

## 防褐化处理对蒙古栎插穗生根及其生理生化的影响

虞家昕, 战 昊, 王思进, 王天宠, 陆秀君\*

(沈阳农业大学 林学院, 辽宁 沈阳 110866)

**摘 要:**研究防褐化处理对蒙古栎嫩枝扦插生根的影响。以蒙古栎3年实生苗的嫩枝为材料,分别采用乙醇、硝酸银、抗坏血酸对插穗进行防褐化处理,采用500 mg·L<sup>-1</sup> IBA-K浸蘸处理后扦插,并分别在扦插后0、10、20、30、40、50 d取样测定不同生根时期氧化蛋白酶活性和内源激素含量。结果表明,防褐化处理可有效提高扦插生根率,以1%乙醇1 h+500 mg·L<sup>-1</sup> IBA-K处理2 h最佳,生根率、根系效果指数分别为21.1%和5.713。在生根过程中,外施500 mg·L<sup>-1</sup> IBA-K能够提升插穗内POD、PPO的活性,降低IAAO的活性,且IAA/ABA、IAA/ZR的比值升高,有利于蒙古栎嫩枝扦插生根。由此说明1%乙醇1 h浸泡结合500 mg·L<sup>-1</sup> IBA-K激素处理,通过提高POD与PPO的活性,可降低IAAO的活性,增加IAA/ZR和IAA/ABA的比值,提升蒙古栎嫩枝扦插成活率。

**关键词:**蒙古栎;嫩枝扦插;防褐化;氧化蛋白酶活性;内源激素

**中图分类号:**S723.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)01-0119-06

### Effects of the Anti-Browning Treatment on the Cutting Rooting of *Quercus mongolica* and Their Physiology and Biochemistry

YU Jia-xin, ZHAN Hao, WANG Si-jin, WANG Tian-chong, LU Xiu-jun\*

(College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

**Abstract:** The effects of the anti-browning treatment on the cutting rooting of *Quercus mongolica* were studied. The twigs of the 3-year-old seedlings of *Q. mongolica* were used as materials. Ethanol, silver nitrate, and ascorbic acid were used to conduct the anti-browning treatment, and the cutting were carried out after the dip treatment with 500 mg/L indole-3-butyric acid potassium salt (IBA-K). Meanwhile, samples were taken at 0, 10, 20, 30, 40, and 50 days after cutting to determine the oxidative protease activity and endogenous hormone content at different rooting stages. The anti-browning treatment could effectively increase the rooting rate of the cuttings. Among them, the treatment with 1% ethanol for 1h and 500 mg/L IBA-K for 2 h was the best. The rooting rate and the root effect index were 21.1% and 5.713, respectively. During the rooting process, the external application of 500 mg/L IBA-K could increase the activity of POD and PPO in the cuttings, reduce the activity of IAAO, and increase the ratio of IAA/ABA and IAA/ZR, which were beneficial to cuttings. By means of increasing the activity of POD and PPO, dipping with 1% ethanol for 1 h in combination with 500 mg/L IBA-K hormone treatment can reduce the activity of IAAO, increase the ratio of IAA/ZR and IAA/ABA, and improve the cutting survival rate.

**Key words:** *Quercus mongolica*; twig cutting; anti-browning; oxidative protease activity; endogenous hormone

收稿日期:2021-03-12 修回日期:2021-04-24

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFD0600602)。

第一作者:虞家昕。研究方向:森林培育。E-mail: yujiaxinshenyang@foxmail.com

\* 通信作者:陆秀君,教授,博士生导师。研究方向:森林培育。E-mail: lxjsyau@syau.edu.cn

蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 是壳斗科 (Fagaceae) 栎属 (*Quercus*) 落叶乔木, 别名柞树、蒙栎, 国家二级珍贵树种, 是我国东北林区中主要次生林树种, 其材质优良, 也是我国 30 个主要工业用材林树种之一<sup>[1-2]</sup>。蒙古栎具有重要的生态建设价值, 尤其材质优良的蒙古栎的橡实和柞叶更具有经济利用和很高的开发价值。

我国目前主要的蒙古栎林绝大部分是采伐后萌蘖更新的次生林, 其遗传改良程度差, 通过优树选择和杂交选育应用无性繁殖的方法, 是增加生产量、提高改良程度, 加速良种化的重要手段<sup>[3]</sup>。栎树属于极难生根树种, 其体内含有大量酚类等阻碍生根物质<sup>[4]</sup>, 其中主要抑制生根物质为单宁, 单宁中含有很多的酚羟基, 对光敏感, 易被氧化成黑色的氧化物, 插条基部褐化, 从而导致插穗死亡。

蒙古栎属愈伤组织和皮部混合生根型且极难生根型树种。对难生根树种常采用激素处理、黄化处理、防褐化处理等方式提高扦插成活率。黄秦军等<sup>[3]</sup>将 2 种生长调节剂 IBA 和 6-BA 混合施用浸蘸插穗, 使蒙古栎的生根率达到 16.67%。祝亚云等<sup>[5]</sup>在研究弗吉尼亚栎 (*Q. virginiana*) 嫩枝扦插中发现, 400 mg · L<sup>-1</sup> NAA + 400 mg · L<sup>-1</sup> IBA 混合液处理效果最佳, 生根率达 82.6%。吕秀立等<sup>[6]</sup>对苏玛栎 (*Q. shumardii*) 扦插繁殖研究表明: 采用 0.5 mg · L<sup>-1</sup> 的 IBA 浸泡 1 h 处理插穗效果最佳, 生根率为 24.2%。夏兴宏等<sup>[7]</sup>在麻栎 (*Q. acutissima*) 无性扦插繁殖的研究中表明, 统一采用 300 mg · L<sup>-1</sup> IBA + 3 mg · L<sup>-1</sup> 6-BA 处理插穗, 以珍珠岩为基质的生根效果最佳, 生根率为 81.00%; 正交试验结果显示, 用 300 mg · L<sup>-1</sup> IBA + ABT1 处理 0.5 h, 扦插生根率达到 88.67%。在实生苗上搭建遮阴网获得黄化的蒙古栎插穗, 采用 IBA 速蘸插穗, 生根率最高达到 84.6%<sup>[4]</sup>。但是采用黄化处理需要建设大量遮阴棚为实生苗遮阴, 成本高, 处理时间长, 有一定的推广局限性。李先民<sup>[8]</sup>采用丙酮、抗坏血酸对青钱柳 (*Cyclocarya paliurus*) 插穗进行了防褐化处理, 使生根率最高达到 17.8%, 显著高于对照处理, 取得了良好的成果。朴楚炳等<sup>[9]</sup>采用酒精和高锰酸钾对红松 (*Pinus koraiensis*) 插穗进行防褐化处理, 使得生根率达到 66.7%, 显著高于对照。李明红等<sup>[10]</sup>采用 250 mg · L<sup>-1</sup> 丙酮 + 200 mg · L<sup>-1</sup> ABT 处理杨梅 (*Myrica rubra*) 插穗, 生根率可达 88.3%。

树种不同, 提高扦插成活率的方法各异。本研究针对对蒙古栎插穗褐化严重的现象, 对其嫩枝插穗采用乙醇、AgNO<sub>3</sub>、抗坏血酸 3 种方法防褐化处理,

并结合激素处理探究其对蒙古栎嫩枝扦插生根及其生根过程中相关酶活性及内源激素的影响, 以掌握嫩枝扦插繁殖技术和影响扦插成活的内在因子, 为扦插育苗提供技术支撑和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料采自位于辽宁省沈阳市高坎镇的沈阳农业大学试验基地, 采穗母株为 3 年生实生苗。2020 年 7 月上旬选取生长良好的当年生半木质化枝条的中上部, 上、下口平剪成 10~15 cm 的插穗, 保留上部 2 片 1/3 叶。基质按 V 草炭 : V 蛭石 : V 珍珠岩 = 1 : 2 : 2 混合后均匀铺在沙床上。塑料拱棚上搭建遮阴网, 透光度 35%~40%, 拱棚内温度控制在 28~30 °C、湿度 85%~95%, 定期喷施杀菌剂与营养液。

### 1.2 试验方法

1.2.1 防褐化处理对插穗生根的影响 防褐化处理的试剂选用 1% 乙醇、2% AgNO<sub>3</sub> 和不同浓度的抗坏血酸。将插穗在上述防褐化药剂中浸泡 1 h 后, 再将插穗基部 2~3 cm 处采用 500 mg · L<sup>-1</sup> IBA-K (吡啶丁酸钾) 浸泡 2 h 后扦插 (表 1)。分别以 500 mg · L<sup>-1</sup> IBA-K 和清水浸泡 2 h 处理为对照。每种处理 3 次重复, 每次重复 30 个插穗。采用完全随机区组设计。扦插后 90 d 调查生根率、愈伤率、愈伤组织平均重量、生根数、平均根长、最长根长及根系效果指数等指标。

表 1 防褐化处理试验设计

Table 1 Anti-browning treatment experiment design

处理	防褐化处理	激素处理
1	1% 乙醇, 1 h	500 mg/L IBA-K, 2 h
2	2% AgNO <sub>3</sub> , 1 h	500 mg/L IBA-K, 2 h
3	100 mg/L 抗坏血酸, 1 h	500 mg/L IBA-K, 2 h
4	300 mg/L 抗坏血酸, 1 h	500 mg/L IBA-K, 2 h
5	500 mg/L 抗坏血酸, 1 h	500 mg/L IBA-K, 2 h
6 (CK1)	—	500 mg/L IBA-K, 2 h
7 (CK2)	—	清水, 2 h

1.2.2 乙醇和 IBA-K 处理对插穗生根过程中氧化蛋白酶系统变化的影响 以清水浸泡处理插穗 2 h 后扦插为空白对照组, 处理组采用 1% 乙醇 1 h + 500 mg · L<sup>-1</sup> IBA-K 2 h 后扦插。定期随机取样, 在扦插当天取样 1 次, 扦插后每 10 d 取样 1 次, 共计 6 次。

取样时将插穗基部韧皮部与木质部分离, 剥离取 2~3 cm 韧皮部, 放置于 -80 °C 超低温冰箱保存备用。

测定处理组和对照组不同时期插穗韧皮部的氧化蛋白酶;过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)、吲哚乙酸氧化酶(IAAO)活性,过氧化物酶(POD)活性测定参照李合生<sup>[11]</sup>的方法;多酚氧化酶(PPO)活性测定参照郝再彬等<sup>[12]</sup>的方法;吲哚乙酸氧化酶(IAAO)活性测定参照高俊凤<sup>[13]</sup>的方法,3次重复。

1.2.3 乙醇和 IBA-K 处理对插穗生根过程内源激素变化的影响 测定处理组和对照组不同时期插穗韧皮部的内源激素:吲哚乙酸 (IAA)、脱落酸 (ABA)和玉米素核苷 (ZR) 含量,采用酶联免疫法 (ELISA)测定,3 次重复。

采用 Excel 2016 进行数据统计,采用 SPSS 22.0 进行方差分析,origin 8.5 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 防褐化处理对蒙古栎插穗生根的影响

蒙古栎嫩枝防褐化处理后再经 IBA-K 生根诱导处理可显著提高插穗的生根率,防褐化处理插穗的扦插生根效果明显优于 CK2(表 2)。蒙古栎插穗经 1%乙醇和 2% AgNO<sub>3</sub> 处理后,生根率、最长根长和根系效果指数显著高于 CK1 和 CK2,表明防褐化处理促进了不定根的发育伸长。其中,1%乙醇处理后的生根率、平均根长和根系效果指数最佳,分别为 21.1%、8.5 cm 和 5.713。蒙古栎插穗经 100 mg · L<sup>-1</sup> 抗坏血酸处理后,生根数量最多,可见适宜浓

度的抗坏血酸更有利于提高不定根生根的数量。而 IBA-K 处理的愈伤率达 43.1%,显著高于其他处理,说明单独的 IBA-K 处理有利于愈伤组织的形成。可见,防褐化处理明显提高了蒙古栎嫩枝扦插的生根率和根系效果指数。

2.2 蒙古栎插穗生根进程中氧化蛋白酶活性的变化

乙醇和外源激素的施加,促进了 POD、PPO 酶活性的增加,而使 IAAO 活性受到抑制。在插穗生根过程中 POD 活性呈上升趋势,且活性一直高于对照(图 1)。生根初期 0~10 d 迅速增加,是因为外源激素的施加促进了 POD 活性上升,这有利于诱导基部皮部膨大形成内部愈伤组织;10~30 d 保持相对平稳状态;30~40 d 急剧增加,此时,插穗不定根大量形成并伸长,而 POD 活性明显增加有利于根部木质化所需的木质素的合成,有效促进根系大量形成和伸长。插穗生根进程中处理组的 PPO 活性始终大于对照(图 2),说明外源激素处理促进了插穗 PPO 的活性。在 0~10 d,PPO 活性保持相对平稳状态;在 20 d 达到峰值,有利于插穗基部皮部膨大从而大量形成愈伤组织;在 30~50 d,PPO 活性又迅速上升,此时,不定根生成伸长,可见高活性 PPO 不仅促进愈伤组织的形成,还促进不定根大量生成和伸长生长。在插穗生根关键期中,PPO 与 POD 维持高活性且呈现协同作用,从而促进不定根的发育伸长。

表 2 防褐化处理对蒙古栎插穗生根性状的影响

Table 2 Effects of preventing browning on rooting characters of *Q. mongolica* cuttings

处理	生根率 /%	愈伤率 /%	愈伤组织 平均重量/g	生根数量 /(条·株 <sup>-1</sup> )	平均根长 /cm	最长根 /cm	根系 效果指数
1	21.1±3.2a	30.0±4.5cd	0.267±0.045ab	3.2±0.3ab	8.5±0.4a	19.2±3.3a	5.713±0.002a
2	18.3±1.9a	31.7±3.4bc	0.257±0.032ab	3.9±0.2a	7.8±0.4b	22.0±1.1a	5.485±0.166a
3	5.2±1.6c	13.0±3.1e	0.158±0.020c	4.0±0.6a	6.8±0.5c	11.9±1.2b	1.410±0.121c
4	1.3±1.3d	26.9±1.4cd	0.314±0.042ab	2.0±0.2cd	3.9±0.3e	5.6±1.5c	0.099±0.003e
5	6.0±1.8c	37.3±2.8ab	0.331±0.051a	1.6±0.3b	5.5±0.3d	12.7±1.1b	0.529±0.027d
CK1(IBA-K 500)	9.7±1.8b	43.1±5.0a	0.171±0.025c	2.6±0.7bc	6.8±0.3c	12.9±0.6b	1.695±0.156b
CK2(清水)	0	23.3±4.2d	0.249±0.065b	0	0	0	0

注:数据为均值±标准差;不同小写字母表示各处理之间在 P<0.05 水平上有显著性差异。

蒙古栎插穗 IAAO 的活性在生根进程各时期总体呈下降趋势,且始终小于对照(图 3),说明外源激素处理有效降低了插穗 IAAO 的活性。在 0~10 d 活性迅速上升达到峰值,此时愈伤组织发育,这说明 IAAO 氧化插穗体内 IAA,外源激素处理的插穗可以有效降低 IAAO 的活性,减少 IAA 的分解,有利于愈伤组织的发育;30 d 后,处理组插穗 IAAO 活性维持在一个较低水平,促进了插穗不定根发育和伸长生长;而对照组一直处于较高水平,抑制了 IAA 的含量影响了不定根的发育生长。

在 不定根生根关键期间,POD、PPO、IAAO

3 种酶协同作用促进了不定根的生长,较高活性 POD、PPO 与维持在低活性的 IAAO 更有利于不定根在生根关键期的发育。

2.4 蒙古栎插穗生根进程中内源激素变化

内源激素比值变化能反映对蒙古栎插穗生根的调控机制。蒙古栎插穗在扦插初期 IAA/ABA 比值在处理组和对照组均开始下降(图 4),因为插穗离开母体,受到切伤刺激,导致 ABA 的含量增加。在 10~20 d 愈伤组织大量形成期内,处理组比值上升接近峰值,对照组也大幅上升,较高的比值有利于蒙古栎愈伤组织发育和不定根原基的诱导。20 d 后,

处理组比值出现下降,此时不定根开始表达发育,消耗 IAA,随后又迅速上升,此时是不定根大量生成时期,ABA 降至初始水平,故比值上升;40 d 后 IAA/ABA 值下降,此时不定根伸长生长。在蒙古栎插穗的生根关键期,处理组插穗的 IAA/ABA 值始终高于对照组,可见外源激素在一定程度上提高了插穗 IAA/ABA 的比值。IAA/ZR 比值整体上呈现出“下降-上升-下降-上升”的趋势(图 5)。扦插前期的 0~20 d,处理组 IAA/ZR 比值先急剧降低而后上升,对照组相比于处理组变化较小,都在 20 d 达到峰值,有利于愈伤组织的大量生成及不定根原基的诱导。20~30 d 不定根开始发生,IAA 含量相对稳定,而 ZR 含量开始上升,高含量的 ZR 有利于不定根的发育,故 IAA/ZR 值下降。30 d 后不定根开始大量生成,IAA 含量和 ZR 含量的上升有利于不定根的伸长发育,处理组与对照组的 IAA/ZR 比值上升而后缓慢下降,恢复正常水平,但对对照组变化幅度始终较处理组小。可见,较高的 IAA/ABA 值和较低的 IAA/ZR 值有利于蒙古栎嫩枝插穗生根。

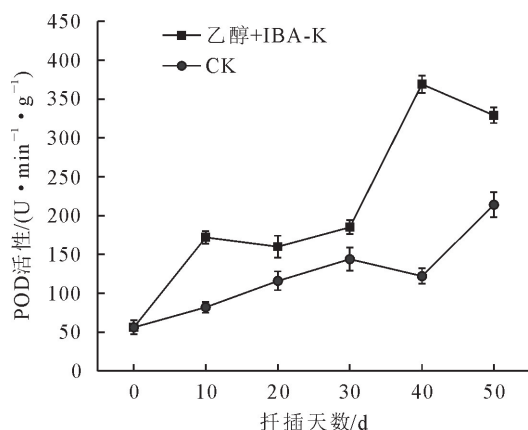


图 1 蒙古栎插穗生根过程中 POD 活性变化

Fig. 1 Changes of POD activity in *Q. mongolica* cuttings during rooting

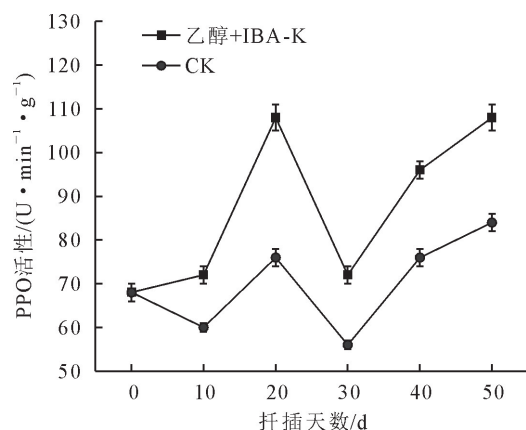


图 2 蒙古栎插穗生根过程中 PPO 活性变化

Fig. 2 Changes of PPO activity in *Q. mongolica* cuttings during rooting

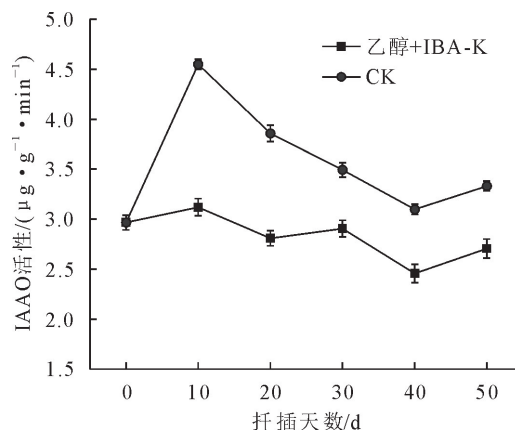


图 3 蒙古栎插穗生根过程中氧化蛋白酶活性变化

Fig. 3 Changes of oxidase activity in *Q. mongolica* cuttings during rooting

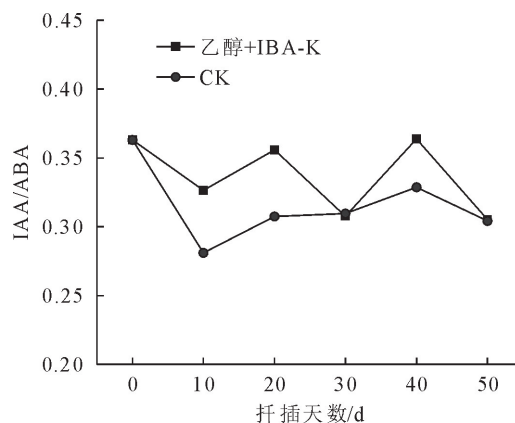


图 4 蒙古栎插穗生根过程中 IAA/ABA 值变化

Fig. 4 Changes of IAA/ABA value in *Q. mongolica* cuttings during rooting

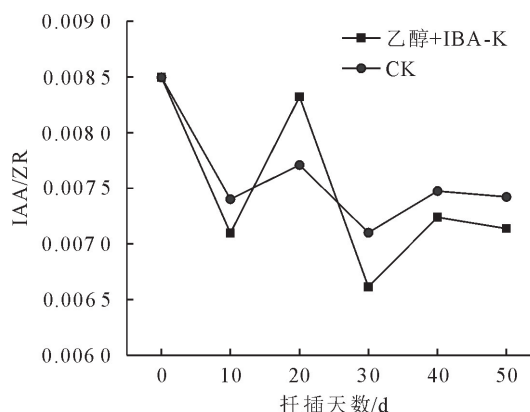


图 5 蒙古栎插穗生根过程中 IAA/ZR 值变化

Fig. 5 Changes of IAA/ZR value in *Q. mongolica* cuttings during rooting

### 3 结论与讨论

在生根过程中,防褐化处理有效提高了蒙古栎插穗的扦插生根率。1% 乙醇 1 h 浸泡结合 500 mg · L<sup>-1</sup> IBA-K 激素处理,通过提高 POD 与 PPO 的活性,降低 IAAO 的活性,增加 IAA/ZR 和 IAA/ABA 的比值,提升蒙古栎嫩枝扦插成活率。林木扦插



插生根诱导过程受到生理、形态、生化等多方面因素的影响,而植物生长调节剂和插穗处理方式是关键的制约因素<sup>[6]</sup>。对于难生根的栎类树种影响插穗生根的因素有很多<sup>[14-17]</sup>,其中植物生长调节剂处理是促进难生根树种插穗生根的重要技术方法,不仅有利于根原始体的诱导,而且能够促进不定根的发育和生长<sup>[18]</sup>。同时可以增加组织再生能力,提高酶活性诱导根源基的发生,从而有利于植物扦插繁殖形成不定根<sup>[19]</sup>,但不同种类对植物插穗生根效果的影响不同。栎树体内含有酚类等阻碍生根的物质,属扦插极难生根树种,其中主要抑制扦插生根的物质为单宁<sup>[8]</sup>,而蒙古栎枝条富含单宁,单宁中含有很多的酚羟基,对光很敏感,且极易被氧化成黑色的氧化物,容易导致插条基部褐化,从而导致插穗死亡,阻碍插穗生根,所以对插穗的预处理方式尤为重要。本研究发现,采用1%乙醇和2% AgNO<sub>3</sub>进行浸泡处理后再用IBA-K浸蘸的生根效果要显著好于单独使用IBA-K处理的效果,通过1%乙醇处理1 h和500 mg·L<sup>-1</sup> IBA-K处理2 h的防褐化处理可以使生根率达到21.1%。

在蒙古栎嫩枝插穗生根进程中,外源激素IBA-K的处理能够一定程度上提升插穗内POD、PPO的活性,降低IAAO的活性,均有利于蒙古栎嫩枝扦插生根。植物扦插不定根的发育及伸长与过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)和吲哚乙酸氧化酶(IAAO)相关氧化酶活性存在密切关系<sup>[20-22]</sup>。POD普遍存在于植物体内,既参与生物体的多种生理生化过程,又与光合作用、呼吸作用都有密切关联,有利于根原基的诱导<sup>[23]</sup>。PPO不仅促进细胞分裂、分化以及根原基形成和发育<sup>[22]</sup>,而且参与愈伤组织的形成,对不定根发育起到重要的作用<sup>[24-25]</sup>。POD与PPO相辅相成,协同作用促进不定根根系的形成,而IAAO是分解IAA的专一性酶,过高的IAAO含量会抑制不定根根系的形成。本试验结果表明,在10 d内的愈伤组织诱导初期,POD活性呈上升趋势;在不定根伸长期,POD活性再次大幅度上升。POD活性在扦插生根关键期都出现了高峰<sup>[26-27]</sup>,其作用的产物是促进不定根形成的辅助因子,参与根的诱导和表达,POD活性变化与马振华等<sup>[28]</sup>的研究结果相符。在植物生根过程中,酚类物质对不定根的形成和发育起着很重要的作用。在愈伤组织形成期PPO活性较高,说明此阶段PPO催化形成了大量“IAA-酚酸复合物”,从而促进愈伤组织的形成<sup>[27]</sup>。在愈伤组织膨大形成与不定根伸长的时期,处理组较对照组PPO活性大幅度增加,有利于根原基诱导和促进不定根伸长生长。处理组插穗IAAO

活性明显比对照组低,主要是外源IBA进入植物组织后,迅速转化为IAA,抑制了IAAO活性升高,从而有利于不定根生成,40 d后不定根大量生成,IAA合成减弱,导致IAAO活性缓慢上升,但活性仍处于较低水平。

插穗生根过程中内源激素的含量变化表现出的规律性,与插穗形态变化相对应;外源激素IBA-K在一定程度上提高了IAA/ABA、IAA/ZR的值。扦插生根期间内源激素之间存在相互协同作用,较高的IAA/ABA值和较低的IAA/ZR值有利于蒙古栎嫩枝插穗不定根发育和伸长。多项研究表明,IAA对不定根的发生有着明显促进作用,不仅可以调节增强插穗基部细胞内相关酶的活性,加快呼吸速率,促进细胞分裂和分化,还可以促进mRNA的合成,影响差异蛋白质的表达,提高插穗能量代谢、胁迫抗性和信号传递等各方面的能力<sup>[29-31]</sup>。ABA对插穗生根具有明显的抑制作用,高浓度的ABA含量会抑制插穗生根<sup>[32]</sup>。有关于细胞分裂素ZR对扦插生根的作用研究各异,有些研究认为高浓度的ZR可以促进不定根的发生<sup>[33]</sup>;也有一些研究认为,较低浓度细胞分裂素促进插穗生根<sup>[17]</sup>。在植物扦插生根的过程中,多种内源激素共同作用、相互制约<sup>[34]</sup>。有研究发现,IAA/ABA值越高越有利于不定根发育<sup>[18]</sup>。而高水平的IAA/ABA和IAA/ZR值有利于插穗根原基的诱导<sup>[35]</sup>。IAA/ABA值与生根呈正相关,通过外源处理保持较高的IAA/ABA值是不定根发育和生长的主要条件<sup>[32-33]</sup>。IAA/ZR值有着重要的调节功能,促进了愈伤组织的形成、不定根的产生和伸长生长<sup>[34,36]</sup>。本研究发现,IAA/ABA值在处理组始终高于对照组,且在生根关键期均出现峰值,而IAA/ZR值较高时有利于不定根原基的诱导,同时生根进程中IAA/ZR值较低时有利于不定根的发育和生长,具体IAA/ZR值如何调整更有利于插穗生根,还有待于进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 郑万钧. 中国树木志:第二卷[M]. 北京:中国林业出版社, 1985:1022.
- [2] 孙佳庆. 珍贵树种大径级用材林培育技术研究[J]. 吉林林业科技, 2012, 41(6):14-18.
- [3] 黄秦军, 李文文, 丁昌俊. 蒙古栎嫩枝扦插繁殖技术研究[J]. 西南林业大学学报, 2013, 33(1):27-33.  
HUANG Q J, LI W W, DING C J. Study on cuttage propagation techniques of *Quercus mongolica* with softwood cuttings [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2013, 33(1): 27-33. (in Chinese)
- [4] 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 J, LI J K, DUAN A A, *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. (in Chinese)
- [5] 祝亚云, 王伯君, 蒋泽平, 等. 弗吉尼亚栎全光雾扦插试验[J]. 现代农业科技, 2018(11):147-148, 150.
- [6] 吕秀立, 杨芳, 施季森, 等. 苏玛栎无性繁殖试验[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2013, 31(3):58-62.
- LÜ X L, YANG F, SHI J S, *et al.* Asexual reproduction experiment of *Quercus shumardii* [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2013, 31(3):58-62. (in Chinese)
- [7] 夏兴宏, 张耀廷, 王连珍, 等. 不同因素对麻栎绿枝扦插生根的影响[J]. 蚕业科学, 2019, 45(6):915-920.
- [8] 李先民. 青钱柳扦插繁殖技术及其生根机理的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [9] 朴楚炳, 张有富, 苗锡臣, 等. 促进红松插穗生根能力的研究[J]. 林业科技, 1996, 21(6):5-8.
- [10] 李明红, 胡春辉, 夏运尧. 杨梅嫁接和扦插繁殖技术试验[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2008, 14(4):1-3.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [12] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [13] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 闫文涛, 佟兆庆, 陆秀君, 等. 不同生长调节剂对蒙古栎嫩枝扦插生根的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3):116-121
- YAN W T, TONG Z Q, LU X J, *et al.* Cuttage propagation technique and rooting mechanism of *Quercus mongolica* with softwood cutting[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3):116-121. (in Chinese)
- [15] 吴幸连. 大叶栎扦插繁殖技术研究[J]. 防护林科技, 2008(5):25-26.
- [16] 丁彤. 北美红栎无性繁殖体系的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [17] 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):66-71.
- GUO S J. Progress of study on rooting anatomy and physiology of forest tree cuttings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1997, 19(4):66-71. (in Chinese)
- [18] 师晨娟, 刘勇, 胡长寿. 青海云杉硬枝扦插繁殖研究[J]. 江西农业大学学报: 自然科学, 2002, 19(2):259-263.
- SHI C J, LIU Y, HU C S. Research on hardy branch cutting cultivation of Qinghai Spruce[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University: Natural Science, 2002, 19(2):259-263. (in Chinese)
- [19] AzamalHusen, Mohinder Pal. Metabolic changes during adventitious root primordium development in *Tectona grandis* Linn. f. (teak) cuttings as affected by age of donor plants and auxin (IBA and NAA) treatment[J]. New Forests, 2007, 33(3):309-323.
- [20] 赵晓敏, 霍常富, 沈海龙. 影响林木插条生根的内部及环境因子研究综述[J]. 世界林业研究, 2007, 20(5):12-16.
- ZAHO X M, HUO C F, SHEN H L. Review on physiological and environmental factors for rooted cuttings of forest trees[J]. World Forestry Research, 2007, 20(5):12-16. (in Chinese)
- [21] 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 X L, ZHAO Z, QUAN J 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. (in Chinese)
- [22] ZHANG W, FAN J, TAN Q, *et al.* The effects of exogenous hormones on rooting process and the activities of key enzymes of *Malus hupehensis* stem cuttings[J]. PLoS One, 2017, 12(2):0172320.
- [23] 张志华, 刘新彩, 王红霞, 等. 核桃 IOD 和 POD 酶活性与生长势的关系[J]. 园艺学报, 2006, 33(2):229-232.
- ZAHNG Z H, LIU X C, WANG H X, *et al.* Studies on the relationship between the POD and IOD activity and the growth vigor of walnut[J]. Journal of Gardening, 2006, 33(2):229-232. (in Chinese)
- [24] ROUT G R. Effect of auxins on adventitious root development from single node cuttings of *Camellia sinensis* (L.) kuntze and associated biochemical changes[J]. Plant Growth Regulation, 2006, 48(2):111-117.
- [25] NAG S, SAHA K, CHOUDHURI M A. Role of auxin and polyamines in adventitious root formation in relation to changes in compounds involved in rooting[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2001, 20(2):182-194.
- [26] 赵云龙, 陈训, 李朝婵. 糙叶杜鹃扦插生根过程中生理生化分析[J]. 林业科学, 2013, 49(6):45-51.
- ZHAO Y L, CHEN X, LI Z C. Dynamic of physiology and biochemistry during Wild *Rhododendron scabrifolium* cutting propagation[J]. Forestry Science, 2013, 49(6):45-51. (in Chinese)
- [27] SHANG C, YANG H, MA S, *et al.* Physiological and transcriptomic changes during the early phases of adventitious root formation in mulberry stem hardwood cuttings[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(15):3707.
- [28] 马振华, 赵忠, 张晓鹏, 等. 四倍体刺槐扦插生根过程中氧化酶活性的变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7):85-89.
- MA Z H, ZHAO Z, ZHANG X P, *et al.* Studied on the oxidation enzymes activities in the periods of making roots in the green branch of *Robinia pseudoacacia* [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science, 2007, 35(7):85-89. (in Chinese)
- [29] 吴文浩, 曹凡, 刘壮壮. NAA 对薄壳山核桃扦插生根过程中内源激素含量变化的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(5):191-196.
- WU W H, CAO F, LIU Z Z. Effects of NAA treatment on the endogenous hormone changes in cuttings of *Carya illinoensis* during rooting[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science, 2016, 40(5):191-196. (in Chinese)

- YANG X C, LUO J Y. Different propagation velocity of stress wave in poplar and larch logs [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(5): 96-100. (in Chinese)
- [9] 高珊, 王立海, 王洋. 东北林区十个树种冻结活立木中应力波传播速度试验研究[J]. *森林工程*, 2013, 29(4): 47-52.
- GAO S, WANG L H, WANG Y. Experimental study on stress wave propagation velocity in frozen standing trees of 10 species in northeast china[J]. *Forest Engineering*, 2013, 29(4): 47-52. (in Chinese)
- [10] 刘丰禄, 姜芳, 王喜平, 等. 应力波在落叶松活立木中传播二维模拟研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 201-205.
- LIUF L, JIANG F, WANG X P, *et al.* Stress wave propagation in larch plantation trees; numerical simulation[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 201-205. (in Chinese)
- [11] 何宇航, 陈恩, 王弘历, 等. 断层扫描法在木材无损检测的研究进展[J]. *木工机床*, 2020(1): 13-16.
- HE Y H, CHEN S, WANG H L, *et al.* The research and development of fault scanning in wood nondestructive testing [J]. *Woodworking Machinery*, 2020(1): 13-16. (in Chinese)
- [12] 吴福社. 树木无损检测方法和安全性评估初探[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
- [13] 吴福社, 吴貽军, 邵卓平. 应力波仪和阻力仪用于雪松立木内部材性检测的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(1): 127-130.
- WU F S, WU Y J, SHAO Z P. Determination of cedar sample interior characteristics based on stress wave and resistograph [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(1): 127-130. (in Chinese)
- [14] 徐华东, 王立海. 空洞对木材中应力波传播路径的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(4): 82-84, 88.
- XU H D, WANG L H. Effects of cavity on propagation path of stress wave in wood[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(4): 82-84, 88. (in Chinese)
- [15] WANG X P, DIVOS F, PILON C, *et al.* Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive-evaluation tools-A guide for use and interpretation[R]. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Prod Lab, 2004: 1-12.
- [16] RINN F. Intact-decay transitions in profiles of density-calibratable resistance drilling devices using long thin needles[J]. *Arboricultural Journal*, 2016, 38(4): 204-217.
- [17] 张文彤, 邱春伟. SPSS统计分析基础教程[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 236-237.
- [18] ROSS R J. Nondestructive evaluation of wood[M]. Washington: U. S. Government Printing Office, 2015.
- [19] WANG X P, ROSS R J, MCCLELLAN M, *et al.* Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method [J]. *Wood and Fiber Science*, 2007, 33(4): 522-533.
- [20] 陈峻崎. 北京市古树健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [21] WU X, LI G H, JIAO Z, *et al.* Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection [J]. *Applications in Plant Sciences*, 2018, 6(10): e1187.
- [22] LI G H, WENG X, DU X C, *et al.* Stress wave velocity patterns in the longitudinal-radial plane of trees for defect diagnosis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 124: 23-28.

(上接第124页)

- [30] 张晓平, 方炎明, 黄绍辉. 杂种鹅掌楸扦插生根过程中内源激素的变化[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(3): 79-82.
- ZHANG X P, FANG Y M, HUANG S H. The endogenous hormone's variation during the adventitious roots formation of hybrid tuliptrees by cutting[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science*, 2004, 28(3): 79-82. (in Chinese)
- [31] WEI K, RUAN L, WANG L, *et al.* Auxin-induced adventitious root formation in nodal cuttings of *Camellia sinensis* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(19): 4817.
- [32] 詹亚光, 杨传平. 白桦插穗生根的内源激素和营养物质[J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(4): 1-4.
- ZHAN Y G, YANG C P. Endogenous hormones and nutritive material in softwood cuttings of *Betula platyphylla* during rooting[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(4): 1-4. (in Chinese)
- [33] 敖红, 王崑, 冯玉龙. 长白落叶松插穗的内源激素水平及其与扦插生根的关系[J]. *植物研究*, 2002, 22(2): 190-195.
- [34] 王青, 张捷, 仲崇禄, 等. 麻楝扦插生根进程中内源激素和营养物质含量的变化[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(4): 111-119.
- WANG Q, ZHANG J, ZHONG C L, *et al.* Variation of endogenesis hormone and nutritive matter concentration in *Chukrasia tabularis* cuttings during rooting[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(4): 111-119. (in Chinese)
- [35] 王艳晶, 彭祚登. 不同生根促进剂对国槐嫩枝扦插生根过程中内源激素变化的影响[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 109-114.
- WANG Y J, PENG Z D. Effects of different rooting accelerators on the changes of endogenous hormones in *Sophora japonica* during softwood-cutting rooting process[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(5): 109-114. (in Chinese)
- [36] 胡涛, 曹钰, 张鸽香. 美国流苏嫩枝扦插及生根内源激素含量的变化[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(2): 109-115.
- HU T, CAO Y, ZHANG G X. Softwood cutting of *Chionanthus virginicus* and changes of endogenous hormone content during rooting period[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(2): 109-115. (in Chinese)