

颜坤元, 李淑顺, 马秋月, 等. 三角槭一步成苗及生根机制[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(7): 1422-1428.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.07.018

三角槭一步成苗及生根机制

颜坤元, 李淑顺, 马秋月, 杜一鸣, 李倩中, 朱璐

(江苏省农业科学院休闲农业研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 三角槭叶色美丽, 用途广泛, 观赏价值和经济价值极高。为快速获得大量优质种苗, 实现工厂化育苗, 本研究以三角槭带芽茎段为外植体, 对外植体材料的最佳采集时间、消毒方式、茎段腋芽诱导和生根诱导培养基配方进行筛选, 建立了三角槭一步成苗体系。为进一步探究三角槭幼苗的生根机制, 对不定芽的根原基进行了细胞学分析和生根发育时期关键基因相对表达量鉴定。结果表明, 6月采集的外植体使用75%乙醇消毒20s和0.1%氯化汞消毒15min的组合灭菌方式效果最佳。茎段腋芽诱导最适培养基为MS培养基+0.5mg/L吲哚丁酸(IBA), 诱导率达82.3%。不定芽生根诱导最适培养基为1/2MS+0.6mg/LIBA, 生根率达88.7%, 平均根数达4.9条。三角槭不定根原基的发生与IBA密切相关, 在0.6mg/LIBA的作用下, 根原基发生明显, 生根发育关键基因*AbPIN1*、*AbPIN2*和*AbPIN3*的相对表达量显著升高。本研究为三角槭新品种规模化繁育提供了技术参考, 为探究三角槭生根机制奠定了基础。

关键词: 三角槭; 组培; 快繁; 生根

中图分类号: S792.35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)07-1422-07

The one-step seedling formation and rooting mechanism of *Acer buergerianum* Miq.

YAN Kunyuan, LI Shushun, MA Qiuyue, DU Yiming, LI Qianzhong, ZHU Lu

(*Institute of Leisure Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

Abstract: The *Acer buergerianum*, renowned for its ornamental foliage and extensive applications, possesses significant aesthetic and economic value. To facilitate the rapid production of high-quality seedlings and achieve industrial-scale propagation, this study employed stem segments with buds as explants to screen for optimal collection times, sterilization methods, and medium formulations for axillary bud induction and root induction. A comprehensive tissue culture rapid propagation system for *Acer buergerianum* was established. Further investigation into the root formation mechanism involved cytological analysis of adventitious root primordia and the expression levels of key genes during root development. The findings indicated that a combination of 75% ethanol disinfection for 20 seconds followed by 0.1% mercuric chloride disinfection for 15 minutes was the most effective sterilization method for explants collected in June. The optimal medium for axillary bud induction was MS + 0.5 mg/L indole-3-butyric acid (IBA), achieving an induction rate of 82.3%. For adventitious root induction, the optimal medium was 1/2 MS + 0.6 mg/L IBA, resulting in a rooting rate of 88.7% with an average of 4.9 roots per plant. The initiation and growth of adventitious root primordia in *Acer buergerianum* were closely associated with auxin IBA. At a concentration of 0.6 mg/L IBA, the formation of root primordia was significantly enhanced, and the relative expression levels of key genes *AbPIN1*, *AbPIN2*, and *AbPIN3* during root development in-

收稿日期: 2025-02-27

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(22)3182]

作者简介: 颜坤元(1990-), 女, 江苏盐城人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为槭树栽培与种质资源创制利用。(E-mail) yky@jaas.ac.cn

通讯作者: 李倩中, (E-mail) qianzhongli@jaas.ac.cn; 朱璐, (E-mail) luzhu@jaas.ac.cn

duction, the optimal medium was 1/2 MS + 0.6 mg/L IBA, resulting in a rooting rate of 88.7% with an average of 4.9 roots per plant. The initiation and growth of adventitious root primordia in *Acer buergerianum* were closely associated with auxin IBA. At a concentration of 0.6 mg/L IBA, the formation of root primordia was significantly enhanced, and the relative expression levels of key genes *AbPIN1*, *AbPIN2*, and *AbPIN3* during root development in-

creased markedly. This study provides a technical reference for large-scale propagation of new varieties of *Acer buergerianum* and establishes a foundation for exploring its root formation mechanism.

Key words: *Acer buergerianum* Miq.; tissue culture; rapid propagation; rooting

三角槭(*Acer buergerianum* Miq.)为无患子科槭属落叶乔木,高度可达10 m,树冠卵形,原产于中国东部^[1-2]。三角槭树干高耸,气势雄伟,冠如华盖,浓荫覆地,秋叶橙红,美丽动人,具有极高的观赏价值,为秋色叶树种之一。三角槭适宜在公园、庭院、道路两旁,或在湖畔、溪边、谷地或草坪种植^[3]。三角槭不仅观赏价值高,而且生长较快,萌芽力强,耐修剪。三角槭适应性强,耐干旱瘠薄,可广泛种植于丘陵山区及渠边岗地^[3-4],而且三角槭木材优良,可制作家具、农具等,推广应用价值极高。三角槭种仁中含有多种营养成分,如蛋白质、不饱和脂肪酸、神经酸和维生素E等^[5],可作为油料树种进行开发利用,经济价值极高。因此,开展三角槭优质种苗规范繁育技术研究意义重大。

目前,在三角槭种苗生产过程中,主要采用播种繁殖和嫁接繁殖2种方式^[6]。由于气候差异和采种母树不同,且种子具有深度休眠性,导致三角槭繁殖效率和种苗质量均难以保证。而嫁接繁殖受季节和外界因素影响较大,人工成本高,极大地限制了优质种苗的繁育和推广。利用组织培养技术建立三角槭快繁体系,具有繁育速度快,遗传稳定性好等优点,可以极大地推进三角槭规模化和工厂化育苗进程。近年来,许多槭属植物的组织培养体系已建立并日渐成熟^[7],如鸡爪槭(*Acer palmatum*)^[8]、红花槭(*Acer rubrum*)^[9]和紫花槭(*Acer pseudosieboldianum*)^[10]等,但未见有三角槭组培成苗的报道。

生根是三角槭组培快繁中最重要的一步,生长素对植物细胞伸长和分化以及植物生根具有明显的促进作用,不同种类不同含量的生长素对植物组培苗生根的影响不同^[7,11-13]。研究表明,0.5 mg/L的萘乙酸(NAA)能有效促进丝棉木生根,其生根率可达100%^[11]。红叶石楠则需要0.5 mg/L吲哚丁酸(IBA)和0.1 mg/L NAA共同作用才能生根^[12]。单独添加0.2 mg/L IBA可促使杜梨组培苗快速生根^[13]。槭属植物组培苗生根过程中常用的生长素有IBA、吲哚乙酸(IAA)和NAA^[7]。

本研究拟以当年生三角槭带芽茎段为外植体,探索其最佳消毒方式和外植体采集时间,筛选最适

腋芽诱导培养基和生根诱导培养基,建立三角槭一步成苗技术体系;同时研究不同含量IBA对三角槭不定芽生根的影响。利用石蜡切片技术对不同含量IBA条件下生长的不定芽基部进行细胞学分析,运用荧光定量PCR技术检测3个不定根发育关键基因(*AbPIN1*、*AbPIN2*和*AbPIN3*)在不同含量IBA作用下的相对表达量,以期三角槭工厂化育苗和生根机制的深入研究提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料的选取及外植体的消毒

试验所用三角槭种植于江苏省农业科学院槭树良种繁育圃。选取当年生不同时期(5月、6月、7月、8月、9月)健康、无病害、半木质化带芽枝条,迅速带回实验室,用无菌剪刀剪除叶片留下叶柄,并将枝条剪成带腋芽的单芽茎段作为外植体,节上部保留2 cm,节下部保留2 cm。用纱布包好,用流水冲洗2 h后,放入三角瓶中进行进一步消毒处理。在超净工作台上,先后使用75%乙醇(处理时间10 s、20 s、30 s)和0.1%氯化汞(处理时间15 min、20 min)进行消毒处理,同时在三角瓶中添加0.2%吐温20(Tween-20),充分振荡混匀后倒出。用无菌水漂洗5遍后将带芽茎段取出,用滤纸吸干,接种于不同培养基中。每个处理接种20瓶,每瓶2个外植体,每个处理重复3次。随时观察其污染状况,防止交叉感染,30 d后统计污染率和死亡率。培养条件为光照度100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光周期16 h/8 h(光照/黑暗),温度(25 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$,湿度60%~70%。

1.2 三角槭茎段腋芽诱导

将无菌外植体分别接种到腋芽诱导培养基中,以1/2 MS培养基、MS培养基和NN69培养基为基本培养基,添加不同含量(0 mg/L、0.3 mg/L和0.5 mg/L)的IBA和30 g/L蔗糖。培养45 d后,统计腋芽诱导率[腋芽诱导率=(产生腋芽数/接种外植体总数) \times 100%],其间观察统计腋芽展叶时间。每个处理接种30个外植体,重复3次,筛选腋芽诱导最佳培养基。

1.3 三角槭不定芽生根诱导

当腋芽完全展叶时,将其切下转入到生根诱导

培养基中,分别以 1/2 MS 培养基、MS 培养基和 NN69 培养基为基本培养基,添加不同含量(0.2 mg/L、0.4 mg/L、0.6 mg/L 和 0.8 mg/L)的 IBA 和 30 g/L 蔗糖。培养 30 d 后统计生根率和平均根数,同时观察不定芽的生长状况。每个处理接种 30 个外植体,重复 3 次,筛选最佳生根诱导培养基。

1.4 炼苗及移栽

将已生根的健壮三角槭小苗开瓶炼苗 3 d,用清水洗去根部的培养基,移栽至营养土和珍珠岩体积比为 3:1 的基质中,移栽前使用 20% 多菌灵对配好的混合基质进行消毒处理,移栽后进行常规管理。

1.5 三角槭不定芽基部石蜡切片

将三角槭腋芽分别接种于 1/2 MS 培养基、1/2 MS 培养基+0.4 mg/L IBA 和 1/2 MS 培养基+0.6 mg/L IBA 中,接种后 10 d 分别取约 0.5 cm 不定芽基部,使用福尔马林-乙酸-乙醇(FAA)固定液进行固定,参考刘涛等^[14]的方法制作石蜡切片,使用番红-固绿法染色。染色完成的切片使用显微镜观察和拍照。

1.6 三角槭不定芽生根关键基因表达分析

于三角槭不定芽接种到生根培养基第 10 d,分别取不同 IBA 处理和对照培养基中生长的约 0.5 cm 不定芽基部进行液氮速冻并提取总 RNA,去除基因组 DNA,通过反转录获得 cDNA。在 1/2 MS 培养基(CK)、1/2 MS 培养基+0.4 mg/L IBA(T1)和 1/2 MS 培养基+0.6 mg/L IBA(T2)中取样,使用荧光定量 PCR 技术检测三角槭不定芽基部生根发育相关的关键基因的相对表达量。荧光定量反应体系及程序参考朱璐等^[15],内参基因使用 *AbTUB* 基因^[16]。

1.7 数据统计与分析

试验数据采用 Excel 2020 和 SPSS22.0 进行统计、整理及分析,采用 One-way ANOVA 及 Duncan's 多重比较检验进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同消毒方式对三角槭外植体生长的影响

不同消毒方式对三角槭外植体产生的影响不同。接种 7 d 后,灭菌不彻底的外植体陆续出现污染,接种 30 d 后的外植体污染率和死亡率如表 1 所示。处理 6 污染率最低,但是死亡率最高,说明该消毒方式对三角槭外植体造成了一定的伤害。当使用

75%乙醇消毒 20 s 和 0.1%氯化汞消毒 15 min 的消毒方式处理三角槭外植体时,既能保证外植体具有较低的污染率(14.6%±1.2%),又能保持较低的死亡率(3.5%±0.6%)。故选择该消毒方式为三角槭外植体最优消毒处理。

表 1 不同消毒方式对三角槭外植体的影响

Table 1 Effects of different disinfection methods on *Acer buergerianum* explants

编号	75%乙醇处理时间(s)	0.1%氯化汞处理时间(min)	污染率(%)	死亡率(%)
1	10	15	41.1±3.2a	1.7±0.3f
2	10	20	25.9±2.9b	2.3±0.5e
3	20	15	14.6±1.2c	3.5±0.6d
4	20	20	12.1±2.0d	8.6±0.7c
5	30	15	9.3±2.5e	12.3±1.1b
6	30	20	8.5±1.7f	18.7±1.2a

同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同采集时间对三角槭外植体生长的影响

为了进一步研究获得的最优消毒处理方式对不同时间采集的外植体生长的影响,采集不同月份(5月、6月、7月、8月、9月)的三角槭外植体,经过 75%乙醇消毒 20 s 和 0.1%氯化汞消毒 15 min 后,比较不同采集时间的外植体污染率和死亡率。结果如表 2 所示,不同时间采集的三角槭外植体污染率差异较大,5 月份采集的外植体死亡率较高,其次是 6 月,8 月和 9 月采集的外植体死亡率最低。6 月份采集的外植体污染率最低(16.2%±2.6%),9 月份采集的外植体污染率最高(55.8%±6.9%)(表 2)。

表 2 不同采集时间对三角槭外植体生长的影响

Table 2 Effects of collection time on *Acer buergerianum* explants

编号	采集时间(月)	污染率(%)	死亡率(%)
1	5	28.3±3.5d	8.1±0.7a
2	6	16.2±2.6e	5.3±0.6b
3	7	32.3±5.5c	4.1±0.5c
4	8	41.6±6.4b	3.6±0.5d
5	9	55.8±6.9a	3.3±0.4d

同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.3 不同基本培养基和不同含量的 IBA 对三角槭腋芽诱导的影响

将灭菌后的三角槭外植体分别接种到 1/2 MS 培养基、MS 培养基和 NN69 培养基中,并添加不同含量的 IBA,发现不同基本培养基和不同含量的

IBA 对三角槭腋芽诱导影响不同。如表 3 所示,添加不同含量 IBA 的 1/2 MS 培养基中三角槭腋芽诱导率为 48.7%~72.5%,腋芽展叶时间为 29.5~33.1 d;添加不同含量 IBA 的 MS 培养基中三角槭腋芽诱导率为 51.6%~82.3%,腋芽展叶时间为 28.6~31.2 d;添加不同含量 IBA 的 NN69 培养基中三角槭腋芽诱导率为 42.2%~70.8%,腋芽展叶时间为 30.3~33.5 d。含量分析结果表明,三角槭腋芽诱导最佳培养基为 MS 培养基+0.5 mg/L IBA(表 3)。

表 3 基本培养基和吲哚丁酸 (IBA) 对三角槭腋芽诱导的影响

Table 3 Effects of basic medium and indole-3-butyric acid (IBA) on axillary bud induction in *Acer buergerianum*

编号	基本培养基	吲哚丁酸含量 (mg/L)	腋芽诱导率 (%)	展叶时间 (d)
1	1/2 MS	0	48.7±2.7e	33.1±0.9a
2	1/2 MS	0.3	60.3±3.3c	29.7±1.1cd
3	1/2 MS	0.5	72.5±3.8b	29.5±0.7cd
4	MS	0	51.6±2.1d	31.2±0.8b
5	MS	0.3	69.1±4.5b	29.3±1.7cd
6	MS	0.5	82.3±3.2a	28.6±1.1d
7	NN69	0	42.2±3.6f	33.5±1.3a
8	NN69	0.3	57.4±4.8c	30.9±1.5b
9	NN69	0.5	70.8±5.1b	30.3±1.6bc

同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 不同基本培养基和不同含量的 IBA 对三角槭生根诱导的影响

将已经完全展叶的健壮腋芽切下,转移到含有不同含量 IBA 的生根诱导培养基中培养,10 d 左右不定芽基部出现根原基,20 d 左右不定芽基部出现不定根,30 d 左右不定芽基部形成完整根系。对三角槭不定芽在含有不同含量 IBA 的基本培养基中的生根情况进行统计,发现不同含量 IBA 和不同基本培养基对三角槭不定芽生根的影响显著不同。如表 4 所示,使用 1/2 MS 培养基作为基本培养基,添加不同含量 IBA,生根率为 54.7%~88.7%,平均根数为 2.5~4.9 条;使用 MS 培养基作为基本培养基,添加不同含量 IBA,生根率为 47.5%~73.6%,平均根数为 1.9~3.6 条;使用 NN69 培养基作为基本培养基,添加不同含量 IBA,生根率为 40.2%~63.8%,平均根数为 1.5~3.3 条。当 IBA 含量为 0.2~0.6 mg/L 时,三角槭不定芽生根率和平均根数随着 IBA 含量的增加而增加;当 IBA 含量为 0.8 mg/L 时,生根率和平均根数均下降。对不同基本培养基和不同

含量 IBA 处理的三角槭不定芽的生根情况进行综合分析,发现诱导三角槭不定芽生根的最适培养基为 1/2 MS 培养基+0.6 mg/L IBA(表 4)。

表 4 不同基本培养基和不同含量吲哚丁酸对生根诱导的影响

Table 4 Effects of different basic media and indole-3-butyric acid concentrations on rooting induction in *Acer buergerianum*

编号	基本培养基	吲哚丁酸含量 (mg/L)	生根率 (%)	平均根数 (条)
1	1/2 MS	0.2	54.7±3.6d	2.5±0.2e
2	1/2 MS	0.4	72.3±3.1b	3.8±0.2b
3	1/2 MS	0.6	88.7±3.9a	4.9±0.3a
4	1/2 MS	0.8	75.6±3.5b	3.5±0.4bc
5	MS	0.2	47.5±3.5e	1.9±0.2f
6	MS	0.4	65.1±4.1c	3.1±0.2c
7	MS	0.6	73.6±3.7b	3.6±0.3b
8	MS	0.8	60.9±3.9c	2.9±0.2d
9	NN69	0.2	40.2±2.9f	1.5±0.2g
10	NN69	0.4	52.1±2.8d	2.9±0.3d
11	NN69	0.6	63.8±5.1c	3.3±0.3c
12	NN69	0.8	50.6±4.5d	2.5±0.2e

同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 炼苗与移栽

将炼苗 3 d 的健壮组培苗从培养瓶中取出,用无菌水清洗干净培养基后移栽到营养土和珍珠岩(体积比 3:1)混合基质(使用 20% 多菌灵消毒处理)中。移栽后注意保湿,成活率可达 95% 以上。移栽约 10 d 后,三角槭顶芽有新叶长出(图 1)。

2.6 三角槭不定芽基部细胞形态学分析

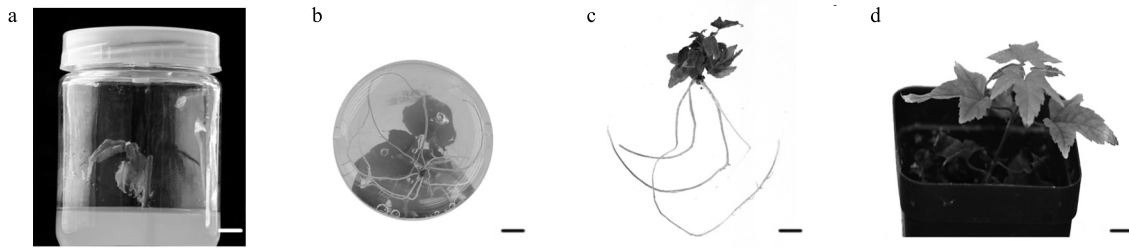
取不同含量 IBA 处理后第 10 d 的不定芽基部制作石蜡切片,观察根原基的发生情况。结果表明,不添加 IBA 的 1/2 MS 培养基中生长的不定芽未见根原基形成(图 2a),添加 0.4 mg/L IBA 的 1/2 MS 培养基中生长的不定芽有根原基开始形成(图 2b),添加 0.6 mg/L IBA 的 1/2 MS 培养基中生长的不定芽上的根原基形成更加明显,形成的根原基将要突破表皮(图 2c)。说明,IBA 可以在一定程度上促进三角槭不定根原基的形成,0.6 mg/L 的 IBA 对促进三角槭不定根原基的形成作用最明显。

2.7 不同含量 IBA 对三角槭不定根原基发育关键基因相对表达量的影响

对转移到含有不同含量 IBA 的 1/2 MS 培养基中生长 10 d 的三角槭不定芽基部进行取样,分析不定根发育关键基因 *AbPIN1*、*AbPIN2* 和 *AbPIN3* 的相

对表达量。结果(图 3)显示,三角槭不定根原基形成过程中的关键基因 *AbPIN1*、*AbPIN2* 和 *AbPIN3* 的

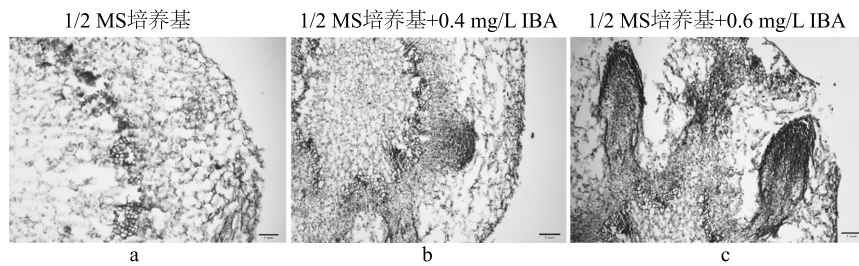
相对表达量都受 IBA 诱导。这 3 个基因的相对表达量与添加 IBA 的含量呈正相关。



a:腋芽诱导;b:生根诱导;c:生根小苗;d:移栽小苗。标尺=1 cm。

图 1 三角槭组培过程中的不同形态

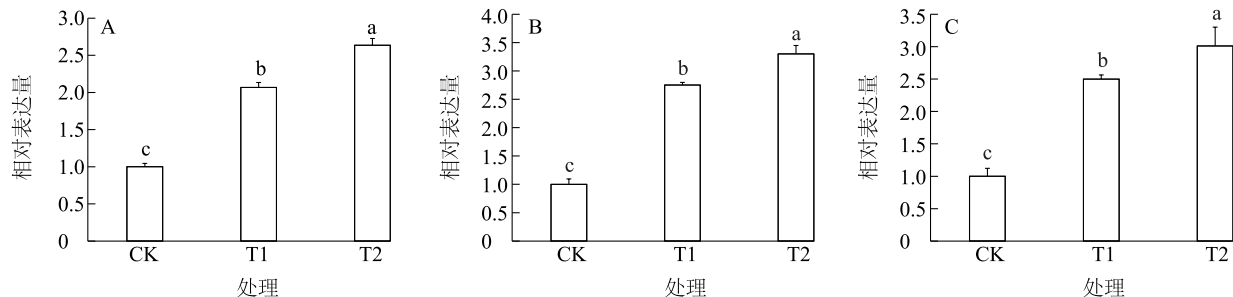
Fig.1 Morphological variations in tissue culture of *Acer buergerianum*



IBA:吲哚丁酸。

图 2 不同含量 IBA 对三角槭不定根原基形成的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of indole-3-butyric acid (IBA) on the formation of adventitious root primordia of *Acer buergerianum*



A: *AbPIN1* 基因相对表达量分析;B: *AbPIN2* 基因相对表达量分析;C: *AbPIN3* 基因相对表达量分析。CK:1/2 MS 培养基;T1:1/2 MS 培养基+0.4 mg/L IBA;T2:1/2 MS 培养基+0.6 mg/L IBA。IBA:吲哚丁酸。不同小写字母表示不同处理间具有显著差异 ($P < 0.05$)。

图 3 *AbPIN1*、*AbPIN2* 和 *AbPIN3* 基因在三角槭生根过程中的相对表达量分析

Fig.3 Relative expression analysis of *AbPIN1*, *AbPIN2* and *AbPIN3* genes in the rooting process of *Acer buergerianum*

3 讨论与结论

三角槭是集观赏、木材和药用为一体的多功能树种,用途极其广泛。秋季叶色橙红,观赏性极佳,是一种极具开发潜力,应用前景广阔的树种。建立完善的三角槭一步成苗技术体系可在保持其优良性状的同时提高其繁殖效率,是三角槭种苗快速繁育

的重要途径。目前,槭属植物组织培养途径有 3 种:间接器官发生、直接器官发生和体细胞胚诱导。槭属植物间接器官发生途径一般以幼嫩茎段和叶片作为外植体,诱导产生愈伤组织,再进一步分化形成不定芽,如复叶槭 (*Acer negundo*)^[17]、白牛槭 (*Acer mandshuricum*)^[18]、羊角槭 (*Acer yangjuechi*)^[19] 和红翅槭 (*Acer fabri*)^[20] 等。槭属植物直接器官发生途

径则直接以带芽茎段为外植体诱导腋芽萌发,再通过诱导不定芽生根实现再生,如元宝枫(*Acer truncatum*)^[21]。有的则将诱导萌发的腋芽增殖为丛生芽,再将单芽分离诱导生根成苗,如鸡爪槭^[22]和色木槭^[23]等。通过体细胞胚诱导途径的槭属植物则利用诱导生成的体细胞胚分化发育形成完整植株,如红花槭十月光辉^[9]。三角槭是利用带芽茎段诱导腋芽萌发,再将腋芽切下,进一步诱导其生根,长成完整植株。因此,三角槭组织培养途径属于直接器官发生途径。

外植体取材时间及消毒方式是三角槭一步成苗的第一个关键步骤。消毒时间过短,污染率不容易控制,消毒时间过长,容易使外植体失水死亡,所以在降低污染率的同时还需要考虑外植体的死亡率。本研究将外植体流水冲洗 2 h 后,再使用 75%乙醇消毒 20 s 和 0.1%氯化汞消毒 15 min 的组合消毒方式,在一定程度上既控制了外植体的污染率,又保证了成活率。除此之外,本研究还对不同时间采集的外植体进行了比较,发现 6 月份采集的外植体污染率最低,这与槭属植物鸡爪槭赤枫^[22]、自由人槭秋焰^[24]和红翅槭^[25]的外植体最佳采集时间一致。这可能与外界气候有关,7 月温度逐渐升高,且进入雨季,湿度增大导致外植体附着较多病菌。部分病菌还会通过伤口或皮孔进入外植体内部,难以消毒彻底,造成污染率升高。

适合的基本培养基是三角槭一步成苗的重要因素之一。不同植物所需要的营养成分不同,适合的基本培养基也不同。目前槭属植物一步成苗过程中常用的基本培养基有 MS 培养基、1/2 MS 培养基、WPM 培养基和 NN69 培养基等。金叶复叶槭使用 MS 和 WPM 培养基均可诱导外植体腋芽生长,但新芽在 MS 培养基中生长更快,在 WPM 培养基中生长缓慢^[26]。羊角槭茎段和叶片愈伤组织诱导最适培养基为 WPM 培养基^[19]。尖尾槭(*Acer caudatifolium*)外植体腋芽萌发的最适培养基为 WPM 培养基^[27]。而鸡爪槭金陵丹枫最适宜的组培快繁培养基为 NN69 培养基^[8]。本研究在三角槭外植体腋芽诱导阶段,使用 3 种添加不同含量生长素的基本培养基对其进行筛选,发现在 MS 培养基中添加适宜含量的生长素对三角槭腋芽诱导效率优于其他 2 种基本培养基。

植物生长调节剂是三角槭一步成苗的决定性因

素。在槭属植物一步成苗过程中常使用的激素有细胞分裂素和生长素。红枫青龙以带芽茎段为外植体,使用 WPM 培养基为基本培养基,同时添加 0.05 mg/L 的细胞分裂素(TDZ)诱导腋芽生长,其诱导率达 96.1%^[28]。鸡爪槭赤枫在诱导外植体腋芽萌发时,使用 IAA 诱导外植体腋芽诱导率明显高于其他激素,其诱导率达 92.1%^[22]。本研究发现以 MS 培养基为基本培养基,添加 0.5 mg/L 的 IBA 可有效诱导三角槭外植体腋芽萌发,其诱导率可达 82.3%。一般生根培养基添加生长素即可获得较好的生根效果。以 DKW 培养基为基本培养基的巨齿槭(*Acer grandidentatum*)研究中,添加 2.5 μmol/L 的 IAA 可迅速获得生根小苗^[29]。在生根培养基中添加 IBA 可成功诱导尖尾槭不定芽生根^[27]。本研究结果表明,1/2 MS 培养基对三角槭不定芽的生根效率优于 MS 培养基,在 1/2 MS 培养基中添加 0.6 mg/L 的 IBA 生根效果最好,生根率可达 88.7%,平均根数为 4.9 条,且根系健壮,移栽成活率高。

PIN-FORMED(PIN)蛋白是生长素极性运输的载体,对植物生根具有重要作用^[30-31]。拟南芥 AtPIN1、AtPIN2、AtPIN3、AtPIN4 和 AtPIN7 蛋白上具有长亲水环,是典型的 PIN 蛋白,介导并保证生长素输出的稳定性^[32]。已在拟南芥、水稻、小麦、玉米等多种作物中发现 PIN 基因家族蛋白具有调控侧根或不定根发育的功能^[33]。本研究通过石蜡切片分析发现 IBA 对三角槭根原基发生的促进作用明显,荧光定量表达分析结果表明,3 个 PIN 家族基因 *AbPIN1*、*AbPIN2* 和 *AbPIN3* 的相对表达量受 IBA 诱导明显。进一步研究发现,与 1/2 MS 培养基相比,1/2 MS 培养基+0.6 mg/L IBA 对三角槭根原基的发生和 PIN 基因相对表达量的诱导效果最显著。

参考文献:

- [1] AKIHISA T, ORIDO M, AKAZAWA H, et al. Melanogenesis-inhibitory activity of aromatic glycosides from the stem bark of *Acer buergerianum*[J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2013, 10(2): 167-176.
- [2] 郑勇平,王 春,杨家强,等. 三角枫扦插繁殖[J]. *中国花卉园艺*, 2018(14): 39-41.
- [3] 姚 旭. 浅析优良乡土树种三角枫的园林应用[J]. *现代园艺*, 2019(13): 82-83.
- [4] 李功兵. 三角枫苗期生长规律研究[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(15): 63-64.
- [5] 李娟娟,樊金拴,魏伊楚,等. 几种槭属植物的油脂营养成分分

- 析[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(5): 55-59.
- [6] 杨银虎. 三角枫繁育技术[J]. 中国花卉园艺, 2016(12): 47-49.
- [7] 胡选萍, 蒋景龙. 槭属(*Acer* L.) 植物组织培养技术的研究进展[J]. 分子植物育种, 2021, 19(22): 7561-7569.
- [8] 朱璐, 李淑顺, 闻婧, 等. 鸡爪槭金陵丹枫组培再生体系的建立[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 54-58.
- [9] DAI C W, YAN Y Y, LIU Y M, et al. The regeneration of *Acer rubrum* L. "October Glory" through embryonic callus[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 309.
- [10] 张佳奇, 高玉福, 徐博, 等. 长白山特有彩叶树种紫花槭的组培快繁[J]. 植物生理学报, 2021, 57(8): 1701-1707.
- [11] 师群航, 刘艳军, 易元慧. 丝棉木组培快繁体系的优化[J]. 天津农学院学报, 2024, 31(6): 39-43.
- [12] 冯雪, 高汝勇, 刘国荣, 等. 红叶石楠组培快繁体系的建立[J]. 衡水学院学报, 2025, 27(1): 29-33.
- [13] 关秋竹, 董肖昌, 董冉, 等. 杜梨组培快繁及组培苗微扦插技术研究[J]. 北方园艺, 2024(20): 23-29.
- [14] 刘涛, 任莉萍, 曹沛沛, 等. 菊花不同时期各组织器官石蜡切片制作条件的优化[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 739-746.
- [15] 朱璐, 闻婧, 马秋月, 等. 鸡爪槭金陵丹枫和金陵黄枫叶片呈色分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(2): 521-527.
- [16] 褚江涛. 三角枫新品种“齐鲁金”的叶色变异机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [17] 张彦妮, 董亚茹, 卓丽环, 等. 激素对复叶槭茎段和叶片愈伤组织诱导及再生的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(4): 516-520.
- [18] 刘宝光, 施莹. 白牛槭的组织培养与快速繁殖[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(6): 613-614.
- [19] 胡佳卉, 王小德. 羊角槭愈伤组织诱导、增殖与分化[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(5): 975-980.
- [20] 唐丽, 钟秋平. 景观树种红翅槭愈伤组织增殖培养[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(11): 69-73.
- [21] 马秋月, 李倩中, 李淑顺, 等. 元宝枫组织培养及快速繁殖技术研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 220-224.
- [22] 马建华, 朱晓菲, 何程相, 等. 鸡爪槭(*Acer palmatum* thunb.) 品种“赤枫”组培再生体系的建立[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(1): 171-178.
- [23] 顾地周, 丛小力, 姜云天, 等. 色木槭的组织培养与快速繁殖[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(2): 314.
- [24] 招雪晴, 苑兆和, 徐榕, 等. 自由人槭“秋焰”组织培养中外植体的选择研究[J]. 山东林业科技, 2009, 39(4): 70-72.
- [25] 唐丽, 钟秋平, 刘显梅, 等. 红翅槭的组织培养及快繁技术[J]. 北方园艺, 2010(9): 136-138.
- [26] 张焕玲. 金叶复叶槭水培嫩枝组织培养体系研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 89-94.
- [27] DURKOVIC J. Regeneration of *Acer caudatifolium* Hayata plantlets from juvenile explants[J]. Plant Cell Reports, 2003, 21(11): 1060-1064.
- [28] 孙红英, 辛全伟, 林兴生, 等. 日本红枫“青龙”组织培养与快速繁殖[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(7): 44-47.
- [29] BOWEN-O'CONNOR C A, HUBSTENBERGER J, KILLOUGH C, et al. *In vitro* propagation of *Acer grandidentatum* nutt[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 2007, 43(1): 40-50.
- [30] BARBOSA I C R, HAMMES U Z, SCHWECHHEIMER C. Activation and polarity control of PIN-FORMED auxin transporters by phosphorylation[J]. Trends in Plant Science, 2018, 23(6): 523-538.
- [31] BLILOU I, XU J, WILDWATER M, et al. The PIN auxin efflux facilitator network controls growth and patterning in *Arabidopsis* roots[J]. Nature, 2005, 433(7021): 39-44.
- [32] RAKUSOVÁ H, FENDRYCH M, FRIML J. Intracellular trafficking and PIN-mediated cell polarity during tropic responses in plants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2015, 23: 116-123.
- [33] 林雨晴, 齐艳华. 生长素输出载体 PIN 家族研究进展[J]. 植物学报, 2021, 56(2): 151-165.

(责任编辑: 陈海霞)