

转抗除草剂基因油菜与5种十字花科杂草的基因流研究*

赵祥祥¹ 夏秋霞¹ 陆大雷¹ 陆卫平^{1**} 戚存扣²
浦惠明² 刘葛山² 赵建³ 王幼平⁴

1. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009; 2. 江苏省农业科学院经济作物研究所, 南京 210014;
3. 江苏出入境检验检疫局, 南京 210001; 4. 扬州大学生物科学与技术学院, 扬州 225009

摘要 通过荧光显微镜和人工杂交授粉结实情况的观察, 研究了抗草甘膦甘蓝型油菜 Q3 (*Brassica napus* L.) 与 5 种十字花科杂草的杂交亲和性。结果表明, 遏蓝菜 (*Thlaspi arvense* L.)、荠菜 [*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic]、碎米荠 (*Cardamine hirsuta* L.)、风花菜 [*Rorippa palustris* (L.) Besser] (作母本) 与 Q3 (作父本) 杂交高度不亲和。荧光显微镜观察发现花粉管生长受阻, 分别停滞在上述杂草的柱头表面或花柱上部 1/3 处; 而野芥菜 × Q3 则表现出一定程度的亲和性, 亲和指数为 1.65。在大田邻近间隔种植和自然授粉条件下, Q3 与遏蓝菜、荠菜、碎米荠和风花菜间的基因流频率为 0, 与野芥菜间的频率为 0.86%。上述结果表明转抗除草剂基因油菜与十字花科杂草间存在不同程度的基因流, 基因流频率与杂交亲和性高度相关。

关键词 转抗除草剂基因油菜 十字花科杂草 苯胺蓝荧光法 种间杂交 亲和性 基因流

近年来, 转抗除草剂基因作物在全球范围内大量种植^[1], 与此同时也带来了一定的生态风险, 主要风险之一是抗性转基因通过花粉漂流转移到野生近缘植物, 导致这些植物产生抗性, 从而形成“超级杂草”。因此, 在转基因作物商品化生产之前, 对转基因作物与近缘植物间潜在的基因流进行评估是完全必要的^[2,3]。

油菜是世界四大油料作物之一, 属十字花科 (Cruciferae) 芸苔属 (*Brassica*) 作物。我国油菜田间常见的十字花科野生杂草有: 遏蓝菜 (*Thlaspi arvense* L.)、荠菜 [*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic]、碎米荠 (*Cardamine hirsuta* L.)、风花菜 [*Rorippa palustris* (L.) Besser] 和野芥菜 (*Brassica juncea* L.) 等^[4,5]。这些杂草与油菜都是异花授粉或常异花授粉植物, 且花粉传播以风媒和虫媒为

主。因此, 油菜通过花粉漂流将抗除草剂基因转移到可交配的杂草上受到特别关注^[6]。目前, 国际上关于转基因油菜与近缘植物间基因流的报道主要集中在油菜与芜菁 (*Brassica rapa* L.) 等同属植物间, 以及油菜与萝卜 (*Raphanus raphanistrum* L.)、野芥 (*Sinapis arvensis* L.)、白芥 (*Sinapis alba* L.) 等异属植物间^[7-12], 而对于抗除草剂油菜与遏蓝菜、荠菜、碎米荠、风花菜等杂草间的基因流则研究较少。转基因作物与近缘植物间的基因流关键取决于作物与其野生近缘种的杂交亲和程度^[13], 对于抗除草剂油菜与上述杂草间的杂交亲和性国内外还缺乏系统研究。

本实验通过荧光显微镜观察和人工杂交授粉结实情况, 对抗草甘膦甘蓝型油菜 Q3 与 5 种十字花科杂草间的杂交亲和性, 以及在邻近间隔种植和自

2005-10-17 收稿, 2005-11-17 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 30070152)

** 通讯作者, E-mail: luwping_2005@yahoo.com.cn

然授粉条件下, Q3 与这些杂草间的基因流频率进行了研究, 以期为转基因抗除草剂油菜的生态安全性评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

花粉供体材料为引自加拿大的抗草甘膦油菜品种“Quest”的高世代品系 Q3(*B. napus*), 该品系具有 GOX 和 CP4-EPSPS 双价抗草甘膦除草剂基因。花粉受体材料选用遏蓝菜(*T. arvense*)、芥菜(*C. bursa-pastoris*)、碎米荠(*C. hirsuta*)、风花菜(*R. palustris*)和野芥菜(*B. juncea*) 5 种十字花科杂草。筛选抗性植株的除草剂为美国 Monsanto 公司生产的 RoundupTM, 有效成分为 41% 的草甘膦(glyphosate)。

1.2 Q3 与受体植物的杂交亲和性研究

1.2.1 Q3 花粉在受体柱头上的萌发 2003 年将 Q3 与受体植物播于扬州大学温室内, 其中受体材料种植于 50 cm × 45 cm 盆钵内, 每个材料种植 30 盆, 播种前按照浦惠明等的方法用 GA₃ 进行破眠^[14]。花期人工去雄, 去雄前用酒精棉球擦拭花蕾, 去雄后立即套袋, 次日授以当天开花的转基因油菜 Q3 花粉, 套袋挂牌; 并另配置自交组合作对照(方法是将受体植物去雄后套袋挂牌, 次日授以当天开花的自花花粉)。于授粉后 0.5, 1, 4, 8, 12, 18, 24, 48 和 72 h 分别取各组合的雌蕊 20—25 个, 立即浸泡在 FAA(70% 乙醇 90 mL, 冰醋酸 5 mL 和福尔马林 5 mL)固定液中, 4℃ 条件下保存。按苯胺蓝荧光法(aniline blue fluorescence, ABF)运用 Leica DMLB 荧光显微镜在 355—425 nm 波长的紫外光下观察 Q3 花粉在上述杂草柱头上的萌发生长情况^[15]。

1.2.2 人工杂交授粉结实观察 受体植物人工去雄后, 授以抗除草剂油菜 Q3 花粉。各组合授粉花蕾数为 100—200 个, 授粉后立即套袋挂牌, 观察角果的生长和结实情况, 并计算亲和指数(亲和指数 = 饱满籽粒数/授粉花朵数)。

1.3 自然授粉条件下 Q3 与受体植物间的基因流研究

1.3.1 实验材料种植方式 实验在江苏省淮安市高科技农业示范园区油菜隔离区进行。2003 年秋将

抗草甘膦油菜 Q3 与遏蓝菜、芥菜、碎米荠、风花菜和野芥菜 5 种杂草分别成对间隔种植(杂草种子播前进行破眠处理), 行比为 1:1, 每对材料设为 1 个试验小区, 小区面积 20 m², 种植密度 18 株/m², 随机区组排列, 重复 3 次, 四周种植供体品种 Q3。试验小区栽培管理措施同于大田, 记载各种植物的初花期和终花期, 花期自由授粉, 成熟后按小区收获受体材料种子。

1.3.2 抗除草剂植株的筛选 2004 年随机抽取 3 个区组的受体材料的部分种子播于大田(前茬为春玉米, 无十字花科植物自生苗)。小区面积 100 m², 共 15 个小区。在 3 叶期时调查各小区总苗数, 4—5 叶期每公顷喷施 0.2% 有效浓度的草甘膦 750 kg, 15 d 后调查存活苗数, 并计算基因流频率(基因流频率 = 抗草甘膦苗数/小区总苗数)。在喷施除草剂前, 对每个受体材料随机挂牌标记 200 株, 每株取新鲜叶片 0.2—0.4 g, 置于 2.0 mL 离心管中 -20℃ 冰箱保存。

1.3.3 抗草甘膦基因的 PCR 检测 对大田筛选获得的所有抗除草剂植株和挂牌标记植株中的敏感型植株样本进行抗草甘膦基因的 PCR 检测。用于 PCR 测试的 CP4, GOX 基因的引物序列^[16,17]由上海申能博彩生物科技有限公司合成(扩增片段长度分别为 398 bp 和 450 bp)。总 DNA 的提取用 SDS 法^[18]。PCR 反应体系为: 0.2 mmol · L⁻¹ dNTPs, 2 mmol/L MgCl₂, 1 unit Taq 酶, 引物 0.1 μmol · L⁻¹, 模板 DNA 40 ng, 反应体积为 20 μL。扩增反应在 MJ PTC-200 梯度 PCR 仪上进行。PCR 循环程序为: 95℃ 预变性 4 min; 94℃ 变性 1 min, 59℃ 退火 40 s, 72℃ 延伸 40 s, 共 30 个循环; 72℃ 延伸 10 min。扩增产物在 1.5% 琼脂糖凝胶上电泳, 并在 Genegenius 凝胶图像分析仪上观察照相。

2 结果与分析

2.1 Q3 花粉在受体柱头上的萌发情况

荧光显微镜观察结果表明, 遏蓝菜、芥菜、碎米荠授以 Q3 花粉后, 粘合在柱头上的花粉粒数量少、萌发迟, 伸出的花粉管较短, 且在柱头表面发生盘绕; 授粉后 48—72 h 仍未见有花粉管伸进花柱与子房, 花粉管在柱头上被抑制(图 1(a), (b))。

而它们在自交授粉 24—48 h 后, 则可见有花粉管通过珠孔进入胚珠。

Q3 花粉在风花菜柱头上的萌发情况则有些不同。风花菜授 Q3 花粉后 18 h, 粘合的花粉粒数达 41—83 个, 大部分花粉粒萌发出花粉管, 其中有 11—16 条花粉管能穿过乳突细胞伸进花柱上部 1/3 处(图 1(c)), 其余花粉管则很短, 有的盘绕在柱头表面, 并可见与其相接触的乳突细胞表面有胼胝质产生; 至授

粉后 48—72 h 仍未见有花粉管伸进花柱下部与子房, 花粉管生长停滞于花柱上部 1/3 处。而风花菜自交后 48 h, 则可见有花粉管通过珠孔进入胚珠。

Q3 花粉在野芥菜柱头表面的萌发情况与上述相比差异更大。粘合在柱头上的花粉粒数量多、萌发快; 至授粉后 18 h, 即可见有 11—20 条花粉管进入到子房上中部; 授粉后 24 h, 有 1—5 条花粉管通过珠孔进入胚珠(图 1(d))。

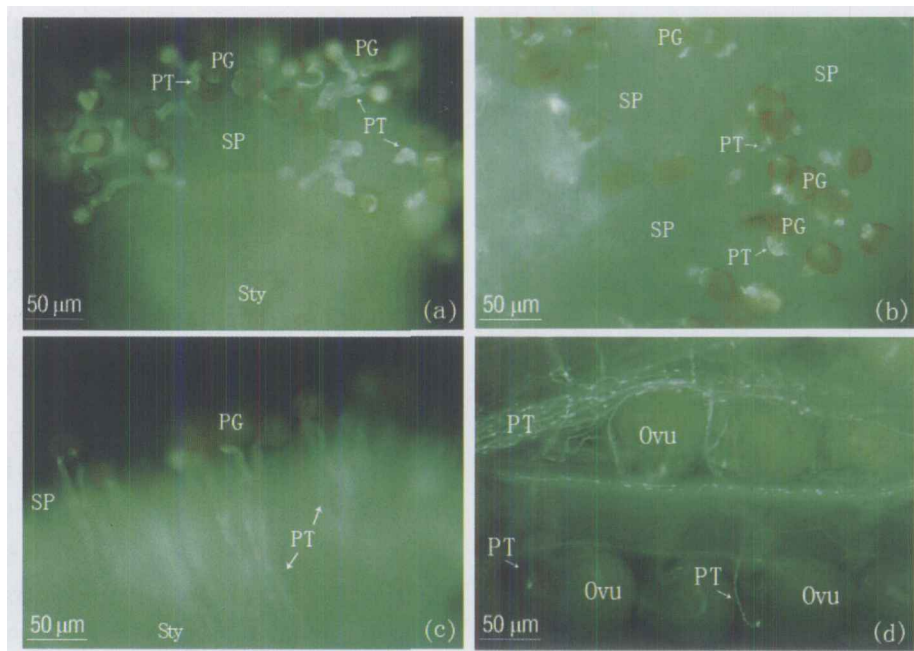


图 1 授 Q3 花粉后不同时期用脱色苯胺蓝染色的柱头荧光显微照片

(a) 遏蓝菜授 Q3 花粉 12 h 后的柱头和花柱部分, 示不亲和反应, 箭头示伸出的花粉管很短, 有的在乳突表面发生盘绕; (b) 碎米荠授 Q3 花粉 18 h 后的柱头部分, 示不亲和反应, 箭头示伸出的花粉管很短, 有的在乳突表面发生盘绕; (c) 风花菜授 Q3 花粉 18 h 后的柱头和花柱部分, 示不亲和反应, 箭头示一部分花粉管穿过乳突细胞伸进花柱, 停止在花柱上部 1/3 处; (d) 野芥菜授 Q3 花粉 24 h 后的一部分子房, 箭头示花粉管通过珠孔进入胚珠。

PT, 花粉管; Sty, 花柱; Ovu, 胚珠; SP, 柱头乳突; PG, 花粉粒

上述实验结果表明, 遏蓝菜、芥菜、碎米荠、风花菜(作母本)与 Q3(作父本)杂交不亲和, 花粉管生长受阻, 分别停滞在遏蓝菜、芥菜、碎米荠的柱头表面和风花菜花柱上部 1/3 处; 而野芥菜×Q3 则表现出一定的亲和性, 说明 Q3 的抗除草剂基因难以通过基因流转移到遏蓝菜、芥菜、碎米荠和风花菜, 而与野芥菜间则存在潜在的基因流。

2.2 人工杂交授粉结实情况

受体植物授以 Q3 花粉后的结实情况列于表 1。

其中野芥菜授以 Q3 花粉后, 结角率为 63.00%, 每角 2.62 粒种子, 亲和指数为 1.65。而遏蓝菜、芥菜、碎米荠和风花菜 4 种杂草授 Q3 花粉后, 结角率仅达 3.03%—10.50%, 且都不结籽, 亲和指数为 0。

上述人工授粉的结实情况与荧光显微镜的观察结果相一致, 进一步说明了 Q3 的抗除草剂基因难以通过基因流转移到遏蓝菜、芥菜、碎米荠和风花菜, 而向野芥菜转移的成功率则较大。

表1 Q3与不同杂草杂交的结角率与亲和指数

杂交组合名称	授粉花蕾数	结角数	结角率/%	饱满籽粒数	每角粒数	亲和指数
遏蓝菜×Q3	200	9	4.50	0	0	0
芥菜×Q3	200	21	10.50	0	0	0
碎米荠×Q3	150	5	3.33	0	0	0
风花菜×Q3	165	5	3.03	0	0	0
野芥菜×Q3	100	63	63.00	165	2.62	1.65

表2 Q3与受体植物的花期同步率

材料名称	初花期(月/日)	终花期(月/日)	花期/d	花期同步天数
Q3	3/23	4/17	25	— ^{a)}
遏蓝菜	3/19	4/18	30	25
芥菜	3/13	4/22	40	25
碎米荠	3/19	4/14	26	22
风花菜	3/31	4/22	22	17
野芥菜	3/28	4/21	24	20

a) 表示空白

2.3 Q3与受体植物的花期同步性观察

Q3与5种受体植物的花期观察结果列于表2。5种受体植物与Q3有长达17—25 d的共花期。因此在正常栽培条件下,转基因油菜Q3的花粉有足够的机会落到上述受体植物柱头上。

2.4 Q3与受体植物间的基因流频率

对5个受体材料在大田筛选抗草甘膦植株,结果显示,Q3与遏蓝菜、芥菜、碎米荠、风花菜间的基因流频率为0,而与野芥菜间的频率为0.86%(表3)。

表3 Q3与受体植物间的基因流频率

材料名称	总株数			抗草甘膦株数			基因流频率/%			
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	平均
遏蓝菜	11040	12580	12360	0	0	0	0	0	0	0
芥菜	10840	12020	9660	0	0	0	0	0	0	0
碎米荠	9820	11040	10180	0	0	0	0	0	0	0
风花菜	10120	9760	9840	0	0	0	0	0	0	0
野芥菜	14360	15480	16020	122	116	159	0.85	0.75	0.99	0.86

I, II, III 为实验中的3次重复

可见Q3的抗性基因在自然授粉条件下不能通过基因流转移到遏蓝菜、芥菜、碎米荠和风花菜,而向野芥菜则能发生转移,使其产生抗性。这与通过杂交亲和性评估的结果完全一致,再次说明了基因流频率与杂交亲和性高度相关,后者是前者发生的决定性因素。

CP4, GOX 抗草甘膦基因的PCR检测。结果表明,所有抗性植株和Q3植株均检测出398 bp与450 bp的特异扩增带,而5种杂草挂牌标记植株中的敏感型植株样本则未检测出该扩增带(图2(a), (b)). 表明大田鉴定获得的抗草甘膦植株均具有CP4, GOX 基因,不抗草甘膦而死亡的敏感型植株则不含有抗除草剂基因,证明本实验获得的基因流频率真实可靠。

2.5 抗除草剂植株相关抗性基因的PCR检测

对大田筛选获得的野芥菜抗除草剂植株进行

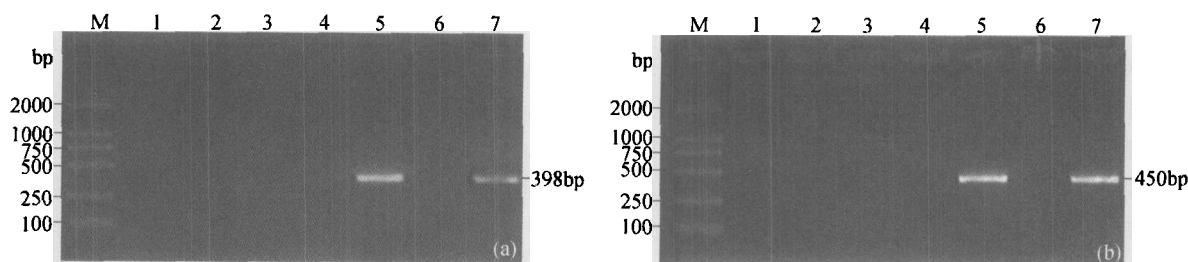


图2 CP4和GOX基因的PCR检测图谱

M, DNA分子量标准; 1, 遏蓝菜敏感型植株; 2, 芥菜敏感型植株; 3, 碎米荠敏感型植株; 4, 风花菜敏感型植株; 5, 野芥菜抗草甘膦植株; 6, 野芥菜敏感型植株; 7, Q3

3 讨论

抗除草剂基因能否通过基因流转移到近缘植物,从而导致其他植物产生抗性需具备以下3个条件:一是空间上转基因作物与近缘植物分布重叠,相邻生长;二是时间上转基因作物与近缘植物具有一定的共花期;三是转基因作物与近缘植物之间在生物学上具有一定的杂交亲和性^[2]。其中转基因作物与近缘植物间的杂交亲和性是所有条件中最重要。本实验中所研究的5种受体植物都是我国油菜田中常见的十字花科杂草,在正常栽培条件下与抗除草剂油菜 Q3 有 17—25 d 的共花期,且开花时间较为一致。杂交亲和性研究表明:遏蓝菜、荠菜、碎米荠、风花菜(作母本)与 Q3(作父本)杂交不亲和;而野芥菜×Q3 则具有一定的亲和性,亲和指数为 1.65。自然授粉条件下, Q3 与遏蓝菜、荠菜、碎米荠和风花菜间的基因流频率为 0,与野芥菜间的频率为 0.86%。上述结果表明转抗除草剂基因油菜与十字花科杂草间存在不同程度的基因流,基因流频率与杂交亲和性高度相关。

高等植物的受精作用从花粉落到柱头上开始,然后是花粉的萌发和花粉管沿着花柱的中空花柱道或引导组织生长,最终到达子房的胚珠和进入雌配子体,完成受精过程^[19]。但是,只有当双亲的染色体组具有部分同源性时才能实现成功的受精。本研究中花粉供体材料 Q3 为甘蓝型油菜(*B. napus*),具有染色体组 AACC,花粉受体材料野芥菜(*B. juncea*)具有染色体组 AABB,它们都具有染色体组 AA。因此 Q3 与野芥菜杂交具有一定的亲和性。我们获得的荧光显微镜观察、人工杂交以及自然授粉的结果都证明了这一点,这也与他人的研究结果相一致^[20]。

当油菜与属间植物发生杂交时往往表现出不亲和性,这种不亲和性决定于花粉壁中蛋白质与柱头乳突细胞表面的蛋白质表膜之间的拒绝反应^[21],结果导致花粉萌发或花粉管生长在雌蕊一定部位被抑制,或配子之间不可交配^[22—24]。本研究中应用荧光显微镜观察了 Q3 花粉在遏蓝菜、荠菜、碎米荠和风花菜柱头上的萌发情况,发现 Q3 的花粉管在遏蓝菜、荠菜、碎米荠的柱头表面发生盘绕,花粉管生长停滞在柱头表面。而 Q3 的花粉管在风花菜柱

头表面一部分发生盘绕,另一部分则能够进入花柱,花粉管生长停滞于花柱上部 1/3 处,这说明了 Q3 的抗除草剂基因不能通过基因流向这 4 种杂草发生转移。

我国是油菜生产大国,且大部分为甘蓝型品种。野芥菜是我国大部分地区常见的十字花科杂草,种类繁多,分布范围广。本研究结果表明,抗除草剂油菜 Q3 与野芥菜间的杂交亲和性较高,在自然授粉条件下的基因流频率达到 0.86%。因此大面积种植抗除草剂油菜带来的与野生杂草间的基因流问题应引起高度重视。此外,关于抗性基因在污染植株后代的遗传传递能力、以及抗除草剂油菜与其他十字花科野生杂草,如独行菜(*Lepidium apetalum* Willd.)、离心芥[*Malcolmia africana* (L.) R.Br.]、葶苈(*Draba nemorosa* L.)、豆瓣菜(*Nasturtium officinale* L.)和小花糖芥(*Erysimum cheiranthoides* L.)等之间的杂交亲和性与基因流问题还有待进一步研究。

致谢 感谢北京大学生命科学院胡适宜教授为本研究提供的指导与帮助。

参 考 文 献

- 1 James C. Preview: Global status of commercialized transgenic crops; 2003. ISAAA Briefs No. 30-2003 (International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications, Ithaca, New York)
- 2 卢宝荣,宋志平,陈家宽. 转基因稻是否会通过基因逃逸导致生态风险. 自然科学进展, 2003, 13(1): 30—35
- 3 钱迎倩,田彦,魏伟. 转基因植物的生态风险评价. 植物生态学报, 1998, 22(4): 289—299
- 4 王枝荣,辛明远,马德慧. 中国农田杂草原色图谱. 北京: 农业出版社, 1990, 96—112
- 5 马承忠,刘滨,许捷,等. 农田杂草识别及防治. 北京: 中国农业出版社, 1999, 136—151
- 6 浦惠明. 转基因抗除草剂油菜及其生态安全性. 中国油料作物学报, 2003, 25(2): 89—93
- 7 Halfhill M D, Millwood R J, Raymer P L, et al. Bt-transgenic oilseed rape hybridization with its weedy relative, *Brassica rapa*. Environ Biosafety Res, 2002, 1: 19—28
- 8 Hansen L B, Siegmund H R, Jorgenson R B. Introgression between oilseed rape (*Brassica napus* L.) and its weedy relative *B. rapa* L. in a natural population. Genet Resour Crop Evol, 2001, 48: 621—627

- 9 Warwick S I, Simard M J, Legere A, et al. Hybridization between transgenic *Brassica napus* L. and its wild relatives; *Brassica rapa* L., *Raphanus raphanistrum* L., *Sinapis arvensis* L., and *Erucastrum gallicum* (Willd.) O. E. Schulz. *Theor Appl Genet*, 2003, 107: 528—539
- 10 Moyes C L, Lilley J M, Casais C A, et al. Barriers to gene flow from oilseed rape (*Brassica napus*) into populations of *Sinapis arvensis*. *Mol Ecol*, 2002, 11: 103—112
- 11 Rieger M A, Potter T D, Preston C, et al. Hybridization between *Brassica napus* L. and *Raphanus raphanistrum* L. under agronomic field conditions. *Theor Appl Genet*, 2001, 103: 555—560
- 12 Chevre A M, Eber F, Darmency H, et al. Assessment of inter-specific hybridization between transgenic oilseed rape and wild radish under agronomic conditions. *Theor Appl Genet*, 2000, 100: 1233—1239
- 13 Dale P J. Spread of engineered genes to wild relatives. *Plant Physiol*, 1992, 100: 13—15
- 14 浦惠明, 高建芹. 十字花科杂草种子的破眠研究. *杂草科学*, 2003, 1: 9—11
- 15 胡适宜. 检查花粉在柱头上萌发和花粉管在花柱中生长的制片法. *植物学通报*, 1994, 11: 58—60
- 16 陈家华, 潘良文, 沈禹飞, 等. 转基因抗草甘膦油菜籽中草甘膦氧化还原酶基因的检测方法研究. *中国油料作物学报*, 2001, 23(2): 63—67
- 17 潘良文, 陈家华, 沈禹飞, 等. 进口转基因抗草甘膦油菜籽和大豆中 CP4-EPSPS 基因的检测比较研究. *生物技术通讯*, 2001, 12(3): 175—177
- 18 李 佳, 沈斌章, 韩继祥, 等. 一种有效提取油菜叶片总 DNA 的方法. *华中农业大学学报*, 1994, 13(5): 521—523
- 19 胡适宜, 杨弘远. 被子植物受精生物学. 北京: 科学出版社, 2002, 128—130
- 20 Bing D J, Downey R K, Rakow G F W. Hybridizations among *Brassica napus*, *B. rapa* and *B. juncea* and their two weedy relatives *B. nigra* and *Sinapis arvensis* under open-pollination conditions in the field. *Plant Breed*, 1996, 115: 470—473
- 21 胡适宜. 被子植物胚胎学. 北京: 人民教育出版社, 1983, 128—130
- 22 孟金陵, 刘定富, 罗 鹏, 等. 植物生殖遗传学. 北京: 科学出版社, 1995, 300—301
- 23 约赫里 B M, 主编. 维管植物实验胚胎学. 上海: 华东师范大学出版社, 1986, 127—139
- 24 孟金陵. 甘蓝型油菜与近缘种属杂交时花粉-雌蕊相互作用的研究. *作物学报*, 1990, 16(1): 19—25

我国科学家关于湖泊水华治理的研究取得重要进展

在国家科技部和国家自然科学基金委员会的资助下, 中国科学院生态环境研究中心潘纲研究员经过多年的努力, 在湖泊富营养化治理方面取得重要进展. 最近其代表性成果以 3 篇系列论文的形式发表于 *Environmental Pollution*, 并被国际环境领域的著名期刊 *Environmental Science & Technology* 在 *Technology News* 专栏以 “Quick, cheap method for algae removal” 为题做了重点介绍. ES&T 评价认为 “这是一种快速、廉价清除藻华的方法, 特别适合于淡水有毒藻华的应急清除, 而且可提供一个永久性修复遭受藻华危害的湖泊并恢复其生态的长期战略”.

我国是淡水资源短缺的国家, 近年来, 由于许多自然和人为因素的影响, 排入湖库的氮、磷等营养物质不断增加, 致使水体富营养化状况加剧, 进而导致各地水体藻华的频繁暴发. 严重的水华会覆盖水面, 阻止水体中的光合作用及其与大气的交换, 使水中的溶解氧浓度迅速降低, 造成水生动植物的死亡以及生态和周边环境的破坏. 这些影响又进一步对周边城市的政治经济(如投资业、水产业、旅游业)产生严重破坏. 同时, 藻华常使水体中的藻毒素含量严重超标, 这些藻毒素也是肝脏肿瘤的强诱发剂, 严重威胁着饮用水安全和人体健康. 如何有效地控制藻华的暴发, 国内外专家投入了多年的努力, 研究了多种控制藻华暴发的方法, 如化学法、机械法、生物法、生态法和絮凝法等等. 但是由于各种方法都存在着这样或那样的缺陷, 多年来, 人们一直期待着一套安全、有效、成本低、操作简便的技术能够出现. (下转第 849 页)