

引文格式: 孙大宽, 马莉, 杨宏艳, 等. 3 种因素对木棉组培苗生根的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(1): 137–144. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202104036](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202104036)

3 种因素对木棉组培苗生根的影响*

孙大宽¹, 马莉¹, 杨宏艳¹, 马焕成¹, 郑晟靖², 唐军荣^{1**}

(1. 西南林业大学, 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南 昆明 650224;

2. 红河州森林和草原资源管理站, 云南 蒙自 661199)

摘要:【目的】进一步完善木棉的组培快繁体系, 实现木棉组培苗不定根的定向诱导, 提高木棉生根苗的移栽成活率。【方法】以木棉组培丛生芽为材料, 通过激素、纵向划痕和暗培养等 3 种处理促进根系诱导, 比较不同处理下木棉组培苗的生根率、根系数量和移栽成活率, 同时对生根过程进行显微观察。【结果】在单独添加 NAA 和 IBA 时, 最高生根率分别为 19.66% 和 39.15%; 而 NAA 与 IBA 组合处理的生根率可达 95.80%, 优于两者单独添加处理, 且生根苗以 1 条不定根为主。纵向划痕处理以 2~3 个划痕效果较好, 其生根率可达 94% 以上, 生根苗以 2 条不定根为主。暗培养处理以 6 d 最佳, 生根率为 97.36%, 生根苗以 1 条不定根为主。显微观察发现: 木棉组培苗生根属于皮层生根类型。对 1、2 和 3 条不定根等 3 种类型的生根苗进行移栽, 其移栽成活率之间无显著差异 ($P>0.05$), 但生物量存在显著差异 ($P<0.05$), 其中 3 条不定根的生根苗生物量最大。【结论】本研究优化了木棉组培苗的生根条件, 为木棉组培苗的移栽炼苗以及不定根的定向调控提供了理论参考。

关键词: 木棉; 组培苗生根; 生根率; 不定根数量

中图分类号: S723.1+32.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2022) 01-0137-08

Effects of Three Factors on the Rooting of Tissue Culture Seedling of *Bombax ceiba*

SUN Dakuan¹, MA Li¹, YANG Hongyan¹, MA Huancheng¹,
ZHENG Chengjing², TANG Junrong¹

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Forest and Grassland Resource Management Station of Honghe Prefecture, Mengzi 661199, China)

Abstract: [Purpose] To further improve the tissue culture and rapid propagation system of *Bombax ceiba*, realizing the directional induction of adventitious roots of tissue culture seedlings of *B. ceiba*, and improving the transplanting survival rate of root seedlings of *B. ceiba*. [Methods] The clustered buds of *B. ceiba* get from the tissue culture were used as materials. The root induction was promoted by hormone, longitudinal scratch and dark culture treatments, so as to compare the differences in the rooting rate, root number of tissue culture seedlings and transplanting survival rate under

收稿日期: 2021-04-21 修回日期: 2021-10-12 网络首发日期: 2022-01-04

*基金项目: 西南林业大学木棉纤维人工林产业化培育省创新团队 (2018CH014); 国家自然科学基金项目 (31560207, 31260175); 云南省“云岭教学名师”培育项目。

作者简介: 孙大宽 (1995—), 男, 云南腾冲人, 在读硕士研究生, 主要从事林木遗传育种研究。

E-mail: 2829383509@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 唐军荣 (1982—), 男, 广西全州人, 博士, 高级实验师, 主要从事珍稀植物快繁与林木种质创新研究。E-mail: tjry2016@swfu.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211231.1644.002.html>



different treatments. The rooting process was observed by microscope. [Results] The highest rooting rate was 19.66% and 39.15% respectively when NAA or IBA was added separately, and the rooting rate was much higher when NAA and IBA used together, and the highest rooting rate was 95.80%, and the rooting seedling with one adventitious root accounted for the majority. In the treatment of longitudinal scratches, the effect of two or three scratches was better, and the rooting rate could reach more than 94%, with two adventitious roots as the majority. In dark culture, the best treatment was six days, and the rooting rate was 97.36%, and the rooting seedling with one adventitious root accounted for the majority. The microscopic observation showed that the rooting of tissue culture seedling of *B. ceiba* belonged to species that generate roots form cortex. In addition, there was no significant difference in transplanting survival rate among one, two or three adventitious of rooting seedling ($P>0.05$), but there was significant difference in biomass ($P<0.05$). Among them, the biomass of the transplanted seedling with three adventitious roots was the largest. [Conclusion] In this study, the rooting conditions of tissue culture seedling of *B. ceiba* were optimized, which provided a theoretical reference for the transplanting of tissue culture seedling of *B. ceiba* and the directional regulation of adventitious roots.

Keywords: *Bombax ceiba*; rooting *in vitro*; rooting rate; adventitious root number

木棉 (*Bombax ceiba*) 是木棉科 (Bombacaceae) 木棉属 (*Bombax*) 落叶高大乔木, 分布于中国云南、四川、贵州和广西等省 (区) 的亚热带地区^[1]。木棉果实中含有大量的木棉纤维, 纤维壁薄, 中空率高达 97%, 具有很好的保暖性和耐热性^[2-3]; 木棉纤维作为一种天然纤维素纤维, 是良好的填充材料和纺织原料^[4]。木棉也是中国南部地区及南亚国家的常用民间药物, 在止血、解暑和治疗胃肠道疾病等方面有广泛的应用^[5]。木棉花作为传统广东凉茶的主要原料, 食用历史悠久, 食药价值高^[6]。此外, 木棉树形优美, 花朵漂亮, 常作为园林绿化的行道树^[7]。更为重要的是, 木棉作为干热河谷地区的优势种, 适应性强, 是一种兼具经济效益和生态效益的多用途树种。

木棉可通过种子、扦插和嫁接等方式进行繁殖, 但对于优良单株的快速繁殖, 植物组织培养是一种快速高效的繁殖方法, 且能够保持母株的优良性状。组培苗生根是植物组织培养技术的重要环节, 是决定植物组织培养是否成功的关键因素, 也是植物组培快繁体系中的关键环节^[8]。但组培苗生根是一个复杂的生理过程, 特别是木本植物生根诱导受多种因素影响, 如培养基类型^[9]、组成成分^[10]、激素种类和浓度^[11]及基因型等^[12], 故生根相对更加困难^[13-14], 且组培生根苗的根系质量直接影响其移栽成活后苗木的质量。组培苗生根是由无根的顶芽在可控的环境中培养获得,

木质化程度极低, 且是苗木培育的早期, 因此不定根诱导可控性强、可塑性高。基于此, 本研究以木棉组培丛生芽为材料, 研究不同激素、纵向划痕和暗培养等处理对木棉组培苗生根的影响, 同时对木棉组培苗生根过程进行动态观察, 分析其内部结构的变化特点, 从而优化木棉组培苗的生根条件, 进一步完善木棉的组培快繁体系, 为后续木棉组培苗移栽炼苗以及不定根的定向调控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

以 MS+6-BA 0.5 mg/L+IBA 0.05 mg/L+琼脂 4.2 g/L+蔗糖 40 g/L 及 pH 5.8 的培养基上培养 50 d 的木棉组培丛生芽为试验材料。

1.2 试验方法

1.2.1 生长素处理的生根试验

生根的生长素为 NAA 和 IBA, 其中, NAA 质量浓度为 0、0.2、0.4、0.8、1.2 和 1.6 mg/L, IBA 质量浓度为 0、0.4、0.8、1.2、1.6 和 2.0 mg/L。采用单独添加 NAA 或 IBA 以及在此基础上选择部分质量浓度的 NAA+IBA 组合进行生根试验, 以不添加 NAA 和 IBA 为对照, 共 16 个处理 (表 1)。所有处理均以 1/2 MS 为基本培养基, 添加蔗糖 15 g/L、琼脂 4.2 g/L 和活性炭 0.2 g/L, pH 5.8。培养条件为光照 12 h/d, 光照强度为 1200 lx, 培

养温度为 (25±2) ℃。每个处理设 3 次重复, 每个重复 30 株, 共 90 株, 50 d 后统计数据, 分析不同处理对木棉组培苗生根率的影响。

1.2.2 机械损伤处理的生根试验

对生根材料的基部进行纵向划痕机械损伤处理。用接种刀在基部分别纵向划出 0、1、2 和 3 个划痕, 划破皮层即可。使用的培养基配方为 1/2 MS+IBA 1.6 mg/L+NAA 0.4 mg/L+蔗糖 15 g/L+琼脂 4.2 g/L+活性炭 0.2 g/L, pH 5.8。每个处理接种 15 瓶, 每瓶 6 株, 重复 3 次。培养条件及统计方法同 1.2.1 节。

1.2.3 暗培养处理的生根试验

试验开始时即对木棉组培丛生芽进行不同时间的暗培养, 设置遮光时长分别为 0、3、6、9 和 12 d, 之后转入正常培养条件。使用的培养基配方为 1/2 MS+IBA 1.6 mg/L+NAA 0.4 mg/L+蔗糖 15 g/L+琼脂 4.2 g/L+活性炭 0.2 g/L, pH 5.8。每个处理接种 15 瓶, 每瓶 6 株, 重复 3 次。培养条件及统计方法同 1.2.1 节。

1.2.4 组培苗生根过程的解剖结构观察

以在 pH 5.8、1/2 MS+IBA 1.6 mg/L+NAA 0.4 mg/L+蔗糖 15 g/L+琼脂 4.2 g/L+活性炭 0.2 g/L 的生根培养基上培养的材料为观察对象, 分别在

生根接种后第 0、3、6、9 和 12 天取样, 各阶段随机取 5 株苗。取生根苗的基部置于 FAA 中固定, 然后经酒精梯度脱水、切片 (厚度 8~12 μm) 和番红—固绿染色后制成永久切片, 并使用德国徕卡 DM750 生物显微镜进行观察和拍照。

1.2.5 炼苗

将不同根系数量的木棉组培生根苗在室内自然光下闭瓶炼苗 7 d, 之后将生根苗从组培瓶中取出, 用清水洗净培养基后移栽至 $m_{\text{红壤}}: m_{\text{腐殖土}} = 3:1$ 的基质中, 每个处理设 3 次重复, 每次重复 30 株。在温度 20~30 ℃、湿度 ≥90% (采用塑料棚保湿) 的环境中按组培苗炼苗的方法^[15]进行管护, 180 d 后统计成活率。此外, 随机从每个处理中选取 10 株苗木, 用清水洗净泥土, 吸干表面水分后利用电子天平立即称其鲜质量。

1.2.6 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行整理, 并运用 SPSS 21.0 对数据进行统计分析, 统计结果采用“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 不同生长素处理对木棉组培苗生根的影响

由表 1 可知: 不同生长素处理间木棉组培苗

表 1 不同生长素处理对组培苗生根的影响

Tab. 1 Effects of different auxin treatments on the rooting of tissue culture seedling

试验编号 test No.	生长素质量浓度/(mg·L ⁻¹) mass concentration of auxin		生根率/% rooting rate	不同根系数量生根苗占比/% proportion of rooting seedling with different numbers of roots		
	IBA	NAA		类型I type I	类型II type II	类型III type III
1	0	0.4	19.66±0.45 j	90.24±0.51 bc	5.32±0.55 h	4.43±0.28 e
2	0	0.8	11.25±0.78 lm	81.43±0.92 ef	17.78±0.40 f	0.79±0.68 f
3	0	1.2	9.72±0.61 lm	88.79±0.81 bcd	10.81±0.87 g	0.39±0.33 g
4	0	1.6	12.16±1.63 kl	72.04±1.14 g	19.03±0.58 ef	8.93±0.69 d
5	0.4	0	16.01±1.58 jk	90.16±1.81 bc	9.73±1.70 g	0.11±0.11 g
6	0.8	0	24.35±1.00 i	99.90±0.10 a	0.10±0.00 i	0.00±0.00 g
7	1.2	0	39.15±1.81 g	76.80±4.11 f	22.41±3.53 e	0.78±0.66 fg
8	1.6	0	34.21±2.04 h	86.47±1.34 cd	10.57±0.62 g	2.96±0.77 ef
9	0.8	0.4	54.89±1.04 f	83.89±0.75 de	15.76±0.65 f	0.35±0.28 g
10	1.2	0.4	60.25±0.82 e	50.41±0.51 i	38.20±0.84 ab	11.39±0.70 c
11	1.6	0.4	87.95±1.43 b	42.63±1.46 j	41.10±0.62 a	16.27±1.35 b
12	2.0	0.4	95.80±1.55 a	46.71±2.03 ij	36.00±2.35 b	17.29±0.89 b
13	1.2	0.2	67.05±1.71 d	65.19±2.72 h	26.68±0.61 d	8.13±2.14 d
14	1.6	0.2	62.44±1.46 e	68.24±0.80 gh	31.75±0.80 c	0.01±0.01 g
15	1.6	0.8	82.576±1.72 c	46.05±1.45 ij	31.40±0.74 c	22.55±0.71 a
CK	0	0	7.27±0.67 m	91.76±1.00 b	8.23±1.00 gh	0.00±0.00 g

注: 类型I、II和III分别为有1、2和3条不定根的生根苗占该处理下全部生根苗数量的百分比; 不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$); 下同。

Note: Type I, II and III indicate the proportion of rooting seedling with one, two and three adventitious root in the total number of rooting seedling under the treatment, respectively; different lowercase letters indicate the significant difference between different treatments ($P<0.05$); the same as below.

生根率存在显著差异，且均会出现 3 种类型的生根苗 (图 1)。其中，单独添加 NAA 或 IBA 时，可在一定程度上促进木棉组培苗生根，但其生根率最高仅为 39.15%，且生根苗以 1 条不定根为主。而 NAA 与 IBA 组合均可显著提高组培苗的生根率，对生根苗的根系数量也具有一定促进效果。此外，在 NAA 与 IBA 组合处理中，当 NAA 质量浓度为 0.4 mg/L、IBA 质量浓度从 0.8 mg/L 上升到 2.0 mg/L 时，其生根率呈上升趋势，以

2 条和 3 条不定根为主的生根苗数量也总体呈上升趋势。与单一生长素处理相比，NAA 与 IBA 组合处理的生根率可提高 15.74%~56.65%。综合来看，IBA 2.0 mg/L+NAA 0.4 mg/L 组合的生根率最高，IBA 1.6 mg/L+NAA 0.4 mg/L 组合的 2 条及以上不定根的生根苗占比最高。从不定根的数量考虑，后续试验选用 IBA 1.6 mg/L+NAA 0.4 mg/L 的组合进行试验。

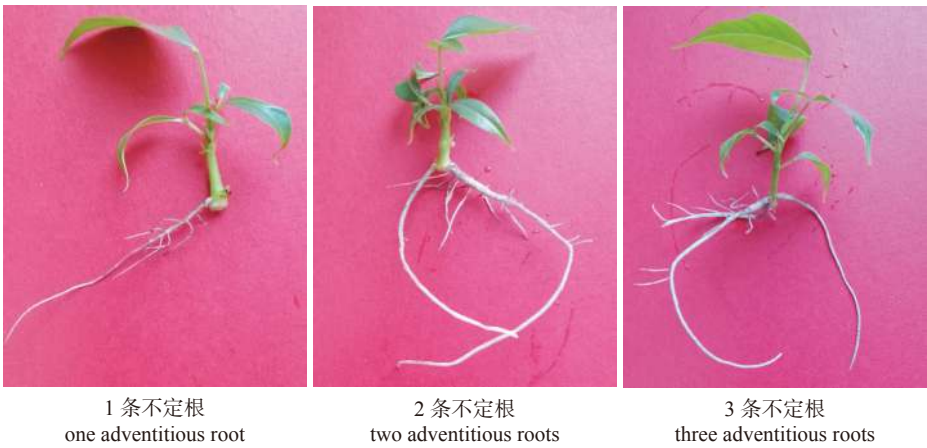


图 1 不同不定根数量的木棉生根苗

Fig. 1 Rooted seedling of *Bombax ceiba* with different numbers of adventitious roots

2.2 不同数量纵向划痕处理对木棉组培苗生根的影响

由表 2 可知：对生根材料的基部进行纵向划痕处理，可显著促进木棉组培苗生根，但纵向划痕数量增加对组培苗的生根率无显著影响。在不同处理中，1 条不定根生根苗所占比例最高的为 1 个纵向划痕处理，为 46.56%；2 条不定根生根

苗所占比例最高的为 3 个纵向划痕处理，为 47.56%；3 条不定根生根苗所占比例最高的为 2 个纵向划痕处理，为 22.84%。可见，纵向划痕数量增加可在一定程度上增加生根苗的不定根数量。综合来看，以 2~3 个纵向划痕处理的生根效果较好，其生根率可达 94% 以上，且 2 条和 3 条不定根数量的生根苗所占比例较高。

表 2 不同纵向划痕数量对组培苗生根的影响

Tab. 2 Effect of different longitudinal scratch numbers on the rooting of tissue culture seedling

纵向划痕数量 longitudinal scratches	生根率/% rooting rate	不同根系数量生根苗占比/% proportion of rooting seedling with different numbers of roots		
		类型I type I	类型II type II	类型III type III
0	87.95±1.43 b	42.67±1.46 b	41.10±0.62 b	16.23±1.35 b
1	92.75±1.25 a	46.56±1.35 a	43.72±1.81 b	9.72±0.97 c
2	95.65±0.87 a	33.29±0.77 c	43.87±0.17 b	22.84±0.67 a
3	94.42±1.68 a	34.44±0.44 c	47.56±0.42 a	17.99±0.84 b

2.3 不同暗培养时间对木棉组培苗生根的影响

由表 3 可知：暗培养处理可以促进木棉组培苗生根。从生根率来看，随着暗培养时间的增加其组培苗生根率呈先上升后下降的趋势，其中以

暗培养时长为 3 和 6 d 时的生根率最高，分别为 94.30% 和 97.36%。生根苗的根系数量均以 1 条不定根为主，其次是 2 条不定根。但暗培养 6 d 的生根苗中，2 条不定根所占比例显著高于暗培

表 3 不同暗培养处理时间对组培苗生根的影响
Tab. 3 Effect of different dark culture time on rooting of tissue cultured seedling

暗培养时间/d dark culture time	生根率/% rooting rate	不同根系数量生根苗占比/% proportion of rooting seedling with different number of roots		
		类型I type I	类型II type II	类型III type III
0	87.95±1.42 c	42.67±1.46 d	41.10±0.62 a	16.23±1.35 a
3	94.30±0.56 ab	63.47±0.87 b	24.63±0.66 c	11.90±0.44 b
6	97.36±0.60 a	58.20±1.74 c	31.04±1.73 b	10.76±1.96 b
9	92.06±0.94 b	55.29±0.51 c	40.76±0.25 a	3.95±0.46 c
12	88.30±1.14 c	67.87±0.92 a	26.52±1.00 c	5.61±0.51 c

养 3 d。此外, 与不进行暗培养的处理相比, 暗培养处理后 1 条不定根的生根苗数量所占比例显著增加, 2 条和 3 条不定根的生根苗数量所占比例则相应减少。综合来看, 暗培养处理可提高木棉组培苗生根率, 但会影响其不定根数量。

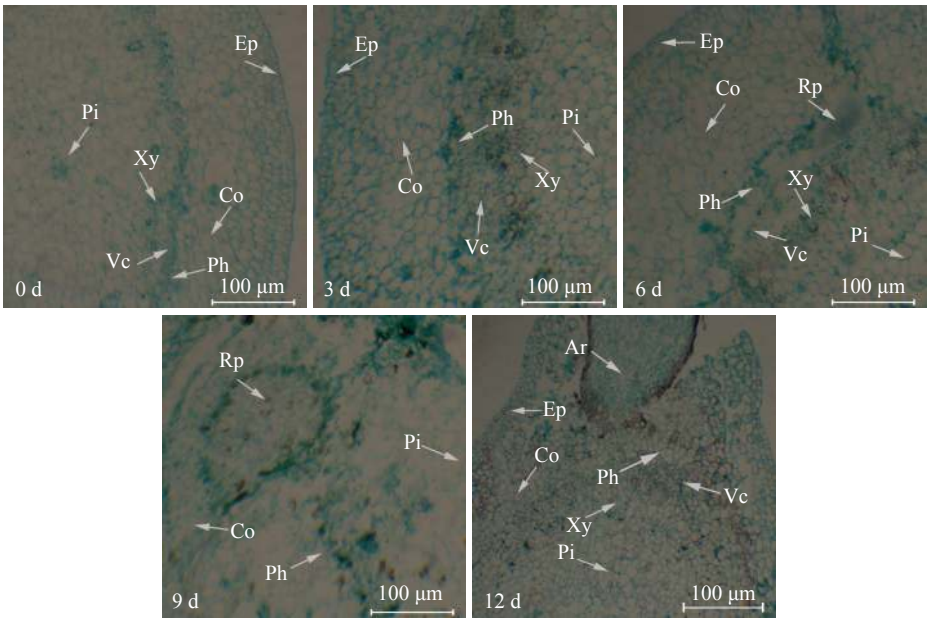
2.4 组培苗生根过程的解剖结构变化

由图 2 可知: 从生根诱导茎段的次生解剖结构中未发现潜伏根原基的存在, 这说明用于生根的材料在最开始没有根原基发生; 生根诱导 3 d 时, 靠近韧皮层的部分皮层细胞密集, 紧密附着于韧皮层, 木质部的密度增加, 和附着于韧皮层的紧密皮层细胞团一起向外凸起; 生根诱导 6 d 时, 韧皮层和木质部分离, 中间形成一团薄壁细胞向皮层组织挤压往外延伸, 初始根原基形成,

初始根原基外的皮层细胞紧密聚集, 形成条带状细胞带; 生根 9 d 时, 初始根原基分裂膨胀, 成为根原始体, 外侧皮层细胞被挤压, 细胞群紧密排列聚集, 并向外凸起; 生根 12 d 时, 根原始体突破皮层和表皮层, 形成不定根, 此时, 不定根与韧皮层连接的一段细胞相互融合, 不定根从外向内分化形成根的导管系统与茎段木质部连接, 完成组培苗生根诱导过程。由上可知, 木棉的组培生根苗为皮层生根型。

2.5 移栽炼苗

由表 4 可知: 移栽 180 d 后, 3 种根系类型的生根苗炼苗成活率均在 90% 以上, 且各种类型的成活率差异不显著 ($P>0.05$), 但生物量存在显著差异 ($P<0.05$)。具体表现为 3 条不定根生根苗



注: Ep. 表皮; Co. 皮层; Ph. 韧皮层; Xy. 木质部; Vc. 维管形成层; Pi. 髓部; Rp. 根原基; Ar. 不定根。
Note: Ep. epidermis; Ph. phloem; Xy. xylem; Vc. vascular cambium; Pi. pith; Rp. root primordium; Ar. adventitious roots.

图 2 生根过程中木棉组培苗茎段横切面解剖结构变化
Fig. 2 Change of cross section of stem segment anatomical structure during rooting of tissue cultured seedling of *B. ceiba*

的鲜质量显著大于 1 条和 2 条不定根生根苗的鲜质量, 但 1 条和 2 条不定根生根苗的鲜质量差异不显著。此外, 3 种类型的生根苗在移栽炼苗后, 虽然不定根均会继续生长, 但其根系形态最终并没有趋于一致 (图 3)。可见, 生根苗的不定根数量对其移栽炼苗后的生长会产生直接影响。

表 4 不同类型组培苗移栽生长情况

Tab. 4 Transplanting growth of different types tissue culture seedlings

组培苗类型 tissue culture seedling type	成活率/% survival rate	鲜质量/g fresh weight
类型 I type I	90.00±5.09 a	1.38±0.17 b
类型 II type II	92.22±1.92 a	1.34±0.14 b
类型 III type III	91.11±6.95 a	2.80±0.44 a



图 3 不同不定根数量的木棉移栽苗

Fig. 3 Transplanted seedling of *B. ceiba* with different number of adventitious roots

3 讨论

植物根系的发生与伸长主要受生长素调控, 它能够刺激植物体根原基的发生发育, 且会出现生长素峰值^[16-17]。在组培苗生根过程中, 常通过添加一定浓度的生长素改变内源生长素水平达到生根目的^[18]。程广有等^[19]通过添加 1.0 mg/L IBA 促进木棉组培苗生根, 生根率高达 96%。本研究中, 通过添加一定质量浓度的 NAA 或 IBA 虽可在一定程度上提高木棉组培苗的生根率, 但其生根率较低, 仅为 39.15%。导致这一现象出现的原因可能是试验材料基因型差异所致。对于某些苗木而言, 仅添加单一的生长素虽可促进生根, 但其生根率往往达不到生产需求^[20]。因此, 在生根培养过程中, 许多植物常采用 2 种激素配合使用的方式提高组培苗的生根率^[21-22]。如在杜梨组培苗生根阶段, 仅添加 IAA 或 IBA 其生根率均低于 36%, 但二者配合使用生根率可达 88.9%^[23]。同样地, IBA 和 NAA 组合使用也可显著提高木棉组培苗的生根率, 提升幅度达 15.74%~56.65%, 同时 2 条及以上不定根的生根苗占比也增加。这

表明 IBA 与 NAA 组合优于单一生长素对木棉组培苗的作用效果。

在植物扦插生根或组培苗生根过程中, 常会对其穗条或组培苗基部进行切口处理以提高其生根能力。这主要是由于植物受伤后, 伤口释放的信号物质会促进伤口生长素合成, 使其在不定根起源细胞周围积累, 从而促进不定根再生^[24-25]; 同时, 伤口也利于外源施用的生长素从伤口处进入茎内, 与植株体内的内源生长素共同作用促进不定根的发生^[26]。在木棉组培苗生根过程中, 对其组培苗基部进行纵向划痕处理有助于生根, 并可在一定程度上影响生根苗不定根的数量。研究表明: 木棉组培苗生根时, 以 2~3 个纵向划横处理的生根效果最佳, 生根率可达 94% 以上, 且 2 条和 3 条不定根的生根苗占比较高。

在植物组培生根过程中, 暗培养可通过影响植物体内的激素代谢水平促进多数植物离体生根^[24,27-28]。如在澳洲青苹组培苗生根试验中, 暗培养能显著促进其生根, 且生根苗根系较整齐一致^[29]。本研究中, 暗培养可显著影响木棉组培苗的生根率, 当暗培养时间为 6 d 时, 组培苗的生

根率较好, 为 97.36%; 但值得注意的是, 暗培养虽可以提高木棉组培苗的生根率, 但会影响生根苗的不定根数量, 这与邹喻等^[30]对粉蕉的研究有所不同。此外, 并不是暗培养时间越长越好, 时间过长会造成组培苗黄化, 因此在组培苗生根时, 需要按材料选择暗培养时间^[29]。

根据不定根的发生位置, 组培苗生根可分为皮层生根型、愈伤组织生根型和综合生根型。多数植物的生根类型可随诱导条件的不同而发生变化。本研究发现: 木棉组培苗不定根由韧皮层和木质部中间形成的一团薄壁细胞不断向外伸长生长而形成, 属皮层生根类型, 其不定根发生形式与核桃和油茶组培苗^[31-32]相似。此外, 组培苗生根的关键是根原基的形成, 其不定根原基按形成时间可分为潜伏根原始体和诱导根原始体^[33]。从木棉生根诱导茎段的次生解剖结构中未发现潜伏根原始体, 可见, 木棉组培苗的不定根是由在生根培养基上培养 6 d 后形成的诱导根原始体发育而来。在组培苗生根过程中, 这种类型产生的不定根相对于愈伤组织发育而来的不定根质量更好, 有利于后期移栽炼苗成活。此外, 不定根数量的增加有助于移栽苗生长。

对 3 种类型的木棉生根苗进行移栽炼苗, 发现 3 种类型生根苗的移栽成活率间无显著差异, 含有 3 条不定根的生根苗生物量积累较多。可见, 不定根数量会直接影响后续移栽苗的根系发育和苗木生物量。因此, 在生根过程中, 既要考虑组培苗的生根率, 也要考虑其不定根的数量。传统的苗木根系可通过定向控水控肥、喷施外源激素和切根等多种方式来实现根系形态的重塑^[34-36]。而在本研究中, 基于植物组织培养技术, 利用组培苗在生根阶段材料幼嫩、可塑性强且易于控制和观察等优势, 通过使用添加生长素、划痕处理和暗培养等手段定向调控生根苗的根系形态。在干热河谷地区造林, 由于干旱少雨, 苗木的质量直接影响其造林成活率, 也影响林木初期的生长速度, 优质苗木的根系生长能力强, 能够迅速适应新的生长环境, 抵御各种生物和非生物胁迫^[37-38]。因此, 今后需进一步研究组培生根苗的根系形态与苗木质量之间的关系。

4 结论

通过合理的激素配比、基部纵向划痕以及暗

培养处理均可促进木棉组培苗生根, 同时也会影响不定根的数量。其中, NAA 与 IBA 组合使用显著优于单一激素处理, 纵向划痕处理以 2~3 个最佳, 暗培养以处理 6 d 最佳; 3 条不定根的生根苗移栽炼苗后生物量增加最快。研究结果优化了木棉组培苗的生根条件, 进一步完善了木棉的组培快繁体系, 可为后续的木棉组培苗移栽炼苗批量化生产以及不定根的定向调控提供理论基础。

[参考文献]

- [1] 中国科学院, 中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 肖红, 于伟东, 施楣梧. 木棉纤维的基本结构和性能[J]. 纺织学报, 2005, 26(4): 4. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9721.2005.04.002.
- [3] 谈丽平, 王府梅, 刘维. 木棉系列絮料的保暖性[J]. 纺织学报, 2007, 28(4): 38. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9721.2007.04.011.
- [4] 肖红, 于伟东, 施楣梧. 木棉纤维的特征与应用前景[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2005, 31(2): 121. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0444.2005.02.029.
- [5] 孟凡燕, 肖颖梅, 夏星. 木棉药理活性研究进展[J]. 海峡药学, 2015, 27(12): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3765.2015.12.002.
- [6] 林庆景. 木棉花黄酮提取工艺及生理活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [7] 陆璃, 叶广荣, 胡彦辉, 等. 广州市园林绿地木棉应用现状及种植规划[J]. 福建林业科技, 2013, 40(4): 157. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7351.2013.04.35.
- [8] 成晓华, 杜国强, 师校欣. 甜查理和红颜草莓组培苗根系发育影响因子分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(24): 38. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2017.24.008.
- [9] 赵展平, 何芳, 唐军荣, 等. 樟叶越桔组培苗生根和移栽技术研究[J]. 广西植物, 2019, 39(7): 967. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201809011.
- [10] 邢文婷, 陈彧, 许奕, 等. 新优花卉红冠桉腋芽快繁体系优化[J]. 分子植物育种, 2020, 18(15): 5106. DOI: 10.13271/j.mpb.018.005106.
- [11] 方明, 欧春青, 王斐, 等. 4种梨试管苗组织培养和生根体系的建立[J]. 中国南方果树, 2019, 48(5): 74.
- [12] 任艳. 花生组织培养技术的优化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [13] RANCILLAC M, FAYE M, DAVID A. *In vitro* rooting of cloned shoots in *Pinus pinaster*[J]. Physiologia Plantarum, 2010, 56(1): 97. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1982.tb04905.x.
- [14] 周新华, 朱宜着, 桂尚上, 等. 多花黄精组培生根技术研究[J]. 经济林研究, 2015, 33(4): 102. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2015.04.018.
- [15] 傅鸿达. 植物组织培养[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [16] KAZAN K. Auxin and the integration of environmental signals into plant root development[J]. Annals of Botany,

- 2013, 112(9): 1655. DOI: [10.1093/aob/mct229](https://doi.org/10.1093/aob/mct229).
- [17] PACURAR D I, PERRONE I, BELLINI C. Auxin is a central player in the hormone cross-talks that control adventitious rooting[J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, 151(1): 83. DOI: [10.1111/pp1.12171](https://doi.org/10.1111/pp1.12171).
- [18] DONG N G, PEI D, YIN W L. Tissue-specific localization and dynamic changes of endogenous IAA during poplar leaf rhizogenesis revealed by in situ immunohistochemistry[J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2012, 6(2): 165. DOI: [10.1007/s11816-011-0209-9](https://doi.org/10.1007/s11816-011-0209-9).
- [19] 程广有, 韩雅莉, 李琰, 等. 木棉的组织培养和快速繁殖[J]. *植物生理学通讯*, 2004, 40(3): 337.
- [20] 智邵川, 石岭. 不同培养基对构树组培苗生根的影响[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(8): 1207. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2481.2020.08.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2481.2020.08.08).
- [21] 李慧娟, 朴炫春, 费丽坤, 等. 影响西洋参不定根组培增殖的几种因素及皂苷生产的研究[J]. *延边大学农学报*, 2011, 33(2): 77. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7999.2011.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7999.2011.02.001).
- [22] 朱碧华, 王旭, 刘国锋, 等. 苯乙酸和吲哚丁酸对胡颓子扦插生根的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(30): 160. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2018.30.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2018.30.025).
- [23] 闫帅, 张少瑜, 徐锴, 等. 杜梨组培生根过程中多胺、内源激素及相关氧化酶活性的变化[J]. *果树学报*, 2019, 36(3): 318. DOI: [10.13925/j.cnki.gsxb.20180372](https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20180372).
- [24] 张焕欣, 董春娟, 李福凯, 等. 植物不定根发生机理的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2017, 37(7): 1457. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2017.07.1457](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2017.07.1457).
- [25] 温绍廷, 顾泽玮, 喻杰, 等. 伤口信号调节植物再生的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(8): 1719. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2019.0573](https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2019.0573).
- [26] POP T I, PAMFIL D C, PAMFIL C. Auxin control in the formation of adventitious roots[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2011, 39(1): 307. DOI: [10.15835/nbha3916101](https://doi.org/10.15835/nbha3916101).
- [27] 李际红, 韩小娇, 卢胜西, 等. 红叶石楠生根培养与根系活力的研究[J]. *园艺学报*, 2006, 33(5): 1129. DOI: [10.3321/j.issn:0513-353X.2006.05.045](https://doi.org/10.3321/j.issn:0513-353X.2006.05.045).
- [28] 孟颢光, 张朝红, 王跃进. 培养基和培养条件对‘砭山酥梨’转基因试管苗生根的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(3): 72. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2011.03.012](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2011.03.012).
- [29] 张志勤, 李焘, 王喆. 澳洲青苹组培苗生根及移栽技术研究[J]. *西北农业学报*, 2003, 12(2): 126. DOI: [10.7606/j.issn.1004-1389.2003.2.042](https://doi.org/10.7606/j.issn.1004-1389.2003.2.042).
- [30] 邹瑜, 林茜, 龙芳, 等. ‘金粉1号’粉蕉高温暗培养组培快繁技术研究[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(12): 2950. DOI: [10.16213/j.cnki.scjas.2016.12.032](https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2016.12.032).
- [31] 王清民, 彭伟秀, 吕保聚, 等. 核桃试管不定根的组织学研究[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(4): 719. DOI: [10.3321/j.issn:1000-4025.2006.04.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-4025.2006.04.012).
- [32] 吴幼媚, 王鹏良, 姚绍嫦, 等. 油茶组培苗器官发生的形态学与解剖学研究[J]. *广西植物*, 2013, 33(6): 745. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3142.2013.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3142.2013.06.005).
- [33] 王金祥, 严小龙, 潘瑞炽. 不定根形成与植物激素的关系[J]. *植物生理学报*, 2005, 41(2): 133.
- [34] 程中倩, 李国雷. 氮肥和容器深度对栓皮栎容器苗生长、根系结构及养分贮存的影响[J]. *林业科学*, 2016, 52(4): 21. DOI: [10.11707/j.1001-7488.20160403](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20160403).
- [35] DANIELA R, MARCO G, KRISTINA M, et al. Natural genetic variation shapes root system responses to phytohormones in *Arabidopsis*[J]. *The Plant Journal*, 2018, 96(2): 468. DOI: [10.1111/tpj.14034](https://doi.org/10.1111/tpj.14034).
- [36] KUMAR S S, AKANKSHA T, KUMAR M P. External nitrogen and carbon source-mediated response on modulation of root system architecture and nitrate uptake in wheat seedlings[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 38(1): 283. DOI: [10.1007/s00344-018-9840-9](https://doi.org/10.1007/s00344-018-9840-9).
- [37] 鲁敏, 姜凤岐, 宋轩. 容器苗质量评定指标的研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(6): 763. DOI: [10.3321/j.issn:1001-9332.2002.06.029](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9332.2002.06.029).
- [38] JACOBS D F, SALIFU K F, SEIFERT J R. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings[J]. *New Forests*, 2005, 30(2/3): 235. DOI: [10.1007/s11056-005-5419-y](https://doi.org/10.1007/s11056-005-5419-y).

责任编辑: 何承刚