

甘薯近缘三倍体杂种 2n 花粉发生 和利用的研究^①

侯利霞^② 李惟基 周海鹰 季卫 刘庆昌 陆漱韵
(植物遗传育种系)

摘要 将甘薯的近缘野生种 *Ipomoea trifida*(2x)与 *I. littoralis*(4x)杂交,得到三倍体杂种。在三倍体杂种无性系中观察到可被醋酸洋红染色的可育大粒花粉(2n 花粉),该花粉频率与花粉母细胞四分体时期的二分体频率呈显著正相关。以三倍体 2n 花粉系为父本与甘薯杂交,观察到花粉萌发、受精、胚发育和结实,但结实率很低,且种子大多没有生活力。本研究表明,其主要原因有:柱头花粉附着量和花柱中花粉管较少,受精后合子停止发育和胚未能发育成熟。用植物生长调节剂处理对克服子房水平的上述不亲和性有效。

关键词 甘薯属; 2n 花粉; 种间杂交不亲和; 植物生长调节剂
中图分类号 S531

Studies on the Formation and Utilization of 2n Pollen of Closely-Related Triploidy Hybrids of Sweet Potato

Hou Lixia Li Weiji Zhou Haiying Ji Wei Liu Qingchang Lu Shuyun
(Dept. of Plant Genetics & Breeding)

Abstract Triploidy hybrids were obtained by *I. littoralis*(4x)×*I. trifida*(2x), and giant fertile pollens stainable by acetic-acid carmine were observed in triploid clones. Positive correlation existed between dyad frequency and fertile giant pollen grain frequency in the population of triploidy hybrids. Few seeds, most inviable were obtained when triploid clones were used as male parent in crosses with hexaploid sweet potatoes. According to observation on the stigma, style, ovule and embryo of the hybrid, it was concluded that the failure of the fertilization can be attributed to incompatibility between species. PGR treatment had good effects on overcoming this incompatibility.

Key words *Ipomoea*; 2n pollen; interspecific incompatibility; plant growth regulator

甘薯近缘野生种中的二倍体与四倍体杂交得到的三倍体杂种,一般表现高度不育^[1]。利用其中一些能产生 2n 花粉的无性系,是实现三倍体与甘薯杂交的一种新途径^[2,3]。但在实

收稿日期: 1996-01-24

①属国家攻关 96-002-02-17 专题研究内容

②侯利霞,河南省农业科学院粮作所,郑州市农业路 1 号,450002

际操作中,产生 $2n$ 花粉的三倍体杂种与甘薯杂交存在结实率低,种子很大部分缺乏生活力的问题^[1,2]。因而本研究着重探讨三倍体的 $2n$ 花粉系与栽培甘薯杂交结实率低和种子缺乏生活力的原因;进行植物生长调节剂(PGR)处理并探明它在授粉至种子发育各阶段的作用。在这之前先讨论 $2n$ 花粉的发生及其细胞学基础。

1 材料和方法

1.1 材料

I. trifida($2x$) \times *I. littoralis*($4x$)三倍体杂种 15 个无性系。栽培甘薯的高自一号等 8 个品种,代表不同的不孕群。

1.2 发生频率的测定

1.2.1 大粒可育花粉 开花前一天进行套袋隔离,开花当日上午用醋酸洋红染色、镜检花粉,每品系测定 3 朵花,求平均值。

1.2.2 四分体时期的二分体 取长 7~9 mm 幼蕾,卡诺氏液固定,70%酒精保存。花药用醋酸洋红染色,涂抹制片,镜检花粉母细胞,统计四分体时期二分体细胞,每个系的频率用 3 枚适宜的幼蕾平均计算而得。

1.3 不亲和群群别测定

选取杂交不亲和群 A,B,C,D 群,美国红群,铁线藤群和 A1-2 群的代表品种。开花前一天去雄并套袋隔离,第 2 天授以 $2n$ 花粉,授粉后 1 h 将花朵采下,醋酸洋红染色,镜检柱头上花粉粒的萌发,每个组合 10 朵。收获每组合的种子,计算结实率。结实率= $[\text{种子数}/(\text{杂交花数}\times 4)]\times 100\%$ ^[4]。

1.4 植物生长调节剂的配方和处理方法

配方及处理为 I, 100 mg \cdot kg⁻¹NAA+50 mg \cdot kg⁻¹6-BA; II. 50 mg \cdot kg⁻¹6-BA+20 mg \cdot kg⁻¹2,4-D; III. 30 mg \cdot kg⁻¹NAA; IV. 50 mg \cdot kg⁻¹6-BA。于授粉后施于子房周围,每朵花 1~2 滴。以只授粉不施加植物生长调节剂作为对照。

1.5 柱头花粉和花柱中花粉管的观察方法^[5]

以 $2n$ 花粉给高自一号授粉,分别在授粉后 4,8 h 采摘授粉花朵,每次 10 枚,固定于卡诺液 24 h,保存于 70%酒精。苯胺蓝染色,荧光显微镜观察,统计柱头花粉粘附量,萌发花粉粒数,花柱上、中、下部花粉管数目。

1.6 子房的观察方法^[6]

取授粉后 1,3,5,10,27 d 的子房,用卡诺液固定,进行石蜡切片,厚度 11 μ m,番红-固绿对染,观察倍数 10 \times 10。

1.7 种子结构和生活力的观察方法

收获在植株上自然成熟的杂交种子,进行发芽试验和解剖观察。

2 结果和讨论

2.1 3X 杂种 $2n$ 花粉的发生

2.1.1 3X 杂种各系的大粒花粉频率、二分体频率和三分体频率以及相互间的关系 在甘薯近缘种间三倍体杂种植株,观察到大粒花粉,直径 11~14 \times 10⁻²mm,可被醋酸洋红染色。

授于甘薯柱头,经观察,有花粉管萌发和生长,并能获得种子,从而证实这些大粒花粉具有生活力。

四分体时期的二分体,是形成 2n 大粒花粉的细胞学基础^[7]。因此统计了三倍体杂种各系花粉母细胞四分体时期的二分体频率。同时观察到三分体在四分体时期也有一定频率。

计得大粒花粉频率与总二分体频率表现正相关,相关系数 $r=0.8743(**)$ 。筛选到大粒花粉系 3408 和 3409,大粒花粉频率约 10%,这些系四分体时期的二分体频率约 24%~42%。

在本试验中,各系中的三分体频率仅在 1.79%~6.13%之间,就其对形成大粒花粉的贡献而言,相当于 0.90%~3.07%的二分体(因为一个三分体至多最终产生一个大粒花粉,而一个二分体至多最终产生两个大粒花粉),因此可以认为,三分体对 2n 花粉形成的贡献很小。

2.1.2 2n 花粉性状的遗传力 三倍体各系的 2n 花粉频率在 0.3%~11.99%之间,系间差异极显著;总二分体频率在 2.54%~41.74%之间,系间差异极显著。说明二分体的形成和 2n 花粉的产生受基因型控制,但表型值易受环境影响,系内个体间呈连续性变异,属于数量性状。以方差法作遗传力分析^[8]结果表明,大花粉频率的广义遗传力 $h^2(B)=94.03\%$,二分体频率的广义遗传力 $h^2(B)=88.13\%$ 。因此可以预测,本试验选到的大花粉系通过无性繁殖遗传到下代的可能性很大,具有较好的选择效果。

2.2 三倍体杂种与甘薯杂交低结实性的原因及克服方法

2.2.1 三倍体杂种与各群别甘薯品种杂交 选取的不亲和群品种为 A 群:石 1707; B 群:一窝红; C 群:向阳黄; D 群:鲁薯七号; 美国红群:向阳红、美国红; A1-2 群: A1-2。另外铁线藤群的铁线藤、黎妇薯因嫁接成活的植株较少,且未能诱导其开花,而未用于测群。2n 花粉系选取 3409,3306 为代表进行杂交,其结果见表 1。

表 1 2n 花粉系 3409,3306 杂交结果

品 种	以 3409 为父本				以 3306 为父本			
	花粉萌发 状况	授粉 花数	结实数	结实率 (%)	花粉萌 发状况	授粉花数	结实数	结实率 (%)
A 群:石 1707	萌发	11	0	0	萌发	11	1	2.27
B 群:一窝红	萌发	15	1	1.67	不萌发	8	0	0
C 群:向阳黄	萌发	13	1	1.92	萌发	9	1	2.78
D 群:鲁薯七号	萌发	7	2	7.14	萌发	25	5	5.00
美国红群:								
美国红	不萌发	8	0	0	不萌发	10	0	0
向阳红	萌发	15	2	3.33	萌发	55	1	0.45
A1-2 群:A1-2	萌发	16	2	3.13	萌发	10	1	2.5

* CK(高自 1 号自交)结实率 82.0%

由上表可看出,2n 花粉系 3409,3306 与各群品种的杂交结实率均小于 10%,未达到杂交亲和的结实率标准^[4]。因此认为三倍体杂种系与甘薯品种之间不存在对应群别关系,而是

普遍地表现低结实性。

2.2.2 三倍体杂种与甘薯杂交低结实性的原因

2.2.2.1 柱头和花柱水平 在测群试验中观察到大粒花粉在大多数甘薯品种柱头上都能萌发,柱头胼胝质反应也较弱(图 1-1),表现一般种间杂交的特征^[9]。花粉在柱头的附着量,和花粉管在花柱引导组织中的生长情况,如表 2 所示。

表 2 柱头花粉附着量和花粉管在花柱中的生长

组 合	附着花粉粒数			花柱中花粉管数				允许的最 大结实率/%
	样本数	大	小	萌发	上部	中部	下部	
高 1×3210	10	2.2	3.0	2.0	2.0	1.7	1.1	27.5
高 1×3409	10	5.0	4.7	2.5	2.5	2.4	1.8	45.0
向阳红×3409	10	5.8	7.3	2.5	2.3	2.2	1.8	45.0
高 1 自交	10	25.4		18.2	6.0	5.6	5.5	100

由表 2 可见,在大粒花粉系与甘薯杂交组合中,母本柱头附着 2n 花粉粒远较甘薯品种高自 1 号自交为少,能萌发的和到达下部的花粉管数就更少,对于子房中的四个胚珠全部受精是不够的,允许的最大结实率只有 27%~45%。高自一号自交,则萌发和到达花柱下部的花粉管数大于 4 个,存在四个胚珠均受精的可能性,允许的最大结实率达 100%。由此可见,在大粒花粉系与甘薯杂交中,较少的 2n 花粉附着量和花粉管数是限制结实率的一个因素。

2.2.2.2 子房水平 观察统计高 1×3409、高 1 自交(CK)授粉后 1 d 的卵细胞和极核的受精率,结果如表 3,4。

表 3 授粉后 1 d 卵细胞受精情况

组 合	卵 细 胞 状 态					
	未受精	精核正在接近	受精	卵核第一次分裂	观察胚珠数	受精率/%
高 1×3409	12	1	10	2	25	48.0
高 1 自交	2	1	7	2	12	75.0

* 受精后的卵细胞从细胞核到细胞壁间的细胞质呈现星状网(图 1-2)。受精率=(受精+卵核第一次分裂)胚珠数÷(未受精+精核正在接近+受精+卵核第一次分裂)胚珠数×100%。

表 4 授粉后 1 d 极核受精情况

组 合	极 核 所 处 状 态			
	未受精	受精	观察胚珠数	受精率/%
高 1×3409	7	7	14	50.0
高 1 自交	2	11	13	84.6

* 受精的极核与精核融合为一(图 1-3)。

从表 3 看出,高 1×3409,高 1 自交组合的受精率分别为 48.0%,75%;由表 4 看出,极核受精率分别为 50%,84.6%,均与各该组合花柱下部花粉管数所允许的最大受精率相近,说明在花粉管到达子房后,较少受精障碍。

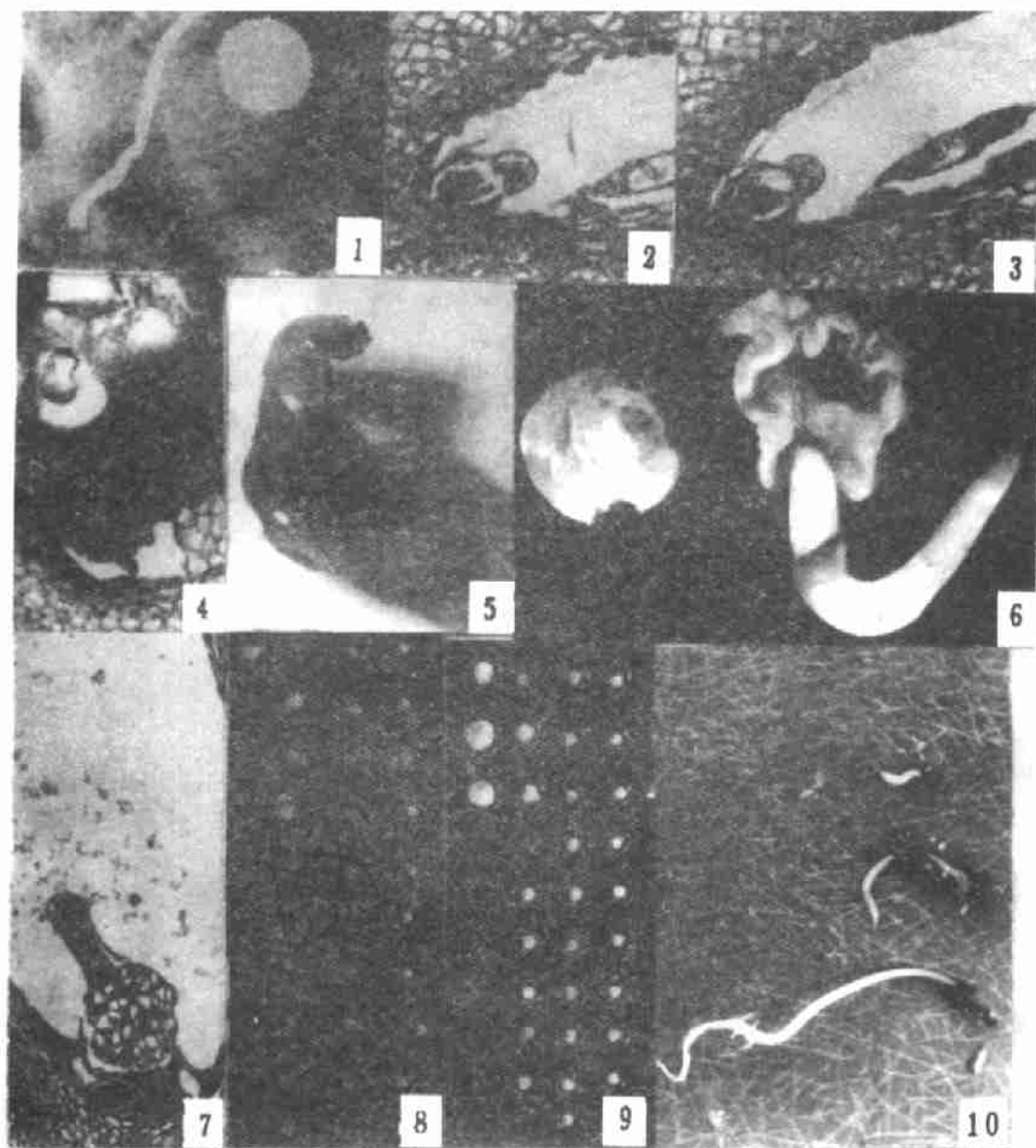


图1 大粒花粉授到大多数甘薯品种柱头上之后的情况

1 大粒花粉在甘薯柱头萌发; 2 受精后的卵细胞,细胞核到细胞壁间的细胞质呈现网状; 3 受精的极核与精核融合为一; 4 授粉后27 d,幼胚部分解体; 5 高1×3409杂交种子解剖; 6 高1自交种子发芽; 7 PGR处理,授粉后10 d观察到的幼胚; 8 CK授粉后不同天数的子房; 9 PGR处理授粉后不同天数的子房; 10 杂交种子的幼苗,与高1自交的幼苗。

观察高1×3409授粉后3d的子房,在13个胚珠中只有一个发育为球形胚,胚发育率为7.69%;由受精极核分裂为胚乳核的占观察胚珠数的频率为33.3%。由此可见受精卵细胞只有极少一部分分裂发育为胚,受精极核则较多地发育成为胚乳核。高1×3409授粉后5d、10d子房中没有观察到进一步的胚发育,相反,胚囊层细胞干枯萎缩,胚囊退化;在授粉后27d,观察到幼胚结构,但不完整,呈解体状,说明幼胚后期停止发育,进而解体(图1-4)。总之,由于受精后的不亲和障碍严重,虽有48%~50%的受精率却只能得到低于10%的结实率,与高自1号自交的情况显然不相同:高自1号受精率75%~85%(表3,4),结实率也高达82.0%(表1下栏*)。

2.2.2.3 种子结构和种子生活力 将高1×3409杂交种子进行发芽试验,以高1自交种子作为对照。2d后高1自交种子有胚根长出,杂交种子却无一粒发芽。经解剖观察发现,高1×3409的种子结构可分为以下几类;(1)黄绿色的胚乳,没有胚结构;(2)在种脐处有一种皮状物,褐色胚乳,没有胚结构;(3)褐色胶乳状胚乳,没有胚结构。在发芽试验的18粒种子中,前一类只有二粒,后两类所占比例为88.9%,而对照高1自交种子有完整的胚根和子叶,最外面包裹着一薄层胚乳(图1-5,6)。

总之,上述高1×3409杂交种子只有胚乳,而没有胚结构。这和前面观察到的,胚乳发育率稍高而大多数卵细胞不再继续分裂的情况是相一致的。说明低结实性、低生活力的主要原因,首先是胚停止发育,其次是胚乳未能发育成熟。

2.2.3 植物生长调节剂(plant growth regulator, 简称PGR)对授粉和发育各个阶段的作用

2.2.3.1 PGR对花粉管生长的影响 从表5中看出,在甘薯与三倍体杂种杂交中,PGR对花粉管的萌发和生长没有促进作用。

表5 PGR对花粉管生长的效果(授粉后4h)

组 合	对照(平均每个雌蕊)						PGR(平均每个雌蕊)					
	附着花粉粒		萌发	花 柱			附着花粉粒		萌发	花 柱		
	大	小		上	中	下	大	小		上	中	下
向阳红×3306	1.7	0.4	1.25	0.7	0.6	0.4	1.1	1.2	0.7	0.7	0.4	0.4
高1×3306	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	1.6	0.4	0.4	0.2	0.2
高1×3309	5.0	4.7	3.0	2.5	2.4	1.8	4.2	6.6	2.0	2.2	1.7	1.7

表6 PGR处理的卵细胞受精情况

处 理	未受精	受精	观察胚珠数	受精率/%
CK	13	12	25	48.0
PGR	16	15	31	48.4

2.2.3.2 卵细胞受精率和极核受精率 由表6,7可见,对照和PGR处理的卵细胞受精率都约为48%,极核受精率约40%~50%,因此认为PGR处理对双受精没有促进作用。

表 7 PGR 处理的极核受精情况

处 理	未受精极核数	受精极核数	观察胚珠数	受精率/%
CK	7	7	14	50.0
PGR	7	5	12	41.7

2.2.3.3 对胚发育过程的作用 授粉后 3 d 观察到对照的 13 个胚珠中没有一个发育为多细胞原胚,其他仍为卵细胞,胚发育率为 7.69%;而观察到 PGR 处理的 15 个胚珠中有 2 个发育的胚,胚发育率为 13.33%。同时,观察到对照的 9 个胚珠中有 3 个发育的胚乳核,胚乳核发育率为 33.3%;PGR 处理的 13 个胚珠中有 5 个发育的胚核,胚乳核发育率为 38.5%。

在授粉后 5 d 和 10 d 的子房切片观察中,对照没有观察到进一步的胚发育,而 PGR 处理的观察到了幼胚(图 1-7)。甘薯在完成双受精后,通常是初生胚乳核先分裂,合子接着分裂。从上述结果看出 PGR 对促进胚的发育,协调胚和胚乳发育具有一定作用。

2.2.3.4 对子房寿命和种子发育的作用 统计授粉 1,3,5,10 d 子房在植株上的存活率、脱落率和子房的大小、重量,得下表(表 8)。

表 8 PGR 处理授粉后不同天数的子房

授粉后 天数/d	CK					PGR				
	观察样 本数	存活率 /%	脱落率 /%	长×宽 /mm	重量 /mg	观察样 本数	存活率 /%	脱落率 /%	长×宽 /mm	重量 /mg
1	27	100	0	1.8×1.09	1.67	31	100	0	1.29×1.15	1.10
3	25	100	0	1.61×1.72	2.06	25	100	0	1.55×1.65	2.85
5	15	73.3	26.7	1.35×1.35	2.93	13	76.9	23.1	1.97×1.69	4.01
10	26	3.85	96.15	2.5×2.0	5.2	21	19.05	80.95	2.65×2.88	19.30

由上表可看出,在授粉后 3 d 之内,全部杂交子房都能在枝条上存活。从授粉后 5 d 起,授粉子房开始脱落,这时对照的存活率为 73.3%,PGR 处理为 76.9%,开始表现差异。到授粉后 10 d,对照 26 枚子房在枝头上只剩 1 枚,即存活率只有 3.85%,而 PGR 处理的存活率则比对照提高到接近 20%,说明 PGR 延长了子房的寿命,从而为种子的发育提供了可能。这与甘薯品种间杂交中的试验结果一致,该试验证实了 PGR 通过延迟离层形成起到上述作用^[10]。

由上表还可看出,授粉后 5 d 对照子房的平均大小为 1.35 mm×1.35 mm,低于授粉后 3 d 的,表现出萎缩的趋向,PGR 处理则授粉后 5 d 比第 3 d 有所增长,重量也高于 CK,可知 PGR 在第 3~5 d 之间开始起作用。至第 10 d,CK 仅存的一个子房,体积比 PGR 处理的小,重量远不及 PGR 处理,说明 PGR 促进了种子发育(图 1-8,9)。

2.2.3.5 对结实率的影响 从表 9 结果看,各种 PGR 处理都能不同程度地提高结蒴率和结实率,其中以不同的 PGR 混合液 100 mg·kg⁻¹NAA+50 mg·kg⁻¹6-BA, 30 mg·kg⁻¹6-

BA+20 mg·kg⁻¹2,4-D 为较好,组合高1×3306,向阳红×3306 对照结实率分别为 0.96%, 0.45%,施用 100 mg·kg⁻¹NAA+50 mg·kg⁻¹5-BA 分别提高到 2.88%和 3.64%。施用 30 mg·kg⁻¹6-BA+20 mg·kg⁻¹2,4-D 则分别提高到 8.13%和 2.55%。

表9 PGR 处理对结实率的影响

组 合	处 理														
	I			II			III			IV			CK		
	授粉 花数	结蒴数 (结蒴率)	结实数 (结实率)	授粉 花数	结蒴数 (结蒴率)	结实数 (结实率)	授粉 花数	结蒴数 (结蒴率)	结实数 (结实率)	授粉 花数	结蒴数 (结蒴率)	结实数 (结实率)	授粉 花数	结蒴数 (结蒴率)	结实数 (结实率)
高1×3306	52	5 (9.6)	6 (2.88)	40	10 (25.0)	13 (8.13)	42	5 (1.63)	6 (3.57)	42	2 (1.65)	4 (3.57)	78	2 (2.56)	3 (0.96)
向阳红×3306	54	5 (9.26)	7 (3.24)	49	3 (6.12)	5 (2.55)	49	1 (2.44)	3 (1.83)	49	1 (2.04)	3 (1.53)	55	1 (1.82)	1 (0.45)
高1×3409	45	9 (20.0)	14 (7.78)										73	11 (1.50)	20 (6.51)

* I: 100 mg·kg⁻¹NAA+50 mg·kg⁻¹6-BA; II: 30 mg·kg⁻¹6-BA+20 mg·kg⁻¹2,4-D; III: 30 mg·kg⁻¹NAA; IV: 30 mg·kg⁻¹6-BA; CK: 不施 PGR。

2.2.3.6 对种子生活力的影响 PGR 处理得到高1×3409 杂交种子 14 粒,其中 3 粒为饱满种子而 CK 所得到的种子全部皱缩或干瘪,进行发芽试验,后者都没发芽,PGR 处理所得到的种子中有 2 粒胚根伸出,其中一粒胚根顶端变黑,后停止伸长,经解剖发现,里面有胚乳,子叶较小,未见胚芽。另外一粒胚根、子叶都已长出,但未见次级根发育。以上说明 PGR 处理获得了具有生活力的种子(图 1-10),幼苗的生长发育有待进一步观察。

3 结 论

1)三倍体杂种各系的 2n 花粉频率与花粉母细胞四分体时期的二分体频率呈正相关。

2)筛选到 3408,3409 两个大粒花粉系。

3)三倍体杂种大粒花粉系与甘薯杂交的低结实性主要原因在于: a. 柱头的花粉附着量和花柱中的花粉管数较少;b. 受精卵进一步分裂发育成胚存在障碍;c. 种子发育后期,胚停止发育。

4)三倍体杂种的大粒花粉系与甘薯杂交获得的种子发芽率低是由于大部分种子不存在胚结构。

5)植物生长调节剂处理有一定效果,它主要通过以下作用改善三倍体杂种与甘薯杂交的结实性和种子生活力: a. 增加受精卵细胞发育成胚的频率;b. 延长子房寿命,使胚的发育成为可能;c. 克服胚败育,从而获得了有生活力的种子。

参 考 文 献

- 1 李惟基, 陆漱韵, 王家旭, 王莉莉. 甘薯属种间杂种三倍体产生 2n 花粉(简报). 北京农业大学学报, 1993, 19(1): 108
- 2 Freyre R, Orjeda G, Iwanaga M. Use of *Ipomoea trifida* (H. B. K.) G, Don germplasm for sweet potato improvement 2. Fertility of synthetic hexaploids and triploids with 2n gametes of *I. trifida*, and their interspecific crossability with sweet potato. *Genome*, 1991, 34: 209~214
- 3 Orjeda G, Iwanaga M, Freyre R. Production of 2n pollen in diploid *Ipomoea trifida*, a putative wild ancestor of sweet potato. *J Hered*, 1990, 81: 462~467
- 4 西北农学院主编. 作物育种学. 北京: 农业出版社, 1981
- 5 Xia D R, Li W J, Wang J X, Liu Q C, Lu S Y, Zhou H Y. The incompatibility and sterility of the hybrid between *Ipomoea triloba* (A series) and *I. batatas* (var. Xushu 18, B series). *Beijing Proc 1st Chinese-Japanese Symp. Sweetpotato & Potato*. 1995, 57~64
- 6 李坤培, 张启堂. 甘薯胚胎及果实发育的研究. *植物学报*, 1987, 29(1): 34~40
- 7 Liang G H. 植物遗传学. 北京: 北京农业大学出版社, 1991
- 8 浙江农业大学主编. 遗传学. 北京: 农业出版社, 1986
- 9 陆漱韵, 李太元. 甘薯组(Batatas Section)种间、种内交配不亲和特性研究. *作物学报*, 1992, 18(3): 161~167
- 10 陆漱韵, 张洪平, 李惟基. 植物生长调节物质克服甘薯品种间交配不亲和性的作用. *植物遗传学理论及应用论文集*, 中国遗传学会, 1994, 557~560

~~~~~  
 (上接第 64 页)

表 1 粘虫 24 h 的死亡率%(括弧中的数字为 20 min 的死亡率%)

| 化合物              | 1 000 mg·L <sup>-1</sup> | 100 mg·L <sup>-1</sup> | 化合物               | 1 000 mg·L <sup>-1</sup> | 100 mg·L <sup>-1</sup> |
|------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| I <sub>1</sub>   | 81                       | —                      | I <sub>11</sub>   | 100                      | 61                     |
| I                | 76                       | —                      | I <sub>12</sub>   | 100                      | 31(39)                 |
| I <sub>3</sub>   | 91                       | 43(29)                 | I <sub>13</sub>   | 100                      | 43(21)                 |
| I <sub>4</sub>   | 91                       | 50(14)                 | I <sub>14</sub>   | 100                      | 18(12)                 |
| I <sub>5</sub>   | 90                       | 21(21)                 | I <sub>15</sub> * | 100                      | 100(40)                |
| I <sub>6</sub> * | 100                      | 100(31)                | I <sub>16</sub> * | 97                       | 100(33)                |
| I <sub>7</sub>   | 80                       | —                      | 敌百虫               | 100                      | 100(20)                |
| I <sub>8</sub>   | 88                       | —                      | 溴氰菊酯              | 100                      | 100(100)               |
| I <sub>9</sub>   | 89                       | —                      | 空白对照              | 0                        | 0                      |
| I <sub>10</sub>  | 100                      | 86(29)                 |                   |                          |                        |

\* 10 mg·L<sup>-1</sup>浓度时, I<sub>6</sub>, I<sub>15</sub>, I<sub>16</sub>的 24 h 死亡率分别为 19%, 30%和 9%;敌百虫和溴氰菊酯为 50%和 86%。

亡率,它们似具有一定的击倒作用。

用 I<sub>13</sub>对黑胸大蠊腹神经的电生理试验表明,它对腹神经节大轴突的 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>膜电流均有抑制作用。I 类化合物所表现的对粘虫的快速杀虫作用,对家蝇的击倒作用,是否与该类化合物可能兼有有机磷与拟除虫菊酯两类杀虫剂有杀虫机制有关,是值得进一步研究的。

从化学结构来看, I<sub>1</sub>~ I<sub>8</sub>的 R<sup>1</sup>和 R<sup>2</sup>均为烷氧基,属磷酸酯类化合物; I<sub>9</sub>~ I<sub>16</sub>的 R<sup>1</sup>为烷氧基, R<sup>2</sup>为氨基,属磷酰胺类化合物。后者对粘虫和家蝇的杀虫活性优于前者。