

第十九章 評估基因轉殖植物對環境的衝擊及其管理

徐慈鴻 李國欽

行政院農委會農業藥物毒物試驗所

一、前言

基因轉殖植物簡單的說即是利用基因工程技術將任何生物（包括動物、植物及微生物）的基因轉移入植物的染色體中，經過基因重組過程後，會使接受轉移之植物表現此基因所調控的功能性狀。已田間種植或商業化之基因轉殖植物，依性狀可分為抗蟲、耐除草劑、抗病毒、延遲老化及軟化、雄株不育、生育恢復、花色改變及脂肪酸成分改變等種類。根據 ISAAA（International Service for the Acquisition Agri-Biotech Application）統計（James, 2003），全球總種植面積在 2003 年時達到 67.7 百萬公頃，較 1996 年（1.7 公頃）之種植面積增加近 40 倍之多，增長極為快速；此外，研發之性狀範圍亦擴增至抗真菌、抗細菌、抗線蟲、耐鹽分、耐旱、改變胺基酸含量、改變碳水化合物代謝作用或者利用基因轉殖植物生產藥用蛋白等（Environmental release of GMOs 2004；Information Systems for Biotechnology 2004），預期基因轉殖作物之種植面積會持續增加且種類會更具多樣性。

儘管基因轉殖植物蓬勃發展，但這種越過長期物種演化的過程而產生的新品種，在自然界是不可能發生的，因此人們對這些有異於傳統育種方式而產生的基因重組植物釋入環境後到底會發生什麼問題充滿疑慮。為澄清這些疑慮，世界主要已開發國家及部份開發中國家都已制定了對基因轉殖生物的管理法規，以期在上市前進行必要的安全評估工作。環觀各國所訂定之管理法，所考慮者不外乎二大方向：一是作為食品之安全性評估；二是對環境衝擊之風險評估（徐等, 2003；Kuiper *et al.*, 2001；Nap *et al.*, 2003）。食品安全性評估主要根據"實質等同（substantial equivalence）"的原則，比較"基因轉殖植物及相關產品"與"非轉殖母本植物及相關產品"間之差異性，除不同植物關鍵營養成分分析項目尚無國際通則外，包括毒理學毒性測試方法及過敏試驗測試皆已有國際公認之試驗規範可循，基因轉殖植物之食品安全評估應無地域環境上的差異，而基因轉殖植物對環境衝擊之風險評估則有地域上之差異（徐等, 2003；Tiedje *et al.*, 1989）。環境影響評估之主要目的是在比較"基因轉殖植物"與"非轉殖母本植物"對環境影響之差異性，考

慮的項目包括有基因轉殖植物對環境中非目標生物之影響、外源基因（exogenous gene，原本不屬於受體植物基因組之基因或去氧核糖核酸（DNA）片段）流佈時對近緣植物之影響以及基因轉殖植物野化為雜草的可能性等。本文之目的在瞭解各國有關基因轉殖植物對生態環境的可能影響（風險評估），謀求因應之道，並建立完善的基因轉殖植物風險管理系統，以期對我國農業生物科技產業具有積極正面之影響。

二、基因轉殖植物對環境的安全性評估

基因轉殖植物沒有經過長期之演化而完全是由人工製造的新物種，這些新物種釋放至環境後是否會對生態環境產生衝擊是眾所關切的問題。各國的管理法對這方面皆有明確的規定以澄清疑慮。這些疑慮粗略來分可分為三方面來說明：基因轉殖植物是否會對環境中非目標生物族群產生衝擊；基因轉殖植物是否有野化為雜草（weedness）的可能性；基因轉殖植物所殖入之外源基因是否會流佈（gene flow）到其他生物體而造成非預期的效應發生（徐等,2003；Conner *et al.*, 2003；Hails, 2000；Rissel and Mellon, 1996）。

（一）基因轉殖植物對非目標生物族群的影響

廣義地說"基因轉殖植物對環境中非目標生物族群之衝擊"包括基因轉殖植物本身（直接效應）或者種植基因轉殖植物伴隨的耕作過程改變（間接效應）而產生對種植區內以及種植區周邊其他生物產生非預期的不利效應（adverse effects）。以抗蟲基因轉殖植物（將源自蘇力菌 *Bacillus thuringiensis* 的殺蟲結晶毒蛋白基因轉殖入植物體內，使植物本身能產生的殺蟲毒蛋白，因而具有抗蟲的特性，或稱為 *Bt* 基因轉殖植物）為例，*Bt* 轉殖植物所產生的內毒素除了能消滅目標害蟲外，有可能同時殺死同類的有益昆蟲或其他非（其他）目標昆蟲，一旦殺蟲過程無法控制時，則可能影響以這些害蟲為生的天敵（如其他昆蟲和鳥類）數量降低，進而破壞生態平衡及生物多樣性。在耐除草劑基因轉殖植物對環境的影響方面，由於除草劑本身對於昆蟲、動物之毒性低，因此耐除草劑基因轉殖植物本身對非目標生物族群並無直接效應，但是伴隨耐除草劑作物田耕作管理方式的改變（如藥劑使用種類及噴施方式）則會引發間接效應，包括因為田間草類種類及數量的減少並影響以這些草類植物為食物或遮蔽處所之其他昆蟲及動物族群之生存，進而導致鳥類的食源減少，最終影響生物多樣性（Conner *et al.*, 2003；Kinderlerer, 2001）。

評估基因轉殖植物對非目標生物族群之衝擊主要根據「生物農藥」的評估方式進行，但所考量的生物種類及範圍更廣，評估的資料及步驟依其先後次序可分為三個階段（AGBIOS 2003；EPA 2001；Kinderlerer, 2001）：

1. 第一階段（Tier 1）

確認對非目標生物可能產生的影響（Identification of possible effects on non-target organisms）：這個階段至少要列舉並討論出該基因轉殖植物在其釋放的環境中有那些族群種類會受到新植物成分所影響或者因為基因轉殖植物之存在而迫使其改變習性，這些非目標生物包括其他植物種類、傳送花粉者（pollinators）、腐生者（detritivores）、草食者（herbivores）、肉食者（predators）等，並探討有無排除這些影響的可能，一旦無法排除這些非目標生物受到影響則需進行第二階段工作（Christian *et al.*, 1999）。

2. 第二階段（Tier 2）

評估非目標生物的效應（Assessment of effects on non-target organisms）：評估時要盡可能的以生態的角度來執行評估試驗，需要考量物種的選擇（choice of species）、暴露的狀態（exposure conditions）及選擇試驗結束點（end-point）等因素，進行此階段的試驗所供試之非目標生物需包括：草食者、花粉傳遞者（蜜蜂）、腐生者、微生物族群及其他植物族群等，這些非目標生物族群可能會因為基因轉殖植物的入侵而被改變，並進而影響生物多樣性，此外另一種形式的直接影響如種植雄不稔的基因轉殖植物，由於不會產生花粉因此直接影響花粉傳遞者的食源，而間接效應影響的層次則擴及食物鏈的改變，如前面所述種植耐除草劑基因轉殖植物時所引發的一連串生物物種及族群的改變。在進行試驗前對該基因轉殖植物要釋放的環境中非目標生物の種類及族群等基本資料必須要徹底掌握，此等資料會因釋放的環境而有所差異。本階段之試驗評估主要在生長箱、試驗室或溫室中針對個別族群進行。

對於基因轉殖植物對非目標生物的直接效應評估，該如何選擇並進行相關試驗則根據：(1)基因轉殖植物所攜帶外源基因的作用方式及在植體所表現的部位（在根、葉、花、種子或者整株植物）。(2)有毒化合物的分佈及其物種專一性，如果外源基因本身涉及抗病、抗蟲、增加剋他物質的活性（increased allelopathic activity），則必須確認並建立這些外源基因產物的專一性及所影響的物種類別，因為在其他非農業生態的環境中這些受影響之物種可能非常重要。一旦這些非目標生物在試驗中出現異常行為則需進一步進行田間試驗。（王等, 2002；Christian *et al.*, 1999；Kinderlerer, 2001）。

有關測試物種的選擇常因個案而不同，以 *Bt* 基因轉殖植物為例，歐盟及美、加等國皆根據"生物農藥"的測試原則來規範，首先要了解這些 *Bt* 毒蛋白在基因轉殖植物各器官的含量範圍，通常這部份的資料也會因為個案而有所差異。關於試驗結束點 (end point) 的選擇則依所試驗的非目標生物物種而定，而試驗物種選擇的種類則需包括 (Christian *et al.*, 1999 ; EPA 2001 ; Kinderlerer, 2001) :

- (1) 鳥類試驗：14 天至 28 天齡的幼鳥毒性試驗 (如 young bobwhite quail 或 mallard duck) 。
 - (2) 水生動物試驗：包含魚毒 (國外以 rainbow trout、coho salmon、bluegill sunfish 等寒帶及溫帶魚類) 及水蚤 (*Daphnia*) 試驗。主要考量 *Bt* 轉基因水生植物 (如水稻，中國農科院發展的抗螟蟲水稻已進入環境釋放階段) 及鄰近水體的基因轉殖作物田對水生生物之影響。
 - (3) 非目標昆蟲試驗：選擇可能接觸到基因轉殖植物毒蛋白的肉食性及寄生性昆蟲種類，另外也要選擇與目標昆蟲系統發育相近的 (phylogenetic proximity) 非目標昆蟲種類進行評估。此外很重要的是要評估有益昆蟲如花粉傳遞昆蟲 (蜜蜂) 所受到的影響，試驗之昆蟲除蜜蜂外，還需要挑出 3 種昆蟲能代表以下至少二類 parasitic dipterans (寄生雙翅目類)、predaceous hemipterans (肉食半翅目類)、predaceous coleopterans (肉食鞘翅目類)、predaceous mites (捕植蟎類)、predaceous neuropterans (捕食脈翅目類) 及 parasitic hymenopterans (寄生膜翅目類) 的昆蟲族群。
 - (4) 無脊椎動物試驗：評估基因轉殖植物殘株長時間的存在土壤中，對無脊椎動物可能的影響，以蚯蚓或跳蟲 (*collembola*) 作為試驗對象。
3. 第三階段 (Tier 3)

對非目標生物族群影響的田間試驗 (measures of effects on non-target organisms in the field) : 針對第二階段試驗結果，對基因轉殖植物的反應具明顯族群差異的各類非目標生物進行田間試驗評估。以昆蟲為例，進行此階段試驗時，採樣必須調整成所關注的昆蟲種類、其互補 (supplementary) 昆蟲種類，當然也包括其他有相同功能族群的昆蟲種類 (other species of the same functional group)。對植物的非目標效應也需要進行田間試驗評估，此部份的試驗可以設計包含在下節所述之入侵試驗中 (invasiveness) (Christian *et al.* 1999) 。

表一、植物野化爲雜草潛勢的判斷特徵。(Baker, 1974)

Ideal weed characteristics
1. Germination requirements fulfilled in a broad range of habitats
2. Discontinuous germination (internally controlled) and great longevity of seeds
3. Rapid growth through vegetative phase to flowering
4. Continuous seed production for as long as growing conditions permit
5. Self-compatible but not completely autogamous ¹⁾ or apomictic ²⁾
6. When cross-pollinated, unspecialized visitors or wind utilized
7. Very high seed output in favorable environmental circumstances
8. Produces some seed in wide range of environmental conditions; tolerant and plastic
9. Has adaptations for short- and long-distance dispersal
10. If a perennial, vigorous vegetative reproduction or regeneration from fragments
11. If a perennial, brittleness ³⁾ , so not easily drawn from ground
12. Has ability to compete inter specifically by special means (rosette, choking growth, allelochemicals)

1) Autogamous plants are plants where all seeds are always the result of selfing

2) Apomicts are plants that require pollination to trigger embryo formation, but there is no actual fusion of gametes. The embryo is a clone from the mother plant.

3) Brittle plants are vulnerable plants, that, when drawn from the ground, break in such a way that the roots remain in the soil.

(二) 基因轉殖植物野化 (weediness) 可能性的風險評估

雜草 (weed) 的定義，根據美國雜草科學學會 (WSSA, The Weed Science Society of America) 的定義雜草是人類不想要但卻分佈廣泛的植物，這些植物會入侵佔領耕地及非耕地 (如國家公園、水域、野生動植物棲息地)，干擾人類的活動、降低農作物產量及影響野生動植物之生存，進而造成經濟損失、破壞生態環境等。

Baker 提出 12 項特徵作爲判斷某種植物是否有變成雜草的潛勢 (表一) (Baker, 1974)。當一種植物被引入新的棲息地時，能持續的在棲息地生存繁衍繼而逐漸改變或者入侵其他的棲息地，則該植物就有變成雜草的風險，因此透過持續存在性 (persistence) 及入侵性 (invasiveness) 兩種策略，植物有可能在棲息地成爲雜草 (Rissel and Mellon, 1996)。

當基因轉殖植物所具有的新性狀，包括使植物具有抗病、蟲害等生物性逆境的性狀，耐除草劑、耐旱及耐鹽等非生物性逆境的性狀，改變種子休眠、發芽及散佈的性狀，改變根伸長特性的性狀等，皆可能促使植物在田間較其他非基因轉殖植物更具持續生存的能力，更具入侵其他棲息地的能力或者兩者兼具，如此基因轉殖植物則有變成雜草的可能性。因此植物本身已經可歸類為雜草或者相當接近雜草的特性時，只要一個或多個外源基因轉殖介入時即會使該植物具有明顯的生態學上的優勢，增加植物的持續生存性及入侵性而變成雜草。例如在美國包括苜蓿（alfalfa）、百慕達草（Bermuda grass）、蘿蔔、黑莓（blackberry）、油菜子、覆盆子（raspberry）及向日葵等植物即具有上述特性（Rissel and Mellon, 1996）。

評估基因轉殖植物的雜草化風險，要依個案方式採多階段評估，一般可依序分為四～五階段來評估。以下就不同階段之試驗之資料需求、試驗環境等作簡要說明（徐等,2003；Ammann *et al.*, 2001；Christian *et al.*, 1999；Conner *et al.*, 2003；Kjellsson *et al.*, 1997；Rissel and Mellon, 1996；Tiedje *et al.*, 1989）：

1. 第一階段（Tier 1）：

徹底瞭解受體植物（接受外源基因之植物）的背景資料、生物學特性、生態環境及遺傳變異等，探討其母本植物是否已經可歸類為雜草或者相當接近雜草的特性、其近緣植物是否為普遍存在的雜草；此外，對外源基因之來源、外源基因之特性、外源基因之功能機轉及表現方式、該基因調控產物之理化特性、基因載體、基因之殖入方式、該基因在受體植物細胞內之位置及其表現之穩定度等都必需充分瞭解掌握。

2. 第二階段（Tier 2）：

此階段重點在於比較基因轉殖植物與母本植物在環境中之表現差異。瞭解載入外源基因之基因轉殖植物及其子代與其母本植物（非轉殖植物）相比較下，對環境之適應力（fitness）是否改變，主要是在固定比率或密度之下觀察植物全生長期的變化（全生長期包括發芽、幼苗存活及生長、成株存活及生長、開花授粉、基因流佈、種子產生及散播、部分植物的營養繁殖等階段），以比較轉殖植物與自然界或棲息地存在的相關近親品種間的適應力及競爭力，故稱為競爭試驗（competition experiments），其結果可用以評估該基因轉殖植物的野化潛能（Fredshavn *et al.*, 1996）。由於對於多年生的轉殖木本植物無法進行該全生長期的觀察，故也可選擇生長關鍵期進行試驗並以生長模式輔助評估。

本階段的試驗設計必須能量化基因轉殖植物及其新性狀與逆境強弱範圍間的相關關係。其方法是逐步加強逆境因子的強弱，使基因轉殖植物及其母本植物從「無競爭優勢」的試驗條件一直到最後出現「顯著競爭優勢」的試驗條件，如果轉殖植物會分泌毒他物質（allelopathic substances），則需要涵蓋對"目標"及"非目標"植物種類的競爭試驗。

這階段的試驗主要在實驗室、溫室或者生長箱等受控制的環境進行，對於在上述試驗環境中無法良好生長者，則規劃半田間試驗進行生長試驗；對於試驗環境之各式生長條件則根據第一階段（Tier1）所收集之訊息來決定。

3. 第三階段（Tier 3）：

此階段主要是在實際田間的種植情形下，比較轉殖植物與母本植物的競爭優勢情形。根據第二階段的試驗結果若轉殖植物並未較母本植物具競爭優勢，則選擇適合母本植物生長之區域進行小規模的取代試驗（abbreviated replacement experiment）；若顯示轉殖植物較其母本植物更具競爭力，則必須以田間實際種植的規模（field margins or the full range of growing environments）進行全生長期的族群取代試驗（full life population replacement experiment），以瞭解在實際栽培環境中基因轉殖植物的運作（perform）是否會比其母本植物更具優勢，變成具入侵性植物（invasion）並影響棲息地其他物種之生存（Parker *et al.*, 1996；Rissel and Mellon, 1996）。

田間試驗常需要經歷 3 個世代的評估，選擇的試驗區環境的形態及數目必須因不同轉殖植物的種類來決定，但選擇的田間試驗環境必須是適合轉殖植物或其母本植物所生長栽培的狀況，對於在第二階段試驗中較母本植物具競爭優勢之轉殖植物，在選擇試驗環境需考慮母本植物可能出現的所有環境形態，例如路邊、濕地、非耕地、草原等不同形態的棲息環境；此外，試驗區內可能會有近親作物或野生植物的存在，同時會有自然狀況下各種生物性（病、蟲害）及非生物性（如乾旱）逆境因子之存在，並且要特別注意生長階段中最敏感時期時植物的變化（change in the most susceptible life stage）。

4. 第四階段（Tier 4）：

本階段屬於定量判斷的階段（quantitative sense），將 Tier 2 及 Tier 3 的實驗結果及試驗區之各種環境參數結合數學及空間模式，以估計模擬轉殖植物在棲息環境中的競爭優勢及對棲息地生態之可能的影響，如果該轉殖植物經評估後較母本植物具競爭優勢則屬於高風險者需要考慮是否適合商業化種植。但另一方面研發單位或公司也可藉此階段試驗證明其研發的基因轉殖植物在某些環境條件下，「較母本植物更具競爭優勢的轉殖植物不會有轉變為

雜草的可能性」，這部分的田間試驗必須在選擇更多不同的生態環境中，進行多年的、小規模的田間試驗，而且結合研發公司、政府管理單位、農藝學家、生態學家、統計學家等共同進行。

(三) 基因流佈 (gene flow) 原因及其對環境的衝擊

轉殖植物所攜帶之外源基因流佈到自然界之途徑包括水平基因流佈或稱水平基因轉移 (horizontal gene flow (or transfer)) 及垂直基因流佈 (vertical gene flow) 或稱花粉基因流佈 (Ammann *et al.*, 2001; Gay, 2001)。

水平基因流佈是指轉殖植物之外源基因流佈於不同種甚至不同生物界之生物體間，其流佈主要經由自然界存在之細菌、病毒或是噬菌體所轉移，水平基因流佈的轉移機制 (transfer mechanism) 包括：接合作用 (conjugation)、轉化作用 (transformation) 及轉導作用 (transduction) 等方式 (Johnsen *et al.*, 2000; Nielsen *et al.*, 1998)，這些轉移機制在自然環境或者人類的腸道中原本就會發生，是細菌進化的途徑之一，因此水平基因流佈並非是針對基因轉殖生物所特有的名詞。關於基因轉殖生物中外源基因之轉移研究或相關資詢相對較少，DNA 分子經由基因轉殖植物轉移至其他生物體之可能途徑或機制仍所知有限。對於基因轉殖植物的外源基因轉移至細菌體內的研究主要仍是在實驗室中以相當人爲的方式所得的實驗結果，至今尚未有具體的田間試驗資料，初步估計在自然環境中發生轉移的頻率非常低約在 10^{-7} ~ 10^{-11} (Johnsen *et al.*, 2000; Gay, 2001; MoRST 2001; Stirn, 2000)。儘管水平基因流佈之機率很低，但幾種經常在植物基因工程上被應用爲選擇性標誌 (selectable marker) 的抗生素基因 (如 *nptII* for kanamycin、*hpt* for hygromycin) 仍是被關注之焦點，由於這些抗生素目前仍應用於人體或動物的醫療方面，一旦發生水平基因流佈的情形，可能對人體健康及環境造成影響，抗生素基因之應用未來可能被逐步的取代 (Gay, 2001; Conner *et al.*, 2003)。

垂直基因流佈是透過轉殖植物與其近緣種植物間透過雜交授粉 (有性生殖) 所產生的族群間的基因流佈，當基因轉殖植物釋放入環境後，轉殖植物有很高的機率經由花粉傳播而與種植區域原本存在的母本植物或近緣植物發生雜交 (hybridization)，而產生帶有外源基因的子代 (F1)，F1 子代再與親本植株發生回交作用 (backcross)，則使外源基因漸滲融合入該近緣族群的基因庫 (introgression)。除花粉外，包括種子、果實及孢子等繁殖體 (diaspora) 也有可能導致基因流佈之發生，但目前關於基因轉殖植物的基因流佈研究主要集中於透過花粉傳遞的方式 (Ammann *et al.*, 2001; Rissel and Mellon 1996)。

當外源基因尤其是各種抵抗生物或非生物性逆境因子之外源基因，透過基因流佈進入近緣植物族群時，這個外源插入基因（inserted gene）會改變近親植物的競爭力，使其有變成雜草的風險，同時改變了自然生態的群落結構，再透過漸滲作用則可能導致植物族群多樣性（diversity）的降低。目前對於基因流佈的評估主要針對發生垂直基因流佈的風險進行評估，評估的步驟及不同階段之資料需求及試驗環境簡要說明如下（Ammann *et al.*, 2001；Christian *et al.*, 1999；Rissel and Mellon, 1996）：

1. 第一階段（Tier 1）：

徹底瞭解受體植物的特性，並調查轉殖植物在預備釋放區中之所有相關近緣植物種類，評估受體植物和近緣植物發生雜交的可能性。在這個階段歐盟組織是利用標準化的代碼（codes）（Ammann *et al.*, 2001；Conner *et al.*, 2003）來協助評估轉殖植物在釋放區是否會有基因流佈發生的風險，代碼主要根據轉殖植物花粉的散佈（dispersal of pollen, 簡稱 Dp）、轉殖植物繁殖體的散佈（dispersal of diaspore, 簡稱 Dd）及釋放區內近緣植物的種類及分佈密度（frequency of distribution of wild relatives, 簡稱 Df）等三項指標而定，每項指標再細分為七個等級（表二）。根據代碼等級，將轉殖植物發生基因流佈的風險分為無基因流佈（no gene flow）、微基因流佈（minimal gene flow）、低但侷限型基因流佈（low but local gene flow）、有基因流佈但可防止者（substantial but local gene flow effects）、有基因流佈且不易防止者（substantial but wide-spread gene flow effects）等五類。

若無足夠的資料訊息作判斷時，則需在實驗室進行轉殖植物與相關近親異種植物間簡單的雜交試驗（如 experimental pollination, forced fertilization），以確認是否會發生雜交作用，並產生帶有外源基因子代。

2. 第二階段（Tier 2）：

對於因為基因流佈所產生帶有外源基因的子代，需在控制的環境條件下（如溫室、生長箱或小規模田區）進行試驗，以測試帶有外源基因的F1及其他子代之競爭適應力以及外源基因漸滲入野生植物族群的機率（probability of introgression）等。此階段很重要的工作是估算雜交機率、不同雜交種間的競爭力、外源基因的"選擇有利性"（selective advantage of inserted gene）、外源基因在不同回交世代中存在的機率以及固定融合入自然族群的機率等。一旦雜交子代（hybrides）形成的機率高，而這些子代在環境中更具有競爭優勢，且外源基因有可能漸滲入野生植物族群的基因庫中，那這些雜交子代植物必須進入上述受體植物野化風險評估的第二階段步驟，以完整評估因基因流佈產生的子代野化為雜草的可能性。

表二、歐盟評估轉殖植物基因流佈風險之 Dpdf 標準代碼 (Ammann *et al.*, 2001)

Classification of the codes of dispersal of pollen (Dp)	
Dispersal of pollen hybridisation potential, including a differentiation of possible negative ecological effects of the inserted gene itself. Categories 0 (lowest risk) to 5 (highest risk) and U (unknown) .	
Dp0:	No wild relatives in the area (country) under consideration
Dp1:	No compatible wild relatives in the area (country) under consideration
Dp2:	No records of spontaneous hybrids in the area (country) under consideration
Dp3:	Occasional natural hybridisation, no backcrosses observed in the area (country) under consideration
Dp4:	Natural hybridisation occurs hybrids are fertile and do backcross
Dp5:	Natural hybridisation occurs fairly often, hybrids are fertile and do backcross frequently
DpU:	Data too scanty or lacking at all, no evaluation possible

Classification of the codes for the dispersal of diaspores (Dd)	
Dd0:	No chance for diaspore dispersal (seeds are sterile or deficient)
Dd1:	Diaspore dispersal possible occasionally under very favorable and exceptional conditions
Dd2:	Diaspore dispersal possible under favourable conditions
Dd3:	Diaspore dispersal occurs, fruiting is usually undesirable and is normally suppressed by various methods
Dd4:	Diaspore dispersal is important, fruiting occurs normally during cultivation
Dd5:	Diaspore dispersal is the rule, fruiting occurs very frequently and is very abundant
DdU:	Data too scanty or lacking at all, no evaluation possible.

Classification of the codes for Df (frequency of distribution)	
Df0:	Wild relatives not known in the wild or as feral populations in the area (country) under consideration
Df1:	Wild relatives extremely rare in the wild and do not occur as feral populations in the area (country) under consideration
Df2:	Wild relatives very rare in the wild and/or they occur sporadically as feral populations in the area (country) under consideration
Df3:	Wild relatives and/or their feral populations not very common in the wild in the area (country) under consideration
Df4:	Wild relatives and/or their feral populations not frequent in the wild but well distributed over the whole plateau in the area under consideration
Df5:	Wild relatives and/or their feral populations common in the wild and well distributed over the whole area (country) under consideration
DfU:	Data too scanty or lacking at all, no evaluation possible.

歐盟環境部 2002 年的報告 (Eastham and Sweet 2002) 已歸納出不同基因轉殖作物 (包括：炸油油菜、甘蔗、玉米、馬鈴薯、小麥、大麥及水果等) 透過花粉或種子引起基因流佈的頻率 (frequency)。其內容包括個別基因轉殖植物的試驗結果，以抗除草劑 (glyphosate or glufosinate) 之油菜 (*Brassica napus* ssp. *oleifera*) 為例，該作物屬於十字花科芸苔屬植物，不管在作物或雜草中其近親植物相當多，在探討基因流佈時就需考慮"作物與作物間" (crop to crops) 及"作物與野生植物間" (crop to wilds) 基因流佈的可能性，試驗結果顯示在抗除草劑油菜 (基改油菜) 種植區之不同方位及不同距離都發現帶有外源基因的雜草種子。

(四) 抗病毒基因轉殖植物之基因流佈

農作物栽培過程中作物一旦遭受病毒之感染及危害，往往因無適當之藥劑可用而造成農作物大量損失，因此研發抗病毒基因轉殖植物 (virus-resistant transgenic plants, 簡稱 VRT plant) 非常具有農業及商業價值，目前在美國及中國大陸已准許抗病毒之基因轉殖植物上市。

產生抗病毒基因轉殖植物之機制大致可歸納為四種方式分別為鞘蛋白調控抗性 (coat protein mediated resistance, CPMR)、複製酶調控抗性 (replicase-mediated resistance, Rep-MR)、移動蛋白調控抗性 (movement protein mediated resistance, MPs-MR) 及核酸層次調控抗性 (nucleic acid mediated resistance) 等；其中以 Coat protein mediated resistance (CPMR) 為目前研究最清楚且最廣泛被應用於產生抗病毒轉殖植物的方法，主要的機制是將病毒基因序列中控制產生蛋白質外鞘的基因片段轉殖到植物的基因中，使植物有能力製造病毒之蛋白質外鞘，一旦來源基因之病毒或其近緣病毒侵略植物時，植物可產生大量的鞘蛋白使入侵病毒無法進行脫鞘作用 (uncoating)，或脫鞘之後其核酸馬上被大量的鞘蛋白所包被 (encapsidation)，而干擾到病毒之複製，此亦稱為遺傳工程式的交互保護作用 (genetically engineered cross-protection)，此方法既無傳統交互保護的風險，使用時又不增加成本，因此廣被採納 (葉錫東, 2000; Aaziz *et al.*, 2000; Beachy, 1997)。

抗病毒轉殖植物之病毒基因產物不論是 RNA 或 protein 和另一感染植物的病毒 (可以為抗病毒轉殖植物來源基因之近緣病毒或其他病毒) 之間會產生協力作用 (synergism)、異鞘蛋白包被作用 (heteroencapsidation) 及重組作用 (recombination) 等交互作用，其中 synergism 乃起因於其他病毒的感染

而使抗病毒轉殖植物的病害加劇，而感染轉殖植物的其他病毒也可能因為 heteroencapsidation 作用（又稱為 transcapsidation）的發生，使得原本不會被昆蟲或其他生物媒介傳送的病毒變成可以經由這些途徑而散佈，這二種交互作用主要發生於抗病毒轉殖植物的周邊，屬於非持久型可回復的表現型效應（phenotypic effects），當造成這二種作用的環境或生物因子不存在時這二種情形就不會發生（Aaziz *et al.*, 1999；Rissel and Mellon, 1996）。重組作用是最有可能造成基因流佈的交互作用，因為重組作用會導致病毒基因不可逆的改變且在自然界發生的頻率甚高。在病毒的世界裡觀察到有非常高的變異性（variability）存在，特別是 RNA 病毒，重組作用是導致病毒高變異性主要的原因之一，是病毒進化的力量。重組作用為病毒挽救及修復 RNA 複製過程中因突變所導致錯誤的手段。RNA 重組作用到目前為止持續扮演增加病毒變種及進化的重要關鍵角色。因此，透過 RNA 病毒的重組作用，抗病毒轉殖植物所攜帶的病毒鞘蛋白（coat protein, CP）基因是否會和其他感染植物的病毒 RNA 發生重組作用，而產生新型病毒或者使某種病毒的感染寄主種類增加，造成較原病毒母株為害更劇是需要探討的問題（Aaziz *et al.*, 1999、2000）。目前大多數證明抗病毒轉殖植物與感染病毒間重組作用存在的實驗都是在高選擇性壓力（high selection pressure）的環境下進行的試驗（Aaziz *et al.*, 1999），但也有報告指出在較溫和的選擇性壓力下，花椰菜嵌紋病毒（cauliflower mosaic caulimovirus, CaMV）與抗病毒菸草植物之轉殖基因間亦存在重組作用（Wintermantel and Schoelz, 1996）。除重組作用外，抗病毒轉殖植物與其他基因轉殖植物一樣，可經由與近緣植物雜交作用產生基因流佈（Rissel and Mellon 1996）。

因此，抗病毒轉殖植物可能引起的生態衝擊除了要考慮轉殖植物本身是否會變成雜草或者透過雜交作用而將抗病毒特性傳送給近緣植物並使其具有競爭優勢之外，特別需要考慮抗病毒基因轉殖植物是否會和另一感染病毒進行重組作用，並導致新型的病毒基因體（virus genomes）產生。關於抗病毒轉殖植物可能引發的生態衝擊在歐盟國家已成立研究團隊，針對瓜類嵌紋病毒群（Cucumoviruses）及馬鈴薯病毒 Y 群（Potyviruses）病毒群積極進行研究中（EUROPA 2003）。

三、結論

為因應生物技術時代的來臨，各國紛紛訂定基因改造生物（genetically modified organisms, GMO）管理辦法以規範 GMO 正式釋放至環境。實質上各國所

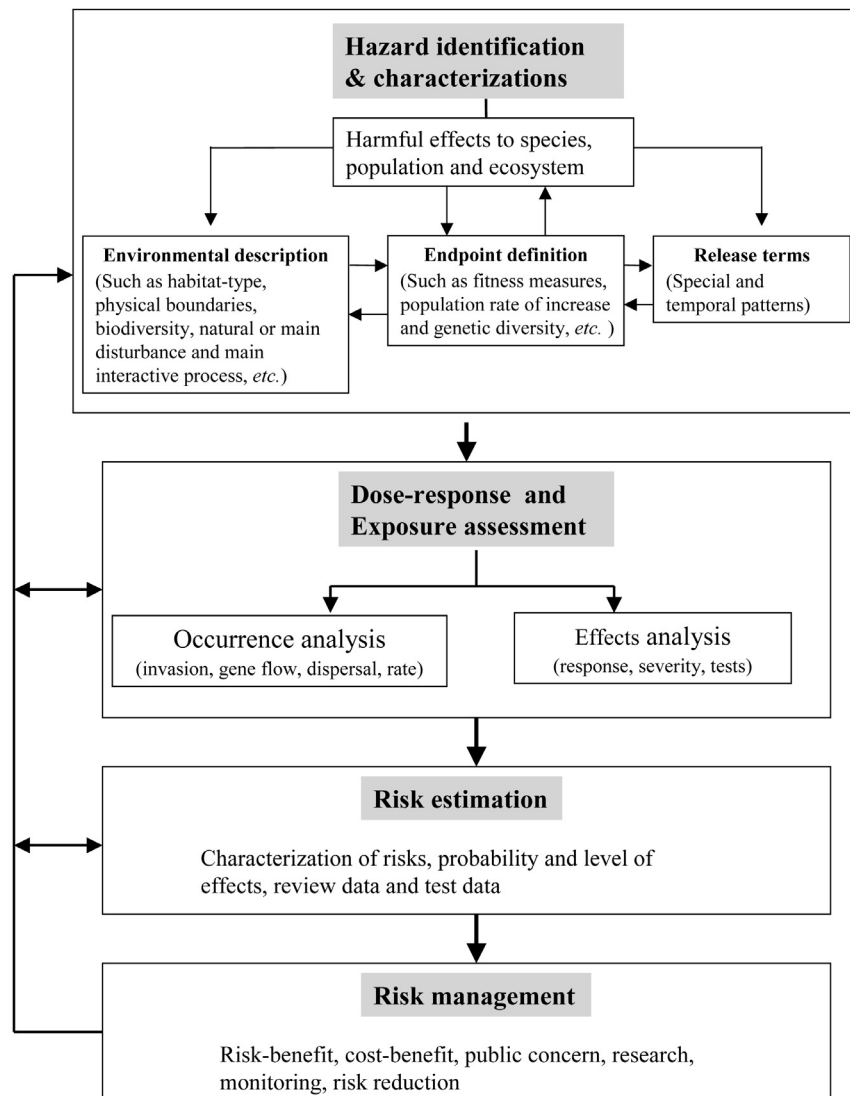
訂定之管理法其所規定之安全性評估原則都是引用自毒物風險評估之觀念，以下就如何配合管理法進行基因轉殖植物對環境的安全性評估（涵蓋風險評估及風險管理）及如何因應各國管理法作簡單之報告，期望能對本國基因轉殖植物之研發有所助益。

（一）風險評估

目前基因轉殖植物在食用安全及對環境生態的衝擊主要是依循對化學物質或者農藥的風險評估方式（FAO 2002a；Kjellsson *et al.*, 1997；Zadoks and Waibel, 2000）。基轉植物之風險評估必須依轉殖植物之特性作個案處理（case by case），而風險評估之內容包括基因轉殖植物物種特性鑑定（GMP characterizations），危害鑑定（hazard identification）、危害特性描述（hazard characterization）、劑量－反應評估（dose-response assessment）、暴露評估（exposure assessment）以及風險描述及評價（risk characterization and estimation）等建立在科學基礎上的評估過程（FAO 2002b），但是對環境生態衝擊的風險評估工作其困難度及複雜性相對較高，最主要的原因是牽涉到地域性之差異（Kjellsson *et al.*, 1997；Tiedje *et al.*, 1989）。根據 Kjellsson 等學者的建議，簡述基因轉殖植物之生態風險評估流程如圖一，在危害鑑定及特性描述（hazard identification and characterization）的部分即利用樹枝狀圖建立基因轉殖植物與不同物種、族群及生態環境間的因果關係及作用模式，並考量基因轉殖植物所欲引入環境的地域性因素，包括棲息地類別、氣候、土壤、生物多樣性、植生密度及基因轉殖植物對環境族群及生態的影響效應（如適應性的評估、族群速度的增加、基因的歧異度及物種多樣性等），以徹底瞭解基因轉殖植物釋放入環境後，環境生態受到危害的風險及如何定義風險所導致的效應。在劑量反應及暴露評估（dose-response and exposure assessment）的部分主要是循序進行階段式的分析試驗（tier analysis）以分析"危害"（如基因轉殖植物野化入侵、外源基因流佈等）可能的發生情形，並評估一旦"危害"發生所引起物種、族群及生態可能的反應及受影響的嚴重程度，此即前述基因轉殖植物對非目標生物族群的影響、基因轉殖植物野化及外源基因流佈對環境生態的影響等階段式的評估。風險描述及評價（risk characterization and estimation）則涵蓋風險特性的描述、風險發生的機率，經由相關資料及試驗結果的彙整分析，以評定基因轉殖植物的環境安全性等級，其最終的目的在對生態環境的已知或潛在不良效應的發生可能性和嚴重程度進行定性和/或定量的估計，其中也包括伴隨的不確定性（uncertainty）（Kjellsson *et al.*, 1997；OGTR 2002）。

(二) 風險管理 (risk management)

風險管理是根據風險評估的結果，斟酌權衡各種可供選擇的政策，徵求有關各方之意見，考慮風險/利益比、本/益比、公眾評價、保護消費者健康、提供研究和促進公平貿易等相關因素，並且在需要時選擇和實施適當的防止、控制和監測方案，包括規章管理措施的過程，最終目的是降低風險的發生。因此風險管理包括五個部分：確認風險概況（風險評估）以確定安全問題等級和優先次序、選擇有效且技術可行的風險管理方案、管理措施的執行、預防、監控和審議 (Conner *et al.*, 2003 ; OGTR 2002 ; Rissel and Mellon, 1996) 。



圖一、基因轉殖植物釋放對環境生態衝擊之風險評估流程及風險管理 (Kjellsson *et al.*, 1997)

(三) 管理法對貿易之衝擊

2000 年所簽訂的「生物多樣性公約」之「卡塔赫納生物安全議定書」(Cartagena protocol on biosafety to the convention on biological diversity) 適用於活修飾生物 (living modified organism, LMO, 指任何具有憑藉現代生物技術獲得的遺傳材料新穎組合的活生物體) 的跨國界遷移, 並允許進口國家對貿易進行限制, 以便排除對生物多樣性造成的不良後果 (經濟部國貿局 2001; CBD 2003)。「議定書」制定的初衷是要求出口國提供有關釋放含活修飾生物的產品的建議, 並在出口前事先徵得進口國的同意。因此在議定書第 7-10 條是有關於預先通知協定的定義即決定流程等 (AIA, advance informed agreement), 第 15 條「風險評估」則關於以科學和透明的方式並根據國際相關準則進行風險評估, 而第 16 條「風險管理」即賦予締約方制定並保持適宜的機制、措施和策略, 用以制約、管理和控制在議定書風險評估條款中指明的、因改性生活生物體的使用、處理和越境轉移而構成的各種風險 (徐等, 2003; 鄭隨和, 2002)。2003 年農糧組織在曼谷之糧食和農業生物風險管理技術磋商會議進一步對「生物安全性 (biosafety)」的風險評估及風險管理之定義、涵蓋範圍及考量事項等作更明確之說明, 並將其導入為生物安全管理措施 (biosecurity) 的一環 (FAO 2002a、b)。

因此在「卡塔赫納生物安全議定書」之原則下各國所訂定關於轉基因生物的相關風險管理法規, 包括預先通知協定、風險評估、風險管理等則成為未來轉基因生物及相關產品進入潛在市場的貿易阻礙。最重要的關鍵在於, 基因轉殖植物對環境安全的風險評估工作需要是在出口的目的地進行, 而不是在出發地進行。這些都是對基因轉殖作物的一種技術性管理規定, 但對出口國家卻是一種技術性的貿易壁壘 (徐等, 2003; 經濟部國貿局 2001)。

(四) 因應對策

目前我國尚未正式准許基因轉殖植物之商業化種植, 為因應國內研究人員的各種生物技術成果即將推廣, 更由於加入 WTO 後可能要面對外國基因轉殖生物的大量進口, 因此必須要有各項的相關風險管理法規準備因應, 以避免淪為生物科技大國的傾銷區, 並導致國際貿易障礙或國內農民及消費者的損失。

我國目前有關基因轉殖植物的環境安全性評估管理法案主要包括「基因轉殖植物田間試驗管理規範 (辦法)」、「基因轉殖植物委託田間試驗作業

要點」、「基因重組實驗守則」等，如何根據法案及國際通則進一步製備各階段試驗之詳細試驗規範及標準操作手冊是亟需開展之重點（製備各階段試驗之試驗規範及標準操作手冊）。此外，基因轉殖植物（或其他活修飾生物）釋放增加的結果可能是對環境無意識的不良影響，包括對本地動物區及植物區系的破壞，因此對經准許釋放種植或商業化的基因轉殖植物應有後續追蹤的機制（徐等, 2003；BANR 2002），建立技術監測體系以更確定不會對生物多樣性及人類健康產生不良的後果。

主要參考文獻

1. 王保民、李召虎、李斌、田曉莉、段留生、翟志席、何鐘佩。2002。轉Bt抗蟲棉各器官毒蛋白的含量及表達。農業生物技術學報 10：215-219。（中國）
2. 徐慈鴻、李貽華、李國欽。2003。基因轉殖植物之生物安全性評估及管理。藥毒所專題報導第70期。行政院農委會農業藥物毒物試驗所。台中。（<http://www.tactri.gov.tw/> 2004/07）。
3. 經濟部國貿局。2001。生物安全議定書規範重點。（[http://www.doc.trade.gov.tw/BOFT/web/report_list.jsp? data_base_id=DB009&category_id=CAT1179](http://www.doc.trade.gov.tw/BOFT/web/report_list.jsp?data_base_id=DB009&category_id=CAT1179) 2004/07）
4. 葉錫東。2000。基因工程作物在植物保護之應用。科學發展月刊 28：257-266。
5. 鄭隨和。2000。卡塔赫那生物安全議定書與國內相關規範簡介。第39-46頁。基因轉殖生物相關議題研討會論文集。中國農業化學會印。台北。
6. Aaziz, R. and M. Tepfer. 1999. Recombination in RNA viruses and in virus-resistant transgenic plants. *J. Gen. Virol.* 80: 1339-1346.
7. Aaziz, R., K. Saláanki, E. Balázs, M. Jacquemond and M. Tepfer. 2000. Strategies for detection of recombination in virus-infected plants expressing a viral transgene. In: *The biosafety results of field tests of genetically modified plants and microorganisms*, pp. 189-196 (Schiemann, J. Ed.) , 5th International Symposium, Berlin, Germany.
8. AGBIOS. 2003. Secondary and non-target adverse effects. In: *Mon 810 environmental risk assessment case study*. ([http://www.agbios.com/cstudies.php? book=ESA&ev=MON810&chapter=Preface](http://www.agbios.com/cstudies.php?book=ESA&ev=MON810&chapter=Preface). 2004/07)
9. Ammann, K., Y. Jacot and P. R. A. Mazyad. 2001. Safety of Genetically Engineered Plants: an Ecological Risk Assessment of Vertical Gene Flow. In: *Safety of Genetically Engineered Crops*, pp. 60-87 (Custers, R. Ed.) , Flanders Interuniversity Institute for Biotechnology, Zwijnaarde, Belgium.
10. Baker, H. 1974. The evolution of weeds. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 5:1-24.
11. BANR (Board on Agriculture and Natural Resources) .2002. Postcommercialization testing and monitoring for environmental effects of transgenic plants. In: *Environmental effects of transgenic plants: the scope and adequacy of regulation*, pp192-219. National Academy Press, Washington, DC. U.S.A. (<http://books.nap.edu/books/0309082633/html/192.html> 2004/07)
12. Beachy, R. N. 1997. Mechanisms and applications of pathogen-derived resistance

- in transgenic plants. *Curr. Opin. Biotech.* 8: 215-220.
13. CBD. 2003. Cartagena protocol on biosafety to the convention on biological diversity. (<http://www.biodiv.org/biosafety/protocol.asp> 2004/07)
 14. Christian, K., D. Christian, K. Gösta, S. Beate and S. Morten. 1999. Ecological Risk Assessment of Genetically Modified Higher Plants (GMHP) Identification of Data Needs. NERI Technical Report, No. 303 Ministry of Environment and Energy National Environmental Research Institute Publisher, Silkeborg, D.K. 35pp.
 15. Conner, A. J., T. R. Glare and J. P. Nap. 2003. The release of genetically modified crops into the environment. II. Overview of ecological risk assessment. *Plant J.* 33: 19-46.
 16. Eastham, K and J. Sweet. 2002. Genetically modified organisms (GMOs) : The significance of gene flow through pollen transfer. Environmental issue report No 28. European Environment Agency, Copenhagen, D.K. 75pp.
 17. Environmental releases of GMOs. 2004 In: Deliberate field trails. (<http://biotech.jrc.it/deliberate/taxonomy.asp> 2004/10)
 18. EPA. 2001. Biopesticides Registration Action Document - *Bacillus thuringiensis* Plant-Incorporated Protectants. (<http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides/pips/index.htm> 2004/07)
 19. EUROPA. Virus-resistant transgenic plants: ecological impact of gene flow (QLK3-2000-00361). 2003. Plants EC research puts impact of GM plants to the test. (<http://europa.eu.int/comm/research/quality-of-life/gmo/01-plants/01-10-project.html> 2004/07)
 20. FAO. 2002a. Technical consultation on biological risk management in food and agriculture Agenda item 3: Biological risk management in food and agriculture: scope and relevance. TC/BRM 03/2. 21pp.
 21. FAO. 2002b. Technical consultation on biological risk management in food and agriculture Agenda item 4: Risk analysis in biological risk management for food and agriculture TC/BRM 03/4. 20pp.
 22. Fredshavn, J. R. and G. S. Poulsen. 1996. Growth behavior and competitive ability of transgenic crops. *Field Crops Res.* 45: 11-18.
 23. Gay, P. 2001. The biosafety of antibiotic resistance markers in plant transformation and the dissemination of genes through horizontal gene flow. In: Safety of Genetically Engineered Crops, pp. 136-157 (Custers, R. Ed.), Flanders Interuniversity Institute for Biotechnology, Zwijnaarde, Belgium.

24. Greene, A. and R. F. Allison 1994. Recombination between viral RNA and transgenic plant transcripts. *Science* 263: 1423-1425.
25. Hails, R. S. 2000. Genetically modified plants-the debate continues. *Tree* 15: 14-18.
26. Information Systems for Biotechnology. 2004. Databases of US and international field tests of GMOs. (<http://www.isb.vt.edu> 2004/07)
27. James, C. 2003. Global status of commercialized transgenic crops, ISAAA Briefs No.30. Ithaca, NY, U.S.A. 38pp.
28. Johnsen, M. G., F. Jorgensen, L. H. Pedersen and P. Stougaard. 2000. Transfer of DNA from genetically modified organisms (GMOs) . A review, on present scientific achievements. Biotechnological Institute Kogle Alle 2 DK-2970 Horsholm. 78pp.
29. Kinderlerer, J. 2001. Effects on non-target organisms of the release of genetically modified crops into the environment. In: *Safety of genetically engineered crops*, pp. 88-107 (Custers, R. Ed.), Flanders Interuniversity Institute for Biotechnology, Zwijnaarde, Belgium.
30. Kjellsson, G., V. Simonsen and K. Ammann. 1997. Methods for risk assessment of transgenic plants. II. Pollination, gene-transfer and population impacts. Basel, Birkhauser Verlag. 308pp.
31. Kuiper, H. A., G. A. Kleter, H. P. J. M. Noteborn and E. J. Kok. 2001. Assessment of the food safety issues related to genetically modified foods. *Plant J.* 27: 503-528.
32. MoRST (The Ministry of Research, Science & Technology, New Zealand) . 2001. Horizontal Gene Transfer (HGT) - A Quick Guide. (<http://www.morst.govt.nz/uploadefiles/Biotechnology/hgt.pdf> 2003/02)
33. Nap, J. P., P. L. J. Metz, M. Escaler and A. J. Conner. 2003. The release of genetically crops into the environment. Part I. Overview of current status and regulations. *Plant J.* 33: 1-18.
34. Nielsen, K. M., A. M. Bones, K. Smalla and J. D. van Elsas. 1998. Horizontal gene transfer from transgenic plants to terrestrial bacteria. a rare event? *FEMS Microbiol. Rev.* 22: 79-103.
35. OGTR. 2002. Risk analysis framework for licence applications to the office of the gene technology regulator. Australia (<http://www.ogtr.gov.au/pdf/public/raf-final.pdf> 2004/07)
36. Parker, I. M. and P. Kareiva. 1996. Assessing the risk of invasion for genetically

- engineered plants: acceptable evidence and reasonable doubts. *Biol. Conserv.* 78: 193-203.
37. Rissler, J. and M. Mellon. 1996. The ecological risks of engineered crops. The MIT press Cambridge, Massachusetts, London, England. 168pp.
38. Stirn, S. 2000. Antibiotic resistance and horizontal gene transfer. (www.gtz.de/biotech/dokumente/biotech5.pdf 2004/07) .
39. Tiedje, J. M., R. K. Colwell, Y. L. Grossman, R. E. Hodson, R. E. Lenski, R. N. Mack and P. J. Regal. 1989. The planned introduction of genetically engineered organisms: Ecological considerations and recommendations. *Ecology* 70: 298-315.
40. Wintermantel, W. M. and J. E. Schoelz. 1996. Isolation of recombinant viruses between cauliflower mosaic virus and a viral gene in transgenic plants under conditions of moderate selection pressure. *Virology* 223: 156-164.
41. Zadoks, J. C. and A. H. Waibel. 2000. From pesticides to genetically modified plants: history, economics and politics. *Neth. J. Agric. Sci.* 48: 125-149.