

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5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.008

论文标题： 生长调节剂与基质配比对赤杨叶扦插不定根形成的影响

作　　者： 杨滨豪，张羽嘉，刘闵豪，等

收稿日期： 2025-04-27

引文格式： 杨滨豪,张羽嘉,刘闵豪,等.生长调节剂与基质配比对赤杨叶扦插不定根形成的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):68-79.

YANG B H, ZHANG Y J, LIU M H, et al. Effects of growth regulators and medium on cuttage adventitious root occurrence of *Alniphyllum fortunei*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):68-79.

相关论文推荐

Recommended articles

植物生长调节剂对木姜叶柯花序生长、内源激素和营养物质的影响

Effects of plant growth regulators on inflorescence growth, endogenous hormones and nutrients of *Lithocarpus litseifolius*

南方红豆杉雌株叶片碳氮营养对喷施生长调节剂的响应

Response of foliar carbon and nitrogen nutrition of female *Taxus chinensis* var. *mairei* to spraying plant growth regulators

生长调节剂对南方红豆杉大孢子叶球和内源激素的影响

Effects of plant growth regulators on megaspore bulbs and endogenous hormones of *Taxus chinensis* var. *mairei*

植物生长调节剂对设施无花果生长及果实品质的影响

Effects of plant growth regulators on growth and fruit quality of facility figs

植物生长调节剂对米槁愈伤组织诱导、组培苗生根的影响

Effects of plant growth regulators on the callus induction and tissue culture seedling rooting of *Cinnamomum migao*

植物生长调节剂对鞑靼忍冬扦插生根及酶活性变化的影响

Effects of plant growth regulators on the rooting and enzyme activities changes of *Lonicera tatarica* cuttings

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.008
http: //qks.csuft.edu.cn

生长调节剂与基质配比对赤杨叶扦插不定根形成的影响

杨滨豪[1]，张羽嘉[2]，刘闵豪[1]，代林利[1]，肖兴翠[1]，彭　建[1]，王　益[1]
（1. 四川省林业科学研究院，四川 成都 610000；2. 成都理工大学，四川 成都 610059）

摘　要：【目的】探讨赤杨叶扦插不定根形成对不同生长调节剂及基质配比的响应，为建立扦插繁殖技术体系提供理论依据。【方法】以 2 年生赤杨叶木质化枝条为穗条，采用 4 因素 3 水平正交试验设计，研究生长调节剂种类、质量浓度、处理时间及基质配比对不定根形成的影响，同时结合解剖结构观测，对插穗共计 12 项生长指标进行测定与统计分析，明确各因素对扦插生根及幼苗生长的调控效应。【结果】生长调节剂处理组在不定根形成期和不定根伸长生长期的可溶性糖含量、PPO 活性、IAAO 活性均高于对照组。50% 黄沙 +50% 蛭石基质处理的叶片数量、总根长、根系数量和生根指数均显著高于其他处理；NAA 处理的平均根长、平均根径、根系体积、比根长、比根面积显著高于其他处理；生长调节剂种类 × 质量浓度、生长调节剂种类 × 处理时间的交互作用表明，高质量浓度 NAA（1 500 mg·L^{-1}）配合短时间（10 min）处理的生根效果更佳。主成分分析表明，综合得分最高的为 T13 处理（75% 蛭石 +25% 珍珠岩，1 500 mg·L^{-1} 的 NAA 处理 10 min），生根率达 71.87%，生根指数为 147.19。【结论】赤杨叶插穗根系生长为愈伤组织生根型，0 ～ 28 d 为愈伤组织形成期，29 ～ 56 d 为不定根形成期，57 ～ 84 d 为不定根伸长生长期。通过生长调节剂处理可以加快赤杨叶插穗可溶性糖含量与氧化酶（PPO、POD、IAAO）活性的动态变化过程，从而有效促进赤杨叶插穗生根。赤杨叶插穗在 T13 处理条件下生长最佳，可为规模化无性繁殖应用提供参考。

关键词：赤杨叶；扦插；生长调节剂；基质配比；不定根形成；主成分分析
中图分类号：S723.1^{+}32.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0068-12

Effects of growth regulators and medium on cuttage adventitious root occurrence of *Alniphyllum fortunei*

YANG Binhao[1], ZHANG Yujia[2], LIU Minhao[1], DAI Linli[1], XIAO Xingcui[1], PENG Jian[1], WANG Yi[1]

(1. Sichuan Academy of Forestry Sciences, Chengdu 610000, Sichuan, China;
2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract:【Objective】This study aims to investigate the effects of growth regulators and medium on cuttage adventitious root occurrence of *Alniphyllum fortunei*, and to provide theoretical for *A. fortunei* propagation by cutting.【Method】Using lignified branches of 2-year-old *A. fortunei* as the cuttings, an orthogonal experimental design with four factors and three levels was employed to investigate the effects of growth regulator type, concentration, treatment duration, and medium composition on adventitious root formation. Combined with anatomical observations, a total of twelve cuttings growth indices were measured and statistically analyzed to clarify the regulatory effects of each factor on cutting rooting and seedling growth.【Result】The soluble sugar content, PPO, and IAAO in the *A. fortunei* growth regulator treatment group were higher than those in the control group during both the adventitious root formation stage and the adventitious root growth stage. The average root length, average root diameter, root volume, fine root specific root length and fine root specific root area of NAA treatment group were significantly higher than those of other treatments; regulator type × concentration, regulator type × treatment time mean analysis showed that the rooting effect of high concentration (1 500 mg·L^{-1}) and low treatment time (10 min) of NAA treatment was better. Four principal components were extracted by principal component analysis, which were the comprehensive growth status of aboveground and underground parts, root coarseness index, root length index,

收稿日期（Received）：2025-04-27　　**修订日期**（Revised）：2025-07-04
基金项目：四川省科技计划项目（重点研发项目）（2022YFN0034）；四川省省级公益性科研院所基本科研业务费项目（2024JBKY08，2025JBKY10）。
第一作者：杨滨豪（ybinhao@qq.com），助理研究员，硕士。　　**通信作者：**肖兴翠（525372665@qq.com），研究员，博士。
引文格式：杨滨豪 , 张羽嘉 , 刘闵豪 , 等 . 生长调节剂与基质配比对赤杨叶扦插不定根形成的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):68-79.
YANG B H, ZHANG Y J, LIU M H, et al. Effects of growth regulators and medium on cuttage adventitious root occurrence of *Alniphyllum fortunei*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):68-79.

and comprehensive growth status of root system. The highest comprehensive score was T13, that is, 75% vermiculite+25% perlite was selected as the matrix, and 1 500 mg·L^{-1} IAA was used for 10 min. the rooting rate was 71.87%, and the rooting index was 147.19. 【Conclusion】The root system growth of *A. fortunei* cuttings belongs to the callus rooting type, with adventitious roots emerging around 56 days.Through growth regulator treatment, the dynamic changes in soluble sugar content and oxidase activity（PPO、POD、IAAO）in *A. fortunei* cuttings can be accelerated, thereby promoting rooting.Cuttings of *Alniphyllum fortunei* exhibited optimal growth under the T13 treatment, offering a reference for large-scale clonal propagation.

Keywords: *Alniphyllum fortunei*; cutting; growth regulator; medium; adventitious root occurrence; principal component analysis

赤杨叶 *Alniphyllum fortunei* 属安息香科 Styracaceae 赤杨叶属 *Alniphyllum* 落叶乔木，树干通直，花朵绚丽，是我国南方地区重要的速生乡土树种之一，兼具观赏和用材价值。其木材纹理通直，结构致密，材质轻软，易于加工，是胶合板和轻巧家具的优良原料 [1]。目前，种子繁殖是赤杨叶繁育的主要方式，但由于种子非常细小，实生苗育种存在周期长、出苗不齐、分化较大等问题，严重制约了赤杨叶的保护和利用。攻克赤杨叶无性繁殖技术，有利于丰富繁殖材料，缩短育种周期，改善其保护和利用现状。

扦插繁殖是木本植物常见的无性繁殖技术之一，利用植物细胞的全能性，以母株的任一营养器官为材料，培育出具有相同遗传特性的新个体 [2]。该技术具有成本低、周期短、操作简单及繁殖的新个体能保持母株遗传信息等优点，因此被广泛应用于林木良种规模扩繁生产中。扦插繁殖的关键在于插穗能否形成不定根，而不定根的形成受遗传特性、母树年龄、插穗木质化程度、生长调节剂、基质、温度、湿度等多种因素影响。扦插基质是指用于固定插穗根系，为根系生长提供氧气和营养的物质 [3]。不同基质配比会影响插穗根系生长的湿度、养分及空气环境 [4]，合理的配比是插穗不定根形成的关键因素。大量研究表明，在扦插前使用生长调节剂对插穗进行浸泡，能有效提高扦插成活率 [5-6]。萘乙酸（NAA）、吲哚丁酸（IBA）、脱落酸（ABA）等生长调节剂能通过加快营养物质的合成与代谢、提高氧化酶活性，从而提高扦插成活率并缩短生根时间。因此，研究适宜的基质和生长调节剂是建立扦插繁殖技术体系的基础。

目前，关于赤杨叶的相关研究主要集中在人工林径级结构、空间分布格局和容器育苗方面 [1,7]，缺少无性繁殖方面的研究，严重制约了其高效开发与合理利用。对安息香科的肉果秤锤树、长果安息香、鸦头梨、越南安息香、白花龙等树种扦插繁殖相关研究表明，生长调节剂的种类和质量浓度、基质配比、插穗取样部位等是影响扦插成活率的关键因素 [8-12]。赵子荀等 [10] 研究表明，生长调节剂种类对鸦头梨硬枝扦插影响最大，1 000 mg·L^{-1} 的 IAA+IBA+NAA（质量比为 1∶1∶1）混合剂处理插穗 30 min 效果最佳，生根率最高可达 46.13%。刘郁林等 [11] 对越南安息香的扦插研究发现，插穗取样部位对不定根形成影响最大，1 年生越南安息香基部插穗经质量浓度 300 mg·L^{-1} 生根剂处理后，平均生根率可达 40.7%。尽管安息香科部分树种已经开展扦插繁殖研究，但这些树种与赤杨叶遗传特性存在差异，且扦插生根效果尚不理想，因此有必要系统地开展赤杨叶扦插繁殖技术研究。此外，目前鲜有关于安息香科植物在扦插生根过程中生理生化指标动态变化的系统研究 [8-12]。

本研究以 2 年生赤杨叶枝条为试验材料，通过正交试验设计，分析基质配比、生长调节剂种类、质量浓度及处理时间对赤杨叶扦插生根效果及地下、地上部分形质指标的影响，探究营养物质含量和酶活性变化与插穗不定根形成的关系，筛选最适扦插条件，以期揭示赤杨叶扦插生根特性，为规模化无性繁殖生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本研究在四川玉蟾山楠木培育国家长期科研基地（105°23′E，29°09′N）开展，该基地海拔 350 ～ 550 m，年平均气温 18.0 ℃，极端最高气温 41.3 ℃，极端最低气温 −1.6 ℃，年平均日照时数 1 145 h。本试验扦插地位于地势平坦、通风良好的大树旁，可以有效避免阳光直射。

1.2　试验材料

试验于 2024 年 3 月下旬进行，试验材料为 2 年生赤杨叶（四川省沐川县优良单株当年生木质化侧枝），采集穗条并于当日进行扦插，选择粗度 0.3 ～ 0.8 cm 的枝条，修剪成长度 8 ～ 10 cm、带 1 ～ 3 个芽的插穗，并剪去叶片的 1/2，放入清水待处理。

1.3 试验设计与扦插处理

扦插试验采用正交试验设计，设置 4 因素 3 水平，基质配比均为体积比，以基质（75% 蛭石 +25% 珍珠岩）扦插为对照（CK），共 16 个处理，每个处理 30 根插穗，重复 3 次。因素与水平分别为：生长调节剂种类（A1，IBA+IAA+NAA；A2，IBA；A3，IAA）、基质配比（B1，75% 蛭石 + 25% 珍珠岩；B2，50% 黄沙 +50% 蛭石；B3，蛭石）、生长调节剂质量浓度（C1，500 mg·L^{-1}；C2，1 000 mg·L^{-1}；C3，1 500 mg·L^{-1}）、处理时间（D1，10 min；D2，30 min；D3，60 min）。 正交试验设计各因素水平组合如表 1 所示。

表 1 扦插正交试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	生长调节剂种类 Growth regulator	基质配比 Medium ratio	生长调节剂质量浓度 Growth regulation concentration	处理时间 Treatment time
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B1	C3	D3
3	A1	B1	C2	D2
4	A1	B2	C1	D3
5	A1	B2	C2	D1
6	A1	B3	C1	D2
7	A1	B3	C3	D1
8	A2	B1	C1	D3
9	A2	B1	C2	D1
10	A2	B2	C3	D2
11	A2	B3	C1	D1
12	A3	B1	C1	D2
13	A3	B1	C3	D1
14	A3	B2	C1	D1
15	A3	B3	C2	D3
对照 CK		B1		

将基质按试验设计进行配比并装入长 40 cm、高 10 cm 的方形育苗盘中，在扦插前 1 d 使用 0.3% 高锰酸钾溶液对基质进行消毒，次日用清水浇灌冲洗干净，然后将基质平整后用于扦插。扦插前将插穗浸泡在 0.1% 的多菌灵溶液中 20 min 进行消毒，然后按照试验设计进行生长调节剂浸泡处理。插穗扦插深度为穗条长度的 1/2 ～ 2/3，插后用手指压紧，浇透水，喷洒 0.1% 的多菌灵消毒液，搭小拱棚覆盖薄膜保湿，并搭盖 2 m 高遮阳网降温，定期补水保持棚内相对湿度为 70% ～ 90%，并于扦插后 10 d 左右喷洒 1 次 0.1% 的多菌灵溶液。

1.4 数据测定

生根情况统计及形质指标的测定：于扦插 200 d 后，即赤杨叶插穗生长休眠期，对各试验处理的生根情况进行调查，计算各处理的生根率、主根长、主根直径、粗根数、细根数、生根指数、比根长、比根面积等指标。

$R=(N_r/N_t)\times 100\%$；

$R_I=R\times(T_N/N_r)\times(T_L/T_N)$；

$S_{RL}=L_{fine}/D_{fine}$；

$S_{RA}=S_{fine}/D_{fine}$。

式中：R 为生根率；N_r 为生根的个体数量；N_t 为扦插的总数量；R_I 为生根指数；T_N 为根总条数；T_L 为细根总根长；S_{RL} 为细根的比根长；S_{RA} 为细根的比根面积；L_{fine} 为细根的根长；D_{fine} 为细根的干质量；S_{fine} 为细根的表面积。

根系形态结构观察：扦插后，选取经生长调节剂处理的 T3 组插穗，每 28 d 取样 1 次，共取样 4 次。根系混合取样后经 FAA 固定液固定，采用石蜡切片法，切片厚度为 8 ～ 10 μm，用蓝色染液染色后，在光学显微镜下观察根系形态及组织结构特征。

生根过程中氧化酶活性和营养物质含量的测定：自扦插当日起，对经生长调节剂处理的 T3 组插穗进行定期取样，每 28 d 取样 1 次，共取样 4 次，每次随机选取 5 根插穗。将插穗用清水洗净、擦干，剪取插穗基部 2 cm 组织，将样品剪碎混合均匀后做好标记，放入 −80 ℃超低温冰箱中保存，用于各生理指标的测定。其中，可溶性糖含量参照李合生 [13] 的方法测定；过氧化物酶（POD）、多酚氧化酶（PPO）、吲哚乙酸氧化酶（IAAO）活性的测定参照高俊凤 [14] 的方法进行。

1.5 数据处理与分析

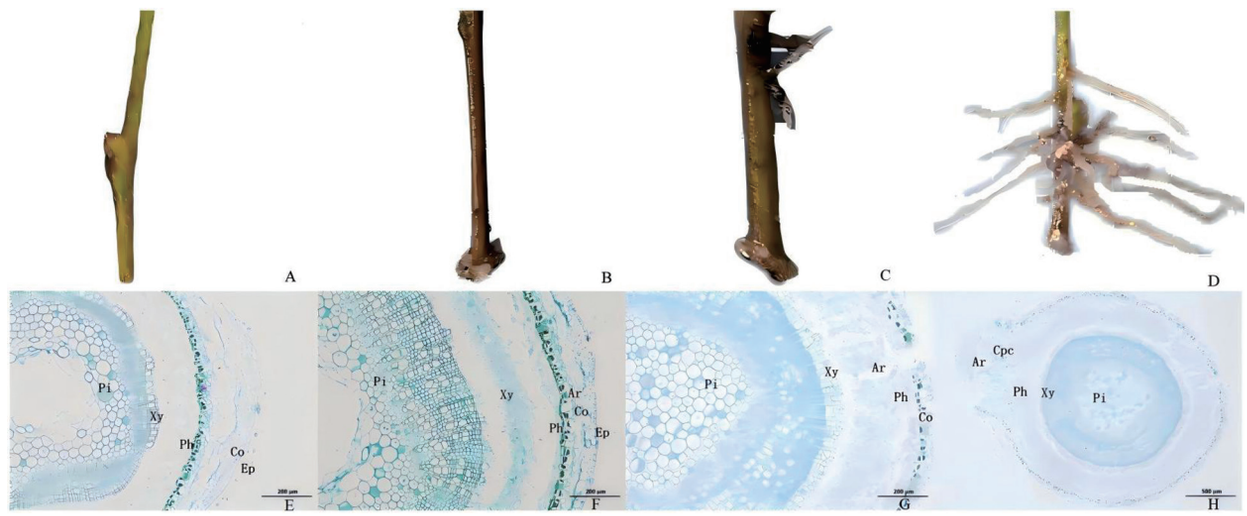
使用 Excel 2019 软件进行统计分析，使用 SPSS 27.0 软件进行方差分析及主成分分析，使用 Origin 2024 软件绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 扦插不定根发育形态及解剖结构

赤杨叶扦插生根过程中解剖结构变化如图 1 所示。观察结果（图 1）表明，赤杨叶扦插繁殖属于愈伤组织生根型。扦插后 28 d，插穗基部开始形成愈伤组织（图 1B）；扦插后 56 d，插穗基部及侧面出现白色芽状不定根（图 1C）；随后不定根逐渐伸长，至 84 d，已形成大量不定根，根系发育趋于成熟（图 1D）。因此，赤杨叶的扦插生

根过程可分为三个阶段：愈伤组织形成期（0 ～ 28 d）、不定根形成期（29 ～ 56 d）及不定根伸长生长期（57 ～ 84 d）。不同生根阶段插穗基部的解剖观察（图 1E ～ H）显示，基部横切面由外至内依次为表皮（Epidermis，Ep）、皮层（Cortex，Co）、韧皮部（Phloem，Ph）、木质部（Xylem，Xy）、髓（Pith，Pi）。在愈伤组织形成初期，部分皮层薄壁细胞通过分裂与再脱分化，诱导不定根原基的发生（图 1E、F）；不定根原基分生组织细胞持续分裂与分化，其前端逐渐发育形成根冠，后端则不断伸长生长并向外突破表皮，最终完成不定根的发育与形成（图 1G、H）。



A ～ D 分别为扦插后 0、28、56、84 d 的生根情况；E ～ H 分别为扦插后 0、28、56、84 d 插穗基部切面；Co—周皮；Ar—不定根；Cpc—皮层薄壁细胞。
A-D. Cuttings at 0, 28, 56 and 84 days after cutting. E-H represent the cross-sections of the cutting base at 0, 28, 56, and 84 days after insertion respectively. Co=Periderm; Ar=Adventitious root; Cpc=Cortical parenchyma cells.

图 1　赤杨叶扦插生根过程中根系结构变化
Fig. 1　The rooting process of *A. fortunei* cuttings

2.2　扦插生根过程中可溶性糖含量及氧化酶活性变化

扦插后 4 个时间段穗条的可溶性糖含量（图 2）显示，处理 T3 的可溶性糖含量均呈先升高后降低的趋势，而对照（CK）则表现为先缓慢增加后下降再升高的变化趋势。与 CK 相比，T3 处理的可溶性糖含量在愈伤组织形成期（0 ～ 28 d）和不定根形成期（29 ～ 56 d）的增长速率更大，且在不定根形成期（29 ～ 56 d）和不定根伸长生长期（57 ～ 84 d）的可溶性糖含量均高于 CK。PPO 活性总体呈上升趋势：T3 处理在不定根形成期（29 ～ 56 d）出现小幅下降，但在 0 ～ 28 d 和 57 ～ 84 d 两个阶段的增长速率均大于 CK。T3 处理的 POD 活性在愈伤组织形成期（0 ～ 28 d）和不定根形成期（29 ～ 56 d）呈上升趋势，在不定根伸长生长期（57 ～ 84 d）则出现下降，而 CK 表现为先上升后下降。T3 处理与 CK 的 IAAO 活性在愈伤组织形成期（0 ～ 28 d）和不定根形成期（29 ～ 56 d）均呈上升趋势，随后在不定根伸长生长期（57 ～ 84 d）下降。在愈伤组织形成期（0 ～ 28 d），T3 处理的 IAAO 活性上升速度与 CK 基本相当；进入不定根形成期（29 ～ 56 d）后，T3 处理的 IAAO 活性上升速度显著高于 CK；至不定根伸长生长期（57 ～ 84 d），两者的 IAAO 含量均开始下降，且 CK 的下降速度大于 T3 处理的下降速度。

综合来看，在愈伤组织形成期（0 ～ 28 d），赤杨叶穗条中 T3 处理的可溶性糖含量、PPO 及 IAAO 活性均逐渐上升，且高于 CK；在不定根形成期（29 ～ 56 d）和不定根伸长生长期（57 ～ 84 d），T3 处理的可溶性糖含量、PPO 及 IAAO 活性均高于 CK。

2.3　不同处理下插穗的生根情况

不同处理下插穗生根情况如图 3、图 4 及表 2 所示。各处理间各项指标存在较大差异。其中，生根率最高的处理为 T5，达 74.87%，为对照组 CK（21.67%）的 3.46 倍，且所有处理的生根率均高于 CK；叶片数量以 T5 处理最多，为 8.78 片；新梢长度以 T10 处理最长（11.91 cm），是最低处理 T15（3.62 cm）的 3.29 倍，同时是 CK（5.32 cm）的 2.24 倍；总根长以 T5 处理（266.20 cm）最高，为最低处理 T15（81.55 cm）的 3.26 倍。平均根长以 T14 处理（41.73 cm）最高，是最低处理 T10（10.06 cm）的 4.15 倍。根系数量以 T10 处理

（18.67）最多，为最低处理 T12（4.33）的 4.31 倍。生根指数以 T5 处理最高（198.42），所有处理均高于 CK；平均根径在各处理间差异不大，以 T15 处理最大（0.68 mm）。根系表面积以 T5 处理（41.28 cm^2）最高，为最低处理 T15（19.13 cm^2）的 2.16 倍。根系体积以 T13 处理（0.66 cm^3）最高，为最低处理 T4（0.21 cm^3）的 3.14 倍；比根长以 T15 处理（144.62）最高，为最低处理 T10（28.42）的 5.09 倍。比根面积以 T15（144.04）最高，为最低处理 T2（52.88）的 2.72 倍。在生物量累积方面，T5 处理的鲜质量（13.55 g）和干质量（2.85 g）均居于首位，其含水量为 78.97%。地下部分鲜质量以 T13 处理最大，地下部分干质量以 T5 处理最大。鲜质量根冠比以 T4 处理最小，T13 处理最大。

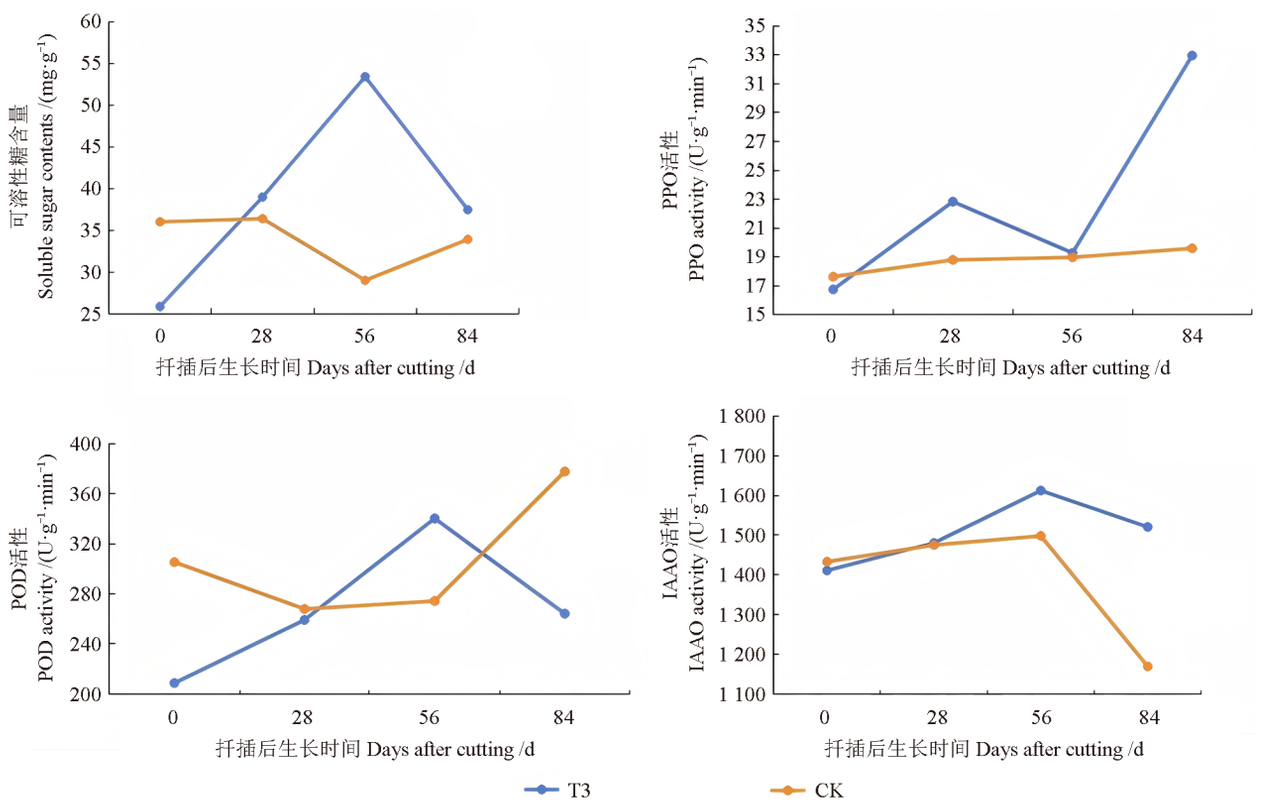


图 2 赤杨叶扦插生根过程中可溶性糖含量与氧化酶活性

Fig. 2 Soluble sugar contents and oxidase activities during the rooting process of *A. fortunei* cuttings

2.4 影响赤杨叶扦插生根的因素分析

赤杨叶扦插苗生根情况的方差分析结果如表 3 所示。方差分析表明，生长调节处理对插穗生根率影响极显著（$P < 0.01$）；生长调节剂种类与质量浓度的交互作用对生根率影响显著（$P < 0.05$）。基质配比对叶片数量具有显著影响（$P < 0.05$）。基质配比对新梢长则表现为极显著影响（$P < 0.01$）；此外，生长调节剂种类与质量浓度、生长调节剂种类与处理时间的交互作用，均显著影响新梢长（$P < 0.05$）。在根系生长指标中，基质配比对总根长具有显著影响（$P < 0.05$）；生长调节剂种类及质量浓度对平均根长具有显著影响（$P < 0.05$）；生长调节剂种类与质量浓度对根系数量具有极显著影响（$P < 0.01$），同时基质配比、生长调节剂种类与质量浓度的交互作用以及生长调节剂种类与处理时间的交互作用均显著影响根系数量（$P < 0.05$）；基质配比、生长调节剂种类与质量浓度的交互作用均显著影响生根指数（$P < 0.05$）；生长调节剂种类与质量浓度对平均根径具有极显著影响（$P < 0.01$）；生长调节剂种类、生长调节剂质量浓度、生长调节剂种类与质量浓度的交互作用均显著影响根系体积（$P < 0.05$）；生长调节剂种类对比根长具有极显著影响（$P < 0.01$）；生长调节剂种类对比根面积具有显著影响（$P < 0.05$）。

2.5 各影响因素最适水平分析

各单因素均值比较（表 4）显示，在受生长调节剂显著影响的指标中，A3（NAA）处理的平均根长、平均根径、根系体积、比根长及比根面积均高于 A1（IBA+IAA+NAA）和 A2（IBA）处理，而 A2（IBA）处理的根系数量更多。综合比较，A3（NAA）是最适合赤杨叶扦插的生长调节剂种类。



图 3　不同处理下插穗的生根情况
Fig. 3　The rooting conditions of cuttings under different treatments

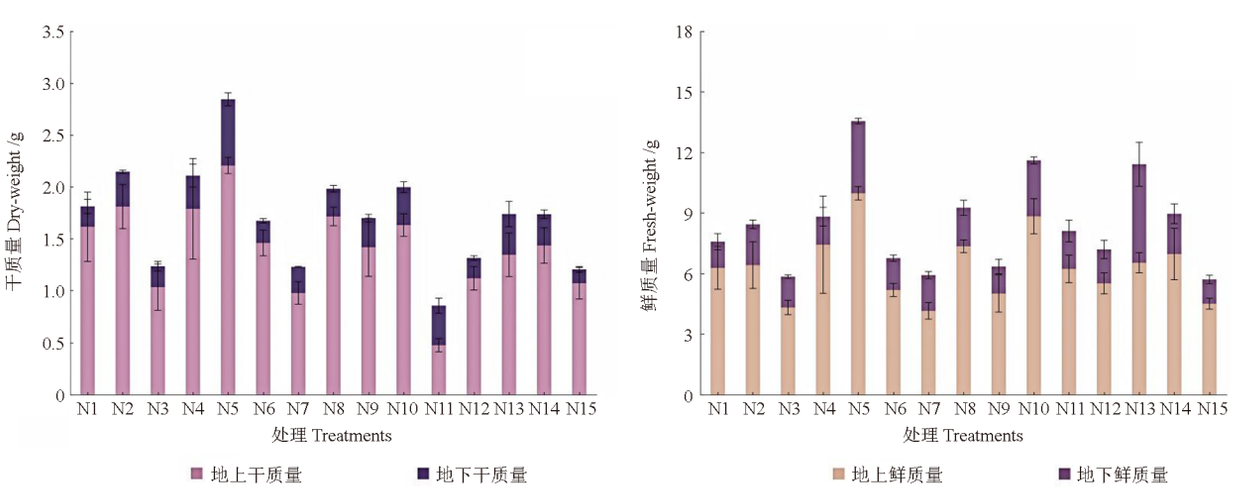


图 4　不同处理下扦插苗的干质量、鲜质量
Fig. 4　The dry weight and fresh weight of cuttings under different treatments

基质配比显著影响的指标中，B2（50% 黄沙 + 50% 蛭石）处理的叶片数量、总根长、根系数量及生根指数大于 B3（蛭石）和 B1（75% 蛭石 + 25% 珍珠岩）处理，而 B1 处理的新梢长最长。综合考虑，B2 为最佳基质配比。

生长调节剂质量浓度仅对叶片数量有显著影响，C1（500 mg·L^{-1}）处理的叶片数量略大于 C2（1 000 mg·L^{-1}）和 C3（1 500 mg·L^{-1}）处理。如表 5 所示，在选择最适合赤杨叶扦插的生长调节剂 A3（NAA）的情况下，在受生长调节剂种类 × 生长调节剂质量浓度组合显著影响的指标中，C3（1 500 mg·L^{-1}）的生根指数及根系表面积均大幅

高于 C1（500 mg·L^{-1}）和 C2（1 000 mg·L^{-1}）处理。选择 A1（IBA+IAA+NAA）为生长调节剂时，C2（1 000 mg·L^{-1}）处理的生根率、根系数量、根系表面积及根系体积更大，表明在选择 A1（IBA+IAA+NAA）时高质量浓度不利于生根。而选择 A2（IBA）时，高质量浓度 C3（1 500 mg·L^{-1}）处理的新梢长和根系数量显著高于低质量浓度处理。综上，选择最适合的生长调节剂 A3（NAA）时，C3 的最适质量浓度为 1 500 mg·L^{-1}。

生长调节剂处理时间仅对生根率和比根面积有显著影响，D1（10 min）处理的生根率略高于 D2（30 min）和 D3（60 min）处理，而 D2（30 min）处理的比根面积更大。生长调节剂种类 × 生长调节剂处理时间组合的均值（表 6）显示，A3（NAA）× D1（10 min）处理的生根率、总根长及生根指数显著高于其他组合，说明在选择 NAA 作为生长调节剂时，处理时间长不利于赤杨叶的生根。因此，在选择 A3（NAA）为最适生长调节剂的情况下，生长调节剂处理时间以 10 min 为宜。

综上所述，根据均值比较结果，A3B2C3D1 是潜在的最佳处理组合。

表 2 不同处理下赤杨叶扦插的生长指标

Table 2 Growth indicators of *A. fortunei* cuttings under different treatments

处理 Treatment	生根率 Rooting rate /%	叶片数量 Number of leave	新梢长 Shoot length /cm	总根长 Total root length /cm	平均根长 Average root length /cm	根系数量 Root number
1	46.73±5.71	6.56±0.51	6.16±2.65	112.05±53.68	15.80±1.38	7.33±4.16
2	56.87±12.55	5.56±1.39	5.77±3.38	103.16±71.67	13.11±6.49	7.33±4.04
3	73.60±7.46	3.67±1.53	4.30±0.57	107.84±36.64	16.10±6.65	7.00±1.00
4	50.27±13.89	7.00±2.89	10.54±7.74	179.14±134.36	21.66±6.13	7.67±5.69
5	74.87±2.10	8.78±0.84	11.01±2.32	266.20±69.86	18.76±6.93	14.33±1.53
6	63.77±22.41	5.56±0.51	6.07±2.06	197.29±106.23	21.28±9.02	8.67±1.53
7	65.73±4.44	4.89±0.19	4.27±0.38	124.28±34.36	16.35±0.94	7.67±2.08
8	54.13±11.87	7.33±1.53	6.14±1.40	194.16±63.94	16.05±2.28	12.00±4.36
9	63.70±5.14	6.56±0.96	6.82±3.19	152.34±22.54	11.09±2.51	14.00±1.00
10	73.07±5.40	8.55±2.27	11.91±1.07	186.39±35.18	10.06±1.86	18.67±1.53
11	70.57±4.57	6.78±1.65	6.01±1.24	168.12±77.42	17.10±2.08	9.67±4.04
12	52.57±11.10	6.89±1.68	4.71±1.75	111.28±20.51	25.45±1.51	4.33±0.58
13	71.87±2.48	6.33±1.77	4.73±1.34	204.57±46.72	25.78±3.60	8.33±3.21
14	68.27±15.73	6.67±2.34	8.29±3.49	197.08±80.64	41.73±40.43	8.00±5.20
15	47.73±10.89	6.00±0.58	3.62±0.57	81.55±11.24	18.04±3.09	4.67±0.58
CK	21.67±2.48	5.67±0.58	5.32±1.32	161.12±30.60	22.53±2.94	7.33±2.08

处理 Treatment	生根指数 Index of rooting	平均根径 Average root diameter /mm	根系表面积 Root surface area /cm^2	根系体积 Root volume /cm^3	比根长 Specific root length	比根面积 Specific root area
1	51.07±21.42	0.52±0.07	19.29±11.15	0.26±0.17	129.91±123.88	115.56±54.37
2	54.82±37.95	0.50±0.02	18.27±12.28	0.25±0.18	38.82±18.44	52.88±34.65
3	78.27±24.58	0.50±0.07	17.45±3.99	0.24±0.08	96.69±65.80	105.28±70.66
4	101.52±88.13	0.40±0.04	20.91±17.52	0.21±0.17	80.90±43.58	60.95±30.15
5	198.42±46.60	0.48±0.02	41.28±8.16	0.51±0.11	28.80±5.53	64.55±2.46
6	134.94±86.26	0.50±0.02	20.55±6.58	0.25±0.08	100.31±39.14	98.42±36.89
7	81.66±22.48	0.52±0.08	21.19±6.98	0.28±0.12	64.97±5.53	83.52±24.52
8	106.17±49.58	0.52±0.03	30.79±10.06	0.40±0.13	63.02±21.53	113.48±21.90
9	96.40±8.66	0.47±0.03	24.08±8.03	0.30±0.12	39.76±3.27	85.82±17.22
10	135.67±22.89	0.55±0.04	29.64±6.29	0.41±0.10	28.42±6.90	82.92±15.88
11	117.29±52.47	0.56±0.04	28.47±13.87	0.40±0.20	47.00±9.46	73.03±27.92
12	59.66±20.47	0.67±0.03	21.88±5.66	0.37±0.12	132.96±18.52	116.3±42.38
13	147.19±35.60	0.64±0.02	41.17±10.28	0.66±0.17	84.99±59.73	125.99±58.86
14	129.86±39.52	0.55±0.04	30.25±13.29	0.42±0.17	139.08±137.82	97.27±19.67
15	38.40±7.48	0.68±0.06	19.13±7.82	0.28±0.08	144.62±40.73	144.04±25.44
CK	35.41±10.19	0.49±0.01	22.86±3.82	0.27±0.04	110.54±42.46	108.72±24.23

表 3　赤杨叶扦插试验各指标方差分析结果 †
Table 3　ANOVA of *A. fortunei* cutting tests

因变量 Dependent variable	方差来源 Source of variation					
	生长调节剂 Growth regulator	基质配比 Medium ratio	生长调节剂质量浓度 Growth regulation concentration	处理时间 Treatment time	生长调节剂 × 生长调节剂质量浓度 Growth regulator × Growth regulation concentration	生长调节剂 × 处理时间 Growth regulator × Treatment time
生根率 Rooting rate	0.443	0.377	0.084	0.006**	0.014*	0.197
叶片数量 Number of leaves	0.117	0.012*	0.768	0.979	0.465	0.108
新梢长 Shoot length	0.068	0**	0.691	0.647	0.038*	0.041*
总根长 Total root length	0.685	0.027*	0.685	0.371	0.135	0.280
平均根长 Average root length	0.026*	0.443	0.026*	0.509	0.739	0.443
根系数量 Root number	0**	0.033*	0**	0.269	0.040*	0.037*
生根指数 Index of rooting	0.639	0.013*	0.639	0.106	0.026*	0.227
平均根径 Average root diameter	0**	0.091	0**	0.303	0.162	0.053
根系表面积 Root surface area	0.293	0.183	0.293	0.172	0.057	0.309
根系体积 Root volume	0.020*	0.472	0.020*	0.142	0.014*	0.254
比根长 Specific root length	0.006**	0.721	0.130	0.817	0.832	0.704
比根面积 Specific root area	0.012*	0.173	0.740	0.660	0.601	0.113

† * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上具有显著性，下同。* and ** are significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively, the same below.

表 4　不同处理下各单因素生长指标均值比较
Table 4　Comparison of mean growth indicators under different single factor treatments

因素 Factor	水平 Level	生根率 Rooting rate /%	叶片数量 Number of leaves	新梢长 Shoot length / cm	总根长 Total root length / cm	平均根长 Average root length /cm	根系数量 Root number	生根指数 Index of rooting	平均根径 Average root diameter / mm	根系表面积 Surface area /cm^2	根系体积 Volume / cm^3	比根长 Specific root length	比根面积 Specific root area
生长调节剂种类 Growth regulator	A1	61.69	6.00	6.87	155.71	17.58**	8.57**	100.10	0.49**	22.70	0.29*	77.20**	83.02*
	A2	65.37	7.31	7.72	175.25	13.58**	13.58**	113.88	0.52**	28.25	0.38*	44.55**	88.81*
	A3	60.11	6.47	5.34	148.62	27.75**	6.33**	93.78	0.64**	28.11	0.43*	125.41**	120.90*
基质配比 Medium ratio	B1	59.92	6.13*	5.52**	140.77*	17.63	8.62*	84.80*	0.54	24.70	0.36	83.74	102.19
	B2	66.62	6.78*	5.09**	170.54*	19.40	9.30*	108.24*	0.55	29.65	0.42	74.04	104.63
	B3	61.95	5.81*	4.99**	142.81*	18.19	7.67*	93.07*	0.57	22.34	0.30	89.22	99.75
生长调节剂质量浓度 Growth regulation concentration	C1	58.04	6.68*	6.85	165.59	22.72	8.24	100.07	0.53	24.59	0.33	99.03	96.43
	C2	64.98	6.25*	6.44	151.98	16.00	10.00	102.87	0.53	25.48	0.33	77.47	99.92
	C3	66.88	6.33*	6.67	154.60	16.32	10.50	104.84	0.55	27.57	0.40	54.30	86.33
处理时间 Treatment time	D1	65.96*	6.65	6.76	174.95	20.94	9.90	117.41	0.54	29.39	0.40	76.36	92.25*
	D2	65.75*	6.17	6.75	150.70	18.22	9.67	102.14	0.55	22.38	0.32	89.59	100.73*
	D3	52.25*	6.47	6.52	139.50	17.22	7.92	75.23	0.53	28.11	0.29	81.84	92.84*

表 5　生长调节剂种类与质量浓度交互作用下生长指标均值比较
Table 5　Comparison of mean growth indicators under the interaction between growth regulator type and concentration

因素 Factor	水平 Level	生根率 Rooting rate /%	叶片数量 Number of leaves	新梢长 Shoot length / cm	总根长 Total root length / cm	平均根长 Average root length /cm	根系数量 Root number	生根指数 Index of rooting	平均根径 Average root diameter / mm	根系表面积 Root surface area /cm^2	根系体积 Root volume / cm^3	比根长 Specific root length	比根面积 Specific root area
A1	C1	53.59*	6.67**	7.59	136.96	19.64	8.00*	95.84	0.47	19.72**	0.23**	103.71	91.64
	C2	73.40*	6.50**	7.66	186.17	17.43	11.00*	138.35	0.49	29.37**	0.37**	62.75	84.92
	C3	61.30*	5.50**	5.02	116.09	14.73	7.50*	68.24	0.51	19.73**	0.28**	51.90	68.20
A2	C1	62.35	7.00	6.08**	176.84	16.58**	11.00*	111.73	0.54	29.63	0.40	55.01	93.26
	C2	63.70	7.00	6.82**	156.03	11.09**	14.00*	96.40	0.48	24.08	0.30	39.76	85.82
	C3	73.07	9.00	11.91**	177.61	10.06**	19.00*	135.67	0.55	29.64	0.41	28.42	82.92
A3	C1	60.42	7.00	6.50	140.70	33.60	6.50	94.76*	0.61	26.30*	0.40	136.02	106.78
	C2	47.73	6.00	3.62	75.60	18.01	5.00	38.40*	0.68	18.10*	0.27	144.62	144.04
	C3	71.87	6.00	4.73	203.22	25.78	8.00	147.19*	0.64	41.17*	0.66	84.99	125.99

表 6 生长调节剂种类与处理时间交互作用下生长指标均值比较

Table 6 Comparison of mean growth indicators under the interaction between growth regulator type and treatment dutation

因素 Factor	水平 Level	生根率 Rooting rate /%	叶片数量 Number of leaves	新梢长 Shoot length / cm	总根长 Total root length / cm	平均根长 Average root length /cm	根系数量 Root number	生根指数 Index of rooting	平均根径 Average root diameter / mm	根系表面积 Root surface area /cm^2	根系体积 Root volume / cm^3	比根长 Specific root length	比根面积 Specific root area
A1	D1	62.44	6.74	7.15	167.51	16.97	9.78*	110.38	0.51	27.25	0.35	74.56	87.88
	D2	68.68	4.61	5.18	152.57	18.69	7.83*	106.61	0.50	19.00	0.25	98.50	101.85
	D3	53.57	6.28	8.16	141.15	17.39	7.50*	78.17	0.45	19.59	0.23	59.86	56.91
A2	D1	67.13*	6.67	6.42**	160.23	14.10	11.83*	106.84	0.52	26.28	0.35	43.38*	79.43
	D2	73.07*	8.55	11.91**	186.39	10.06	18.67*	135.67	0.55	29.64	0.41	28.42*	82.92
	D3	54.13*	7.33	6.14**	194.16	16.05	12.00*	106.17	0.52	30.79	0.40	63.02*	113.48
A3	D1	70.07*	6.50	6.51	200.83**	33.75	8.17	138.53**	0.60	35.71	0.54	112.04	111.63
	D2	52.57*	6.89	4.71	111.28**	25.45	4.33	59.66**	0.67	21.88	0.37	132.96	116.30
	D3	47.73*	6.00	3.62	81.55**	18.04	4.67	38.40**	0.68	19.13	0.28	144.62	144.04

2.6 不同处理下插穗生根指标的主成分分析

选取不同处理下插穗的生根率、叶片数量、新梢长、总根长、平均根长、根系数量、生根指数、平均根径、根系表面积、根系体积、比根长及比根面积共 12 个指标进行主成分分析，以此综合评价不同处理下插穗的生根综合表现。以特征值大于 1 为提取标准，共确定 4 个主成分因子。由表 7 可知，排名前 4 的因子累计贡献率达到 84.429%，表明这 4 个因子可有效反映 12 个指标的主要信息。PC1 特征值为 4.992，贡献率为 41.603%，其中叶片数量、新梢长及总根长具有较高载荷，表征插穗的地上与地下部分的综合生长状况。PC2 特征值为 2.736，贡献率为 22.797%，平均根径的载荷最高，表征根系粗度指标。PC3 特征值为 1.316，贡献率为 10.965%，平均根长的载荷最高，表征根系长度指标。PC4 特征值为 1.088，贡献率为 9.064%，生根率的载荷最高，表征根系综合生长状况。

根据主成分分析结果，以各因子的方差贡献率为权重，对因子得分进行加权求和，构建综合评价函数：F=0.416F_1 + 0.228F_2+0.110F_3+0.091F_4。计算各处理的综合得分，并进行排序（表 8）。由表 8 的主成分分析结果可知，T13 处理和 T5 处理的综合得分位居前列，表明这两个处理的扦插效果最佳。其中，T13 处理在根系粗度指标（PC2）上的因子得分排名第 1，而 T5 处理在地上、地下部分的综合生长状况（PC1）上的因子得分排名第 1。

表 7 各评价指标荷载矩阵和方差贡献率

Table 7 Principal component loading matrix and variance contribution rate of each evaluation index

指标 Index	不同评价指标的载荷 Principal component loading matrix			
	PC1	PC2	PC3	PC4
生根率 Rooting rate	−0.184	−0.059	0.018	0.686
叶片数量 Number of leaves	0.315	−0.081	0.123	−0.329
新梢长 Shoot length	0.279	−0.261	0.118	−0.199
总根长 Total root length	0.205	−0.018	0.070	0.030
平均根长 Average root length	0.088	−0.131	0.526	0.114
根系数量 Root number	0.121	0.024	−0.263	−0.014
生根指数 Index of rooting	0.089	−0.039	0.076	0.312
平均根径 Average rootdiameter	−0.076	0.424	−0.083	0.047
根系表面积 Surface area	0.157	0.189	−0.078	0.035
根系体积 Root volume	0.097	0.292	−0.107	0.093
比根长 Specific root length	0.038	0.003	0.432	−0.096
比根面积 Specific root area	0.056	0.369	0.007	−0.188
特征值 Eigenvalue	4.992	2.736	1.316	1.088
贡献率 Contribution rate /%	41.603	22.797	10.965	9.064
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	41.603	64.400	75.365	84.429

表 8　主成分因子得分及生根指标综合得分
Table 8　Principal component factor scores and comprehensive scores of rooting indicators

处理 Treatment	因子得分 Factor score				综合得分 Comprehensive score	排序 Ranking
	F_1	F_2	F_3	F_4		
1	−0.218 203 923	0.008 851 743	0.264 350 307	0.102 056 647	40.58	10
2	−0.728 907 347	−0.677 438 557	−0.553 180 200	−0.311 799 597	24.49	15
3	−1.225 743 203	−0.131 701 293	−0.091 639 347	−0.972 984 287	31.89	16
4	0.499 907 423	−1.686 000 357	0.617 906 207	−0.722 232 143	45.06	12
5	1.505 502 497	−0.560 850 810	−0.315 981 050	0.194 367 117	63.66	2
6	−0.160 319 367	−0.377 141 393	0.375 067 017	−0.550 677 137	45.42	11
7	−0.839 193 700	−0.100 130 060	−0.333 150 227	−0.400 252 523	37.38	14
8	0.492 697 540	0.328 069 737	−0.428 023 423	0.254 345 897	57.26	5
9	0.008 408 850	−0.442 581 937	−0.848 304 120	−0.144 895 213	44.22	13
10	1.023 981 050	−0.303 241 697	−1.024 265 783	0.469 383 500	58.15	4
11	−0.062 964 207	0.067 280 200	−0.424 501 750	0.297 156 190	49.14	9
12	−0.370 934 750	0.982 577 627	0.641 198 253	0.927 751 273	56.36	6
13	0.280 989 943	1.696 576 637	−0.029 944 747	0.489 947 400	65.46	1
14	0.514 358 390	−0.146 552 370	1.536 871 590	0.021 572 293	59.96	3
15	−0.793 999 733	1.368 888 903	0.277 006 773	0.747 379 750	52.27	7
CK	0.074 413 970	−0.026 610 090	0.336 587 303	−0.401 130 610	50.72	8

3　讨　论

不定根原基的形成是植物扦插生根的关键过程。当植物产生切口时，在适宜的生境条件下，切口处的薄壁细胞脱分化形成愈伤组织，通过植物内部信号传导和外部温度、光照等条件的协同作用，进一步由根原基形成不定根 [15-18]。本研究中，赤杨叶扦插 28 d 后白色芽状愈伤组织开始逐渐形成，随着生根进程的推进，扦插后 56 d 根原基伸长生长突破表皮形成不定根。赤杨叶不定根形成的速度慢于麻竹、桑树、杨树等，快于银杏、红豆树等，这与植物本身的遗传特性有关，大量研究表明，不同树种的扦插生根能力不同 [19-23]。依据植物根原基形成方式不同，植物可分为诱生根原基型和潜伏根原基型。赤杨叶属于诱生根原基型，根原基形成依赖于适宜条件诱导，薄壁细胞脱分化形成根原基，不定根发生难度高；而杨树、桑树、麻竹等树种属于潜伏根原基型，不定根发生难度低，根原基在外植体离体前就已产生 [20-21]。

IAA 是促进不定根形成的主要生长激素，对细胞分化、愈伤组织形成、根原基形成与发展起重要促进作用 [15]。本研究中，赤杨叶扦插过程中 IAAO 活性于愈伤组织形成期（0 ～ 28 d）、不定根形成期（29 ～ 56 d）升高，在不定根伸长生长期（57 ～ 84 d）下降，与秦岭杜鹃 [24]、元宝枫 [25] 的试验结果一致。生长调节剂处理组 IAAO 活性的升高速度于不定根形成期（29 ～ 56 d）大幅领先对照组，IAAO 通过氧化分解 IAA 对其调控，说明生长调节剂处理使 IAA 分解速度加快，且于不定根形成阶段达到峰值，前期积累的 IAA 迅速分解。吴卫倩等 [15] 提出在插穗生根的进程中，代谢活动增强，插穗中的其他物质逐步转化为可被直接利用的可溶性糖，同时叶片维持了一定的光合作用，可溶性糖持续积累，随着不定根的形成达到峰值，这与本研究可溶性糖含量呈现先增高后降低的趋势相吻合。生长调节剂处理组的可溶性糖含量升高幅度高于对照组，且在各个阶段的可溶性糖含量均高于对照组，说明生长调节剂处理能加快赤杨叶不定根形成阶段营养物质的积累。赤杨叶生长调节剂处理组的 POD 活性在扦插后 56 d 出现拐点，与吕庚鑫 [26] 的研究结果相符，在愈伤组织形成阶段和不定根形成阶段 POD 的积累，有利于适应扦插伤口导致的胁迫，促进不定根的形成。部分研究表明，PPO 通过催化酚类物质与生长激素 IAA，形成利于不定根形成的 IAA- 酚酸复合物，影响扦插生根进程，这与本研究赤杨叶 PPO 活性总体呈升高的趋势一致 [27]。

生长调节剂通过调节营养物质合成和细胞分化生长，促进植物扦插生根。将插穗浸泡在 1 500 mg·L^{-1} IAA 溶液中 10 min 的处理组合（T13），主成分分析综合得分排名第 1，其地下部分鲜质量、根系体积、根冠比等指标居于各处理首位。混合生长调节剂 IBA+IAA+NAA 在 1 000 mg·L^{-1} 下处理 10 min 的组合（T5）生根效果较好，综合得分排名第 2。这表明赤杨叶扦插时，相较于混

合生长调节剂，IAA 需要更高质量浓度才能积累插穗根系发育所需的含量，这与闽楠扦插试验结论一致 [6]。均值分析结果表明，采用 1 500 mg·L^{-1} NAA 处理 10 min 是潜在最适合赤杨叶扦插的处理，该分析结果有待进一步验证。赤杨叶扦插时，高质量浓度的生长调节剂配合较短处理时间更能促进不定根的形成，与越南安息香 [11]、红豆树 [23] 等的研究结果一致。

基质能为植物根系生长提供必需的水分、养分、空气等，不同的基质通过理化性质、成分等差异直接影响插穗不定根的形成，木本植物扦插常见的基质有黄沙、蛭石、珍珠岩等 [28]。本研究显示，基质配比为 50% 黄沙 +50% 蛭石处理的叶片数量、总根长、根系数量及生根指数显著高于其他处理。黄沙的容重为 0.85 g·cm^{-3}，总孔隙度为 62.0%，饱和持水量为 68.3%，而蛭石的容重为 0.18 ～ 0.46 g·cm^{-3}，总孔隙度为 81.7% ～ 93.0%，饱和持水量为 144% ～ 257%[28]。在黄沙中添加蛭石可降低基质的容重，增加持水率，这表明高持水率有利于赤杨叶根系生长。正交试验最佳处理的基质与单因素分析结果一致，说明降低基质容重、增加持水量的基质配比方案能够很好地应对生长调节剂对根系的协同作用，保证高成活率与良好的根系发展。

4 结 论

赤杨叶扦插生根类型属于诱生根原基型（愈伤组织生根型）。生根过程分为三个阶段：扦插后 0 ～ 28 d 为愈伤组织形成期，29 ～ 56 d 为不定根形成期，57 ～ 84 d 为不定根伸长生长期。

在扦插过程中，赤杨叶插穗的可溶性糖含量、过氧化物酶（POD）和吲哚乙酸氧化酶（IAAO）活性均呈现先上升后下降的变化趋势，生长调节剂处理能够有效加快插穗体内相关生理生化代谢过程，调节生根相关物质的合成与转运，从而显著促进不定根的诱导。

均值分析结果显示，采用 50% 黄沙 +50% 蛭石的基质，配合高质量浓度（1 500 mg·L^{-1}）低处理时间（10 min）的 NAA 是潜在的最佳扦插组合，其效果有待进一步试验验证。主成分分析综合得分表明，T13 处理（75% 蛭石 +25% 珍珠岩，1 500 mg·L^{-1} 的 IAA 处理 10 min）为最佳扦插组合，其生根率可达 71.87%，生根指数为 147.19。

参考文献：

[1] 杨滨豪 , 李文静 , 李文忠 , 等 . 赤杨叶容器育苗技术研究 [J]. 四川林业科技 ,2025,46(1):137-143.
YANG B H, LI W J, LI W Z, et al. Study on container seedling raising technique of *Alniphyllum fortunei*[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology,2025,46(1):137-143.

[2] 许智宏 , 张宪省 , 苏英华 , 等 . 植物细胞全能性和再生 [J]. 中国科学 : 生命科学 ,2019,49(10):1282-1300.
XU Z H, ZHANG X S, SU Y H, et al. Plant cell totipotency and regeneration[J]. Scientia Sinica (Vitae),2019,49(10):1282-1300.

[3] 周跃华 , 聂艳丽 , 赵永红 , 等 . 国内外固体基质研究概况 [J]. 中国生态农业学报 ,2005,13(4):40-43.
ZHOU Y H, NIE Y L, ZHAO Y H, et al. Research on solid substrate in the whole world[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2005,13(4):40-43.

[4] 赵瑞 , 沈永宝 . 林木扦插繁殖研究进展 [J]. 种子 ,2019,38(9):57-66.
ZHAO R, SHEN Y B. Research advances in tree cutting propagation[J]. Seed,2019,38(9):57-66.

[5] 唐梓萱 . 山桐子扦插育苗技术研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2025.
TANG Z X. Research on cutting seedling technology of *Idesia polycarpa*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2025.

[6] 陈来贺 , 王妍 , 杨志坚 , 等 . 不同植物生长调节剂对闽楠扦插的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2020,48(11):54-62.
CHEN L H, WANG Y, YANG Z J, et al. Effects of plant growth regulators on *Phoebe bournei* cutting propagation[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2020,48(11):54-62.

[7] 赖根伟 , 吴初平 , 邱伟清 , 等 . 湖山林场赤杨叶人工林的径级结构和空间分布格局研究 [J]. 浙江林业科技 ,2019,39(1):16-20.
LAI G W, WU C P, QIU W Q, et al. Diameter class structure and spatial distribution pattern of *Alniphyllum fortunei* plantation in Hushan forest farm[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology,2019,39(1):16-20.

[8] 范晶 , 罗永富 , 黄明远 , 等 . 四川濒危肉果秤锤树 rDNA-ITS 分子鉴定、种子形态学及繁育分析 [J]. 基因组学与应用生物学 ,2015,34(11):2483-2491.
FAN J, LUO Y F, HUANG M Y, et al. Analysis of rDNA-ITS molecular identification, seed morphology and breeding on the endangered *Sinojackia sarcocarpa* in Sichuan[J]. Genomics and Applied Biology,2015,34(11):2483-2491.

[9] 唐苏慧 . 长果安息香种群特征及繁育技术研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2016.
TANG S H. Study on the population characteristics and breeding technology research of *Sinojackia dolichocarpa*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2016.

[10] 赵子荀 , 吴秀萍 , 刘政 , 等 . 外源激素对鸦头梨硬枝扦插生根的影响 [J]. 江苏林业科技 ,2019,46(1):6-10.
ZHAO Z X, WU X P, LIU Z, et al. Effects of exogenous hormones on rooting of *Melliodendron xylocarpum* cuttings[J].

Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology,2019,46(1): 6-10.

[11] 刘郁林 , 廖忠明 , 黄红兰 , 等 . 越南安息香嫩枝扦插生根技术 [J]. 林业科技通讯 ,2020(10):72-75.
LIU Y L, LIAO Z M, HUANG H L, et al. Twig cutting and rooting technology of *Styrax tonkinensis*[J]. Forest Science and Technology,2020(10):72-75.

[12] 刘瑶 , 惠静怡 , 唐思佳 , 等 . 生长调节剂对白花龙扦插生根效能的影响 [J]. 江苏林业科技 ,2020,47(5):1-4,10.
LIU Y, HUI J Y, TANG S J, et al. Effects of growth regulators on rooting efficiency of cuttings of *Styrax faberi* Perk.[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology,2020,47(5):1-4,10.

[13] 李合生 . 植物生理生化实验原理和技术 [M].2 版 . 北京 : 高等教育出版社 ,2000.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press,2000.

[14] 高俊凤 . 植物生理学实验指导 [M]. 北京 : 高等教育出版社 , 2006.
GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press,2006.

[15] 吴卫倩 , 胡子建 , 沈诗雅 , 等 . 植物不定根再生与扦插生根相关激素调控研究进展 [J]. 植物研究 ,2026,46(1):13-24.
WU W Q, HU Z J, SHEN S Y, et al. Research progress on the hormonal regulation related to adventitious root regeneration and cuttings rooting in plants[J]. Bulletin of Botanical Research, 2026,46(1):13-24.

[16] 贾志远 , 葛晓敏 , 唐罗忠 . 木本植物扦插繁殖及其影响因素 [J]. 世界林业研究 ,2015,28(2):36-41.
JIA Z Y, GE X M, TANG L Z. Research progress in cutting propagation technology for woody plants and its affecting factors[J]. World Forestry Research,2015,28(2):36-41.

[17] 苗大鹏 , 贾瑞瑞 , 李胜皓 , 等 . 木本植物不定根发生机制研究进展 [J]. 浙江农林大学学报 ,2022,39(4):902-912.
MIAO D P, JIA R R, LI S H, et al. Research advances in the mechanism of adventitious root occurrence in woody species[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2022,39(4):902-912.

[18] HARTMANN H T, KESTER D E, DAVIES F T, et al. Hartmann and Kester's plant propagation: principles and practices[M]. 7th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall,2002.

[19] 欧惠玲 , 郭灿勤 , 王曦 , 等 . 不同基质对红蝉花硬枝扦插生根的影响 [J]. 湖南林业科技 ,2026,53(1):65-70.
OU H L, GUO C Q, WANG X, et al. Effects of different substrates on rooting of hardwood cuttings of *Mandevilla sander*[J]. Hunan Forestry Science& Technology,2026,53(1):65-70.

[20] 徐振国 , 黄大勇 , 梁晓静 , 等 . 基质、激素种类和浓度及其交互作用对麻竹扦插生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2019,39(2):47-52.
XU Z G, HUANG D Y, LIANG X J, et al. Effects of substrate, hormone types, concentration and their interactions on branch cuttage growth of *Dendrocalamus latiflorus*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2019,39(2):47-52.

[21] 袁姜莲 , 李炎 , 罗义维 , 等 . 不同桑树品种扦插生长情况及其生根能力评价 [J]. 西南大学学报 (自然科学版),2025,47(2): 61-69.
YUAN J L, LI Y, LUO Y W, et al. Evaluation of cutting growth and rooting potentials of different mulberry varieties[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2025,47(2): 61-69.

[22] 王瑞敏 , 祝凌云 , 陈颖 , 等 . 金叶银杏硬枝扦插繁殖生根过程及其生根机制研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(5): 28-37.
WANG R M, ZHU L Y, CHEN Y, et al. Study on rooting process and rooting mechanism of hardwood cuttings of *Ginkgo biloba* 'golden-leaf'[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(5):28-37.

[23] 何必庭 , 陈焕伟 , 陈杏林 , 等 . 红豆树根插和嫩枝扦插繁殖试验 [J]. 南方林业科学 ,2019,47(3):35-36,45.
HE B T, CHEN H W, CHEN X L, et al. Study on the experiment of cutting propagation of tender branch and root for *Ormosia hosiei*[J]. South China Forestry Science,2019,47(3):35-36,45.

[24] 郭素娟 . 林木扦插生根的解剖学及生理学研究进展 [J]. 北京林业大学学报 ,1997,19(4):64-69.
GUO S J. Progress of study on rooting anatomy and physiology of forest tree cuttings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1997,19(4):64-69.

[25] 王玉虓 , 张斌 , 马秋月 , 等 . 元宝枫嫩枝扦插技术及生根过程的生理生化分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2024, 48(5):123-130.
WANG Y X, ZHANG B, MA Q Y, et al. Softwood cutting technology for *Acer truncatum* and physiological and biochemical analysis during rooting process[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2024,48(5):123-130.

[26] 吕庚鑫 . 杜仲良种嫩枝扦插生根的生理生化研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2022.
LYU G X. Study on physiological, biochemical of rooting in *Eucommia ulmoides* improved varieties soft-wood cutting[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2022.

[27] SOMKUWAR R G, BONDAGE D D, SURANGE M S, et al. Rooting behaviour, polyphenol oxidase activity, and biochemical changes in grape rootstocks at different growth stages[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry,2011,35(3):281-287.

[28] 孙敏 , 奥岩松 . 几种固形物料的物理、化学性状及其栽培基质化评价 [J]. 华北农学报 ,2004,19(1):102-106.
SUN M, AO Y S. Evaluation as growing medium on physical and chemical characteristics of several solid materials[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2004,19(1):102-106.

[本文编校：谢荣秀]