



插穗因素对闽楠扦插苗生根、生长及相关酶活性的影响

吴小慧¹,王妍²,杨志坚¹,陈世品¹,冯金玲^{1*}

(1 福建农林大学 林学院,福州 350002;2 中国林学会,北京 100091)

摘要:选择 40 年生无病虫害闽楠植株半木质化枝条为插穗,采用 $L_8(2^7)$ 正交试验方法,设置插穗来源(枝条顶部、枝条中部)、枝条长度(10 cm、15 cm)和留叶数(保留 1 片和 2 片全叶)3 个插穗因素,研究插穗因素对闽楠扦插苗生根、生长及理化性质等方面影响,筛选适宜插穗处理方式,揭示插穗调控扦插苗生根和生长机理。结果表明:(1)闽楠插穗来源、长度及留叶数显著影响扦插苗的生根、生长及理化特性。(2)闽楠扦插最适合的插穗处理是取长度为 10 cm 的中部枝、保留 2 片叶。(3)影响闽楠扦插生根率的最主要因素是插穗来源,关键生理指标是根系 PPO 和 POD 活性;影响闽楠扦插苗新梢生长最主要的因素是插穗的留叶数,关键生理指标是根系 IAAO 活性和 MDA 含量。研究表明,各插穗因素显著影响着闽楠扦插苗的生根及生长,并以长度 10 cm、保留 2 片的中部枝为插穗最佳;该研究结果为闽楠扦插繁殖技术制定和推广应用提供理论与技术指导。

关键词:闽楠;扦插;插穗;生根机制

中图分类号:Q945.39; Q945.79

文献标志码:A

Rooting, Growth and Related Enzyme Activities of *Phoebe bournei* Cutting Seedlings under Different Treatments of Cuttings

WU Xiaohui¹, WANG Yan², YANG Zhijian¹, CHEN Shipin¹, FENG Jinling^{1*}

(1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 Chinese Society of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To obtain the appropriate treatment of *Phoebe bournei* cutting, to explore the regulation mechanism of the rooting and growth of cutting seedlings, we used the $L_8(2^7)$ orthogonal experimental design to studied effects of branch position, cutting length and leaf retention on *P. bournei* cutting seedling rooting, growth and physicochemical characteristics. The results showed that: (1) the branch position, cutting length and leaf retention had significant effects on the rooting, growth and physicochemical properties of *P. bournei* cutting seedlings. (2) For *P. bournei* cutting seedlings, the middle position of branch with 2 leaves and length of 10 cm as cutting was the most suitable. (3) The main factor affecting the rooting rate of *P. bournei* cuttings was the physiological state of cuttings, PPO and POD enzyme activities were the key physicochemical indexes. The most important factor affecting the growth of shoots of *P. bournei* cutting seedlings was the leaf retention, while IAAO enzyme activity and MDA content were the key physicochemical indexes. The results showed that the rooting and growth of *P. bournei* cutting seedlings were

收稿日期:2019-06-04;修改稿收到日期:2019-09-23

基金项目:福建省林木种苗科技攻关五期项目“闽楠气培扦插及组培新技术研究”(KLh16H04A)

作者简介:吴小慧(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事森林培育研究。E-mail: 936096193@qq.com

* 通信作者:冯金玲,副教授,硕士研究生导师,主要从事森林培育研究。E-mail: FJL9703@163.com

significantly affected by cuttings, laid a foundation for *P. bournei* cutting propagation and provided theoretical guidance for its application.

Key words: *Phoebe bournei*; cutting; cutting; rooting mechanism

闽楠[*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang]属国家Ⅱ级重点保护野生渐危物种,是中国特有的用材林树种。其木材质地细腻,削面流畅,光滑美观,香气独特,易加工,是高档家具、雕刻工艺和精密木模等珍贵的材料^[1-2]。近年来,闽楠商业价值日益凸显,市场需求量急升,但长期以来市场供应主要以野生资源为主,乱采滥伐致使资源日趋匮乏^[3-4]。

闽楠在生产中具有生长周期长、天然更新慢、种子活力弱和大小年明显等缺陷;同时闽楠实生苗个体间差异明显,良莠不齐,限制其良种推广,这些严重制约了闽楠产业的发展^[5-7]。因此,无性繁殖便成为加速闽楠繁殖和推广的主要技术手段。其中,扦插育苗繁殖系数高,便于规模化管理,相对组培、嫁接、压条等方法而言,具有易操作、繁殖稳定及成本低等优点,是无性繁殖育苗的首选^[8]。所以,闽楠扦插育苗繁殖的研究对加快其产业发展具有重要的现实意义。

目前,闽楠扦插繁殖方面的报道多集中于基质筛选、激素处理等技术研究,其扦插生根的机理尚不清楚^[9-12]。林木扦插取得成功,插穗快速形成不定根是关键。插穗生根与插穗是否脱水,是否能光合生成足够的碳水化合物有关^[13-14]。同时不定根的分化和生长与插穗的理化性质有着密切关系^[15-16]。因此,插穗是解决闽楠扦插繁殖成功的关键所在,但迄今插穗对闽楠扦插的影响研究较少。本实验通过考察闽楠插穗长度、来源的位置及留叶数这3个因素对扦插苗生根、生长及理化等指标的影响,分析影响闽楠扦插生根和苗生长的主要插穗因素,并进一

步探讨其生根机理,以期为闽楠的扦插繁殖提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建农林大学科技园田间苗圃。该区域无霜期达326 d;年平均日照数为1 700~1 980 h;年平均降水量为900~2 100 mm;年平均气温为20~25 °C,最冷月(1~2月)平均气温达6~10 °C,最热月份(7~8月)平均气温为33~37 °C,极端气温最高为42.3 °C,最低气温仅-2.5 °C。年相对湿度约77%。

1.2 材料采集与处理

插条材料来源于福建农林大学校园内直径为25 cm、40年生无病虫害的闽楠植株。选择向阳、芽饱满、生长良好的半木质化枝条作为插条,插条采集后,充分用浅水浸泡运回试验室。

本实验采用L₈(2⁷)正交方法,设置插穗来源枝梢的位置、插穗长度及留叶数3个因子,每个因子2个水平,共8个处理(表1)。田间试验采用完全随机区组设计,每个处理3个重复,共24个区组,每个区组扦插25根,共扦插600根。

1.3 插穗扦插及其管理

扦插前2 d,将沙子、蛭石、泥炭土按2:3:5体积比配制培养基质,填满育苗穴(540×280×80 mm),摆上苗床。0.5%(质量分数,下同)高锰酸钾溶液淋灌消毒基质,塑料薄膜覆盖1 d,揭膜,清水浇透基质,备用。按实验设计要求制作插穗,制好的插

表1 闽楠插穗的正交试验设计

Table 1 Orthogonal experimental design of *Phoebe bournei* cutting

Treatment	插穗来源(A) Cutting position	插穗长度(B) The length of cuttings/cm	插穗留叶数(C) The number of leaf retention
1(A1B1C1)	枝顶部 Top position of branch	10	1
2(A1B1C1)	枝顶部 Top position of branch	10	1
3(A1B2C2)	枝顶部 Top position of branch	15	2
4(A1B2C2)	枝顶部 Top position of branch	15	2
5(A2B1C2)	枝中部 Middle position of branch	10	2
6(A2B1C2)	枝中部 Middle position of branch	10	2
7(A2B2C1)	枝中部 Middle position of branch	15	1
8(A2B2C1)	枝中部 Middle position of branch	15	1

穗于 50% 多菌灵 800 倍溶液中消毒 8 min, 蒸馏水冲洗 3 遍。接着插穗下端于 200 mg/L NAA 溶液中浸泡 4 h, 取出, 晾干。每个育苗穴中扦插 1 根插穗, 并浇透水。扦插后, 苗床上搭建高 50 cm 的塑料拱棚。苗圃地架高为 2.7 m 荫棚, 70% 的自然光照。遮荫棚内温度控制在 28~35 ℃。塑料拱形棚内湿度控制在 90% 左右。及时清除苗床上的枯落叶、坏死插穗及新长出的杂草。每隔 30 d 喷 1 次 1 000 倍的 70% 甲基托布津或 1 000 倍的 50% 多菌灵(交替使用)。当插穗抽出新芽至扦插 120 d 期间, 每隔半个月轮流喷施 0.1% 尿素和 0.1% 复合肥。扦插后 120~150 d 期间, 夜间揭膜通气, 逐步加强通风和光照, 直至揭掉薄膜; 塑料拱形棚内湿度控制在 80% 左右, 每隔半个月喷施 0.1% 复合肥 1 次。150 d 以后, 停止施肥, 田间持水量控制在 75% 左右。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长指标 2017 年 4 月份, 调查闽楠扦插苗生根率(rooting rate, RT, 抽稍株数与扦插数的比值), 钢卷尺测量新稍长(shoot length, SL)。每个实验重复选取 5 棵标准株。植株取样后, 根部浸入水中, 清洗掉根上的泥土, 阴干。按 Pregitzer 法分一级根和二级根, 分别测总根数(the total number of root, TNR)、一级根长(primary root length, PRL)、二级根长(secondary root length, SRL)和总根长(total root length, TRL)^[17], 计算根系效果指数(root effect index, RI)(平均根长×生根数量/插穗总数)^[13]。晾干后从苗木根际处剪断, 采用电子天平称茎(stem weight, SW)、叶(leaf weight, LW)(地上部分鲜重)和根(root weight, RW)(地下部分)的鲜重, 计算根冠比(root-shoot ratio, R/S, 地下部分鲜重与地下部分鲜重的比值)^[18]。

1.4.2 生理生化指标 将取样得到的叶片在液氮中充分研磨, 取约 0.2 g 粉末至 10 mL 离心管, 分析天平称样品重量, 采用蒽酮乙酸乙酯比色法^[19]测可溶性糖含量(soluble sugar content of leave, SSCL)。将取样得到的根在液氮中充分研磨, 取约 0.2 g 粉末至 2 mL 或 10 mL 离心管, 分析天平称样品重量, 分别测过氧化物酶(POD)活性(愈创木酚比色法测定^[20])和多酚氧化酶(PPO)、吲哚乙酸氧化酶(IAAO)(邻苯二酚比色法测定)、超氧化物歧化酶(SOD)活性(氮蓝四唑光化还原法测定^[21]), 以及丙二醛(MDA)含量(硫代巴比妥酸比色法^[21])。称取根尖样品 0.5 g, 测根系活力(root activity, RA)(TTC 法^[22])。每个实验指标重复 3 次。

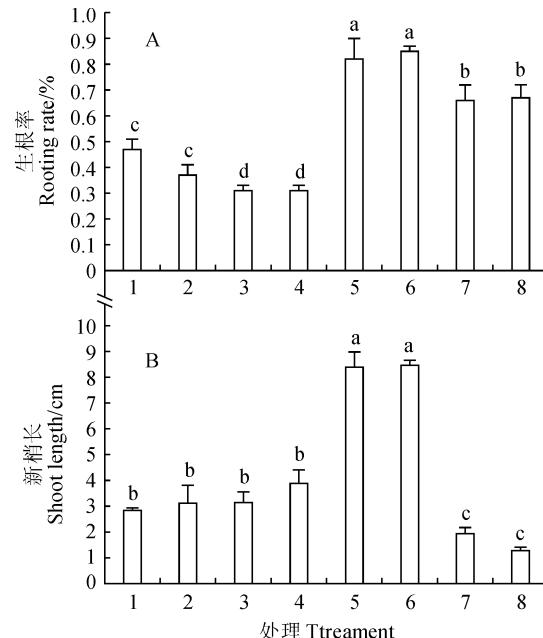
1.5 数据处理

试验数据用 Excel 进行分析并作图, 运用 SPSS17.0 对数据进行方差分析、多重比较、极差分析、相关分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同插穗处理对闽楠扦插苗生根率和新梢生长的影响

插穗处理对闽楠扦插苗生根率均有显著性影响($P<0.05$)。其中, 处理 5 和处理 6(10 cm 中部枝, 并保留 2 片全叶)扦插苗的生根率分别为 0.82 和 0.85, 显著高于其余处理; 其次是处理 7 和处理 8(15 cm 中部枝, 并保留 1 片全叶), 生根率分别为 0.66 和 0.67; 处理 1 和处理 2(10 cm 顶部枝, 并保留 1 片全叶)的生根率分别为 0.47 和 0.37; 最差是处理 3 和处理 4(15 cm 顶部枝, 并保留 2 片全叶), 生根率都为 0.31, 且显著低于其他处理(图 1, A)。同时, 闽楠扦插苗的新梢生长也受插穗处理显著影响($P<0.05$)。其中, 处理 5 和处理 6 扦插苗的抽梢



不同小写母表示处理间差异显著($P<0.05$), 采用 Duncan 多重比较分析, 错误线表示标准偏差。

图 1 不同插穗处理下闽楠扦插苗生根率和新梢生长的变化

Different normal letters showed significant difference ($P<0.05$) among treatments using Duncan multiple comparison analysis, the error line shows the standard deviation

Fig. 1 The rooting rate and shoot length of cutting seedlings of *P. bournei* under different cutting treatments

也最长,分别为8.39和8.46 cm,并与其余处理差异达到显著水平;其次是处理3和处理4,其扦插苗新梢长分别为3.14和3.88 cm;接着是处理1和处理2,扦插苗新梢长分别为2.84和3.11 cm;最差的处理7和处理8,扦插苗新梢长分别为1.94和0.96 cm,与其余处理差异达到显著(图1,B)。因此,选择10 cm中部枝、保留2片全叶作插穗最有利于闽楠扦插苗生根和抽稍。

2.2 不同插穗处理对闽楠扦插苗生物量和根生长的影响

来源于枝条不同位置、长度及留叶数的闽楠插穗,其扦插苗的茎、叶和根鲜重及根冠比都有显著性差异($P<0.05$) (表2)。其中,扦插苗茎鲜重最大的为处理8(1.01 g),显著高于除处理4以外的其他处理,最差的为处理1(0.30 g),显著低于除处理2以外的其他处理。扦插苗叶鲜重最大的仍为处理8(0.96 g),与其余处理差异均达到显著水平,最差的

为处理2(0.26 g),其仅与处理7相近。扦插苗根鲜重最大的为处理4(1.14 g),但仅与处理1和处理2差异显著;最差的为处理2(0.36 g),但仅与处理4差异显著。扦插苗根冠比最大的为处理6(0.79),其与处理3、4相近;最差的为处理8(0.23),它与处理3~6差异显著。

由表3得出,来源于枝条不同位置、长度及留叶数的闽楠插穗,其扦插苗的总根长、总根数、一级根长、二级根长、根系效果指数和根系活力都存在显著差异($P<0.05$)。其中,扦插苗总根长最大的为处理6(10.72 cm),显著高于除处理5以外的处理;最差的为处理7(0.90 cm),它与其他处理均差异显著。扦插苗总根数最大的为处理6(6.0根),并显著高于处理3以外的其他处理;最差的为处理2(2.0根),它与其他处理均差异显著。扦插苗一级根长最大的是处理3(3.32 cm),最差的是处理4(0.71 cm),均与其他处理差异显著。扦插苗二级根长最大

表2 不同插穗处理下闽楠扦插苗生物量的变化

Table 2 The biomass of *P. bournei* cutting seedlings under different cuttings treatments

处理 Treatment	茎重 Stem weight/g	叶重 Leaf weight/g	根重 Root weight/g	根冠比 R/S
1(A1B1C1)	0.30±0.10d	0.47±0.05cd	0.50±0.06b	0.38±0.00c
2(A1B1C1)	0.44±0.09cd	0.26±0.02f	0.36±0.08b	0.40±0.00c
3(A1B2C2)	0.80±0.06b	0.69±0.03b	0.92±0.04ab	0.62±0.01ab
4(A1B2C2)	0.96±0.16ab	0.60±0.10bc	1.14±0.40a	0.75±0.25ab
5(A2B1C2)	0.52±0.07c	0.52±0.11cd	0.71±0.20ab	0.58±0.02b
6(A2B1C2)	0.61±0.04c	0.41±0.03de	0.81±0.02ab	0.79±0.05a
7(A2B2C1)	0.60±0.11c	0.37±0.09ef	0.60±0.22ab	0.38±0.03c
8(A2B2C1)	1.01±0.09a	0.96±0.08a	0.82±0.32ab	0.23±0.11c

注:表中数值为均值±标准差,数值后不同字母表示差异显著($P<0.05$,Duncan 多重比较分析),下同

Note: The values in the table were the mean value ± the standard deviation, letters showed significant difference degree ($P<0.05$, Duncan multiple comparison analysis). The same as below

表3 不同插穗处理下闽楠扦插苗根生长的变化

Table 3 The root growth of *P. bournei* cutting seedlings under different cuttings treatments

处理 Treatment	总根长 TRL/cm	总根数 TNR(根)	一级根长 PRL/cm	二级根长 SRL/cm	根系效果指数 RI	根系活力 RA/(mg·kg ⁻¹)
1(A1B1C1)	6.32±0.25c	4.0±0.0bc	1.95±0.45b	4.39±0.69abc	1.32±0.12cd	4.00±0.01b
2(A1B1C1)	8.62±0.28b	2.0±0.2e	1.50±0.25bc	4.90±0.44ab	0.86±0.04d	4.03±0.05b
3(A1B2C2)	8.23±0.90b	5.5±0.7a	3.32±0.85a	4.63±0.33ab	2.11±0.29b	4.01±0.01b
4(A1B2C2)	8.23±0.88b	3.0±0.0d	0.71±0.17d	3.93±0.33abc	1.18±0.10d	5.69±1.44a
5(A2B1C2)	10.53±0.86a	3.5±0.5cd	1.57±0.49bc	5.00±0.20a	1.74±0.09bc	4.00±0.05b
6(A2B1C2)	10.72±1.25a	6.0±0.4a	1.66±0.29bc	3.48±1.30c	3.81±0.75a	4.04±0.04b
7(A2B2C1)	0.90±0.00e	3.0±0.1d	0.93±0.02cd	0.00±0.00d	0.13±0.01e	4.02±0.03b
8(A2B2C1)	3.81±0.34d	4.5±0.5b	1.09±0.06cd	3.86±0.14bc	1.02±0.20d	4.09±0.08b

的是处理 5(5.00 cm),但仅与处理 6~8 差异显著;最差的是处理 7,无二级分化。扦插苗根系效果指数最大的是处理 6(3.81),最差的是处理 7(0.13),其值均与其余处理差异显著。扦插苗根系活力最大的是处理 4(5.69),显著高于其余处理,而其他处理间无显著差异,保持在 4.00 左右。

2.3 不同插穗处理对闽楠扦插苗理化指标的影响

表 4 显示,插穗处理对闽楠扦插苗叶片可溶性糖含量,以及根的 PPO、SOD、IAAO、POD 活性和 MDA 含量都有显著性影响($P < 0.05$)。其中,根系 IAAO 活性最大的是处理 5($10.18 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$),影响最差的是处理 7($7.87 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$),并均与其余处理存在显著性差异;根系 PPO 活性最大的是处理 4($1246 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$),它与处理 2、3、7 酶活性相近;最差的是 6 处理($1093.50 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$),它与处理 1、6、8 酶活性相近;根系 POD 活性最大的是处理 8($56.25 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$),与其余处理酶活性差异均达到显著性水平;最差的是处理 2、4($4.17 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$),其值仅与处理 7 无显著差异;根系 SOD 活性最大的是处理 7($24.28 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$),但其值仅显著高于处理 1、2、6;最差的是处理 6($5.70 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$),其值与其余处理均存在显著性差异。根系 MDA 含量最大的是处理 5($1.17 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),最小的是处理 8($0.34 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),两处理含量均与其余处理差异显著。对于叶可溶性糖含量,各处理间差异巨大,最大的是处理 8($464.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其次是处理 2($402.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最小的是处理 7($6.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),均与其余处理差异显著。

2.4 闽楠扦插苗各指标之间的关系分析

2.4.1 回归及相关性分析

分别以闽楠扦插苗生根率和新梢长为因变量 Y,以叶鲜重(X_1)、根鲜重

(X_2)、茎鲜重(X_3)、一级根长(X_4)、二级根长(X_5)、根冠比(X_6)、根系效果指数(X_7)、IAAO 活性(X_8)、MDA 含量(X_9)、SOD 活性(X_{10})、叶可溶性糖含量(X_{11})、总根长(X_{12})、总根数(X_{13})、根系活性(X_{14})、PPO 活性(X_{15})和 POD 活性(X_{16})为自变量进行逐步回归分析,获得生根率回归方程为 $Y = 3.876 + 0.461X_3 + 0.244X_9 - 0.014X_{10} - 0.003X_{15}$ (复相关系数 $R = 0.79, P < 0.01$),新梢长回归方程为 $Y = -27.221 + 0.986X_8 + 9.782X_9 - 0.295X_{10} + 0.015X_{15} + 0.096X_{16}$ (复相关系数 $R = 0.90, P < 0.01$)。这表明茎重、MDA 含量、SOD 活性及 PPO 活性构成了影响闽楠插穗生根的重要因素,而 IAAO 活性、MDA 含量、SOD 活性、PPO 活性及 POD 活性构成了影响闽楠扦插苗新梢生长的重要因素。

通过逐步回归分析获得的影响闽楠插穗生根和新梢生长的重要指标,与闽楠扦插苗的生长指标进一步做相关分析,结果(表 5)表明,闽楠扦插苗茎重与叶重和根重之间呈显著正相关;根系 IAAO 活性与总根数呈显著负相关,与二级根长呈显著正相关;根系 PPO 活性与生根率呈极显著负相关;根系 POD 活性与闽楠扦插苗的生长指标无显著相关;根系 SOD 活性与新梢长呈极显著负相关,与茎重呈极显著正相关,与二级根长呈显著正相关;而根系 MDA 含量与新梢长呈显著正相关。另外,闽楠扦插苗重要理化指标之间的相关性分析(表 6)发现,根系 PPO 活性与 IAAO 活性呈显著负相关,与 POD 活性呈极显著负相关;根系 POD 活性与根系 MDA 含量呈极显著负相关。

2.4.2 极差分析

用直观分析法分析不同插穗处理对闽楠扦插苗重要指标的影响,根据极差大小结果(表 7)得出,影响闽楠扦插苗生根率的最重要因素

表 4 不同插穗处理下闽楠扦插苗理化指标的变化

Table 4 The physiochemical indexes of *P. bournei* cutting seedlings under different cuttings

处理 Treatment	IAAO 活性 IAAO activity / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	PPO 活性 PPO activity / ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	POD 活性 POD activity / ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	SOD 活性 SOD activity / ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	MDA 含量 MDA content / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶可溶性糖含量 SSCL / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1(A1B1C1)	$8.86 \pm 0.13\text{bc}$	$1154.00 \pm 36.11\text{bcd}$	$33.33 \pm 0.00\text{cd}$	$13.05 \pm 2.36\text{b}$	$0.56 \pm 0.03\text{d}$	$67.50 \pm 5.10\text{e}$
2(A1B1C1)	$8.07 \pm 0.25\text{de}$	$1224.00 \pm 74.71\text{ab}$	$4.17 \pm 0.00\text{e}$	$13.13 \pm 2.54\text{b}$	$0.80 \pm 0.14\text{bc}$	$402.50 \pm 31.13\text{b}$
3(A1B2C2)	$8.30 \pm 0.38\text{cde}$	$1188.00 \pm 9.80\text{abc}$	$45.83 \pm 3.40\text{b}$	$22.42 \pm 5.14\text{a}$	$0.52 \pm 0.03\text{de}$	$70.00 \pm 7.14\text{e}$
4(A1B2C2)	$9.12 \pm 0.20\text{b}$	$1246.50 \pm 45.32\text{a}$	$4.17 \pm 0.00\text{e}$	$19.67 \pm 1.82\text{a}$	$0.94 \pm 0.06\text{b}$	$197.81 \pm 4.34\text{d}$
5(A2B1C2)	$10.18 \pm 1.06\text{a}$	$1093.50 \pm 14.70\text{d}$	$27.08 \pm 8.51\text{d}$	$20.63 \pm 0.29\text{a}$	$1.17 \pm 0.20\text{a}$	$89.06 \pm 16.07\text{e}$
6(A2B1C2)	$8.76 \pm 0.06\text{bcd}$	$1132.00 \pm 25.82\text{cd}$	$41.67 \pm 10.21\text{bc}$	$5.70 \pm 0.38\text{c}$	$0.63 \pm 0.02\text{cd}$	$253.75 \pm 33.17\text{c}$
7(A2B2C1)	$7.87 \pm 0.01\text{e}$	$1173.00 \pm 52.66\text{abc}$	$10.42 \pm 5.10\text{e}$	$24.28 \pm 4.39\text{a}$	$0.93 \pm 0.08\text{b}$	$6.88 \pm 0.51\text{f}$
8(A2B2C1)	$9.25 \pm 0.10\text{b}$	$1134.00 \pm 15.92\text{cd}$	$56.25 \pm 8.51\text{a}$	$23.54 \pm 2.81\text{a}$	$0.34 \pm 0.13\text{e}$	$464.69 \pm 29.85\text{a}$

表5 闽楠扦插苗的生长指标与重要指标的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of growth indexes and key indexes of *P. bournei* cutting seedlings

指标 Index	生根率 RT	新梢长 SL	茎重 SW	叶重 LW	根重 RW	总根数 TNR	二级根长 SRL
SW	-0.010	-0.295	1.000	0.439*	0.420*	-0.025	0.106
IAAO	0.330	0.388	-0.054	0.291	0.101	-0.411*	0.428*
PPO	-0.680**	-0.194	0.374	0.001	0.132	-0.338	-0.323
POD	0.302	-0.083	0.044	0.380	0.176	0.359	0.385
SOD	-0.108	-0.505**	0.608**	0.372	0.173	-0.199	0.438*
MDA	0.188	0.466*	-0.081	-0.337	-0.026	-0.297	0.016

注*表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关 $P<0.01$ 。下同

Note: * represents significant correlation at 0.05 level; ** represent extremely significant correlation at 0.01 level. The same as below

表6 闽楠扦插苗重要理化指标之间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis among key physiochemical indexes of *P. bournei* cutting seedlings

指标 Index	IAAO	PPO	POD	SOD	MDA
IAAO	1.000				
PPO	-0.437*	1.000			
POD	0.316	-0.502**	1.000		
SOD	0.127	0.093	0.028	1.000	
MDA	0.113	0.003	-0.669**	0.157	1.000

是插穗来源,其次是插穗长度,接着是留叶数,其最好的水平组合处理是 A2B1C2,即中部枝、10 cm 长、留 2 片全叶;影响闽楠扦插苗新梢生长的最重要因素是留叶数,接着分别为插穗长度和插穗来源,其最好的水平组合处理也是 A2B1C2(枝中部、10 cm 长、留 2 片全叶)。对于重要理化指标根系 PPO 和 POD 活性影响最大的因素是插穗来源, PPO 和 POD 活性最高的插穗来源水平分别是 A1(枝顶部)和 A2(枝中部);对于重要指标茎重和 SOD 活性影响最大的因素是插穗长度,其值最高的水平都是 B2 (15 cm);对于重要指标 IAAO 活性和 MDA 含量影响最大的因素是留叶数,其值最高的水平都是 C2 (留 2 片全叶)。

3 讨论与结论

3.1 插穗因素影响闽楠扦插生根

不同插穗处理显著影响闽楠的插穗生根,其中插穗来源的效应大于插穗长度,最小的是留叶数。以 10 cm 中部枝,并保留 2 片全叶作闽楠插穗,最有利于生根。对于插穗来源,中部枝的生根率和 POD 活性高于顶枝, PPO 活性低于顶枝, PPO 活性与生根率呈极显著负相关。可能是闽楠中部枝比顶枝的细胞更成熟,更有利于根的分化^[23-24]。闽楠扦插苗

的茎重和 SOD 活性随着插穗长度的增加而增大,生根率则随着下降。这与先前研究得出的插穗过长不利于插穗生根的结果相同^[25]。对于留叶数,留 2 片叶插穗的生根率和 MDA 含量都高于留 1 片叶插穗,有可能是插穗保留叶片数增多,蒸腾作用加大,受胁迫强度增加,MDA 含量则随之增大^[26]。同时,在一定的蒸腾作用下(即保留 2 片全叶),有利于光合产物输送给茎端,促进插穗的根分化,因此 MDA 与生根率呈弱的正相关关系(0.188)。可见,影响闽楠扦插生根率最主要的因素是插穗的生理状态,使插穗有一定的胁迫压力下,降低根系 PPO 活性,提高根系 POD 活性。

闽楠扦插取得成功关键在于插穗快速形成不定根,但目前扦插生根机理的研究不够深入^[13-14]。本研究通过逐步回归分析得出,闽楠扦插苗茎重、MDA 含量、SOD 及 PPO 活性构成了影响闽楠插穗生根的重要因素;闽楠插穗的生根率与根系 PPO 活性呈极显著负相关,根系 IAAO 活性与 PPO 活性呈显著负相关。IAAO 通过氧化吲哚乙酸(IAA),降低植物体内的 IAA 含量,不利于插穗细胞分化。多酚氧化酶(PPO)作为植物呼吸作用末端氧化酶的一种,催化酚类物质生成醌,合成“IAA-酚酸”复合物,降低插穗内 IAA 含量,负反馈 IAAO 活性,调控不

表7 插穗处理对闽楠扦插苗重要指标影响的极差分析

Table 7 Range analysis of effect on the key indexes of *P. bournei* cutting seedlings under different cuttings treatments

指标 Index	水平 Level	因素均值 Factor mean		
		插穗来源(A) Cutting position	插穗长度(B) The length of cuttings	插穗留叶数(C) The number of leaf retention
生根率 RT/%	K1	0.37	0.63	0.54
	K2	0.75	0.49	0.57
	极差 Range	0.39	0.14	0.03
新梢长 SL/cm	K1	3.24	5.70	2.21
	K2	4.94	2.48	5.97
	极差 Range	1.70	3.22	3.76
茎重 SW/g	K1	0.63	0.47	0.59
	K2	0.69	0.84	0.72
	极差 Range	0.06	0.38	0.14
IAAO /(\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})	K1	8.59	8.97	8.51
	K2	9.02	8.64	9.09
	极差 Range	0.43	0.33	0.58
PPO /(U \cdot g^{-1})	K1	1 203.13	1 150.88	1 171.25
	K2	1 133.13	1 185.38	1 165.00
	极差 Range	70.00	34.50	6.25
POD /(U \cdot g^{-1})	K1	21.88	26.56	26.04
	K2	33.86	29.17	29.69
	极差 Range	11.98	2.61	3.65
SOD /(U \cdot g^{-1})	K1	17.07	13.13	18.50
	K2	18.54	22.48	17.11
	极差 Range	1.47	9.35	1.40
MDA /(\mu g \cdot g^{-1})	K1	0.71	0.79	0.66
	K2	0.77	0.68	0.82
	极差 Range	0.06	0.11	0.16

定根的形成^[15,27]。插穗分化根过程中发生细胞程序性死亡,细胞解体,插穗产生大量的自由基和活性氧^[27-28]。闽楠插穗体内的PPO活性与POD活性呈显著负相关。POD作为一种诱导酶,存在于植物细胞壁和细胞的质外体之中,能清除植物体内的H₂O₂^[28]。POD活性随着植株体内细胞分化的增加而提高。闽楠插穗的POD活性与MDA含量呈极显著负相关。随着POD活性增强,减少自由基和活性氧对插穗其他细胞造成伤害,MDA含量下降,细胞内新陈代谢能力增强,越有利于细胞分化根^[29]。同时,超氧化物歧化酶(SOD)是植物氧化系统中的关键酶,可以减轻自由基对植物的毒害^[30]。王东光等研究表明SOD活性对闽楠扦插的生根有显著性促进作用^[9]。本试验不同闽楠插穗处理中根系SOD活性有显著性差异,插穗的SOD活性与茎鲜

重呈极显著正相关,与二级根长呈显著正相关,与王东光对闽楠苗扦插研究的结果基本相似;同时,闽楠插穗IAAO活性与二级根长呈显著正相关。说明插穗茎越重,SOD活性越强,越有利于插穗分化出的根(二级根)的伸长,进一步提高了根的IAAO活性,降低插穗根的IAA含量,降低根的分化。因此,在闽楠插穗生根过程中,可通过PPO活性调控IAAO和POD活性,控制内源IAA,降低MDA含量,促进根分化;同时可通过SOD促进根的生长,负反馈IAAO,从而调控闽楠插穗根的分化与生长。

3.2 插穗因素影响闽楠扦插苗培育

一般的扦插繁殖研究都只关注扦插是否成功,而对扦插苗质量评价较少。新梢长度能够很好地评价扦插苗质量、生长状况^[18]。本研究中不同插穗处理都显著影响闽楠的扦插苗的新梢长,10 cm中部

枝并保留2片全叶作闽楠插穗,最有利于扦插苗梢的生长;效应最大的因素是留叶数,然后分别为插穗长度和插穗来源。逐步回归得出,插穗根系IAAO、SOD、PPO、POD活性和MDA含量构成了影响闽楠扦插苗新梢生长的重要因素。其中,回归系数大于0.2的仅有MDA含量(9.782)和IAAO活性(0.986),因此IAAO活性和MDA含量是影响闽楠扦插苗新梢生长的关键两个指标,而影响IAAO活性和MDA含量最大的插穗因素是留叶数,在C2(留2片全叶)水平其活性都处在最高水平。由此可得,可通过闽楠插穗留叶数量来调控扦插苗根系IAAO活性和MDA含量,从而有效促进闽楠扦插苗新梢的生长。

参考文献:

- [1] 王艺,王秀花,吴小林,等.缓释肥加载对浙江楠和闽楠容器苗生长和养分库构建的影响[J].林业科学,2013,49(12):57-63.
- WANG Y, WANG X H, WU X L, et al. Effects of slow-release fertilizer loading on growth and construction of nutrients reserves of *Phoebe chekiangensis* and *Phoebe bournei* container seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(12): 57-63.
- [2] 程林林,尹光天,黄雨芹,等.闽楠种源家系种质早期生长评估及选择[J].分子植物育种,2018,16(15): 5 108-5 116.
- CHENG L L, YIN G T, HUANG Y Q, et al. Early growth evaluation and selection of germplasm resources of *Phoebe bournei* provenances/families[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(15): 5 108-5 116.
- [3] 吴大荣,吴永彬.闽楠(*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang)种群的天然更新[J].植物资源与环境学报,1998,7(3): 8-12.
- WU D R, WU Y B. Regeneration of *Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang population[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1998, 7(3): 8-12.
- [4] 刘骏,薛莉,田地,等.森林转化对乔木地上部分与土壤的碳氮储量及分配格局的影响[J].生态学杂志,2018,37(10): 3 047-3 052.
- LIU J, XUE L, TIAN D, et al. Effects of forest conversion on carbon and nitrogen storage and distribution of the aboveground part of trees and soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(10): 3 047-3 052.
- [5] 吴大荣,王伯荪.濒危树种闽楠种子和幼苗生态学研究[J].生态学报,2001,21(11): 1 751-1 760.
- WU D R, WANG B S. Seed and seedling ecology of endangered *Phoebe bournei* (Lauraceae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1 751-1 760.
- [6] 刘军,姜景民,陈益泰,等.闽楠种子轻基质容器育苗及优良家系选择[J].西北林学院学报,2011,26(6): 70-73.
- LIU J, JIANG J M, CHEN Y T, et al. Cultural techniques of container seedlings with light medium and family selection for *Phoebe bournei*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(6): 70-73.
- [7] 王向前.不同扦插基质及不同浓度IBA处理对闽楠生根的影响[J].安徽农学通报,2017,23(17): 98-99+105.
- WANG X Q. Effects of different factors on cutting rooting of *Phoebe bournei* [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(17): 98-99+105.
- [8] 戚华沙,黄赛,王景飞,等.烟叶唇柱苣苔叶片扦插繁殖方法的筛选[J].分子植物育种,2018,16(2): 535-540.
- QI H S, HUANG S, WANG J F, et al. Screening of leaf cottage propagation methods for *Chirita heterotricha*[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(2): 535-540.
- [9] 王东光.闽楠嫩枝扦插繁殖技术及生根机理研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013.
- [10] 苏村水.闽楠扦插繁殖技术研究[J].安徽农学通报,2011,17(13): 26-28.
- SU C S. Study on *Phoebe bournei* cutting propagation technologies[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2011, 17(13): 26-28.
- [11] 申展,李铁华,文仕知,等.不同因素对闽楠嫩枝扦插生根的影响[J].中南林业科技大学学报,2013,33(1): 63-67.
- SHEN Z, LI T H, WEN S Z, et al. Effects of different factors on cutting rooting of *Phoebe bournei* twigs[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(1): 63-67.
- [12] 王东光,尹光天,邹文涛,等.不同基质和季节对闽楠嫩枝扦插生根的影响[J].热带作物学报,2013,34(8): 1 458-1 462.
- WANG D G, YIN G T, ZOU W T, et al. Effects of different substrates and seasons on shoot cutting propagation of *Phoebe bournei*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(8): 1 458-1 462.
- [13] 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 H H, KANG X Y, WANG X F. 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.
- [14] 马小军, 高微微, 张丽萍, 等. 全光喷雾和生长调节剂对杜仲插穗的影响[J]. 中国医学科学院学报, 2001, **23**(6): 552-555. MA X J, GAO W W, ZHANG L P, et al. Effects of growth regulator, full exposure and mist spray on the cutting *Eucimnia ulmoides* [J]. *Acta Academicae Medicinae Sinicae*, 2001, **23**(6): 552-555.
- [15] 张锦春, 刘有军, 王方琳, 等. 沙生柽柳扦插生根过程插穗相关理化特征分析[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(3): 484-492. ZHANG J C, LIU Y J, WANG F L, et al. Physiological and biochemical characteristics of *Tamarix taklamakanensis* cuttings during rooting stages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(3): 484-492.
- [16] 王政, 王照路, 申萍, 等. 牡丹试管苗与扦插苗生根过程中相关酶活性的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(10): 193-198. WANG Z, WANG Z L, SHEN P, et al. Change in activities of related enzymes during rooting of peony shoots in vitro and cutting seedlings[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science Edition), 2014, **42**(10): 193-198.
- [17] PREGITZER K S. Fine roots of trees: A new perspective[J]. *New Phytologist*, 2002, **154**: 267-270.
- [18] 胡勤鸿, 欧阳芳群, 贾子瑞, 等. 不同穗条类型、长度的欧洲云杉扦插苗质量评价[J]. 林业科学研究, 2016, **29**(6): 919-925. HU M H, OUYANG F Q, JIA Z R, et al. Quality evaluation on Norway spruce cuttings with different types and lengths[J]. *Forest Research*, 2016, **29**(6): 919-925.
- [19] 李德友, 张少峰, 冯春莹, 等. 套袋对油梨果实生长发育及品质动态变化的影响[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(1): 102-111. LI D Y, ZHANG S F, FENG C Y, et al. Effect of bagging on growth and dynamic change in quality of avocado fruits [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(1): 102-111.
- [20] 王岚, 戴闽琪, 严重玲. 磷镉交互作用对白骨壤幼苗体内镉的亚细胞分布和生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(4): 640-646. WANG L, DAI M Y, YAN C L. Effects of phosphorus and cadmium interaction on cadmium subcellular distribution and physiological characteristics in *Avicennia marina* (Forsk.) Vieth seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(4): 640-646.
- [21] 刘盟盟, 贾丽, 程路芸, 等. 冷蒿酚酸及其抗氧化防御酶活性对机械损伤的响应[J]. 植物生态学报, 2017, **41**(2): 219-230. LIU M M, JIA L, CHENG L Y, et al. Responses of phenolic acid and defensive enzyme activities to mechanical damage in *Artemisia frigida*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, **41**(2): 219-230.
- [22] 许冰霞, 尹美强, 温银元, 等. 谷子萌发期响应干旱胁迫的基因表达谱分析[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(8): 1431-1447. XU B X, YIN M Q, WEN Y Y, et al. Gene expression profiling of *Foxtail Millet* (*Setaria italica* L.) under drought stress during germination[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(8): 1431-1447.
- [23] 王小玲, 赵忠, 高柱. 四倍体刺槐插条不定根发生的营养物质变化[J]. 江西农业大学学报, 2012, **34**(4): 724-729. WANG X L, ZHAO Z, GAO Z. Changes of nutrients in adventitious root formation of tetraploid *Robinia pseudoacacia* cuttings[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (Natural Sciences Edition), 2012, **34**(4): 724-729.
- [24] 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 J H, LI W. 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.
- [25] 高风华, 经希天, 司凤义, 等. 杨树不同品种插穗自身含水量与扦插成活的关系[J]. 吉林林业科技, 2009, **38**(4): 8-12. GAO F H, JING X T, SI F Y, et al. Relationship between moisture contents of cuttings and survival rates for different poplar varieties[J]. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 2009, **38**(4): 8-12.
- [26] 谢志南, 钟赞华, 张雪芹, 等. 失水胁迫对三角梅插穗叶片光合作用的影响[J]. 江西农业学报, 2009, **21**(4): 36-38. XIE Z N, ZHONG Z H, ZHANG X Q, et al. Effects of water loss stress on leaf photosynthesis of *Bougainvillea spectabilis* cuttings[J]. *Acta Agricultrae Jiangxi*, 2009, **21**(4): 36-38.
- [27] 白晓燕, 王力荣, 王新卫, 等. 桃砧木组织培养和扦插生根的解剖学观察[J]. 果树学报, 2015, **32**(1): 74-78. BAI X Y, WANG L R, WANG X W, et al. Microscopic observation on adventitious root development of micropropagation and cutting propagation on peach rootstock[J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, **32**(1): 74-78.
- [28] RRHMANI M S, CHEN Q, YAN J, et al. A novel stress-responsive *BnaNAL1* transcriptional activator in oilseed rape positively modulates reactive oxygen species production and cell death[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **163**: 1-14.
- [29] XIONG F, LIAO J, MA Y, et al. The protective effect of exogenous putrescine in the response of tea plants (*Camellia sinensis*) to salt stress[J]. *Hort Science*, 2018, **53** (11): 1640-1646.
- [30] 汪凤林, 马志慧, 叶义全, 等. 缺镁对杉木根系活力及抗氧化酶活性影响研究[J]. 西北林学院学报, 2018, **33**(2): 16-19. WANG F L, MA Z H, YE Y Q, et al. Physiological responses of *Cunninghamia lanceolate* roots to magnesium deficiency[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, **33**(2): 16-19.

(编辑:裴阿卫)