

不同年龄栓皮栎嫩枝扦插生根及解剖学分析和酶活性变化

钱家连¹, 李迎超¹, 许慧慧¹, 王 茜², 秦爱丽³, 任俊杰⁴, 王利兵¹, 于海燕¹

(1. 中国林业科学研究院 林业研究所 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 河北邢台市信都区农业农村局, 河北 邢台 054000; 3. 中国林业科学研究院 森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091; 4. 河北省洪崖山国有林场, 河北 易县 074200)

摘要: 【目的】探讨母树年龄对栓皮栎 *Quercus variabilis* 嫩枝扦插生根的影响, 解析其可能成因, 为栓皮栎扦插繁殖提供依据。【方法】以 1 年生、5 年生和 10 年生栓皮栎母树的半木质化嫩枝为材料, 用 200 mg·L⁻¹ 生根粉 (ABT-1 号) 浸泡处理 2 h。扦插 60 d 后, 测定各插穗生根率、生根数量、根直径、根长及多酚氧化酶 (PPO)、过氧化物酶 (POD) 及吲哚乙酸氧化酶 (IAAO) 活性; 采用石蜡切片法观察不同年龄插穗茎段的组织结构变化。【结果】①母树年龄越大, 嫩枝扦插生根率越低。②栓皮栎不定根根原基在根形成后期被诱导; 不同年龄插穗产生不定根时间存在差异, 1 年生为 17 d, 5 年生为 44 d, 10 年生未产生不定根。③1 年生和 5 年生母树的插穗中 IAAO、PPO 和 POD 这 3 种酶活性总体呈“先上升后下降”的单峰趋势, 10 年生母树的插穗 POD 活性总体呈增加趋势, PPO 和 IAAO 活性变化不明显。【结论】母树年龄影响插穗不定根的生成, 栓皮栎嫩枝扦插生根率和平均不定根数量从高到低依次为 1 年生、5 年生、10 年生, 1 年生平均生根率为 92.69%, 5 年生的平均生根率为 10.79%, 10 年生的为 0。栓皮栎的生根类型为皮部生根型, 其不定根原基类型为诱生根原基。高水平 POD、PPO 活性有助于不定根的诱导, IAAO 活性升高有助于不定根的形成。图 3 表 1 参 30

关键词: 栓皮栎; 扦插; 年龄效应; 生根率; 解剖结构; 酶活性

中图分类号: S723.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)01-0107-08

Rooting, anatomical analysis and changes of enzyme activity of softwood cuttings of *Quercus variabilis* at different ages

QIAN Jialian¹, LI Yingchao¹, XU Huihui¹, WANG Xi², QIN Aili³, REN Junjie⁴, WANG Libing¹, YU Haiyan¹

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Xindu District, Xingtai 054000, Hebei, China; 3. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Hongyashan State-owned Forest Farm, Yixian 074200, Hebei, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effect of mother tree age on the cutting rooting of *Quercus variabilis* as well as the possible causes, so as to provide basis for the cutting propagation of *Q. variabilis*. [Method] The semi-lignified shoots of 1, 5 and 10-year-old oak mother trees were soaked with 200 mg·L⁻¹ root powder (ABT-1) for 2 h. The rooting rate, rooting number, root diameter, root length and activities of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD) and IAA-oxidase (IAAO) were determined after 60 d. The changes of tissue structure of stem segments of cuttings at different ages were observed by paraffin sectioning. [Result] (1) The older the mother tree was, the lower the cutting rooting rate was. (2) The adventitious root primordium of *Q. variabilis* was induced in the late stage of adventitious root formation. The

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-05-30

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2018ZB001); “万人计划”青年拔尖人才资助项目

作者简介: 钱家连 (ORCID: 0000-0001-5432-800X), 从事工厂化育苗研究。E-mail: 1783040539@qq.com。通信作

者: 李迎超 (ORCID: 0000-0002-2616-6928), 助理研究员, 从事工厂化育苗研究。E-mail: 505464683@

qq.com

adventitious root generation time of cuttings at different ages was different (17 d for trees of 1 year old, 44 d for 5 years old, and none for 10 years old). (3) The activities of IAAO, PPO and POD in the cuttings of 1-year-old and 5-year-old mother trees showed a single-peak trend of ‘first increasing and then decreasing’, while the activities of POD in the cuttings of 10-year-old mother trees showed an increasing trend. The activities of PPO and IAAO did not change significantly. [Conclusion] The age of mother trees affects the generation of adventitious roots of cuttings. The rooting rate and the average adventitious root number of *Q. variabilis* softwood cuttings from high to low are trees of 1 year old, 5 years old and 10 years old, with an average rooting rate of 92.69%, 10.79%, and 0, respectively. The rooting type of *Q. variabilis* is dermal rooting type and its adventitious root primordium is induced root primordium. High levels of POD and PPO activity are conducive to adventitious root induction, while increased IAAO activity is conducive to adventitious root formation. [Ch, 3 fig. 1 tab. 30 ref.]

Key words: *Quercus variabilis*; cutting; age effect; rooting rate; anatomical structure; enzyme activity

扦插繁殖是无性繁殖的重要技术手段之一,操作简单,应用广泛,后代很好地保持了亲本的优良遗传性状,但受母树年龄影响较大。对双色栎 *Quercus bicolor*、使君子 *Quisqualis indica* 及水黄皮 *Pongamia pinnata* 等树种的研究发现^[1-3]:诱导插穗产生不定根是植物扦插成功的关键,随着母树年龄的增加,林木插穗生根能力出现下降,插穗生根率随母树年龄的增加逐渐降低^[4-5]。解剖结构观察发现:不同年龄母树的插穗组织结构不同;植物开花度过幼年期后进入到成年期,是生理老化的开始,植物内部生根抑制物质增加,生根促进物质减少,再生作用降低、生活力下降^[6]。一般来说,幼年期是无性繁殖采条的最佳时期。扦插生根过程中,吲哚乙酸氧化酶 (IAAO) 通过影响内源生长素 (IAA) 氧化及含量的变化来影响生根^[7],过氧化物酶 (POD) 活性升高被认为是诱导生根启动的信号,多酚氧化酶 (PPO) 在根起始阶段与酚类的代谢有关^[8]。栓皮栎 *Quercus variabilis* 是壳斗科 Fagaceae 栎属 *Quercus* 植物,是中国重要的珍贵用材树种,经济和生态价值极高^[9-10]。近年来,学者利用扦插繁殖对栓皮栎嫩枝扦插进行了相关研究^[11-12],但对不同母树年龄的栓皮栎扦插生根研究报道并不多。本研究以1年生、5年生及10年生栓皮栎母树的半木质化嫩枝为插穗材料,测定插穗的生根率、生根数量、根直径和根长等特征变化,观察不同时期插穗茎段的组织结构和酶活性变化,旨在揭示不同母树年龄栓皮栎不定根诱导形成的相关机制,为不同年龄栓皮栎的扦插繁殖提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

栓皮栎扦插繁殖试验在中国林业科学研究院科研温室进行。该温室顶部设有天窗和遮阳网,室内有风扇和湿帘。扦插期间室温为 25~31℃,相对空气湿度 $\geq 85\%$,晴天 9:00—11:00 的光合有效辐射为 $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,二氧化碳 (CO_2) 摩尔分数约 $380 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[13]。试验苗床为南北走向,规格 21.0 m $\times$ 1.5 m,试验时间为 2019 年 7—9 月。

1.2 方法

1.2.1 插穗来源 2019 年 7 月 16 日分别在中国林业科学研究荒漠化研究所 1 年生、5 年生和 10 年生的栓皮栎母树上采集树冠中下部生长势良好、无病虫害的当年生嫩枝。将嫩枝修剪为 8~10 cm 的插穗,每个插穗顶端保留 1~2 个叶片,每个叶片保留 1/3 面积;每个插穗预留 2~3 个腋芽,插穗枝的顶端在距上端芽 1 cm 处平切,底端斜切。

1.2.2 扦插基质 珍珠岩和泥炭按体积比 7:3 配制成基质,用质量分数 0.1% 高锰酸钾灭菌后装入轻基质无纺布育苗袋中,育苗袋高 9.0 cm,上下内径均为 3.8 cm。

1.2.3 插穗处理 参照 ABT 生根粉使用说明,以 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 植物生长调节剂 ABT-1 号 (北京艾比蒂生物科技有限公司) 浸泡 2 h 处理插穗。①解剖结构观察试验。以 1 年生、5 年生和 10 年生插穗为试验材料,各年龄母树的插穗设置 3 次重复,各重复 45 个插穗,共 135 个。②酶活性测定试验。各年龄母树的插穗设置 3 次重复,各重复 150 个插穗,共 450 个。③生根率统计试验。各年龄母树的插穗设置 3 次

重复, 各重复 105 个插穗, 共 315 个。所有年龄处理共 900 个插穗, 采用完全随机区组设计, 在相对一致的环境下, 进行统一浸泡处理。

1.2.4 扦插与管理 扦插前用小棒在基质内引孔, 深度为 2~3 cm。每个容器扦插 1 根插穗。扦插后用小棒将插穗周边的基质稍加压实, 浇透水, 将容器摆放在塑料托盘中。扦插完成后在插床搭建高约 45 cm 白色塑料薄膜拱棚, 扦插基质湿度保持为 55%~65%, 拱棚内相对空气湿度保持为 85% 以上, 天气晴朗时插穗上方 30 cm 处覆盖 50% 遮阳网。

1.2.5 插穗生根指标统计 扦插 60 d 后, 统计各处理的生根株数和每个插穗的生根数量, 测量各插穗不定根的直径与长度。计算扦插生根率 (%)。从各处理已生根插穗中随机抽取 5 个插穗, 计算平均不定根数量、不定根长及不定根直径。

1.2.6 插穗解剖结构观察 栓皮栎生根过程中, 扦插前进行第 1 次取样, 每个处理随机取 3 根插穗, 重复取样 3 次, 取其基部 2~3 cm 茎段部分。10 d 后再次取样, 之后隔 7 d 取样 1 次, 直到 9 月 1 日结束取样工作。所有样品均保存在 FAA 溶液 ($V_{\text{甲醛}}:V_{\text{冰醋酸}}:V_{70\% \text{ 酒精}}=1:1:18$) 里, 抽真空。常规石蜡切片, 切片厚度为 10~12 μm , 甲苯胺蓝染色, 在光学显微镜 (Olympus BX51) 下观察插穗基部组织结构并拍照。

1.2.7 插穗酶活性的测定 栓皮栎生根过程中, 扦插前第 1 次取样, 取其基部 3~4 cm 范围内的韧皮部, 每次取样 10 根, 设置 3 次重复, 用锡箔纸包好后放入液氮中, 再转移至 -80°C 冰箱进行保存; 10 d 后再次取样, 之后 7 d 取样 1 次, 直至 9 月 1 日结束。参考李墨野^[14]和刘俊芳^[15]方法测定样品 PPO 和 POD 活性, 参考王小虎^[16]测量 IAAO 活性。

1.3 数据处理

采用单因素方差分析和 Duncan 法进行多重比较, 采用 SPSS 19.0 软件进行数据统计处理。

2 结果与分析

2.1 栓皮栎生根表型观察及生根率情况

由图 1 可知: 栓皮栎生根部位为插穗基部, 不定根从皮层长出。1 年生栓皮栎嫩枝插穗在扦插 17 d 后发现白色不定根突出 (图 1A1), 31 d 不定根形成 (图 1A2), 38 d 不定根由白色发育为褐色, 并出现根伸长的现象 (图 1A3), 44 d 不定根数目增多 (图 1A4)。5 年生栓皮栎嫩枝插穗在扦插 44 d 才发现白色的不定根形成 (图 1B4), 此前的插穗叶子长势良好, 插穗顶部有愈伤组织形成。10 年生栓皮栎插穗在整个实验期间未见不定根形成, 且叶子逐渐干枯, 部分插穗变黑, 直至死亡 (图 1C4)。

从表 1 可以看出: 栓皮栎嫩枝扦插生根率及其根系特征存在明显的年龄效应。栓皮栎嫩枝扦插生根率和平均不定根数量从多到少依次均为 1 年生、5 年生、10 年生, 各年龄插穗差异显著 ($P<0.05$), 平均不定根长和根直径从大到小依次均为 5 年生、1 年生、10 年生, 各年龄插穗差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 栓皮栎插穗组织解剖结构特征的变化

解剖学观察 (图 2) 可知: 插穗基部由外向内依次为表皮、皮层、厚壁组织、韧皮部、形成层及木质部等。扦插 0 d 时 3 个年龄的栓皮栎厚壁组织宽度不一, 表现为 5 年生和 10 年生较大, 1 年生较小 (图 2A1、图 2B1 和图 2C1)。1 年生栓皮栎嫩枝扦插生根约需 44 d, 经历诱导期—表达期—形成期—伸长期等阶段; 5 年生栓皮栎嫩枝扦插 44 d 后插穗生根才进入形成期, 而 10 年生栓皮栎嫩枝则一直处于诱导期, 未发生生根迹象。1 年生和 5 年生栓皮栎嫩枝最终都形成了不定根, 其根原基是在不定根形成后期产生, 由此判断栓皮栎根原基为诱生型。1 年生栓皮栎嫩枝扦插 10 d 时, 插穗没有发现根原基的存在, 处于不定根诱导期 (图 2A2); 扦插 17 d 后靠近表皮位置出现不定根, 此时为不定根表达期 (图 2A3); 扦插 31 d 后不定根明显形成, 此时为不定根形成期。不定根主要由靠近形成层附近的薄壁细胞分化而来, 依次向外突破韧皮部、厚壁组织、皮层及表皮 (图 2A4)。扦插 44 d 后, 不定根向外延伸, 处于伸长阶段 (图 2A5)。5 年生栓皮栎嫩枝扦插 44 d 后不定根出现, 其由维管形成层附近的薄壁细胞分化而来, 向外伸展, 处于不定根的形成期 (图 2B5)。10 年生栓皮栎嫩枝在整个生根过程中插穗基部的组织没有任何明显变化。

2.3 栓皮栎插穗酶活性的变化

不同年龄栓皮栎嫩枝生根过程中的 POD、PPO 及 IAAO 活性变化规律存在差异。由图 3 可知: 不同年龄插穗 POD 活性水平 1 年生和 5 年生要高于 10 年生; PPO 活性水平从大到小依次为 1 年生、5 年

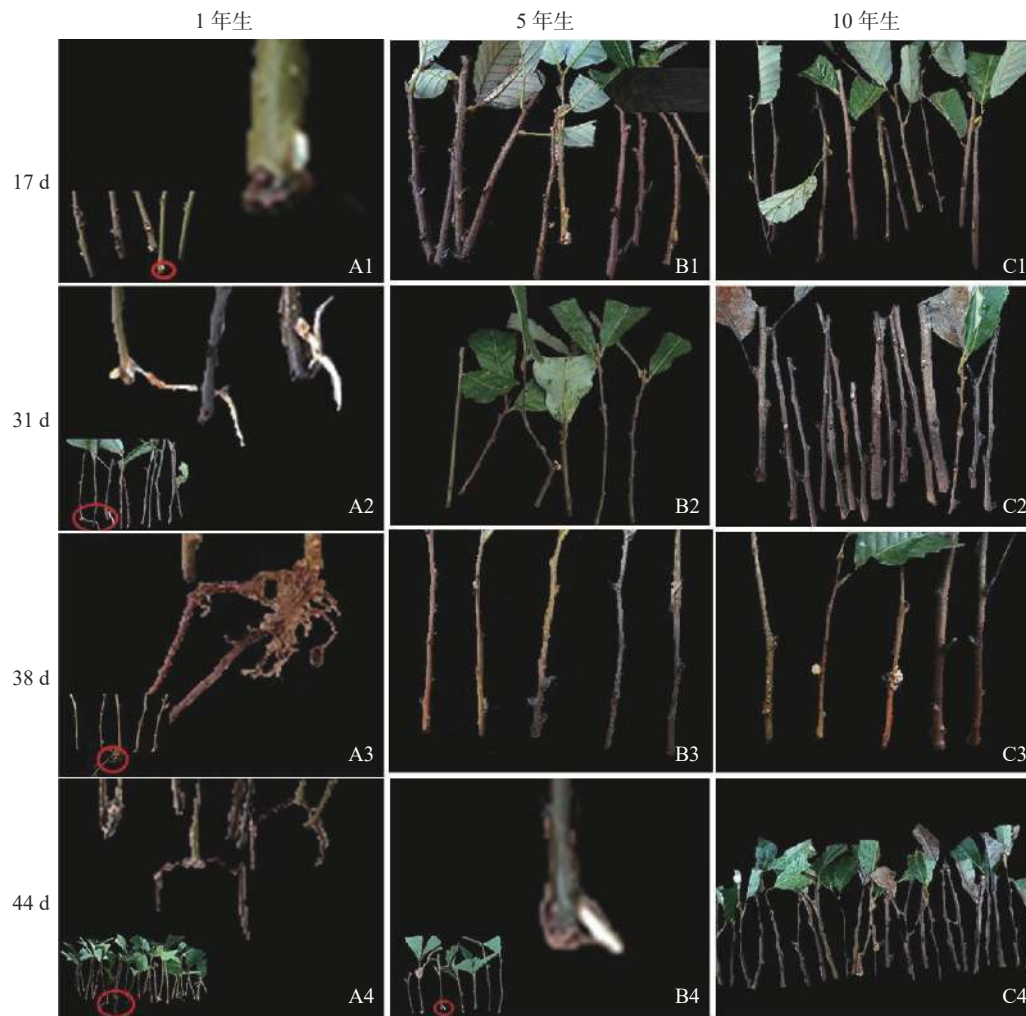


图1 不同年龄栓皮栎母树插穗在生根期间的外部形态

Figure 1 External morphological of mother cuttings of *Q. variabilis* at different ages during rooting

表1 栓皮栎不同年龄母树插穗的生根情况

Table 1 Rooting of cuttings of *Q. variabilis* mother tree at different ages

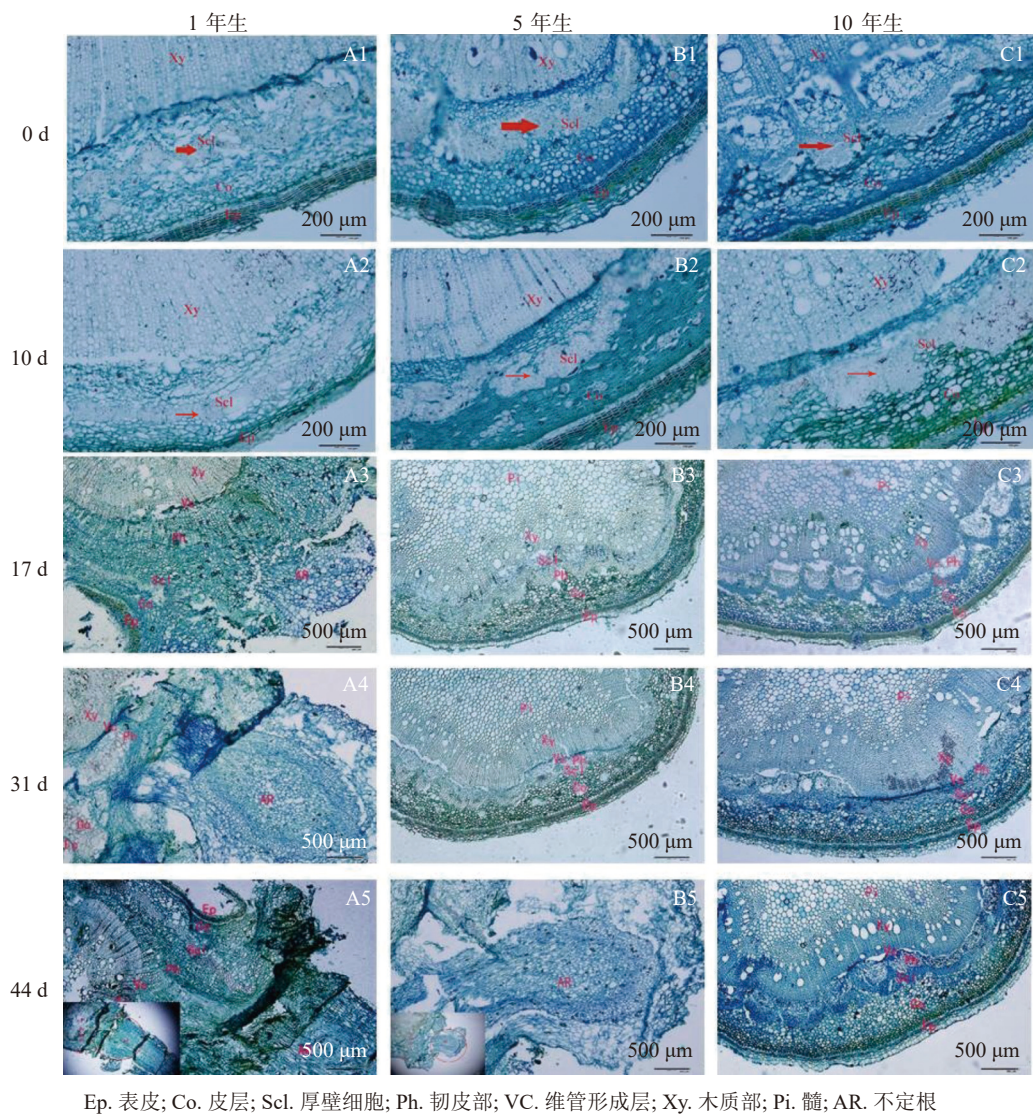
年龄	生根率/%	平均不定根数量/条	平均不定根长/mm	平均不定根直径/mm
1年生	92.69±0.02 b	3.6±2.15 b	40.22±10.09 b	1.19±0.25 b
5年生	10.79±0.10 a	2.6±0.49 b	52.82±8.35 c	1.42±0.21 b
10年生	0 a	0 a	0 a	0 a

说明: 数值为平均值±标准差, 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)

生、10年生; 扦插17 d之前IAAO活性水平10年生大于5年生和1年生, 17 d后从大到小依次为1年生、5年生、10年生。1年生和5年生插穗POD活性整体呈先上升后下降的单峰趋势, 1年生在扦插17 d时达到峰值; 5年生在扦插31 d时达到峰值, 此时插穗都处于不定根的表达期(图2 A3、图2 B4)。10年生插穗POD活性呈先下降后上升的趋势, 在扦插17 d时达最低值。

1年生插穗的PPO活性呈先上升后下降的单峰趋势, 在扦插17 d时出现峰值, 此时PPO活性显著高于5年生和10年生插穗; 5年生插穗的PPO活性则出现了双峰趋势, 最大值出现在扦插31 d时, 此时PPO活性与1年生插穗差异不显著, 却显著高于10年生插穗; 10年生插穗的PPO活性整体变化趋势不明显。

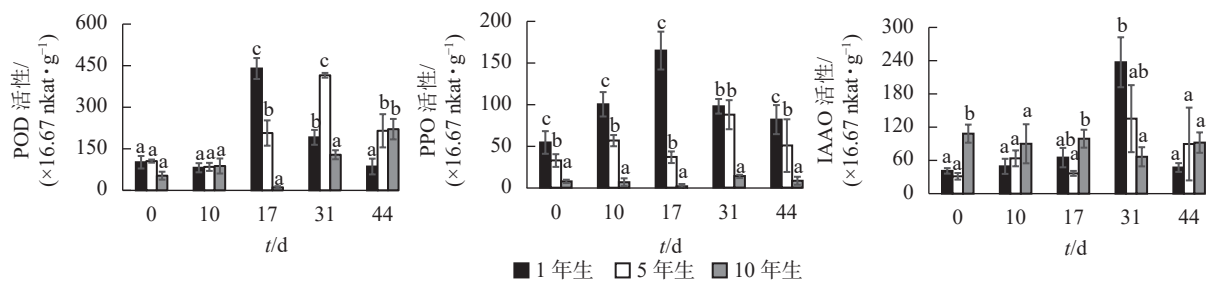
1年生和5年生插穗的IAAO活性整体上呈先上升后下降的单峰趋势, 在扦插31 d时出现峰值, 1年生IAAO活性显著高于5年生和10年生。此时1年生栓皮栎进入不定根形成期(图2 A4), 5年生进入不定根表达期(图2 B4)。10年生插穗IAAO活性整体变化呈现先下降后上升趋势。



Ep. 表皮; Co. 皮层; Scl. 厚壁细胞; Ph. 韧皮部; VC. 维管形成层; Xy. 木质部; Pi. 髓; AR. 不定根

图 2 1 年生、5 年生及 10 年生栓皮栎解剖学结构观察

Figure 2 Anatomical structure of 1, 5 and 10-year-old *Q. variabilis*



不同小写字母表示同一时期不同年龄插穗酶活性差异显著 ($P<0.05$)

图 3 栓皮栎扦插生根过程中酶活性变化

Figure 3 Changes of enzyme activities during the rooting process of *Q. variabilis* cuttings

3 讨论

3.1 栓皮栎母树年龄对插穗生根率的影响

本研究发现：1 年生和 5 年生栓皮栎扦插均产生了不定根，10 年生无不定根；插穗生根率从高到低依次为 1 年生、5 年生、10 年生，且差异显著。可见植物插穗的母树年龄越小，不定根形成时间越短，生根率也越高。原因可能是母本年龄越小，代谢更加活跃，酶活性含量会增加，POD 活性增加有利于增加细胞壁的强度^[17]，能更好地抵御病原体入侵，有助于插穗生根，这与十月樱 *Prunus subhirtella*

‘Autumnalis’和夏栎 *Quercus robur* 的研究类似^[4,18]。母树年龄越大,插穗的组织分化程度会更高,进行再分化的能力下降^[19];而随着年龄增加,韧皮纤维厚度会加大,韧皮纤维细胞壁厚,会增加生根的机械阻力^[20],这些都会影响不定根的生成。

3.2 栓皮栎插穗不定根的解剖学结构变化特征

对插穗组织解剖结构的观察发现:栓皮栎的不定根根原基是在生根过程中形成的,由此判定栓皮栎根原基类型为诱生型。通常来说,诱生型根原基的出现需要一定时间,导致植物插穗难以生根^[20],这可能是栓皮栎插穗生根难的原因之一。栓皮栎插穗的皮层和韧皮部间存在连续的环状厚壁组织,观察发现5年生和10年生厚壁组织的宽度大于1年生,这可能也是造成栓皮栎5年生和10年生生根率低的原因。在沙棘 *Hippophae rhamnoides*^[21]及冬青 *Ilex × altaclerensis* ‘Belhica Aurea’^[22]扦插繁殖过程中也发现厚壁组织的存在和生根率不高存在一定相关性。

3.3 酶活性对栓皮栎插穗生根的影响

POD、PPO和IAAO的活性与不定根形成关系密切^[7]。扦插前POD活性升高,可以保护插穗免受活性氧自由基的侵害^[12]。高活性POD有利于细胞分化产生不定根^[23],1年生和5年生插穗在不定根表达期POD活性出现峰值,使得插穗内的IAA含量降低,从而有助于不定根的形成^[24]。随后POD活性开始下降,至不定根伸长期后又开始升高。10年生插穗则出现先下降后上升的趋势,其POD活性在扦插下降,预示其对插穗保护效果下降,自由基及活性氧对插穗细胞侵害加大,不利于不定根的形成。

PPO可以催化酚类物质,在根原基诱导和发育过程中起至关重要作用^[25]。本研究中1年生栓皮栎生根过程中PPO活性呈单峰趋势,在扦插17d(不定根表达期)出现峰值,此时高活性的PPO有助于催化酚类物质与IAA形成生根辅助因子“IAA-酚酸复合物”,以此促进生根^[26-27]。5年生栓皮栎生根过程PPO活性水平呈双峰趋势,扦插31d(形成期),峰值明显大于扦插第10d(诱导期)。诱导期(10d)时插穗的切口暴露在外,高水平PPO活性可降低其被细菌侵害的可能^[28];至不定根形成期(31d),插穗需要更高的PPO活性来形成生根辅助因子促进生根。10年生的PPO活性整体趋势变化不明显,这可能是其难生根的原因。

IAAO通过调节内源IAA的水平来影响不定根的形成。1年生和5年生IAAO活性均呈现单峰趋势,且1年生的IAAO活性显著高于5年生。IAAO活性升高有助于消除插穗体内多余的IAA^[29],利于生根诱导^[30]。10年生插穗IAAO的酶活性整体上趋势变化不大,并且在31d出现下降的趋势,使得IAAO活性降低,内源IAA水平过高,导致生根率低。

总体上,1年生和5年生插穗在不定根表达期不定根开始形成,这时的POD和PPO活性最高;1年生IAAO活性低,5年生IAAO活性偏高,导致插穗体内IAA被大量降解,最终影响生根率。同时,ABT属于外源激素,对内源激素也会产生影响,所以IAAO活性也会受到一定影响。

4 结论

母树年龄影响插穗不定根的生成,栓皮栎嫩枝扦插生根率和平均不定根数量从高到低依次为1年生、5年生、10年生,平均生根率1年生为92.69%,5年生为10.79%,10年生为0。栓皮栎的生根类型为皮部生根型,其根原基属于诱生型根原基,不定根主要由靠近形成层附近的薄壁细胞分化而来,最终突破韧皮部、厚壁组织、皮层及表皮向外伸长,但皮层与韧皮部中间存在的连续环状厚壁组织对不定根的形成有一定的阻碍作用。POD活性增加有利于增加细胞壁强度,使植物能更好地抵御病菌,有助于插穗生根;PPO活性增加能促进生根辅助因子“IAA-酚酸复合物”的形成,IAAO活性增加有助于减少体内IAA含量,较低质量浓度的IAA有助于促进生根;栓皮栎插穗1年生和5年生POD、PPO及IAAO活性整体呈现“先上升后下降”趋势,POD和PPO活性升高有利于不定根的表达,IAAO活性升高有助于不定根的生成。

5 参考文献

- [1] AMISSAH J N, PAOLILLO D J, BASSUK N. Adventitious root formation in stem cuttings of *Quercus bicolor* and *Quercus macrocarpa* and its relationship to stem anatomy [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2008, 133(4): 479–486.

- [2] 陈登雄, 蔡邦平, 董建文, 等. 使君子的扦插繁殖技术[J]. 浙江林学院学报, 2000, 17(4): 384 – 388.
CHEN Dengxiong, CAI Bangping, DONG Jianwen, *et al.* Cutting propagation techniques for *Quisqualis indica* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2000, 17(4): 384 – 388.
- [3] SAHOO G, SWAMY S L, SINGH A K, *et al.* Propagation of *Pongamia pinnata* (L.) Pierre: effect of auxins, age, season and C/N ratio on rooting of stem cuttings [J/OL]. *Trees Forests and People*, 2021, 5: 100091 [2021-01-10]. doi: 10.1016/j.tfp.2021.100091.
- [4] OSTERC G, ŠTAMPAR F. Differences in endo/exogenous auxin profile in cuttings of different physiological ages [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(17): 2088 – 2092.
- [5] 王军辉, 张建国, 张守攻, 等. 青海云杉硬枝扦插的激素、年龄和位置效应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 65 – 71.
WANG Junhui, ZHANG Jianguo, ZHANG Shougong, *et al.* Research of hormone, age and position effect of hardwood cutting in *Picea crassifolia* Kom [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2006, 34(7): 65 – 71.
- [6] 朱之悌, 盛莹萍. 论树木的老化——幼年性、成年性、相互关系及其利用[J]. 北京林业大学学报, 1992, 14(增刊 3): 92 – 104.
ZHU Zhit, SHENG Yingping. On aging of trees: juvenile, maturity, their relations and utilization [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1992, 14(suppl 3): 92 – 104.
- [7] LIAO Weibiao, XIAO Honglang, ZHANG Meiling. Effect of nitric oxide and hydrogen peroxide on adventitious root development from cuttings of groundcover chrysanthemum and associated biochemical changes [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2010, 29(3): 338 – 348.
- [8] 李迎超, 于海燕, 付甜, 等. 中国栓皮栎资源生产燃料乙醇的潜力及其空间分布[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 129 – 134.
LI Yingchao, YU Haiyan, FU Tian, *et al.* Spatial distribution and bio-ethanol potential of *Quercus variabilis* in China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(11): 129 – 134.
- [9] YUAN Jun, SUN Ningxiao, DU Hongmei, *et al.* Roles of metabolic regulation in developing *Quercus variabilis* acorns at contrasting geologically-derived phosphorus sites in subtropical China [J/OL]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20: 389 [2022-01-10]. doi: 10.1186/s12870-020-02605-y.
- [10] 尹艺凝, 张文辉, 何景峰, 等. 四种类型栓皮栎栲胶含量[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2954 – 2962.
YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, *et al.* The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2954 – 2962.
- [11] 张杰, 李健康, 段安安, 等. 不同质量浓度 NAA、IBA 对栓皮栎、蒙古栎黄化嫩枝扦插生根的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(7): 128 – 138.
ZHANG Jie, LI Jiankang, DUAN An'an, *et al.* Effects of different concentrations of IBA, NAA on rooting of etiolated shoots of *Quercus variabilis* and *Quercus mongolica* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(7): 128 – 138.
- [12] 杨庆春. 栓皮栎嫩枝扦插关键技术及生理机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
YANG Qinchun. *Study on Key Techniques and Rooting Mechanism of Softwood Cutting of Quercus variabilis* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [13] 秦爱丽, 简尊吉, 马凡强, 等. 母树年龄、生长调节剂、容器与基质对崖柏嫩枝扦插的影响[J]. 林业科学, 2018, 54(7): 40 – 50.
QIN Aili, JIAN Zunji, MA Fanqiang, *et al.* Effects of the mother tree age, growth regulator, containers and substrates on softwood cutting propagation of *Thuja sutchuenensis* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(7): 40 – 50.
- [14] 李墨野. 转 LbDRE 基因大青杨抗旱及耐盐性分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
LI Moye. *The Resistance Analysis of Transgenic Populus ussuriensis Kom. Overexpressing LbDREB Gene to Drought and Salt Stress* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [15] 刘俊芳. 番茄 G2-like 转录因子家族生物信息学分析及抗逆相关基因鉴定[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
LIU Junfang. *Bioinformatics Analysis of Tomato G2-like Transcription Factor Family and Identification of Resistance-related Genes* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [16] 王小虎. 水稻类病变早衰基因 LMES3 和 LMES4 的克隆与功能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
WANG Xiaohu. *Map-based Cloning and Function Analysis of Two Lesion Mimic and Early Senescence Gene LMES3 and*

- LMES4 in Rice* [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [17] KHAN M A, WANG Y, MUHAMMAD B, *et al.* Morpho-physiological and phytohormonal changes during the induction of adventitious root development stimulated by exogenous IBA application in *Magnolia biondii* Pamp [J/OL]. *Brazilian Journal of Biology*, 2022, **84**[2022-01-20]. doi: 10.1590/1519-6984.255664.
- [18] CHALUPA V. Vegetative propagation of oak (*Quercus robur* and *Q. petraea*) by cutting and tissue culture [J]. *Annals of Forest Science*, 1993, **50**(1): 295 – 307.
- [19] 洪汉辉, 康向阳, 汪晓峰. 年龄效应对白杨硬枝扦插苗生长及其茎皮部解剖结构和叶片生化指标的影响[J]. *西北植物学报*, 2018, **38**(2): 274 – 281.
- HONG Hanhui, KANG Xiangyang, WANG Xiaofeng. Impact of age effect on growth traits, anatomical structure of bark and biochemical parameters of leaves in hardwood cuttings of white poplar [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(2): 274 – 281.
- [20] 卓嘎, 杨小林, 幸福梅. 西藏 2 种红豆杉扦插生根过程及解剖结构研究[J]. *西部林业科学*, 2015, **44**(1): 88 – 91.
- ZHUO Ga, YANG Xiaolin, XIN Fumei. Cuttings rooting and anatomical structures of two *Taxus* in Tibet [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2015, **44**(1): 88 – 91.
- [21] 姚景瀚, 李伟. 沙棘微扦插不定根发生的形态解剖学研究[J]. *北京林业大学学报*, 2013, **35**(2): 130 – 133.
- YAO Jinghan, LI Wei. Morphological and anatomical features during the formation of adventitious roots of sea buckthorn by micro-cutting multiplication [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, **35**(2): 130 – 133.
- [22] 朱晓宇, 童婉婉, 赵楚, 等. 冬青‘长叶阿尔塔’扦插生根及解剖学研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, **39**(2): 347 – 355.
- ZHU Xiaoyu, TONG Wanwan, ZHAO Chu, *et al.* Root formation and anatomical structure of *Ilex×altaclerensis* ‘Belhica Aurea’ stem cuttings [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(2): 347 – 355.
- [23] XIONG Fei, LIAO Jianren, MA Yuanchun, *et al.* The protective effect of exogenous putrescine in the response of tea plants (*Camellia sinensis*) to salt stress [J]. *HortScience*, 2018, **53**(11): 1640 – 1646.
- [24] LI X M, HE X Y, ZHANG L H, *et al.* Influence of elevated CO₂ and O₃ on IAA, IAA oxidase and peroxidase in the leaves of ginkgo trees [J]. *Biologia Plantarum*, 2009, **53**: 339 – 342.
- [25] 董明. 阿诺红鞑靼忍冬扦插繁殖与生态适应性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- DONG Ming. *Study on Cutting Propagation and Ecoogical Adaptability of Arnold Red Honeysuckle* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [26] BASSUK N L, HUNTER L D, HOWARD B H. The apparent of polyphenol oxidase and phloridzin in the production of apple rooting cofactors [J]. *Journal of Horticultural Science*, 1981, **56**(4): 313 – 322.
- [27] 王小玲, 赵忠, 权金娥, 等. 外源激素对四倍体刺槐硬枝扦插生根及其关联酶活性的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, **31**(1): 116 – 122.
- WANG Xiaoling, ZHAO Zhong, QUAN Jin’e, *et al.* Rooting and correlative enzyme activities of hardwood cuttings of tetraploid *Robinia pseudoacacia* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31**(1): 116 – 122.
- [28] 李合生. 现代植物生理学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- LI Hesheng. *Modern Plant Physiology* [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [29] 宋金耀, 何文林, 李松波, 等. 毛白杨嵌合体扦插生根相关理化特性分析[J]. *林业科学*, 2001, **37**(5): 64 – 67.
- SONG Jinyao, HE Wenlin, LI Songbo, *et al.* Analysis of physiological and biochemical characteristics related to cutting and rooting of chimera in *Populus Tomentosa* Carr. [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, **37**(5): 64 – 67.
- [30] CALDERÓN-BALTIERRA X A. Flavonoids as regulators and makers of root formation by shoots of *Eucalyptus globulus* raised in vitro [J]. *Plant Peroxidase Newslett*, 1994, **5**: 27 – 29.