

## 黄花马蹄莲‘京彩阳光’组培快繁体系优化及遗传转化体系初探

吴乐乐<sup>1,2</sup>, 王 壹<sup>2</sup>, 付娇娇<sup>3</sup>, 蒋 尹<sup>2</sup>, 张国君<sup>4</sup>, 卫尊征<sup>2</sup>, 陈洪伟<sup>1,①</sup>, 郑玉红<sup>3,①</sup>

[1. 北京农学院园林学院, 北京 102206; 2. 北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所, 北京 100097;

3. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源保护与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;

4. 河北科技师范学院园艺科技学院 河北省特色园艺种质挖掘与创新利用重点实验室, 河北 秦皇岛 066004]

**摘要:** 为探索建立不依赖于再生体系的遗传转化体系,突破彩色马蹄莲(*Zantedeschia hybrida*)遗传转化的技术瓶颈,对黄花马蹄莲‘京彩阳光’(*Z. elliottiana* ‘Jingcai Yangguang’)快繁技术进行优化,并以块茎切片为侵染对象,以*GUS*基因为报告基因,通过正交试验设计和PCR鉴定,初步建立其农杆菌(*Agrobacterium*)介导的遗传转化体系。结果表明:1.0 mg·L<sup>-1</sup>6-BA和0.8 mg·L<sup>-1</sup>NAA、3.0 mg·L<sup>-1</sup>6-BA、1.0 mg·L<sup>-1</sup>6-BA和0.5 mg·L<sup>-1</sup>NAA分别为愈伤组织诱导、丛生芽诱导和壮芽的最佳激素组成;表面形成霜状愈伤的块茎切片是农杆菌侵染的合适对象;潮霉素对块茎切片愈伤组织生长有明显抑制作用。菌液OD<sub>600</sub>值为0.6、重悬后摇菌2 h、侵染25 min、共培养3 d时,块茎切片的蓝斑率最高(43.3%),其中71.1%再生株系呈阳性。综上,建立的黄花马蹄莲‘京彩阳光’组培快繁体系高效,建立的遗传转化体系具有可行性。

**关键词:** 黄花马蹄莲‘京彩阳光’;组培快繁;遗传转化

中图分类号: Q943.1; S682.2\*64 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)03-0111-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.03.13

### Optimization of tissue culture rapid propagation system and preliminary exploration of genetic transformation system of *Zantedeschia elliottiana* ‘Jingcai Yangguang’

WU Lele<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, FU Jiaojiao<sup>3</sup>, JIANG Yin<sup>2</sup>, ZHANG Guojun<sup>4</sup>, WEI Zunzheng<sup>2</sup>, CHEN Hongwei<sup>1,①</sup>, ZHENG Yuhong<sup>3,①</sup> [1. School of Landscape Architecture, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. Institute of Grassland, Flowers and Landscape Ecology, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. Jiangsu Key Laboratory for Conservation and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 4. Hebei Key Laboratory of Horticultural Germplasm Excavation and Innovative Utilization, College of Horticultural Science & Technology, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(3): 111-115

**Abstract:** To explore the establishment of a genetic transformation system independent of regeneration systems and break through the technical bottleneck of genetic transformation in *Zantedeschia hybrida*, the rapid propagation technology of *Z. elliottiana* ‘Jingcai Yangguang’ was optimized, tuber slices were used as infection objects, the *GUS* gene was used as a reporter gene, and an *Agrobacterium*-mediated genetic transformation system was preliminarily established through orthogonal experimental design and PCR identification. The results show that 1.0 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA and 0.8 mg·L<sup>-1</sup> NAA, 3.0 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA, and 1.0 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA and 0.5 mg·L<sup>-1</sup> NAA are the optimal hormone compositions for callus induction, clustered shoot induction, and vigorous shoot formation, respectively; the tuber slices with frost-like callus on the surface are suitable objects for *Agrobacterium* infection; hygromycin obviously inhibits callus growth of tuber slices. Under the conditions of bacterial suspension OD<sub>600</sub> value of 0.6, shaking bacteria for 2 h after resuspension, infection for 25 min, and co-cultivation for 3 d, the blue-staining rate of tuber slices reaches the highest value (43.3%), among which 71.1% of the regenerated lines are positive. In conclusion, the established tissue culture rapid propagation system of *Z. elliottiana* ‘Jingcai Yangguang’ is efficient, and the established genetic transformation system is feasible.

**Key words:** *Zantedeschia elliottiana* ‘Jingcai Yangguang’; tissue culture rapid propagation; genetic transformation

黄花马蹄莲[*Zantedeschia elliottiana* (Watson) Engl.]为天南星科(Araceae)马蹄莲属(*Zantedeschia* Spreng.)植物,原产于非洲<sup>[1]</sup>;其苞片呈马蹄形、颜色鲜艳、姿态优美,极具观赏价值<sup>[2]</sup>。但在黄花马蹄莲规模化生产中,软腐病情况严重,常造

收稿日期: 2025-11-19

基金项目: 北京市农林科学院产业技术研究平台建设与科技能力提升专项(CYJS202502); 河北省现代农业产业技术体系花卉产业创新团队建设专项(HBCT2024200202); 江苏省研究生实践创新计划资助项目(SJCX25\_2629)

作者简介: 吴乐乐(1999—),男,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事球根花卉遗传育种方面的研究。

①通信作者 E-mail: chenhongwei2006@126.com; zhengyuhong@cncg.net

引用格式: 吴乐乐, 王 壹, 付娇娇, 等. 黄花马蹄莲‘京彩阳光’组培快繁体系优化及遗传转化体系初探[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(3): 111-115.

成巨大的经济损失<sup>[3]</sup>。马蹄莲 [*Z. aethiopica* (Linn.) Spreng.] 对软腐病的抗性较强,但与黄花马蹄莲等具有彩色佛焰苞的种类之间存在“核质不相容”现象<sup>[4]</sup>,无法通过杂交育种的方式将抗病基因转移到彩色马蹄莲中。

转基因或基因编辑可以提高彩色马蹄莲 (*Z. hybrida*) 的抗病性,但这2种方法在一定程度上依赖于高效的组织培养技术和稳定的遗传转化体系<sup>[5]</sup>。目前,多种观赏植物已建立较为成熟的组织培养与遗传转化体系,如:冯莹等<sup>[6]</sup>构建了中国水仙 [*Narcissus tazetta* subsp. *chinensis* (M. Roem.) Masam. et Yanagih.] *NtFT2* 正义基因表达载体,通过根癌农杆菌介导法转化愈伤组织,建立了稳定、高效的遗传转化体系。马蹄莲属遗传转化相关研究也取得了一定进展,如:杨雪<sup>[7]</sup>实现了彩色马蹄莲 *attM* 基因的转化;孙轩<sup>[8]</sup>以黄花马蹄莲品种‘4d’和‘黎明’(‘Liming’)杂交61 d后的种胚为外植体,初步建立了基于再生体系的遗传转化体系;李菲等<sup>[9]</sup>成功实现了 *GUS* 基因对彩色马蹄莲丛生芽的遗传转化。但已有研究均依赖于再生体系,同时存在转化效率偏低,稳定性普遍不高,且易出现外植体褐化、杂菌污染等问题,难以满足规模化转基因操作的需求。

鉴于此,本研究以黄花马蹄莲‘京彩阳光’(‘Jingcai Yangguang’)块茎切片为外植体,在优化组培快繁体系的基础上,探索建立不依赖于再生体系的遗传转化体系,旨在突破彩色马蹄莲遗传转化的技术瓶颈,为其种质改良及产业高质量发展提供关键技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

黄花马蹄莲‘京彩阳光’无菌苗参考李菲等<sup>[9]</sup>的方法进行培养。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 组培快繁体系优化

1.2.1.1 愈伤组织诱导 将直径0.8~1.0 cm块茎切成5 mm<sup>2</sup>薄片,采用正交法<sup>[10]</sup>设计6-BA和NAA质量浓度。根据预实验结果,6-BA质量浓度分别设置为0.5、1.0、1.5、2.0 mg·L<sup>-1</sup>,NAA质量浓度分别设置为0.3、0.5、0.8、1.0 mg·L<sup>-1</sup>,培养基中添加30 g·L<sup>-1</sup>蔗糖和6.5 g·L<sup>-1</sup>琼脂,pH 5.75至pH 5.85(下同)。每个配方接种50个切片,于(25±1)℃下暗培养<sup>[11]</sup>,培养40 d时统计诱导愈伤组织的切片数量,并计算诱导率(诱导愈伤组织的切片数占接种切片总数的百分比)。

1.2.1.2 丛生芽诱导 根据预实验结果确定6-BA质量浓度范围为0.5~5.0 mg·L<sup>-1</sup>,以0.5 mg·L<sup>-1</sup>为梯度<sup>[12]</sup>,每个配方接种切片30片。于(25±1)℃、光照度800~1 200 lx、光照时间16 h·d<sup>-1</sup>下培养30 d后继代1次,培养60 d时统计萌发出丛生芽的切片数量,并计算诱导率。

1.2.1.3 壮芽培养 根据文献<sup>[13]</sup>设计6-BA和NAA质量浓

度,根据预实验结果,6-BA质量浓度分别设置为0.0、0.5、1.0 g·L<sup>-1</sup>,NAA质量浓度分别设置为0.0、0.3、0.5 g·L<sup>-1</sup>。每种配方接种20个面积1 cm×1 cm丛生芽块,培养环境条件同“1.2.1.2”,培养10 d时统计芽高不低于1 cm的小芽数。

#### 1.2.2 遗传转化体系的建立

1.2.2.1 卡那霉素和潮霉素耐受性试验 质粒pCAMBIA 1300-*GUS* (北京林业大学百合实验室)携带了抗卡那霉素(Kan)和抗潮霉素(Hgy)的基因,采用“1.2.1.1”中筛选出的愈伤组织诱导最佳培养基,分别添加0、25、50、75、100 mg·L<sup>-1</sup> Kan或0、5、10、15、20 mg·L<sup>-1</sup> Hyg,每个配方接种30个切片,于(25±1)℃下暗培养,培养20和40 d时统计死亡率(死亡切片数占接种切片总数的百分比),确定侵染筛选转化植株的培养基。切片愈伤组织褐化或变成枯黄色,即视为死亡。

1.2.2.2 质粒提取和农杆菌活化 参照Aguilar等<sup>[14]</sup>的方法,转化重组农杆菌 (*Agrobacterium*) EHA105 (上海唯第生物公司)。挑取单菌落于LB液体培养基(上海源叶生物科技有限公司)中,于28℃、180 r·min<sup>-1</sup>下摇菌;之后5 000 r·min<sup>-1</sup>离心6 min,弃上清,以含30 g·L<sup>-1</sup>蔗糖、200 μmol·L<sup>-1</sup>乙酰丁香酮(AS)的MS液体培养基重悬,调节OD<sub>600</sub>值至0.6,一部分静置2 h,另一部分继续摇菌2 h,备用。

1.2.2.3 *GUS* 基因转化条件的筛选 采用正交法<sup>[10]</sup>,并根据预实验结果分别设置菌液OD值(0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8)、重悬后处理方式(静置2 h、摇菌2 h)、侵染时间(5、15、25、35 min)和共培养时间(2、3、4、5 d)4个因子。选取已诱导出霜状愈伤组织的切片侵染,无菌滤纸吸干多余菌液,接种到“1.2.1.1”筛选出的最佳培养基中,同时添加200 μmol·L<sup>-1</sup> AS;每个处理组侵染50个切片,于(25±1)℃下暗培养;然后将切片转接到筛选培养基上。筛选培养5 d时,采用*GUS*染色试剂盒(北京华越洋生物科技有限公司)染色,并计算蓝斑率(产生蓝斑的切片数占侵染的切片总数的百分比),确定*GUS*基因转化的成功率<sup>[15]</sup>,筛选遗传转化最佳条件。

1.2.2.4 *GUS* 转基因株系的获取和真实性鉴定 利用“1.2.2.3”筛选出的最佳条件进行侵染。共培养结束后进行3轮筛选培养,每轮14 d,期间及时剔除污染的切片。筛选完成后,将丛生芽块切下,转到“1.2.1.3”筛选出的壮芽培养基上,每3周继代1次,40 d后即可获得组培苗。共培养、筛选培养和壮芽培养均在(25±1)℃、光照度800~1 200 lx、光照时间16 h·d<sup>-1</sup>下进行。采用染色法<sup>[16]</sup>对转化的真实性进行初步鉴定,以质粒pCAMBIA 1300-*GUS*为阳性对照,以ddH<sub>2</sub>O为空白对照,以未转化*GUS*基因为野生型,参照王海英等<sup>[17]</sup>的PCR法再次鉴定转化的真实性。

### 1.3 数据处理

使用EXCEL 2016软件进行原始数据统计,使用IBM SPSS Statistics 26软件绘制表格,使用GraphPad Prism 8软件绘图。

## 2 结果和分析

### 2.1 黄花马蹄莲‘京彩阳光’组培快繁体系的优化

观察和统计结果显示:1.0 mg · L<sup>-1</sup> 6-BA 和 0.8 mg · L<sup>-1</sup> NAA 为黄花马蹄莲‘京彩阳光’切片愈伤组织诱导的最佳激素组合(图 1-A),诱导率为 86.0%。4.0 mg · L<sup>-1</sup> 6-BA 处理的丛生芽诱导率最高(70.0%)、但芽较小,3.0 mg · L<sup>-1</sup> 6-BA 处理的丛生芽诱导率次之(63.3%)、但芽较壮;综合诱导率、健壮程度等指标,确定 3.0 mg · L<sup>-1</sup> 为丛生芽诱导的最适质量浓度(图 1-B)。1.0 mg · L<sup>-1</sup> 6-BA 和 0.5 mg · L<sup>-1</sup> NAA 处理壮芽的个数最多(图 1-C),每个丛生芽块可获得 17 株无菌苗,为黄花马蹄莲‘京彩阳光’壮芽的最佳激素组合。

### 2.2 黄花马蹄莲‘京彩阳光’遗传转化体系的建立

2.2.1 抗生素筛选质量浓度的确定 结果(图 2-A)显示:25 mg · L<sup>-1</sup> 卡那霉素处理,培养 20 d 的愈伤组织死亡率仅 4.0%,培养 40 d 的愈伤组织死亡率仅 8.0%,说明卡那霉素的累加效应并不明显。50 mg · L<sup>-1</sup> 卡那霉素处理,培养 20 d 的愈伤组织死亡率增加到 26.0%,培养 40 d 的愈伤组织死亡率达 42.0%。100 mg · L<sup>-1</sup> 卡那霉素处理,培养 40 d 的愈伤组织死亡率最高,为 62.0%。可见,‘京彩阳光’愈伤组织对卡那霉素

的耐受性较好,可作为遗传转化时农杆菌生长的抑制剂。

结果(图 2-B)还显示:潮霉素对切片愈伤组织生长的抑制作用明显,5 mg · L<sup>-1</sup> 潮霉素处理,培养 20 和 40 d 的愈伤组织死亡率分别达 66.0% 和 88.0%;10 mg · L<sup>-1</sup> 潮霉素处理,培养 20 和 40 d 的愈伤组织死亡率分别达 82.0% 和 92.0%;15 mg · L<sup>-1</sup> 潮霉素处理,培养 40 d 时全部死亡。考虑转化组织细胞对潮霉素的耐受性稍好,选择继代培养时愈伤生长基本停止的 10 mg · L<sup>-1</sup> 作为筛选浓度。

2.2.2 不同侵染条件对块茎切片遗传转化的影响 结果(表 1)显示:OD<sub>600</sub> 值为 0.3~0.5 时,蓝斑率最高仅为 26.7%;OD<sub>600</sub> 值为 0.6 时,蓝斑率最高达 43.3%,最低仅 16.7%;继续提高菌液浓度,蓝斑率下降。OD<sub>600</sub> 值为 0.6 为最佳侵染浓度。OD<sub>600</sub> 值为 0.6 时,摇菌 2 h 比静置 2 h 更有利于侵染成功;摇菌条件下侵染时长 25 min、共培养 3 d 的蓝斑率最高(43.3%)。菌液浓度 OD<sub>600</sub> 值为 0.6、重悬后摇菌 2 h、侵染 25 min、共培养 3 d 是黄花马蹄莲‘京彩阳光’GUS 基因转化的最适条件。

2.2.3 GUS 基因转化条件的筛选及真实性鉴定 对染色法鉴定呈蓝色的 38 个黄花马蹄莲‘京彩阳光’转 GUS 基因再生株系进行 PCR 法鉴定,质量体积分数 1.0% 琼脂糖凝胶电泳检测结果(图 3)显示有 27 个为阳性株系,阳性率达 71.1%,说明建立的遗传转化体系具有可行性。

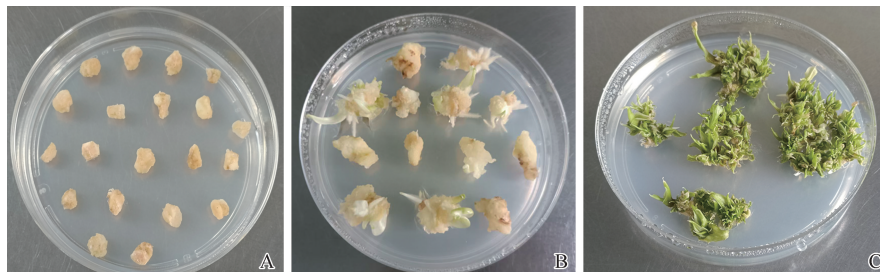
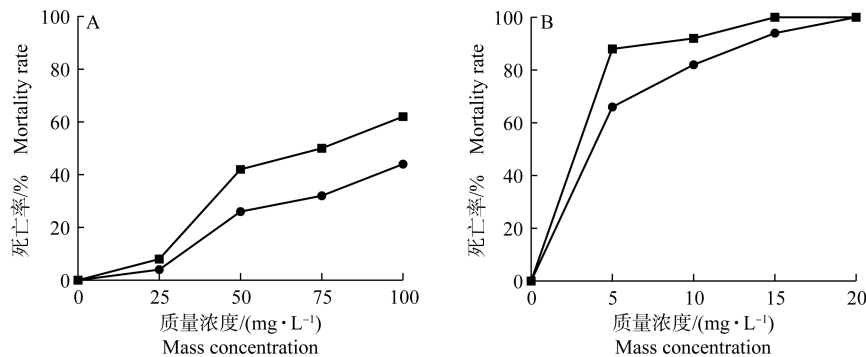


图 1 黄花马蹄莲‘京彩阳光’块茎切片的愈伤组织(A)、芽(B)和壮芽(C)

Fig. 1 Callus (A), bud (B), and vigorous bud (C) of tuber slices of *Zantedeschia Elliottiana* ‘Jingcai Yangguang’



—●—: 20 d 的死亡率 Mortality rate of 20 d; —■—: 40 d 的死亡率 Mortality rate of 40 d.

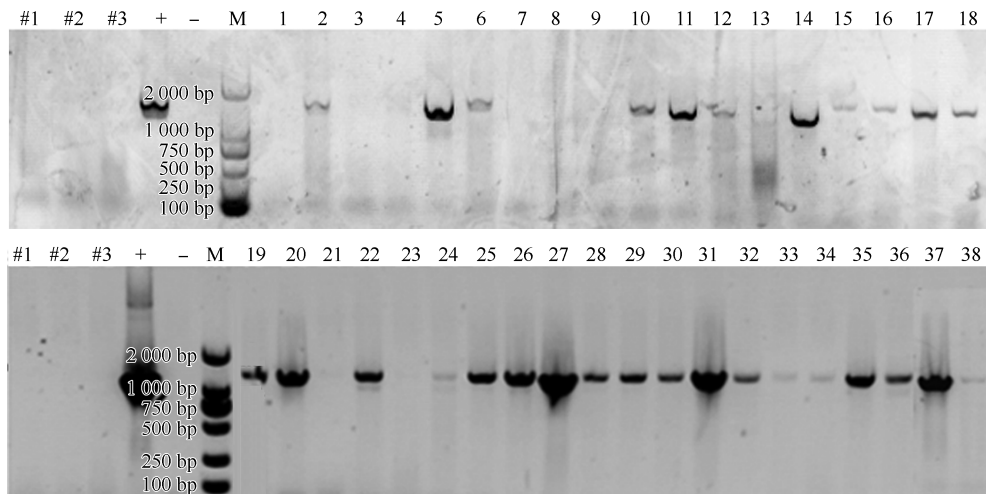
图 2 不同质量浓度卡那霉素(A)和潮霉素(B)处理下黄花马蹄莲‘京彩阳光’块茎切片的死亡率

Fig. 2 Mortality rates of tuber slices of *Zantedeschia Elliottiana* ‘Jingcai Yangguang’ under different mass concentrations of kanamycin (A) and hygromycin (B) treatment

表1 不同侵染条件对黄花马蹄莲‘京彩阳光’块茎切片遗传转化的影响<sup>1)</sup>Table 1 Effects of different infection conditions on the genetic transformation of tuber slices of *Zantedeschia elliptiana* ‘Jingcai Yangguang’<sup>1)</sup>

编号 No.	OD <sub>600</sub>	T	t <sub>1</sub> /min	t <sub>2</sub> /d	R/%	编号 No.	OD <sub>600</sub>	T	t <sub>1</sub> /min	t <sub>2</sub> /d	R/%	编号 No.	OD <sub>600</sub>	T	t <sub>1</sub> /min	t <sub>2</sub> /d	R/%
1	0.3	Q	5	5	3.3	12	0.4	S	25	2	6.7	23	0.6	S	25	3	43.3
2	0.3	S	5	2	0.0	13	0.4	Q	25	5	23.3	24	0.6	Q	35	2	16.7
3	0.3	Q	15	3	10.0	14	0.4	S	25	2	20.0	25	0.7	Q	5	4	6.7
4	0.3	S	15	4	10.0	15	0.4	Q	35	3	13.3	26	0.7	S	15	5	16.7
5	0.3	Q	25	3	10.0	16	0.4	S	35	4	16.7	27	0.7	Q	25	2	3.3
6	0.3	S	25	4	10.0	17	0.5	Q	5	3	10.0	28	0.7	S	35	3	13.3
7	0.3	Q	35	5	13.3	18	0.5	Q	15	2	6.7	29	0.8	Q	5	2	6.7
8	0.3	Q	35	2	3.3	19	0.5	S	25	5	26.7	30	0.8	S	15	3	6.7
9	0.4	Q	5	3	0.0	20	0.5	Q	35	4	0.0	31	0.8	Q	25	4	10.0
10	0.4	S	5	4	16.7	21	0.6	S	5	5	23.3	32	0.8	Q	35	5	0.0
11	0.4	Q	15	5	10.0	22	0.6	S	15	4	36.7						

<sup>1)</sup> T: 重悬后处理 Post suspension treatment; t<sub>1</sub>: 侵染时间 Infection time; t<sub>2</sub>: 共培养时间 Incubation time; R: 蓝斑率 Blue-staining rate. Q: 静置 2 h Quiescence for 2 h; S: 摇菌 2 h Shaking bacteria for 2 h.



#1, #2, #3: 野生型 Wild-types; +: 阳性对照 Positive control; -: 空白对照 Blank control; M: DL2000 DNA marker; 1-38: *GUS* 转基因植株 *GUS* transgenic plants.

图3 黄花马蹄莲‘京彩阳光’*GUS* 基因转化植株的 PCR 结果Fig. 3 PCR results of *GUS* gene transformation plants of *Zantedeschia elliptiana* ‘Jingcai Yangguang’

### 3 讨论和结论

组培快繁体系是彩色马蹄莲种球生产的最主要的方式。无菌条件下,植物自身合成的内源激素量少,无法满足生长发育的需求<sup>[18]</sup>。已有研究中彩色马蹄莲通常以诱导无菌仔球不定芽增殖的方式繁殖,周期约6个月、增殖系数为15~20倍<sup>[19-20]</sup>。本研究以无菌块茎切片为外植体优化黄花马蹄莲组培苗扩繁方法,周期为3.5~4.0个月。以每个直径1.0~0.8 cm的无菌仔球可以获得2~3片,每个丛生芽块经壮芽培养后获得17个芽苗计,繁殖系数约为30~50倍。优化后的方法速度快、周期短、增殖系数高。同时,从植物激素对愈伤组织发生和壮芽的效果看,NAA是主效因子,与前人的研究结果基

本一致<sup>[21]</sup>。本研究为建立高效的彩色马蹄莲组培扩繁体系提供了参考。

高效的再生体系是农杆菌介导的遗传转化体系建立的前提。但多数球根花卉体胚发生难度高,其快繁体系都是在器官发生途径的基础上建立;但其变态茎(块茎、球茎、鳞茎)次生分生组织生命活动旺盛<sup>[22]</sup>,是其组织培养体系器官发生的结构基础,亦可成为其遗传转化的切入点。Cao等<sup>[23]</sup>利用植物自身的再生能力,研发了无需无菌操作、不依赖于再生体系的遗传转化体系。本研究以黄花马蹄莲‘京彩阳光’块茎切片为转化材料,经激活芽眼处分生组织后(即切片表面愈伤组织发生)进行农杆菌侵染,将外源基因整合其中,实现外源基因的转化,*GUS*基因转化成功率可达43.3%。该研究突破了球根花卉遗传转化对离体再生体系的依赖,为直接以块茎等

自然营养器官为受体的遗传转化体系构建提供了新思路与方法参考。

综上所述,本研究以黄花马蹄莲‘京彩阳光’的块茎切片为外植体,建立了高效的组培快繁体系,确定了 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 和  $0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  NAA 处理为愈伤组织诱导的最佳激素组合, $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 为丛生芽诱导的最佳激素组成, $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 和  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  NAA 处理为壮芽的最佳激素组合。初步构建了黄花马蹄莲稳定的遗传转化体系,确定菌液浓度  $\text{OD}_{600}$  值为 0.6、重悬后摇菌 2 h、侵染 25 min、共培养 3 d 为 GUS 转化的最适条件。

#### 参考文献:

- [1] LETTY C. The genus *Zantedeschia*[J]. *Bothalia*, 1973, 11(1/2): 5-26.
- [2] SINGH Y, VAN WYK A E. Floral biology of *Zantedeschia aethiopica* (L.) Spreng (Araceae)[J]. *South African Journal of Botany*, 1996, 62(3): 146-150.
- [3] LI L, YUAN L F, ZHAO Y R, et al. Emergence of bacterial soft rot in calla lily caused by *Pectobacterium aroidearum* in China[J]. *Crop Products*, 2022, 152: 105854.
- [4] YAO J L, COHEN D, ROWLAND R E. Plastid DNA inheritance and plastome-genome incompatibility in interspecific hybrids of *Zantedeschia* (Araceae)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1994, 88(2): 255-260.
- [5] 李卫,郭光沁,郑国辑.根癌农杆菌介导遗传转化研究的若干新进展[J].*科学通报*,2000(8):798-807.
- [6] 冯莹,朱里莹,丁安琪,等.中国水仙 *NtFT2* 正义基因表达载体的构建与愈伤组织遗传转化体系的建立[J].*中国农学通报*,2016,32(10):162-168.
- [7] 杨雪.转 *attM* 基因彩色马蹄莲及 *AttM* 解酯酶抗体制备研究[D].南京:南京农业大学,2010:47-58.
- [8] 孙轩.马蹄莲成熟种子胚再生及农杆菌介导的遗传转化体系初探[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2023:40-46.
- [9] 李菲,曹永琼,王纲,等.根癌农杆菌介导彩色马蹄莲遗传转化体系的建立及优化[J].*南方农业学报*,2024,55(6):1692-1699.
- [10] 胡玲玲.正交法优选木贼山奈素水解条件的研究[J].*陕西农业科学*,2019,65(11):24-26.
- [11] GOPAN A, KUMAR M, BHARAT N K, et al. Optimising seed quality of tomato with naphthyl acetic acid (NAA) foliar spray and training system[J]. *International Journal of Plant and Soil Science*, 2025, 37(8): 535-544.
- [12] YOSHIMOTO N, ASANO T, KISANUKI A, et al. The ability of callus tissues induced from three *Allium* plants to accumulate health-beneficial natural products, S-alk(en)ylcysteine sulfoxides[J]. *Journal of Natural Medicines*, 2022, 76(4): 803-810.
- [13] 弓建国.利用正交旋转组合法优化平菇培养基研究[J].*北方园艺*,2010(3):168-170.
- [14] AGUILAR J M, ABAD J, ARANDA M A. Resistance to *Cucurbit yellow stunting disorder virus* in cucumber[J]. *Plant Disease*, 2006, 90(5): 583-586.
- [15] 谢慧灵,王舸泓,刘滔,等.水稻 *OsGASR8* 基因的时空表达特性分析[J].*分子植物育种*,2025,23(23):7847-7855.
- [16] 唐红艳,崔群香,韩长奎,等.荧光染色法研究茄子花粉母细胞减数分裂及其雄配子体发育[J].*江苏农业科学*,2014,42(2):107-109.
- [17] 王海英,韩德俊,李晓蕊.高通量提取西红柿基因组 DNA 方法探究及其在 SNP 分型中的应用[J].*中国农学通报*,2023,39(9):45-51.
- [18] AZIZI P, RAFII M Y, MAZIAH M, et al. Understanding the shoot apical meristem regulation: a study of the phytohormones, auxin and cytokinin in rice[J]. *Mechanisms of Development*, 2015, 135: 1-15.
- [19] 王进忠,高文,高遐虹,等.粉色马蹄莲组织培养研究[J].*北京农学院学报*,2005,20(2):10-13.
- [20] 范加勤,张雯雯,张娜,等.几个彩色马蹄莲品种的离体培养与快速繁殖[J].*南京农业大学学报*,2005,28(2):28-31.
- [21] 赵润洲,李桂荣,杨鹏鸣.彩色马蹄莲离体快繁体系的优化[J].*中国农学通报*,2009,25(24):318-321.
- [22] 吴响.基于离体模式体系的百合小鳞茎发生发育机制研究[D].杭州:浙江大学,2016:41-54.
- [23] CAO X S, XIE H T, SONG M L, et al. Cut-dip-budding delivery system enables genetic modifications in plants without tissue culture[J]. *The Innovation*, 2023, 4(1): 100345.

(责任编辑:郭严冬)