白，並希望能夠取代農藥。剛開始確實如此，但是在若干年後卻出現了能抵禦抗蟲毒蛋白的「超級害蟲」，農家仍需要使用農藥。再者，抗蟲毒蛋白對害蟲有選擇性，基改作物初期控制了主要害蟲，次要害蟲就藉機竄升成為新主要害蟲，仍舊不能避免殺蟲農藥的使用。中國種植抗蟲基改棉，導致次要害蟲數量與種類急劇增加，反而危害到該國北方數百萬甲的農田，結果農藥用得更多。

圖二｜西歐與美國在 1961～2009 年玉米單位面積產量的變遷（資料來源：Heinemann et al., 2014）

紫線是未種基改的西歐國家，美國則是從 1996 年開始逐漸種基改玉米。



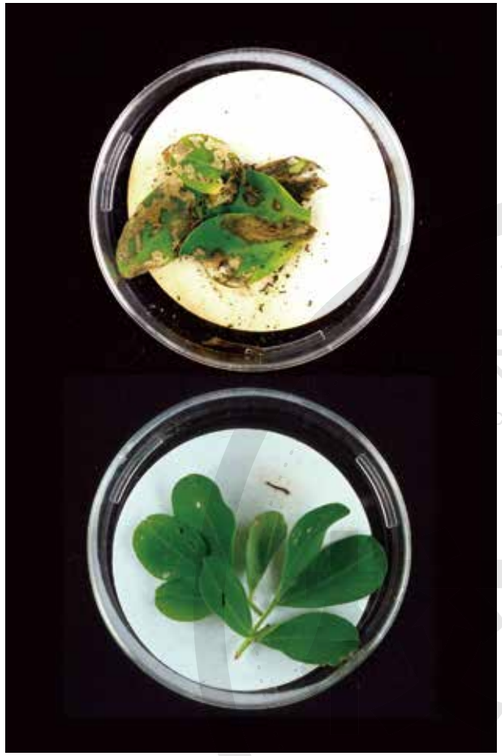
科學月刊 SCIENCE MONTHLY 校對稿

尤有甚者，全球所種的基改作物超過 85%都可以忍受除草劑，意味著除草劑的使用反而會更多。幾年過去，雜草演化出不怕除草劑的「超級雜草」，迫使基改公司推出可以忍受兩種除草劑的基改種子；種植之後，農家需要噴撒兩種除草劑，還惹出大規模傷害鄰田非基改田區的事件。因此整體而言，種植基改作物反而會增加農藥的使用量，對環境更不友善。

在提升營養成分方面，最受矚目的是基改黃金米。這個品項在 2000 年登上《時代》（*Time*）雜誌封面，指出提高米粒胡蘿蔔素含量，可以解決貧國兒童維生素 A 不足的問題。然而直到 2021 年，菲律賓才核可種植基改黃金米；美國雖然准予食用，但仍未開放生產。造成這種情況的問題在於基改黃金米品種的產量低落，使得農民種植意願不高，而且收割一個月後，稻穀裡的胡蘿蔔素含量將急遽下降，對於缺乏冷藏設備的貧困國家而言並沒有解決問題。

杜邦公司透過基改方法提升大豆內含的甲硫胺酸（methionine）含量，卻發現該基改大豆會導致人體的過敏反應，因此不惜龐大的投資，鐵腕中斷研發。這例子告訴我們，基改作物可能有健康問題。雖然政府的把關或許可以排除具有立即風險的基改產品，不過若當初該基改大豆的過敏原含量低到皮下注射測試時檢驗不出因而上市，難保日子一久，對部分消費者仍然會有誘發過敏的可能。

上述案例表示各國政府的基改食品把關有各自的盲點，《改造的基因，扭曲的真相》（*Altered Gene, Twisted Truth*）這本書詳細紀錄了美國政府如何在大公司與部分學者的影響下，訂立了相當寬鬆的基改管理規範。由於政府的審查無法盡釋長期健康的疑慮，因此許多國家都規定，縱使通過安全審核，基改食品上市後仍然需要標示，讓消費者自行選擇要不要購買。



抗蟲基改作物將轉殖抗蟲毒蛋白基因到作物身上，使作物整株都含有抗蟲毒蛋白，並希望能夠取代農藥。（Agricultural Research Service, public domain, Wikimedia Commons）

基改作物推出至今，實際上得利最大的是各大農藥公司，那麼農民為何要種植基改種子呢？對美洲大農制的農民而言，作物生長過程中可以在空中灑除草劑來除去雜草，而不會傷害到基改作物，因此有它的方便之處。另一個原因是多數販賣非基改種子的中小型種子公司早已被那幾家大公司購併而停止生產，使得農民幾乎無從選擇。

對於基改作物應許的更多反思，可以參考引用龐大科學證據的專書《基改迷思與真相》（*GMO Myths and Truths*）。

第二代基因編輯新技術下的基改作物

近十多年來基因編輯技術相繼出現，目前以 CRISPR-Cas9 最受普遍採用。上市迄今，受到矚目的基因編輯產品只有美國高油酸大豆與日本高 GABA 番茄，但是從 2016 年開始，已有不少產品排在生產線上，相信會逐漸上市。

國內外部分生物技術學者認為基因編輯的研發時間較短，有助於減緩氣候變遷對於農業的影響，乃至於提高產量。但這些理由還是延續第一代基轉基改的說法，會經不起科學的挑戰。

前文提到，基轉基改的種植迄今已 25 年，但並未見到有基因轉殖作物本身提高產量、抗旱耐澇的成功案例，這是因為攸關農作物產量或者抵抗環境逆境的能力是綜合許多特性的作用而成，背後的基因數目相當龐大；況且各種特性間可能互相排斥，提高一個特性或許會降低某特性的表現，而抵銷效果，使得轉殖外來相關基因的效果不彰。那麼用基因編輯技術改變本身幾個基因，就想成功，那還是畫餅充饑罷了。反之，傳統育種透過田間產量或者抗逆境能力的綜合表現直接選拔，一點一滴地逐漸改善，已育成不少高產、抗旱、耐淹、耐鹽、抗病蟲害的品種，而這樣的改進，仍然持續進行中。

至於安全性的問題，由於產品剛上市不久，因此還沒能看到產品的健康風險研究報告，然而已有相當多論文指出，基因編輯並非模仿自然程序，而是採用遺傳工程直接干擾整個基因組，藉此改變 DNA；因此所謂基因編輯只改變某特定的基因，實則預料外的其他改變也很多，這包括：一、目標基因若有多重表現（one gene, multiple proteins），編輯目標內的基因可能產生目的蛋白質以外的其他改變；二、目標外的基因也可能被編輯而產生意料外的後果；三、除了 DNA 本身的修改，也可能導致表觀遺傳改變（epigenetic modification）而發生意料外的變化；四、基因編輯可能引發染色體碎裂，乃至於導致整條染色體消失；五、成品還是有機會含外源基因，包括抗抗生素基因等。

這些意料外的改變將可能影響農作物的蛋白質與生化組成，或許會產生毒素或致敏物，因此將基因編輯說成「只改變單一基因，相當精準」實在不夠嚴謹。這些意料外的改變對健康與環境到底有沒有什麼風險，當然需要視為基因改造而加以審查。

總之，不論是第一代的基因轉殖，或則第二代的基因轉殖加上基因編輯，兩者都可能具健康與環境風險，因此都需要通過風險評估後才能上市。上市時也應標示，讓消費者有所選擇。至於國家政策要不要發展基改作物育種，除了技術層面外，還需要考慮到國內外市場需求、研發經費的機會成本、技術專利的陷阱等因素，才能作出妥善政策。