

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.020

论文标题： 直干桉高效组培快繁体系构建及高繁殖能力基因型筛选

作　　者： 周玉吉，曹 越，王鸿嶙，等

收稿日期： 2025-07-23

引文格式： 周玉吉,曹越,王鸿嶙,等.直干桉高效组培快繁体系构建及高繁殖能力基因型筛选[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):205-215.

Zhou Y J, Cao Y, Wang H L, et al. Construction of a highly efficient tissue culture and rapid propagation system for *Eucalyptus maidenii* and screening of genotypes with high reproductive capacity[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):205-215.

相关论文推荐

Recommended articles

巨桉脱水素基因*EgrDHN*家族鉴定及表达模式分析

Identification and expression pattern analysis of *EgrDHN* gene family in *Eucalyptus grandis*

大花序桉径向生长相关基因表达分析

Analysis of gene expression related to radial growth of *Eucalyptus cloeziana*

巨桉*FLA*基因家族成员的鉴定与分析

Identification and analysis of *FLA* gene family members in *Eucalyptus grandis*

一种可视化鉴定尾巨桉阳性转化子的基因编辑体系构建研究

Construction and transformation of CRISPR/Cas9 vector of *ALB3* gene in *Eucalyptus urophylla* × *E.grandis*

大花序桉顶芽转录组SSR位点信息分析

Bioinformatic analysis of simple sequence repeat (SSR) loci in *Eucalyptus cloeziana* buds transcriptome

尾巨桉*EuNF-YB1*基因克隆、亚细胞定位及表达特异性分析

Cloning, subcellular localization and expression pattern analysis of *EuNF-YB1* gene in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.020
http: //qks.csuft.edu.cn

直干桉高效组培快繁体系构建及高繁殖能力基因型筛选

周玉吉[1]，曹　越[2]，王鸿嶙[1]，孔令荣[1]，吕少念[1]，侯玉帆[1]，陆庄跃[1]，
何真敏[1]，曹子林[1]，王晓丽[1]

（1. 西南林业大学 a. 西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室；
b. 生态与水土保持学院，云南 昆明 650224；2. 湖北省林业科学研究院，湖北 武汉 430075）

摘　要：【目的】构建直干桉 *Eucalyptus maidenii* 组培快繁体系，筛选具有高繁殖能力的基因型，为直干桉工厂化育苗提供重要的理论基础和技术支持。【方法】以直干桉优良家系的种子为试验材料，采用全因子和正交试验等方法，探究直干桉初代培养、继代增殖、不定根诱导和炼苗移栽的最适培养条件，并进一步利用最适增殖和生根培养基对直干桉不同基因型无菌苗进行培养，从而筛选具备高增殖能力和强生根能力的基因型。【结果】直干桉无菌苗茎段初代培养和继代增殖的最适培养条件均为 MS 培养基 +0.5 mg/L 6-BA+0.6 mg/L NAA+20 g/L 蔗糖 +4.5 g/L 琼脂，腋芽诱导率可达 100%，月增殖倍数为 10.40 倍，苗高为 1.14 cm，丛芽生长健壮；不定根诱导的最适培养条件为 1/2 DCR 培养基 +0.6 mg/L IBA+0.3 mg/L NAA+1.0 mg/L ABT1+20 g/L 蔗糖 +5 g/L 琼脂 +0.16 g/L 活性炭，培养 20 d 时生根率为 86.67%；移栽最适基质配比为腐殖质土：蛭石：泥炭土 = 1∶1∶1，成活率可达 76.67%。对直干桉 118 个基因型进行增殖和生根培养，最终筛选出 1 个具备高增殖能力和强生根能力的基因型（G116），其培养 60 d 后增殖倍数为 11.76 倍，苗高为 1.65 cm，丛芽生长健壮，培养 20 d 后生根率可达 93.33%。【结论】成功构建了直干桉高效组培快繁体系，筛选出了 1 个具有高繁殖能力的基因型，提高了育苗效率。

关键词：直干桉；无菌实生瓶苗；组培快繁；基因型筛选
中图分类号：S722.37　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)08-0205-11

Construction of a highly efficient tissue culture and rapid propagation system for *Eucalyptus maidenii* and screening of genotypes with high reproductive capacity

Zhou Yuji[1], Cao Yue[2], Wang Honglin[1], Kong Lingrong[1], Lyu Shaonian[1], Hou Yufan[1], Lu Zhuangyue[1], He Zhenmin[1], Cao Zilin[1], Wang Xiaoli[1]

(1. a. Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains, Ministry of Education;
b. College of Ecology and Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430075, Hubei, China)

Abstract:【Objective】This study aims to develop an efficient tissue culture propagation system for *Eucalyptus maidenii* and identify high- performance genotypes, thereby establishing a theoretical and technical foundation for large-scale seedling production. 【Method】Seeds from elite *E. maidenii* families were used as explants. Using full factorial and orthogonal experimental designs, the optimal culture conditions were determined for primary culture, subculture proliferation, adventitious root induction, and hardening. The selected optimal proliferation and rooting media were then applied to axenic seedlings of different genotypes to screen genotypes that

收稿日期（Received）：2025-07-23　　**修订日期**（Revised）：2025-09-16
基金项目：国家自然科学基金项目（32260385）；云南省种子种业联合实验室项目（202205AR070001-22）；云南省高校服务重点产业科技专项（FWCY-ZNT2024022）；西南林业大学科研启动基金项目（112005）。
第一作者：周玉吉（2997202147@qq.com），硕士研究生。
通信作者：王晓丽（ynwangxiaoli@swfu.edu.cn），教授，博士，博士研究生导师。
引文格式：周玉吉 , 曹越 , 王鸿嶙 , 等 . 直干桉高效组培快繁体系构建及高繁殖能力基因型筛选 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(8):205-215.
Zhou Y J, Cao Y, Wang H L, et al. Construction of a highly efficient tissue culture and rapid propagation system for *Eucalyptus maidenii* and screening of genotypes with high reproductive capacity[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):205-215.

exhibited both high proliferation efficiency and robust rooting competence.【Result】The optimal conditions for the primary culture and subculture of sterile stem segments of *E. maidenii* are MS medium supplemented with 0.5 mg/L 6-BA, 0.6 mg/L NAA, 20 g/L sucrose, and 4.5 g/L agar, resulting in a 100% axillary bud induction rate, a 10.40-fold monthly proliferation rate, a plantlet height of 1.14 cm, and robust shoot clusters. Adventitious root induction is optimally achieved on 1/2 DCR medium containing 0.6 mg/L IBA, 0.3 mg/L NAA, 1.0 mg/L ABT1, 20 g/L sucrose, 5 g/L agar, and 0.16 g/L activated charcoal, with a 86.67% rooting rate after 20 days. A 1:1:1 (v/v/v) mixture of humus soil, vermiculite, and peat soil provides the highest transplantation success, with a 76.67% survival rate. A total of 118 *E. maidenii* genotypes were evaluated for proliferation and rooting capacity, from which one superior genotype (G116) with both high proliferation efficiency and strong rooting ability was selected. After 60 days of culture, G116 exhibits a 11.76-fold proliferation rate, reaches 1.65 cm in height, and develops robust shoot clusters. This genotype also demonstrates a 93.33% rooting rate within 20 days of culture.【Conclusion】The research successfully developed an efficient in vitro propagation system for *E. maidenii* and selected one genotype exhibiting superior propagation traits. This methodology enhanced seedling production efficiency.

Keywords: *Eucalyptus maidenii*; aseptic seedling bottle culture; tissue culture rapid propagation; genotype screening

直干桉 *Eucalyptus maidenii* 又名“直杆蓝桉”，原产于澳大利亚，为桃金娘科 Myrtaceae 桉属 *Eucalyptus* 常绿阔叶乔木。直干桉的经济价值显著，具有生长速度快、出浆率高、桉叶油含量多等优良特性，是桉树中少有的油材兼用型树种 [1-3]，在云南、贵州、四川和广西等地均有引种栽培 [4-6]。目前，直干桉人工林主要采用实生苗造林，但其优良种源少，后代遗传性状不稳定，造林后林木分化明显，林分质量难以保障，极大地限制了直干桉优良材料的进一步推广 [3]。同时，直干桉扦插生根难、增殖倍数低。蔡淑明 [7] 研究表明，直干桉扦插育苗的最高生根率仅 60%，繁殖效率低，难以满足直干桉规模化育苗和产业化发展的需求。因此，构建高效的组培快繁体系对直干桉的推广具有重要意义。

植物组织培养具有增殖倍数高、受外界环境影响小、遗传特性稳定、再生苗木规格整齐等优点，是林木良种快繁的重要途径之一 [8-10]。目前，已有学者以直干桉半木质化茎段为外植体进行组培快繁体系构建。刘云彩等 [11] 研究发现，直干桉最高月增殖倍数为 3 倍，生根率为 43.0% ～ 64.2%，移栽成活率为 72.6%；佘小涵 [12] 试验发现，直杆蓝桉最高月增殖倍数为 3.7 倍，40 d 时的生根率达 81%，移栽成活率为 65%；王晓丽等 [3] 的研究结果表明，直干桉最高月增殖倍数为 3.74 倍，60 d 时的增殖倍数可达 8.14 倍，20 d 时的生根率为 77.2%，移栽成活率为 73.2%；Sotelo 等 [13] 对直干桉 58 个无性系进行组织培养，最终仅筛选出 5 个无性系繁殖能力较强，但生根率都不超过 25%。已有研究虽然都获得了完整再生植株，但仍存在增殖倍数低、生根不稳定等问题。因此，直干桉高效组培快繁体系构建的相关研究有待进一步优化。

植物组织培养效果除受培养基类型、生长调节剂配比和培养环境条件等多种因素影响外，外植体基因型差异也会对繁殖效果产生显著影响。不同基因型外植体的生理代谢和信号传导方式存在差异，导致其在再生过程中表现出不同的繁殖能力 [10,14]。刘云彩等 [11] 对直干桉 10 个不同无性系无菌苗进行生根试验，结果显示生根率为 0% ～ 83.3%，各无性系之间生根率差异显著。Negishi 等 [15] 对 7 个不同基因型蓝桉 *Eucalyptus globulus* 外植体的生根能力进行探究，结果表明易生根基因型和难生根基因型的生根率相差近 80%。因此，选择具有高繁殖能力基因型进行组织培养，可以显著提高组培的成功率和繁殖效率。

本研究以直干桉无菌实生瓶苗茎段为试验材料，通过改变基本培养基和生长调节剂的种类及配比，探索直干桉腋芽诱导、不定芽增殖和不定根诱导的最佳培养条件以及炼苗移栽的最佳基质配比。进一步利用最佳增殖和生根培养条件对直干桉 118 个基因型进行培养，比较不同基因型的增殖倍数、苗高、生根率、生根时间、生根数和平均根长等指标，筛选出具有高繁殖能力的基因型，为直干桉良种繁育和工厂化育苗提供理论参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用直干桉种子，于 2022 年 1 月采集自云南省楚雄州冬瓜镇观音山村的 15 株生长健壮、无病虫害的优良直干桉单株。

1.2 研究方法

1.2.1 无菌实生瓶苗培育

以直干桉种子为试验材料，挑选籽粒饱满的种子置于流水下冲洗 30 min，随后转移至超净工作台进行消毒。先用 75% 乙醇浸泡 15 s，再用

0.1% 升汞浸泡 3 min，每次用消毒剂处理后均用无菌水清洗 5 次，消毒完成后用无菌纸吸干种子表面多余的水分，将其接种于添加 0.5 mg/L 6-BA 和 0.5 mg/L NAA 的 MS 培养基中，共接种 645 粒种子。接种 10 d 后统计污染率，接种 90 d 后统计种子的萌芽率。

1.2.2　直干桉初代培养

以直干桉无菌实生瓶苗茎段为外植体，接种至添加不同浓度 6-BA（0.5、0.6、0.7、0.8 mg/L）和 NAA（0.3、0.4、0.5、0.6 mg/L）的 MS 培养基上，并添加 4.5 g/L 琼脂和 20 g/L 蔗糖。采用全因子试验（表 1）探究不同 6-BA 和 NAA 浓度对直干桉腋芽诱导和不定芽增殖的影响。试验共 16 个处理组合，每个处理组合接种 15 个外植体，设 3 次重复。培养 60 d 后记录不定芽的诱导率、增殖倍数和平均苗高。

1.2.3　直干桉继代培养

在腋芽诱导过程中发现处理组合 2、3、4、5 具有较高的增殖倍数和苗高，且丛生芽生长健壮。因此，本研究以上述 4 个处理组合为继代培养的试验方案，以初代培养得到的丛芽茎段为外植体进行探究，每个处理组合接种 15 个外植体，设 3 次重复，分别在培养 30、60 d 后统计不定芽的增殖倍数和平均苗高。

1.2.4　直干桉不定根诱导

以生长健壮的单芽为不定根诱导材料，培养基中添加 5 g/L 琼脂、20 g/L 蔗糖和 0.16 g/L 活性炭。采用四因素三水平正交试验（表 2），探究不同基本培养基（DCR、1/2 MS、1/2 DCR）、不同 IBA 浓度（0.6、1.0、1.4 mg/L）、不同 NAA 浓度（0.1、0.2、0.3 mg/L）和不同 ABT1 浓度（0.6、1.0、1.2 mg/L）对直干桉不定根诱导的影响。试验共 9 个处理组合，每个处理组合 20 株无菌苗，设 3 次重复。接种后暗培养 7 d，再转移至光照条件下继续培养。培养期间每天观察不定根生长情况，并记录不定根生根时间以及培养 20 d 时的生根率、根长和生根条数。

表 1　直干桉不定芽诱导全因子试验设计

Table 1　Full factorial experimental design for adventitious bud induction in *E. maidenii*

处理组合 Handling combinations	6-BA 浓度 6-BA concentration / ($mg \cdot L^{-1}$)	NAA 浓度 NAA concentration / ($mg \cdot L^{-1}$)
1	0.5	0.3
2	0.5	0.4
3	0.5	0.5
4	0.5	0.6
5	0.6	0.3
6	0.6	0.4
7	0.6	0.5
8	0.6	0.6
9	0.7	0.3
10	0.7	0.4
11	0.7	0.5
12	0.7	0.6
13	0.8	0.3
14	0.8	0.4
15	0.8	0.5
16	0.8	0.6

1.2.5　直干桉炼苗移栽

生根培养 30 d 后，选择生长健壮、根长 1 cm 以上的生根苗，在室内开瓶炼苗 3 d，炼苗期间每天喷水保湿，3 d 后取出幼苗，洗净基部残留的培养基，移栽到不同基质中（表 3），在室内培养 15 d 后转移至室外继续培养。每个处理 30 株生根苗，移栽 30 d 后统计成活率。

表 2　直干桉不定根诱导正交试验设计

Table 2　Orthogonal experiment for inducing adventitious roots of *E. maidenii*

试验号 Test No.	处理组合 Processing combination	基本培养基 Basic medium	IBA 浓度 IBA concentration / ($mg \cdot L^{-1}$)	NAA 浓度 NAA concentration / ($mg \cdot L^{-1}$)	ABT1 浓度 ABT1 concentration / ($mg \cdot L^{-1}$)
1	A1B1C1D1	DCR	0.6	0.1	0.6
2	A1B2C2D2	DCR	1.0	0.2	1.0
3	A1B3C3D3	DCR	1.4	0.3	1.2
4	A2B1C2D3	1/2 MS	0.6	0.2	1.2
5	A2B2C3D1	1/2 MS	1.0	0.3	0.6
6	A2B3C1D2	1/2 MS	1.4	0.1	1.0
7	A3B1C3D2	1/2 DCR	0.6	0.3	1.0
8	A3B2C1D3	1/2 DCR	1.0	0.1	1.2
9	A3B3C2D1	1/2 DCR	1.4	0.2	0.6

表 3 不同育苗基质的移栽设计
Table 3 Transplanting design of different seedling substrates

试验号 Test No.	基质配比 Substrate ratio
1	腐殖质土：珍珠岩 =2∶1
2	腐殖质土：珍珠岩：蛭石 =2∶1∶1
3	腐殖质土：蛭石：泥炭土 =1∶1∶1

1.2.6 直干桉高繁殖能力基因型筛选

利用上述试验得到的最佳培养条件，对直干桉 118 个基因型（参试基因型来自云南省楚雄州冬瓜镇观音山村的 15 株速生高产优良单株的半同胞子代，在实生瓶苗阶段生长表现基本一致）进行增殖培养，筛选出一批具有较高增殖能力的基因型，然后利用最适生根培养基对筛选出的基因型进行生根培养。试验期间，定期观察并记录平均萌芽时间、腋芽诱导率、增殖倍数、苗高、生根率、平均生根时间、生根数、平均根长等指标，通过方差分析、多重比较、主成分分析、隶属函数分析和聚类分析等方法筛选出生长健壮、繁殖能力强的基因型。

1.2.7 数据统计与分析

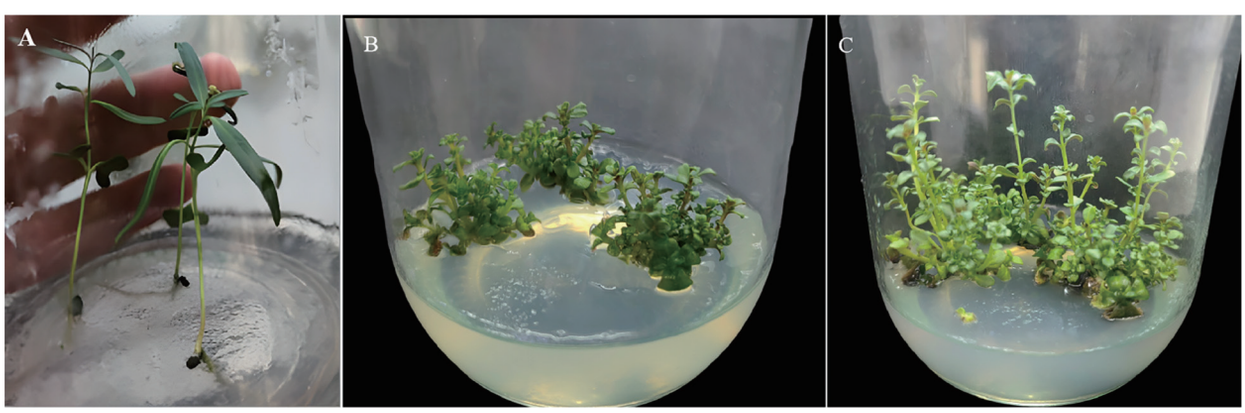
采用 Excel 2010 软件进行数据整理，运用 SPSS 27.0 软件进行方差分析和多重比较分析，并利用 Origin 2025 软件进行主成分分析、聚类分析以及制图。

2 结果与分析

2.1 直干桉组培快繁体系构建

2.1.1 直干桉无菌实生瓶苗培育

接种 10 d 后，直干桉种子污染率为 8.8%，污染率较低，说明本试验使用的消毒方法适用于直干桉种子消毒，可较好地控制污染率。接种 90 d 后，直干桉种子的萌芽率为 83%，萌芽率较高，且幼苗生长健壮（图 1），说明以 MS 为基本培养基，并添加 0.5 mg/L 6-BA 和 0.5 mg/L NAA 的培养条件适于直干桉种子萌发。



A：直干桉种子接种 90 d 时的生长状态；B：直干桉增殖 30 d 时的生长状态；C：直干桉增殖 60 d 时的生长状态。
A: growth status 90 days after seed inoculation; B: growth status 30 days during proliferation; C: growth status 60 days during proliferation.

图 1 直干桉种子萌发和不定芽增殖的生长状态
Fig. 1 Seed germination and adventitious bud proliferation growth status of *E. maidenii*

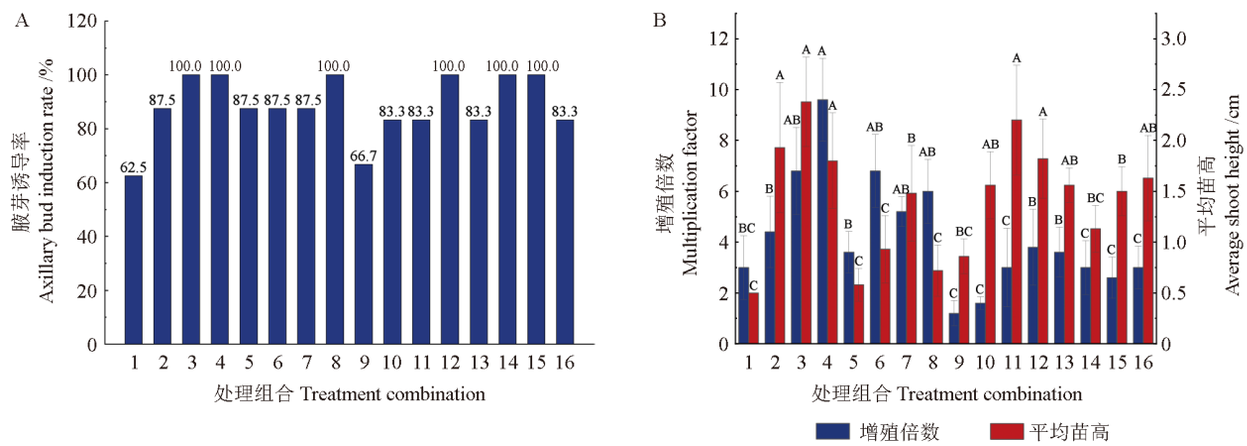
2.1.2 直干桉初代培养

由图 2A 可知，16 种不同激素浓度配比的培养基均能诱导直干桉无菌苗茎段产生腋芽，腋芽诱导率为 62.5% ～ 100.0%。其中处理组合 3、4、8、12、14、15 的诱导效果最好，腋芽诱导率达 100.0%；处理组合 1 的腋芽诱导率最低，仅为 62.5%。如图 2B 所示，60 d 时不同处理组合直干桉无菌苗初代培养的增殖倍数和平均苗高差异性分析结果表明，各处理组合的增殖倍数和平均苗高存在极显著差异（$P < 0.01$）。其中处理组合 4 增殖倍数最高，达 9.60 倍；处理组合 3（6.80 倍）和处理组合 6（6.80 倍）次之。处理组合 3 的平均苗高最高，为 2.38 cm，处理组合 2、4、11、12 的平均苗高分别为 1.93、1.80、2.20 和 1.82 cm，较其他处理组合均表现出较好的伸长效果。同时，当 6-BA 浓度高于 0.6 mg/L 时，直干桉的增殖倍数会降低，说明较高的 6-BA 浓度会抑制不定芽的产生；当 6-BA 浓度固定时，增殖倍数会随着 NAA 浓度的变化而变化，说明 NAA 会对直干桉无菌苗茎段的增殖产生影响。综合直干桉腋芽诱导率、增殖倍数和平均苗高 3 个指标分析可知，处理组合 4（0.5 mg/L 6-BA+0.6 mg/L NAA）为直干桉初代培养的最适培养基，处理组合 3（0.5 mg/L 6-BA+0.5 mg/L NAA）可作为直干桉丛生芽伸长培养的适宜培养基。

2.1.3 直干桉继代增殖培养

不同激素浓度配比对直干桉继代增殖的影响如图 3 所示。研究结果表明，培养 30 d 后，各

处理组合间的增殖倍数和平均苗高存在极显著差异（$P < 0.01$），其中处理组合 4 的增殖倍数最高，达 10.40 倍，平均苗高为 1.14 cm；处理组合 3 的平均苗高最高，为 1.63 cm。培养 60 d 后，4 个处理组合间的增殖倍数和平均苗高差异未达到显著水平，但处理组合 4 的增殖倍数明显高于其他处理组合，处理组合 3 的平均苗高最高，为 2.16 cm。综上，0.5 mg/L 6-BA+0.6 mg/L NAA 是直干桉继代增殖培养的最适激素浓度配比，该培养条件下获得的丛芽生长健壮；0.5 mg/L 6-BA+0.5 mg/L NAA 是直干桉丛生芽伸长的最适激素浓度配比，该结果与初代培养得到的结果一致。



大写字母表示差异极显著（$P < 0.01$）。下同。Capital letters indicate extremely significant differences ($P < 0.01$). The same below.

图 2　60 d 时不同激素配比对直干桉无菌苗初代培养的影响

Fig. 2　Effects of different hormone ratios on the primary culture of *E. maidenii* aseptic seedlings at 60 days

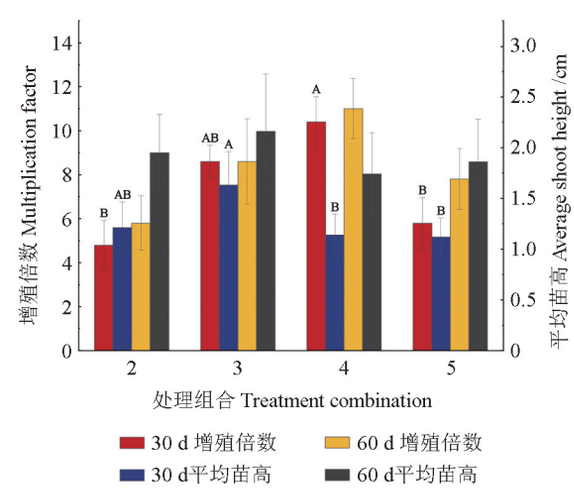


图 3　不同激素配比对直干桉增殖的影响

Fig. 3　Effects of different hormone ratios on the proliferation of *E. maidenii*.

2.1.4　直干桉不定根诱导

如图 4 所示，大部分无根苗在接种后 4 ～ 5 d 开始产生愈伤组织，并开始陆续生根；接种后 5 ～ 10 d，各处理组合的无根苗到达生根高峰期；接种后 15 d，各处理组合的生根总数量趋于稳定；接种后 20 d，再生苗的主根会进一步伸长，并产生大量须根。培养 20 d 后，不同基本培养基类型和激素浓度配比对直干桉生根培养的影响如图 5 所示。研究结果表明，不同处理组合的平均生根时间、平均生根条数和生根率之间的差异均达到极显著水平（$P < 0.01$），平均根长的差异达到显著水平（$P < 0.05$）。其中，处理组合 7 的平均生根时间最短（7 d），生根率最高（86.67%），且与其他处理组合差异极显著；该处理组合的平均生根条数（1.67 条）与处理组合 5（1.90 条）差异不显著；其平均根长（0.77 cm）低于处理组合 1（1.06 cm）和处理组合 2（1.42 cm），但 3 个处理间差异不显著。综合生根率、生根时间、平均生根条数和平均根长 4 个指标来看，直干桉不定根诱导的最适培养基为 1/2 DCR+0.6 mg/L IBA+0.3 mg/L NAA+1.0 mg/L ABT1。

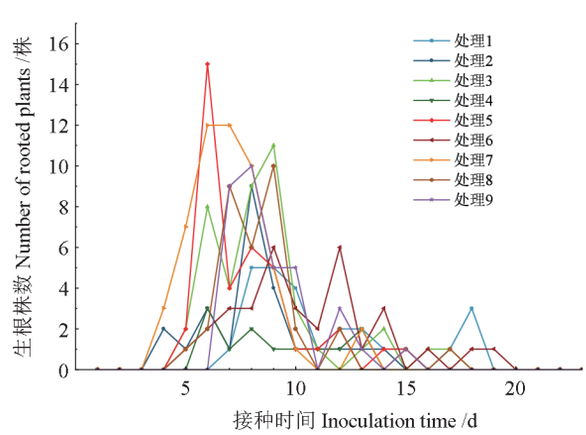


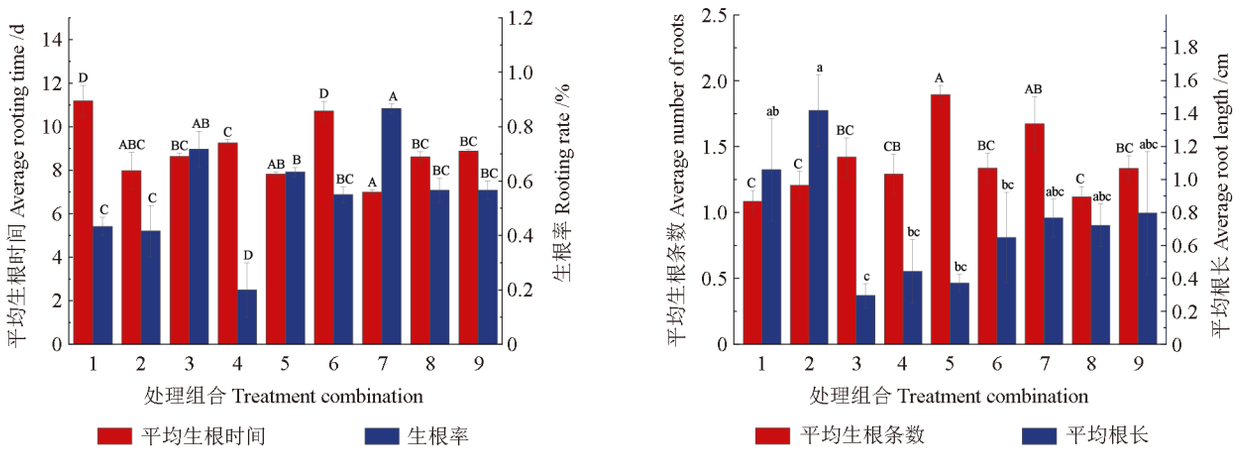
图 4　直干桉生根趋势变化

Fig. 4　Changes of rooting trend of *E. maidenii*

2.1.5　直干桉炼苗移栽

不同基质配比对直干桉移栽成活率的影响如

表 4 所示，3 个处理的直干桉幼苗成活率分别为 46.66%、60.00%、76.67%，处理 3 的成活率最高，其基质配比为腐殖质土∶蛭石∶泥炭土 =1∶1∶1，该基质中的泥炭土和腐殖质土为直干桉幼苗提供了生长所需的营养物质，同时起到了较好的保水作用，蛭石松软透气，利于直干桉根系的呼吸。因此直干桉炼苗移栽的最适基质配比为腐殖质土∶蛭石∶泥炭土 =1∶1∶1。直干桉生根苗移栽 30 d 后，存活幼苗长势良好。



大写字母表示差异极显著（$P < 0.01$），小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。
Uppercase letters in the figure indicate extremely significant differences ($P < 0.01$), and lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图 5 不同基本培养基类型和激素浓度配比对直干桉不定根诱导的影响

Fig. 5 Effects of different basal medium types and hormone concentration combinations on adventitious root induction in *E. maidenii*

表 4 不同基质配比对直干桉移栽成活率的影响

Table 4 The effect of different substrate ratios on the transplant survival rate of *E. maidenii*

试验号 Test No.	基质配比 Substrate ratio	成活率 Survival rate /%
1	腐殖质土∶珍珠岩 =2∶1	46.66
2	腐殖质土∶珍珠岩∶蛭石 =2∶1∶1	60.00
3	腐殖质土∶蛭石∶泥炭土 =1∶1∶1	76.67

2.2 高繁殖能力基因型筛选

2.2.1 高增殖能力基因型筛选

直干桉 118 个基因型各指标的方差分析结果表明（表 5），各基因型的平均出芽时间、腋芽诱导率以及 30、60 d 增殖倍数和平均苗高存在极显著差异（$P < 0.01$）。这说明在植物组织培养过程中，基因型是影响直干桉组培繁殖效果的重要因素。但是，直接比较上述 6 个单项指标的大小，难以准确且直观地筛选出具有高增殖能力的基因型。

6 个单项指标主成分分析结果显示（表 6），前 4 个主成分的贡献率分别为 39.875%、19.714%、18.669% 和 10.154%，累计贡献率达 88.412%。前 4 个主成分的累计贡献率大于 80%，说明可将 6 个单项指标转化为 4 个相互独立的综合指标，且这 4 个综合指标代表了原始数据携带的大部分信息。参考袁宇婷等 [16] 的方法，计算直干桉各综合指标的隶属函数值与权重，隶属函数值越大，表明该基因型的增殖能力越强。最终计算得到 4 个综合指标的权重分别为 0.45、0.22、0.21 和 0.11。

计算直干桉各基因型综合增殖能力，并采用组平均法进行聚类分析，结果如图 6 所示。118 个基因型可划分为 3 类：G138、G75、G366、G516、G517、G116、G96、G317、G20、G667 共 10 个基因型聚为第 1 类，属于高增殖能力基因型（表 7）；G69、G66、G45 等 20 个基因型聚为第 2 类，属于中等增殖能力基因型；G38、G29、G16 等 88 个基因型聚为第 3 类，属于低增殖能力基因型。

2.2.2 强生根能力基因型筛选

基于聚类分析结果，选取第 1 类高增殖能力基因型（G138、G75、G366、G516、G517、G116、G96、G317、G20、G667）为繁殖材料，利用筛选出的最适生根培养基进行培养，探究以上 10 个基因型的生根能力。如图 7 所示，培养 20 d 后直干桉不同基因型的平均生根时间（7.19 ～ 12.00 d）、生根率（0% ～ 93.33%）、平均根长（0.50 ～ 1.79 cm）和平均生根条数（1.00 ～ 1.59 条）均存在极显著差异（$P < 0.01$）。其中 G116 的平均生根时间（7.19 d）、生根率（93.33%）、平均生根条数（1.59 条）在 10 个基因型中表现最好，其平均根长为 1.01 cm，较 G20（1.79 cm）、G317（1.69 cm）、G366（1.26 cm）稍短，但后期会继续伸长；G667 基因型的生根率（71.67%）和平均生根时间（8.59 d）

表现次之；其他基因型的生根能力表现较差，G517 在该培养条件下无法生根。综上所述，培养 20 d 后，10 个基因型中生根能力最强的为 G116，G667 次之，G517 为生根能力最差的基因型。因此，118 个基因型中繁殖能力最强的基因型为 G116。

3　讨　论

3.1　种子消毒和无菌实生瓶苗培育

外植体消毒是顺利开展植物组织培养的前提和基础，恰当的消毒方法可以减少外植体的污染率，提高其存活率 [17-18]。直干桉种子具有体积小、种皮薄的特点，消毒环节需在控制污染的同时降低对种子活性的影响。目前尚未见关于直干桉种子消毒方法的报道，本研究参考蓝桉的消毒方法并加以改进 [19]，采用 75% 乙醇浸泡 15 s，0.1% 升汞浸泡 3 min，可将污染率控制在 8.8%。将经过消毒处理的种子接种在添加 0.5 mg/L 6-BA 和 0.5 mg/L NAA 的 MS 培养基中，培养 90 d 后萌芽率可达 83%，且无菌苗生长健壮。因此，本研究采用的消毒方法和培养条件适用于直干桉无菌实生瓶苗的制备。

表 5　直干桉 118 个基因型各指标方差分析 †

Table 5　Analysis of variance of various indicators among 118 genotypes of *E. maidenii*

指标 Parameter	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
平均出芽时间 Mean bud induction time /d	组间	517.919	117	4.427	18.674	0.000**
	组内	55.942	236	0.237		
	总计	573.862	353			
腋芽诱导率 Axillary bud induction rate /%	组间	2 271.924	117	19.418	1.502	0.005**
	组内	3 051.970	236	12.932		
	总计	5 323.894	353			
30 d 增殖倍数 30-day multiplication coefficient	组间	1 074.260	117	9.182	21.745	0.000**
	组内	99.650	236	0.422		
	总计	1 173.911	353			
30 d 平均苗高 30-day average shoot height /cm	组间	7.237	117	0.062	2.583	0.000**
	组内	5.652	236	0.024		
	总计	12.889	353			
60 d 增殖倍数 60-day multiplication coefficient	组间	3 231.628	117	27.621	22.198	0.000**
	组内	293.659	236	1.244		
	总计	3 525.287	353			
60 d 平均苗高 60-day average shoot height /cm	组间	9.193	117	0.079	2.715	0.000**
	组内	6.830	236	0.029		
	总计	16.022	353			

† ** 表示差异极显著（$P < 0.01$）。** indicates a very significant difference ($P < 0.01$).

表 6　各综合指标的载荷及贡献率

Table 6　Component loading and contribution rates

指标 Parameter	主成分载荷 Principal component loading			
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4
平均出芽时间 Mean budinduction time /d	−0.242	0.488	0.003	0.882
腋芽诱导率 Axillarybud induction rate /%	−0.003	0.708	0.316	−0.654
30 d 增殖倍数 30-day multiplication coefficient	0.331	−0.015	0.407	0.279
30 d 平均苗高 30-day average shoot height /cm	0.245	0.259	−0.531	0.355
60 d 增殖倍数 60-day multiplication coefficient	0.333	0.020	0.374	0.363
60 d 平均苗高 60-day average shoot height /cm	0.281	0.196	−0.453	−0.315
特征值 Eigenvalue	2.392	1.183	1.120	0.609
贡献率 Contribution rate /%	39.875	19.714	18.669	10.154
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	39.875	59.589	78.258	88.412

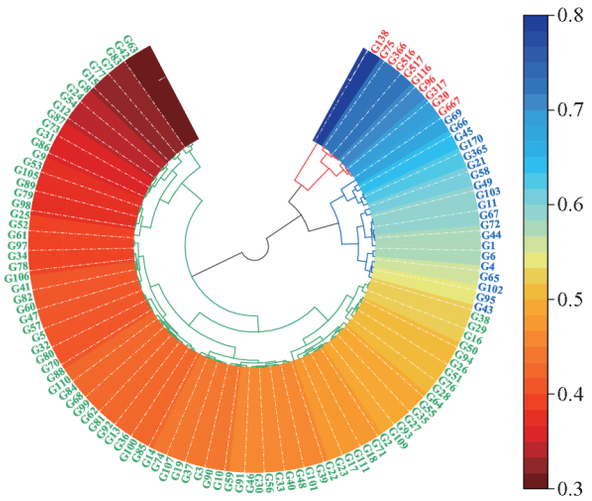


图 6 直干桉 118 个基因型增殖能力聚类热图
Fig. 6 Clustering heatmap of the proliferation capacity among 118 *E. maidenii* genotypes

3.2 直干桉初代培养

植物组织培养过程中，培养基中的生长调节剂种类和浓度配比对植物的生长和分化有较大影响 [20-22]，选择合适的生长调节剂类型和浓度对器官发生和外植体再生等方面具有至关重要的作用 [23-24]。已有研究发现，最适合直干桉腋芽诱导的生长调节剂为 6-BA 和 NAA 组合使用，在确保获得较高诱导率的同时，可以减少愈伤组织的形成 [3,11-12]。刘云彩等 [11] 研究表明，直干桉腋芽诱导效果最好的生长激素配方为 0.5 ～ 2.0 mg/L 6-BA 和 0.1 ～ 1.0 mg/L NAA，诱导率最高为 70.2%；佘小涵 [12] 研究表明，腋芽诱导最适的生长激素配方为 0.4 ～ 0.8 mg/L 6-BA 和 0.2 ～ 0.8 mg/L NAA；王晓丽等 [3] 研究发现，最适生长激素配方为 0.6 mg/L 6-BA 和 0.5 mg/L NAA，诱导率可达 83.33%。本研究综合考虑腋芽诱导率、增殖倍数和平均苗高 3 个指标，发现腋芽诱导的最适生长激素配比为 0.5 mg/L 6-BA 和 0.6 mg/L NAA，诱导率为 100%，诱导获得的丛芽数量多，生长健壮。本研究结果与前人研究结果存在差异，但差异不大，原因可能是外植体的基因型、外植体类型以及外植体对生长调节剂的敏感程度不同 [25]。

3.3 直干桉继代增殖

不定芽的增殖能力是决定该植物能否实现规模化繁殖的关键因素，而外植体的增殖效果主要受细胞分裂素和生长素的调控 [26]。刘云彩等 [11] 采用单因素试验探究了 6-BA、KT、ZEA、NAA 4 种激素对直干桉不定芽增殖的影响，结果表明 6-BA 更有利于直干桉增殖培养，但增殖倍数仅为 2 倍。佘小涵 [12] 和王晓丽等 [3] 将细胞分裂素 6-BA 和生长素 IBA 搭配使用，对直干桉增殖的最适培养条件进行探究，结果显示培养 60 d 时的增殖倍数分别为 3.70 和 8.14 倍，增殖效果较使用单一的细胞分裂素好。王晓丽等 [3] 在探究过程中还发现在继代培养基中加入一定量的 NAA 可以促进丛芽的健壮生长。鉴于此，本试验探究不同浓度 6-BA 和 NAA 配合使用对直干桉继代增殖的影响，试验结果表明 0.5 mg/L 6-BA 和 0.6 mg/L NAA 配合使用，可大大提高直干桉的增殖率，培养 30 d 时增殖倍数可达 10.40 倍，60 d 时增殖倍数为 11.00 倍。本研究还发现，直干桉腋芽诱导和继代增殖的最适培养条件相同，说明在培养基中添加 0.5 mg/L 6-BA 和 0.6 mg/L NAA 可以实现腋芽诱导和继代增殖同步进行，在获得高腋芽诱导率和增殖倍数的同时，还可大幅缩短培养周期。

表 7 高增殖能力基因型的增殖情况
Table 7 Proliferation status of genotypes with high multiplication capacity

基因型 Genot-ypes	平均出芽时间 Mean bud induction time /d	腋芽诱导率 Axillary bud induction rate /%	30 d 增殖倍数 30-day multiplication factor	30 d 平均苗高 30-day average shoot height /cm	60 d 增殖倍数 60-day multiplication factor	60 d 平均苗高 60-day average shoot height /cm
G20	7.60±0.31	100.00±0.00	8.68±0.34	0.69±0.01	10.81±0.10	1.34±0.08
G75	7.56±0.12	100.00±0.00	5.64±0.53	1.01±0.06	10.82±0.32	2.11±0.07
G96	7.82±0.10	100.00±0.00	5.47±0.50	0.85±0.00	13.69±0.17	1.57±0.11
G116	7.45±0.23	100.00±0.00	7.60±0.31	0.78±0.05	11.76±0.68	1.65±0.06
G138	6.92±0.08	100.00±0.00	8.98±0.79	0.76±0.13	16.76±0.57	1.22±0.17
G317	7.00±0.00	100.00±0.00	7.80±0.20	0.89±0.02	10.07±0.39	1.50±0.03
G366	7.45±0.23	100.00±0.00	7.36±0.19	0.95±0.03	11.84±0.26	1.47±0.06
G516	7.70±0.15	100.00±0.00	7.20±0.28	0.93±0.09	10.91±0.39	1.65±0.03
G517	7.00±0.00	100.00±0.00	7.62±0.71	0.77±0.07	12.32±0.39	1.60±0.07
G667	6.53±0.29	100.00±0.00	6.58±0.40	0.86±0.03	11.98±0.79	1.61±0.06

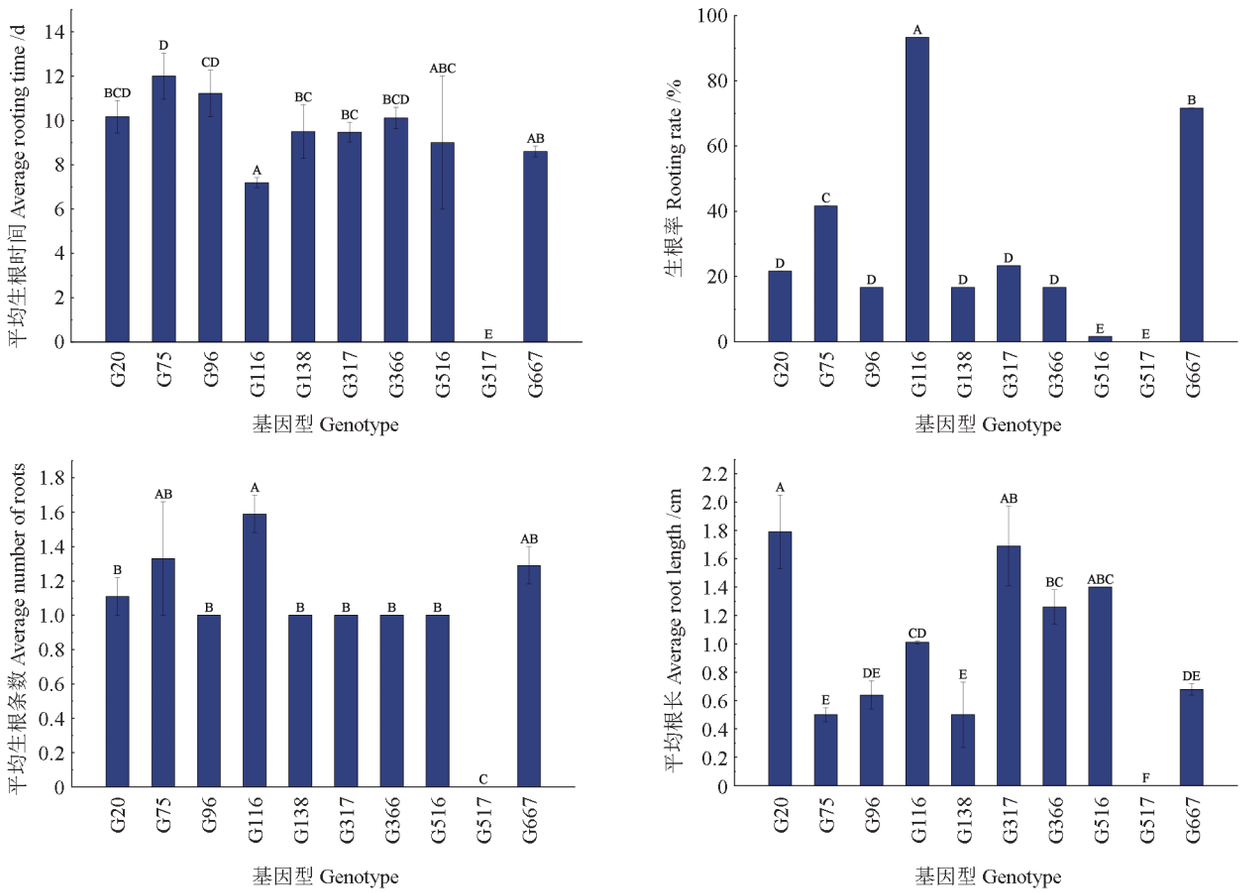


图 7　直干桉 10 个高繁殖能力基因型在相同培养条件下生根能力差异

Fig. 7　Differences in rooting ability among 10 high reproductive capacity genotypes of *E. maidenii* under the same cultivation condition

3.4　直干桉不定根诱导

再生芽成功生根是促进其移栽成活的先决条件，本研究探究了基本培养基类型和生长素配比对直干桉不定根诱导的影响。结果表明，培养 20 d 时，最适培养条件下直干桉最高生根率可达 86.67%，平均生根时间为 7 d。本研究较 Sotelo 等[13]、刘云彩等[11]和王晓丽等[3]的研究结果获得了更高的生根率，与佘小涵[12]培养 40 d 时的直杆蓝桉生根率（81%）相比，不仅提高了生根率，还缩短了培育时间。在不定根诱导阶段，适当降低无机盐浓度有利于无根苗生根，其原因可能是无机盐浓度会对外植体的渗透压产生影响，在较低营养浓度条件下，可使植物根系从被动吸收营养转变为主动吸收营养[17]。与 MS 培养基相比，1/2 MS、DCR 和 1/2 DCR 等培养基的无机盐浓度都相对较低，这些培养基常被用于植物组织培养的生根阶段[3,11,27-28]。本研究首次将 1/2 DCR 培养基应用到了直干桉不定根诱导阶段，并取得了较好的诱导效果。

3.5　直干桉炼苗移栽

炼苗移栽是植物组织培养的最后一个环节，移栽基质的保水性和透气性都会对组培苗移栽成活率产生影响。泥炭土和腐殖质土的有机质丰富、保水能力强，在提供营养的同时，还可以提高土壤的保水能力；珍珠岩和蛭石具有良好的排水性和透气性，可以增加土壤的透气性，有助于植物根系的呼吸。本试验将泥炭土、腐殖质土、珍珠岩和蛭石按照不同比例混合作为直干桉幼苗的移栽基质，移栽 30 d 后发现配比为腐殖质土∶蛭石∶泥炭土 =1∶1∶1 的基质幼苗成活率最高（76.67%），且高于刘云彩等[11]（72.6%）、佘小涵[12]（65%）和王晓丽等[3]（72.3%）试验中的直干桉移栽成活率，但低于 Sotelo 等[13]得到的移栽成活率，其原因可能是幼苗移栽至基质后的前两周内，使用袋子将整盆幼苗完全包裹，保持了环境中的湿度和温度，使其在袋中继续处于炼苗阶段，进而提高了幼苗的移栽成活率。

3.6　高繁殖能力基因型筛选

桉树的繁殖能力除受生长调节剂、基本培养基、蔗糖、光照、温度等外在因素的影响外，基因型、年龄和生理状况等内在因素也是影响桉树繁殖能

力的重要因子[29-30]。本研究对不同基因型直干桉的增殖能力和生根能力进行探究，结果表明不同基因型的增殖能力和生根能力存在着极显著差异，原因可能是不同基因型的基因表达情况、酶活性、内源激素含量等存在差异[31-32]。因此，外植体基因型是植物组织培养过程中不可忽视的因素，选择高繁殖能力的基因型作为繁殖材料可大幅提高繁殖效率。

4 结 论

本研究成功构建了直干桉高效组培快繁体系，并筛选出具有显著繁殖优势的基因型。研究结果表明，初代培养与继代增殖阶段的最适培养基均为 MS 培养基 +0.5 mg/L 6-BA+0.6 mg/L NAA+20 g/L 蔗糖 +4.5 g/L 琼脂，腋芽诱导率可达 100%；培养 30 d 时增殖倍数可达 10.40 倍，平均苗高 1.14 cm；培养 60 d 时增殖倍数为 11.00 倍，平均苗高 2.16 cm。该方法能显著促进直干桉腋芽萌发和丛芽增殖，且可将腋芽诱导和不定芽增殖这两个阶段合二为一，从而降低转瓶污染、节约生产时间以及减少生产成本。生根诱导阶段的最适培养基为 1/2 DCR+0.6 mg/L IBA+0.3 mg/L NAA+1.0 mg/L ABT1+20 g/L 蔗糖 +5 g/L 琼脂 +0.16 g/L 活性炭，该处理组合平均生根时间为 7 d，培养 20 d 后生根率为 86.67%，平均生根条数为 1.67 条，平均根长 0.77 cm，大幅缩短生根时间，提高生根率。炼苗移栽阶段最适基质配比为腐殖质土：蛭石：泥炭土 =1：1：1，移栽 30 d 后成活率为 76.67%。通过对 118 个基因型进行系统的增殖与生根能力比较分析，得到基因型 G116 表现最为突出，培养 30 d 时的增殖倍数为 7.60 倍，平均苗高 0.78 cm；培养 60 d 时的增殖倍数为 11.76 倍，平均苗高 1.65 cm；生根培养 20 d 后的生根率达 93.33%。本研究建立的高效快繁技术体系以及筛选出的优良基因型，为直干桉工厂化育苗提供了重要的理论基础和技术支持，对推动该树种产业化发展具有重要的应用价值。

参考文献：

[1] 张荣贵 , 李思广 , 蒋云东 . 云南的桉树引种及对其发展状况的剖析 [J]. 西部林业科学 ,2007,36(3):97-102.
Zhang R G, Li S G, Jiang Y D. Introduction of *Eucalyptus* in Yunnan and analysis on development status[J]. Journal of West China Forestry Science,2007,36(3):97-102.

[2] 唐有慈 , 李妹 , 张兴才 , 等 . 定干高度与时间对直干桉嫩枝数量和质量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(7):47-53.
Tang Y C, Li M, Zhang X C, et al. Effects of cutting height and time on the quantity and quality of *Eucalyptus maideni* shoots[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024,44(7):47-53.

[3] 王晓丽 , 孙继瑞 , 韦文长 , 等 . 直干桉超级苗组培快繁技术体系研究 [J]. 西北林学院学报 ,2019,34(4):131-138.
Wang X L, Sun J R, Wei W C, et al. Technical system of tissue culture for rapid propagation of *Eucalyptus maideni* superior seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019,34(4):131-138.

[4] 张荣贵 , 李思广 , 蒋云东 . 云南桉树引种历史、发展现状及展望 [J]. 桉树科技 ,2007(2):18-23.
Zhang R G, Li S G, Jiang Y D. The introduction history, current development and the future of *Eucalyptus* in Yunnan Province[J]. Eucalypt Science &Technology,2007(2):18-23.

[5] 邓伯龙 , 陈波涛 . 贵州省桉树引种栽培现状、问题与对策 [J]. 贵州林业科技 ,2006(3):54-57.
Deng B L, Chen B T. The present status, problems and countermeasures of the introduction & cultivation of *Eucalyptus* in Guizhou Province[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2006(3):54-57.

[6] 陈余美 , 林彬远 . 直干桉引种及培育技术研究 [J]. 四川林业科技 ,2006,27(3):10-14.
Chen Y M, Lin B Y. A study of the introduction and cultural techniques of *Eucalyetus maidenii*[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology,2006,27(3):10-14.

[7] 蔡淑明 . 直干桉无性繁殖方法 [C]// 中国林学会林木遗传育种第四届年会论文集 . 桂林 ,1997:65-66.
Cai S M. Vegetative propagation methods of *Eucalyptus maidenii*[C]// Proceedings of the 4th Annual Meeting on Forest Tree Genetics and Breeding of the Chinese Society of Forestry. Guilin,1997:65-66.

[8] 王晨 , 张俊红 , 张苗 , 等 . 柳杉优良无性系组培快繁体系研究 [J]. 浙江农林大学学报 ,2020,37(4):810-816.
Wang C, Zhang J H, Zhang M, et al. Study on rapid propagation system of superior clones in *Cryptomeria fortunei*[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2020,37(4):810-816.

[9] 权志珣 , 燕丽萍 , 王因花 , 等 . 元宝枫组织培养与快速繁殖技术 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(1):119-127,139.
Quan Z X, Yan L P, Wang Y H, et al. Tissue culture and rapid propagation technology of *Acer truncatum*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(1):119-127,139.

[10] 王娜 , 杨柳 , 赵国栋 , 等 . 重要木本植物组织培养技术研究进展 [J]. 上海农业学报 ,2025,41(1):131-142.
Wang N, Yang L, Zhao G D, et al. Advances in tissue culture techniques of important woody plants[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2025,41(1):131-142.

[11] 刘云彩 , 陈芳 , 吴丽圆 . 直干桉组织培养 [J]. 云南林业科技 , 1996(3):12-18.
Liu Y C, Chen F, Wu L Y. Study on tissue culture of *Eucalyptus maidenii*[J]. Yunnan Forestry Science and Technology, 1996(3):12-18.

[12] 佘小涵 . 直杆蓝桉组织培养繁殖育苗试验研究 [J]. 福建林业科技 ,2002,29(3):26-29.
She X H. Experimental studies on the seedling raising of tissue culture propagation of *Eucalyptus labill*[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology,2002,29(3):26-29.

[13] Sotelo M, Monza J. Micropropagation of *Eucalyptus maidenii* elite trees[J]. Agrociencia,2007,11(1):81-89.

[14] 张陆玉 , 李婧 , 胡新龙 , 等 . 中国茶树组织培养研究进展 [J]. 分子植物育种 ,2024,22(24):8253-8263.
Zhang L Y, Li J, Hu X L, et al. Research progress of tissue culture in tea plant (*Camellia sinensis*)[J]. Molecular Plant Breeding,2024,22(24):8253-8263.

[15] Negishi N, Nakahama K, Urata N, et al. Hormone level analysis on adventitious root formation in *Eucalyptus globulus*[J]. New Forests,2014,45:577-587.

[16] 袁宇婷 , 张晓燕 , 吴谷丰 , 等 . 基于主成分和隶属函数分析的大豆种质资源耐盐性综合评价 [J]. 大豆科学 ,2025,44(1):22-32.
Yuan Y T, Zhang X Y, Wu G F, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of soybean germplasm resources based on principal component analysis and membership function analysis[J]. Soybean Science,2025,44(1):22-32.

[17] 王莹莹 , 余登利 , 邱风进 , 等 . 濒危植物岩生鼠尾草的组培快繁技术 [J]. 植物研究 ,2025,45(4):558-568.
Wang Y Y, Yu D L, Qiu F J, et al. Tissue culture and rapid propagation of endangered *Salvia petrophila*[J]. Bulletin of Botanical Research,2025,45(4):558-568.

[18] Kuppusamy S, Ramanathan S, Sengodagounder S, et al. Optimizing the sterilization methods for initiation of the five different clones of the *Eucalyptus* hybrid species[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology,2019,22:101361.

[19] 李艳 , 耿金凤 , 曹现富 , 等 . 蓝桉实生瓶苗繁育技术体系的建立 [J]. 种子 ,2022,41(3):126-131.
Li Y, Geng J F, Cao X F, et al. Establishment of breeding technology system of *Eucalyptus globulus* in bottle seedlings[J]. Seed,2022,41(3):126-131.

[20] 曹雪敏 , 包颖 , 张悦新 , 等 . 野蔷薇组培快繁和高效瞬时表达体系的建立 [J]. 植物学报 ,2025,60(2):235-245.
Cao X M, Bao Y, Zhang Y X, et al. Tissue culture, rapid propagation and efficient transient expression systems of *Rosa multiflora*[J]. Chinese Bulletin of Botany,2025,60(2):235-245.

[21] Trueman S J, Hung C D, Wendling I. Tissue culture of *Corymbia* and *Eucalyptus*[J]. Forests,2018,9:84.

[22] Shwe S S, Leung D W M. Plant regeneration from *Eucalyptus bosistoana* callus culture[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant,2020,56:718-725.

[23] Zhang A L, Wang H Z, Shao Q S, et al. Large scale *in vitro* propagation of *Anoectochilus roxburghii* for commercial application: pharmaceutically important and ornamental plant[J]. Industrial Crops and Products,2015,70:158-162.

[24] Bansal S, Sharma M K, Joshi P, et al. An efficient direct organogenesis protocol for *in vitro* clonal propagation of *Rubia cordifolia* L.[J]. Industrial Crops and Products,2024,208:117856.

[25] 韩伟 , 常圣鑫 , 麦广威 , 等 . 丹霞小花苣苔叶片离体培养与植株再生技术研究 [J]. 广西植物 ,2025,45(4):667-677.
Han W, Chang S X, Mai G W, et al. *In vitro* culture and plant regeneration from the leaves of *Primulina danxiaensis*[J]. Guihaia,2025,45(4):667-677.

[26] Song X B, Liu H, Bu D C, et al. Rejuvenation remodels transcriptional network to improve rhizogenesis in mature Juglans tree, Tree Physiology,2021,41(10):1938-1952.

[27] Cui Y Y, Deng Y W, Zheng K Y, et al. An efficient micropropagation protocol for an endangered ornamental tree species (*Magnolia sirindhorniae* Noot. & Chalermglin) and assessment of genetic uniformity through DNA markers[J]. Scientific Reports,2019,9:9634.

[28] Sykłowska-Baranek K, Gaweł M, Kuźma Ł, et al. *Rindera graeca* (A. DC.) Boiss. & Heldr. (Boraginaceae) in vitro cultures targeting lithospermic acid B and rosmarinic acid production[J]. Molecules,2023,28:4880.

[29] Abiri R, Atabaki N, Abdul-Hamid H, et al. The prospect of physiological events associated with the micropropagation of *Eucalyptus* sp.[J]. Forests,2020,11:1211.

[30] Li X Q, Mushtaq N, Xing N, et al. Efficient in vitro regeneration system and comparative transcriptome analysis offer insight into the early development characteristics of explants from cotyledon with partial petiole in small-fruited pepper (*Capsicum annuum*)[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024,25:7547.

[31] Ranjan A, Perrone I, Alallaq S, et al. Molecular basis of differential adventitious rooting competence in poplar genotypes[J]. Journal of Experimental Botany,2022,73(12):4046-4064.

[32] 刘锴 , 何闪闪 , 张彩霞 , 等 . 苹果叶片不定芽再生过程的差异表达基因鉴定与分析 [J]. 中国农业科学 ,2021,54(16):3488-3501.
Liu K, He S S, Zhang C X, et al. Identification and analysis of differentially expressed genes in adventitious shoot regeneration in leaves of apple[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(16):3488-3501.

[本文编校：戴欧琳]