

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220560

# 铝胁迫下马尾松二代家系苗生长规律与筛选

李 鹏<sup>1</sup>, 谭健晖<sup>1</sup>, 杨章旗<sup>1\*</sup>, 罗群凤<sup>1</sup>, 凌金燕<sup>2</sup>,  
陈 虎<sup>1</sup>, 陈钊铭<sup>2</sup>, 贾 婕<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院 国家林草局马尾松工程技术研究中心 广西马尾松工程技术研究中心 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西南宁 530002; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541006)

**摘要:** [目的] 铝胁迫是限制植物生长的重要非生物胁迫因子, 严重制约我国南方酸性土壤森林生产力水平。为探明酸铝环境下马尾松幼苗生长变异规律, 筛选出适应酸性环境耐铝毒家系和敏感性家系, 为马尾松耐铝胁迫遗传改良提供依据。[方法] 以 55 个马尾松二代优良家系 (201~255) 幼苗为材料, 采用沙培方式研究酸性环境 (pH=4.0) 不同铝浓度 (0、0.1、0.3、0.6、1.2、2.4 mmol·L<sup>-1</sup>) 马尾松苗生长和根系形态变化规律, 并通过主成分分析和聚类分析对马尾松耐铝特性进行分等定级, 筛选和鉴定马尾松幼苗耐铝优良家系。[结果] 苗高、地径、高径比、生物量 (地上生物量、根生物量、总生物量、根冠比)、根系形态 (总根长、根表面积、根体积) 在家系间和铝浓度处理间均存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。随铝浓度增加马尾松幼苗地径、苗高、生物量和根系形态指标均呈现先升后降趋势, 在 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度下最大, 显著高于 0、2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 处理, 而与 0.3 mmol·L<sup>-1</sup> 处理无显著差异, 其中根生物量、总根长、根表面积和根体积的变异系数较大, 平均为 30.79%, 属中等变异, 根系可作为马尾松幼苗适应酸铝环境敏感性器官。用上述 10 个指标计算家系间耐铝特性综合评价价值 (CEV) 和系统聚类, 筛选出强度耐铝型家系 3 个 (占 5.45%), 中度耐铝型家系 11 个 (占 20%), 一般耐铝型家系 37 个 (占 67.28%), 铝敏感型家系 4 个 (占 7.27%)。[结论] 适宜铝浓度能够促进马尾松生长, 尤其是 0.3~0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度下促进效果佳, 筛选得到耐铝型和敏感型家系对马尾松耐铝性状改良具有重要意义。

**关键词:** 马尾松; 二代家系; 铝胁迫; 耐铝特性; 主成分分析

**中图分类号:** S728.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2023)05-0121-10

亚热带酸性红壤是我国南方主要的土壤形式, 其形成过程是脱硅铝化与生物富集两个相互矛盾过程长期作用结果<sup>[1]</sup>。脱硅富铝是红壤所进行的一种地球化学过程, 酸铝环境是其土壤的主要存在形式, 也是植物主要胁迫因素之一<sup>[2]</sup>。当土壤 pH < 4.5 强酸性时, 会导致土壤中重金属及铝离子大量释放、活化, 极易诱发重金属及铝毒害<sup>[3-4]</sup>, 其中以游离态 Al<sup>3+</sup> 的毒性最大, 抑制植物生长, 降低

植物产量<sup>[5]</sup>。尤其是我国南方地区, 59.8% 为红壤偏酸性<sup>[6]</sup>, 土壤的酸化使土壤中螯合态铝淋出, 解离为游离态铝, 对植物产生毒害作用<sup>[7-8]</sup>, 铝 (Al) 毒成为酸性土壤中植物生长的主要制约因素。因此, 明晰酸性环境下铝胁迫对植物生长规律的影响以及筛选耐铝胁迫的优良家系尤为重要。

铝对植物生长的影响主要包括: 一方面适量铝能够促进植物的生长<sup>[9-11]</sup>; 另一方面, 铝含量增加

收稿日期: 2022-11-21 修回日期: 2023-03-11

基金项目: 广西优良用材林资源培育重点实验室开放课题 (2020-A-02-03); 广西自然科学基金 (2019GXNSFDA245033); 广西科技基地和人才专项 (桂 AD19254004); 八桂学者项目 (2019A026) 资助。

作者简介: 李鹏, 硕士, 工程师。主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治及森林土壤。电话: 15177460233, Email: 1055122499@qq.com

\* 通讯作者: 杨章旗, 博士, 教授级高级工程师。主要研究方向: 林木遗传育种及森林培育。电话: 13978858085,

Email: Yangzhangqi@163.com

时,铝会产生植物毒性。铝抑制了植物根尖细胞的伸长和分裂,使根的直径较小、根系表面积减小、根变得短粗而扭曲,根毛和须根稀少,根尖膨大<sup>[12-13]</sup>。张盛楠等<sup>[14]</sup>对马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)幼苗进行铝胁迫试验,表明低浓度的铝对于马尾松的生长具有一定的促进作用,而在高浓度下,铝会抑制马尾松幼苗的生长。也有学者对于秋葵(*Abelmoschus esculentus*)<sup>[15]</sup>、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)<sup>[16]</sup>等幼苗进行铝胁迫试验,结果均表明在适量的铝浓度范围内,植物会呈现一定适应性,但当铝含量过高时,则出现铝的毒害性。此外,铝对植物幼苗根部的毒害较大,植物根从土壤吸收水分和养分的主要部位是根尖的根毛区,其次是伸长区<sup>[17]</sup>,当这两个部位的铝含量过高时,会抑制对其他营养元素的吸收,其吸收功能减弱,致使植物摄取营养元素和微量元素较少,从而影响植物的生长。

马尾松是我国湿润亚热带地区分布最广、资源最多的针叶树种,主要分布于南方省区,具有速生、丰产、适生性强、用途广等优良特性,一直是南方造林的先锋树种<sup>[18]</sup>。南方土壤普遍偏酸性,酸性土壤中的活性铝,是影响马尾松林的生长,导致马尾松大面积衰退和减产的主要原因<sup>[1]</sup>。作为南方优势用材树种,马尾松在漫长的进化历程中,孕育了丰富的遗传多样性资源,使得不同种源、家系对酸铝环境的反应式样差异较大<sup>[19]</sup>。明晰马尾松在酸性环境中对铝浓度变化的生长响应规律,筛选马尾松耐铝胁迫优良家系,提高马尾松的耐铝能力,已成为亟待解决的热点问题。目前,不同种源马尾松对酸铝环境的适应性筛选<sup>[20]</sup>,以及酸铝环境下马尾松根系的分泌特性、根系分泌物对酸铝土壤微生态及马尾松铝毒的调控作用<sup>[21-23]</sup>等方面已有研究,而马尾松已进入高世代育种阶段,尤其是二代家系水平下马尾松幼苗适应酸铝环境的变化规律,以及耐酸铝环境优良二代家系筛选方面仍相对缺乏。因此,为探明酸性环境下铝胁迫对马尾松二代家系生长、根系形态变异规律影响,筛选品系优良耐铝胁迫家系,本文以马尾松二代种子园55个优良家系为研究对象,采用沙培方式,开展酸性环境下不同铝浓度马尾松生长、表型变异规律的研究,并运用主成分分析、聚类分析等综合评估不同家系马尾松耐铝能力和等级的划分,主要研究目标是1)明晰

酸铝环境下马尾松幼苗生长变异规律,2)筛选出马尾松幼苗的耐铝毒家系和敏感性家系,为马尾松耐铝胁迫的遗传改良和推广、应用提供理论基础。

## 1 研究区概况

试验在广西壮族自治区林业科学研究院苗圃防雨大棚(108°20'32"~108°21'10" E, 22°50'22"~22°50'40" N)进行。属亚热带季风气候,阳光充足,雨量充沛,霜少无雪,气候温和,夏长冬短,年平均气温21.6℃,冬季最冷的1月平均12.8℃,夏季最热的7、8月平均28.2℃,年均降水量1304.2 mm,平均湿度为80%,雨季主要集中在5—9月,旱季主要集中在10月—次年4月,海拔80 m。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料与处理

试验材料为55个马尾松优良家系(编号201~255),种子于2019年10月采自广西国有派阳山林场国家级良种基地马尾松二代种子园。于2020年12月在广西林科院松树良种繁育中心育苗,选取不同家系饱满种子,清洗干净,经灭菌后于育种盘中发芽。采用沙培的培养方式,选取0.2~1.0 mm纯石英砂,砂子先用3%稀盐酸浸渍1周,再用水冲洗至水无明显的氯离子反应为止,发芽后,2021年1月将其转移至装有石英砂的无纺纤维布容器(直径8 cm,高12 cm),每杯1株,每个家系150株。2021年3月,各家系选择生长基本一致苗木90株进行胁迫试验,胁迫前幼苗分别于1月生和1.5月生时采用1/4霍格兰氏完全营养液浇灌,每杯10 mL以维持苗木正常生长;2月生时采用1/4格兰仕完全营养液浇灌,直至营养液同砂粒接触24 h内pH(pH=4.00±0.05)基本无变化为止,缓苗2周后开始胁迫试验(家系苗高6.12±0.11 cm、地径0.42±0.05 mm)。

### 2.2 试验设计

设置家系与铝浓度2因素完全随机区组试验,每个家系分别设置6个处理,铝浓度分别为0、0.1、0.3、0.6、1.2和2.4 mmol·L<sup>-1</sup>,每个处理重复3次,每个重复30株。用氯化铝(AlCl<sub>3</sub>)分析纯控制铝含量,根据铝的各设计水平分别供给;用NaOH和HCl调整土壤pH值,pH维持在

4.00 ± 0.05。配制不同铝浓度的 1/4 格兰仕完全营养液, 每天浇 1 次 10 mL, 中间酌情补充水分。培养过程中每隔 20 d 浇灌 1 次 0.05% 的百里酚溶液抑制微生物活动。处理 60 d 后收获, 测定各生长和根系形态指标。

### 2.3 测定项目及方法

胁迫处理 60 d 后, 用游标卡尺和钢直尺测量每株马尾松幼苗的地径(精确到 0.01 mm)和苗高(精确到 0.01 cm); 然用自来水不断冲洗沙杯, 小心取出整株幼苗, 冲洗干净。利用霍尔德根系图像扫描分析系统(WinRHIZO)测定总根长、表面积和体积; 然后将幼苗分成根和地上部分, 在 105 °C 杀青 5 min 再 65 °C 烘干至质量恒定, 测量各组分(根系和地上部分)的干物质质量。并计算高径比(高径比=苗高/地径)和根冠比(根冠比=根系干质量/地上部干质量)。

### 2.4 数据分析与处理

2.4.1 耐铝系数的确定 参考崔博文等<sup>[24]</sup>的方法, 引入耐铝系数公式(1), 表征铝胁迫下植物生长受限制的大小。

$$RAIC = MV_{al}/MV_n \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $RAIC$  为耐铝系数;  $MV_{al}$  为铝胁迫下测定值;  $MV_n$  为正常铝胁迫下测定值。

2.4.2 耐铝能力综合评价和等级划分 (1) 数据标准化 运用隶属度函数公式(2)对数据进行标准化(归一化)处理。

$$N_i = (RAIC_i - RAIC_{min}) / (RAIC_{max} - RAIC_{min}) \quad (2)$$

式中:  $N_i$  为第  $i$  个指标的归一化数值,  $RAIC_i$  为第  $i$  个指标耐铝系数,  $RAIC_{max}$  为和  $RAIC_{min}$  为参试家系第  $i$  个指标的最大和最小值。

(2) 主成分分析与权重的确定 主成分分析是通过指标降维方式筛选指标冗余变量及线性关系, 将零散的变量进行整合处理, 运用线性回归方程进行主成分个数的确定, 并计算主成分中解释方差贡献率, 提取特征值 > 1 主成分类型, 进而确定主成分荷载矩阵。

权重的确定方法为: 将每个指标对应的主成分荷载矩阵乘以其对应成分的方差贡献率, 再除以其综合方差贡献率, 即为该指标的权重。

$$\Delta_i = (\sum_j^n R_{ij} \times VCR_j) / TVCR \quad (3)$$

$$W_i = e^{\Delta_i} / \sum_i^n e^{\Delta_i} \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个指标的权重,  $\Delta_i$  为第  $i$  个指标荷载占比,  $R_{ij}$  为主成分荷载矩阵,  $VCR_j$  为第  $j$  个主成分的方差贡献率,  $TVCR$  为特征值 > 1 的主成分累积方差贡献率。

(3) 综合评价价值 采用加权隶属度值公式, 计算综合评价价值(CEV)。

$$CEV_j = \sum_i^n (W_i \times N_i) \quad (5)$$

式中:  $CEV_j$  为第  $j$  个家系综合评价价值,  $W_i$  和  $N_i$  分别为第  $i$  个指标权重和隶属度值。

(4) 聚类分析 利用 SPSS 软件进行系统聚类分析, 以综合评价价值(CEV)为指标, 采用 Euclidean-Complete 法计算欧式距离, 将 55 个家系聚类为不同耐铝类型。

2.4.3 数据的处理 采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件进行数据的运算和图表的绘制。对不同家系和铝浓度各指标进行双因素方差分析(Two-way ANOVA)。采用 Duncan 多重比较法检验比较不同铝浓度各指标差异显著性, 显著性水平为  $p < 0.05$ 。

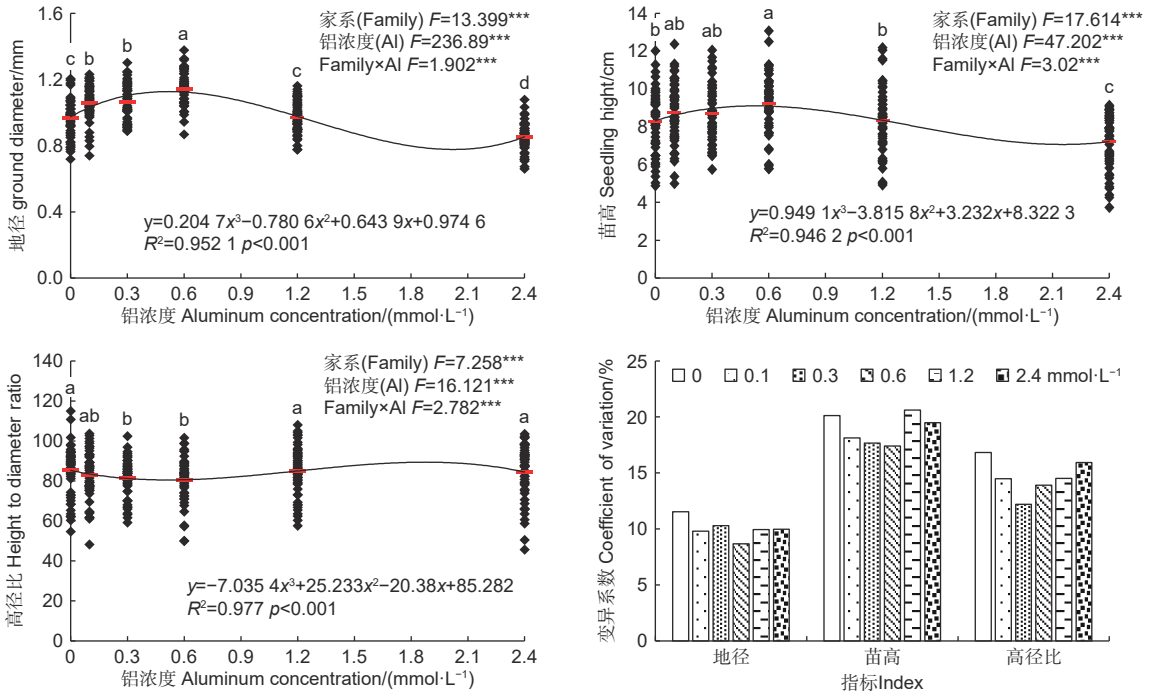
## 3 结果与分析

### 3.1 铝胁迫对马尾松幼苗地径和苗高的影响

双因素方差分析(图 1)显示, 不同家系和铝浓度及其之间的交互作用对马尾松幼苗地径、苗高和高径比均具有极显著性影响( $p < 0.001$ )。马尾松幼苗地径、苗高和高径比家系变异系数为 8.67%~20.63%, 变异系数大小为苗高(平均 18.91%) > 高径比(平均 14.65%) > 地径(平均 10.04%)。随铝浓度增加地径和苗高均呈现先增加后减小的趋势, 在 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 时苗高和地径生长量最大, 分别为 1.14 mm 和 9.25 cm, 均显著高于 0、1.2 和 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理; 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理下苗高和地径生长量最小, 分别为 0.85 mm 和 7.22 cm, 且显著低于其它处理。不同家系幼苗高径比范围为 45.66~126.02, 平均为 83.36, 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理下最小为 80.69, 显著低于 0、1.2 和 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理。

### 3.2 铝胁迫对马尾松幼苗生物量的影响

双因素方差分析(图 2)显示, 不同家系和铝浓度及其之间的交互作用对马尾松幼苗生物量和根



注: \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$ ; 下同

Notes: \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$ ; The same below

图 1 不同铝浓度马尾松幼苗地径、苗高变化及变异系数

Fig. 1 Variation of ground diameter, seedling height and coefficient of variation with different aluminum concentrations of *P. massoniana* seedlings

冠比均具有显著性影响 ( $p < 0.05$ )。马尾松幼苗根系生物量和根冠比家系变异较大, 变化范围为 19.15%~37.29%, 属中度变异, 各指标变异系数大小为根冠比 (平均 28.66%) > 根系生物量 (平均 26.75%) > 地上部分 (平均 6.03%) > 整株生物量 (平均 5.64%), 表明根系是酸铝环境下马尾松幼苗敏感性器官。随铝浓度增加根系、地上部分和整株生物量均呈现先增加后减小的趋势, 在 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 时最大, 平均值分别为 0.091 8 g、0.702 4 g 和 0.794 3 g, 均显著高于 0、0.1 和 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理, 而与 0.3 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理下无显著差异; 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理下生物量最小, 且显著低于其它处理。不同铝浓度幼苗根冠比呈现先增加后减小再增加过程, 在 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 时最大为 0.1316, 显著高于 0、0.1 和 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理。

### 3.3 铝胁迫对马尾松幼苗根系形态的影响

双因素方差分析 (图 3) 显示, 不同家系和铝浓度对马尾松幼苗总根长、根表面积和体积均具有显著性影响 ( $p < 0.05$ ), 家系和铝浓度的交互作用对总根长和根表面积具有显著性影响, 对根体积

无显著影响。马尾松幼苗根系形态指标变异系数比较均匀, 变化范围为 21.84%~44.97%, 各指标变异系数大小为根体积 (40.13%) > 根表面积 (29.98%) > 总根长 (26.28%), 均属中度变异。随铝浓度增加总根长、根表面积和体积均呈现先增加后减小的趋势, 在 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 时最大, 平均值分别为 272.82 cm、110.19 cm<sup>2</sup> 和 4.92 cm<sup>3</sup>, 均显著高于 0、0.1、1.2 和 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理, 而与 0.3 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理下无显著差异。不同铝浓度幼苗根冠比呈现先增加后减小再增加过程, 在 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 时最大为 0.1316, 显著高于 0、0.1 和 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理。

### 3.4 不同家系马尾松耐铝系数、隶属度值

根据上述试验结果, 采用 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> 铝浓度处理的测定值与 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 处理下测定值的比值乘以 100% 作为耐铝系数, 并依据隶属度函数计算得到 55 个马尾松二代优良家系隶属度值 (图 4)。在铝胁迫环境下, 不同家系马尾松的耐铝系数差别较大, 其耐铝系数因家系不同而表现较大差别, 表明各指标在马尾松耐铝特性中所发挥的作用不尽相同, 不同测定指标因家系差异所表现出的耐受性并

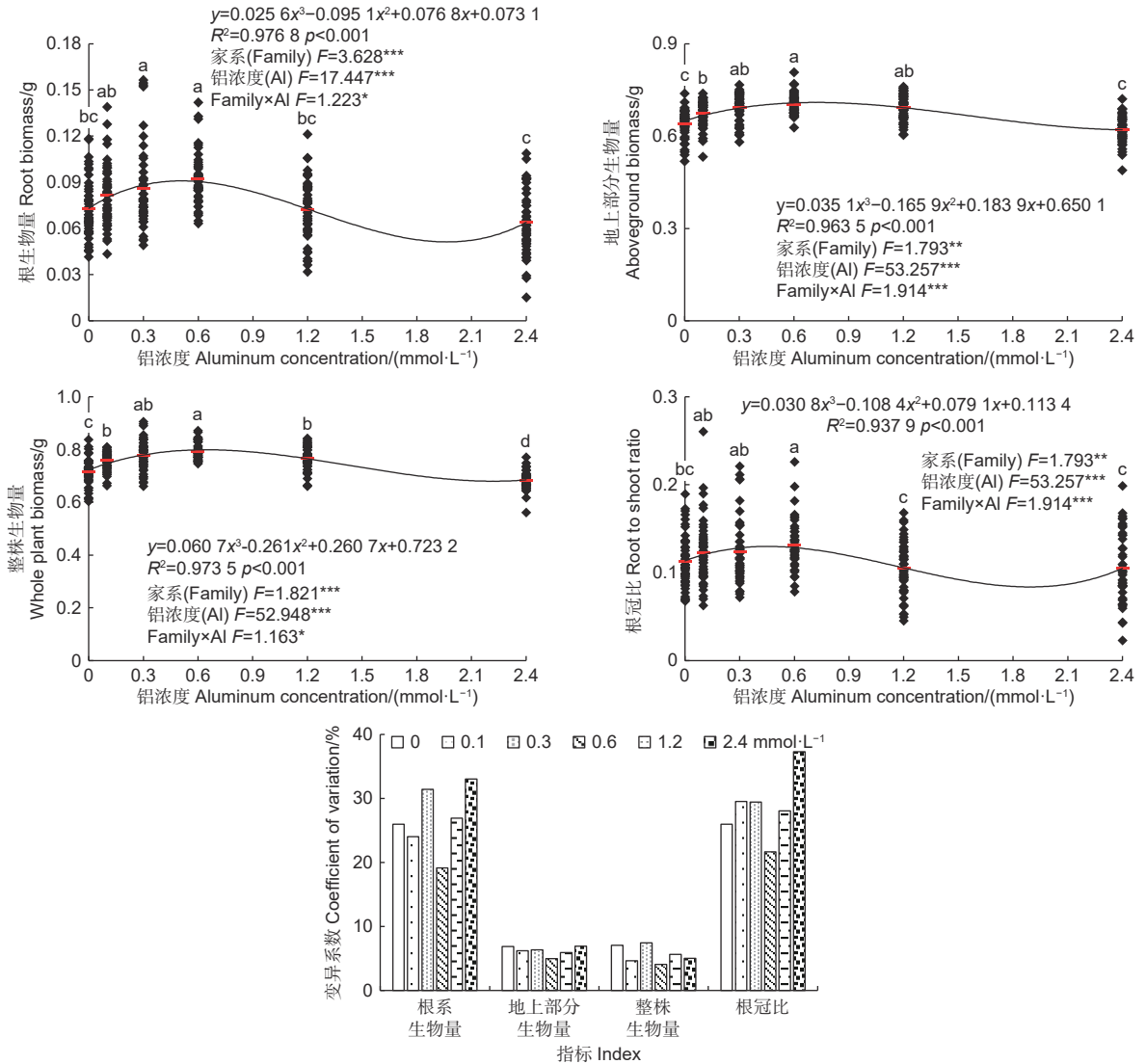


图 2 不同铝浓度马尾松幼苗生物量变化及变异系数

Fig. 2 Changes of biomass and coefficient of variation with different aluminum concentrations of *P. massoniana* seedlings

不一致, 因此, 仅使用一个单一指标评价各家系的耐铝特性是不够的。

### 3.5 不同家系马尾松耐铝特性主成分分析

对 10 个生长特性指标进行主成分分析, KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 统计量 = 0.471, 巴特利特 (Bartlett) 球形度检验  $F=575.048$ , 自由度 ( $df$ ) = 45,  $p<0.001$ , 表明适合进行主成分分析。选择特征值 >1 的主成分有 4 个, 累积方差贡献率为 87.57%, 这 4 个主成分解释了大部分信息 (表 1)。第 1 主成分 (PC1) 方差贡献率为 30.48%, 高因子荷载包括总根长、根表面积、根体积; 第 2 主成分 (PC2, 方差贡献率为 23.07%) 由根生物量、地上部分生物量、根冠比组成; 第 3 主成分

(PC3, 方差贡献率为 21.87%) 由苗高、地径组成; 第 4 主成分 (PC4, 方差贡献率为 21.87%) 由整株生物量组成。

### 3.6 不同家系马尾松耐铝特性综合评价及聚类分析

利用上述 10 个指标, 计算求得 55 个二代马尾松优良家系耐铝特性综合评价值 (CEV) 及排序 (图 5A), 其中 CEV 平均为 36.64%, 变化幅度为 22.1%~63.19%, 变异系数为 22.51%, 属中等耐铝变异水平。结合聚类分析 (图 5B), 当欧式距离为 10 时将 55 个二代家系按耐铝能力的强弱被划分为 4 类, 其中排名前三的家系为 251、252、241, CEV 平均为 63.19%、60.33%、55.74%,

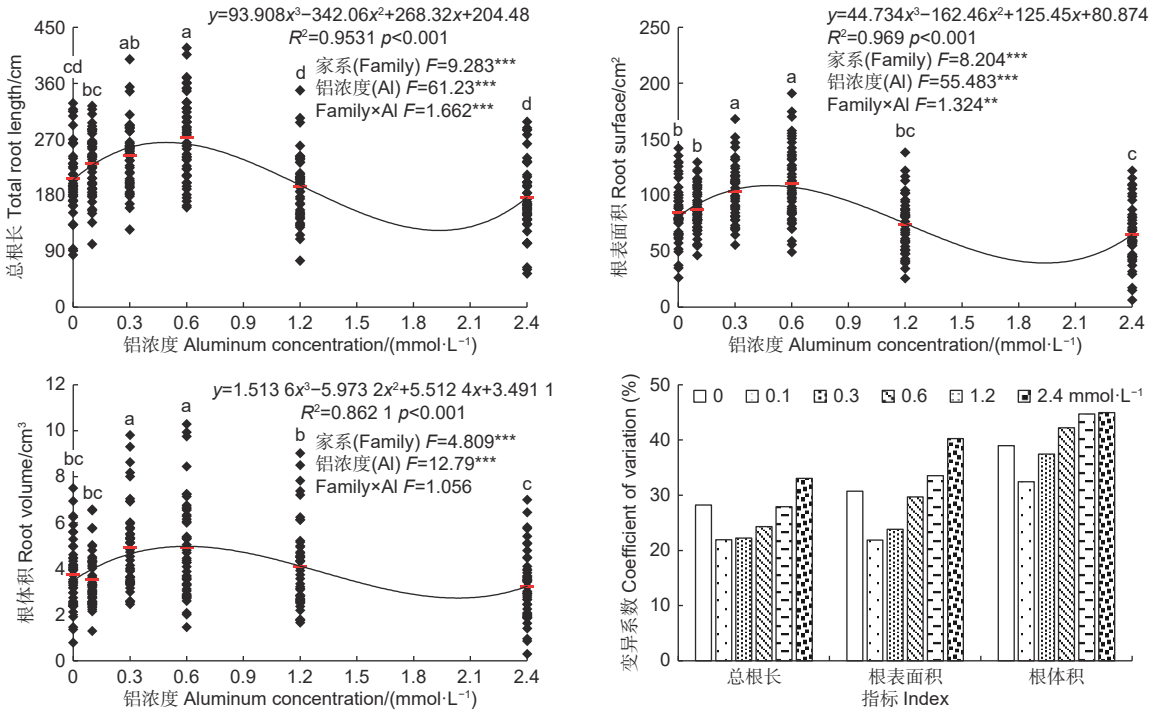


图 3 不同铝浓度马尾松幼苗根系形态变化及变异系数

Fig. 3 Changes of root morphological and coefficient of variation with different aluminum concentrations of *P. massoniana* seedlings

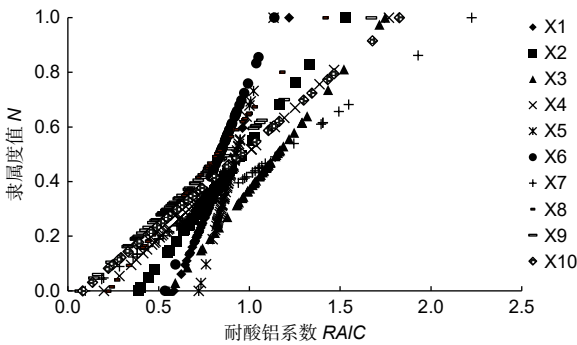


图 4 不同家系马尾松耐铝系数和隶属度值

Fig. 4 Aluminum tolerance coefficient and membership value of different families of *P. massoniana*

注：X1，地径；X2，苗高；X3，高径比；X4，根生物量；X5，地上部分生物量；X6，整株生物量；X7，根冠比；X8，总根长；X9，根表面积；X10，根体积，下同

Notes : X1, ground diameter ; X2, seedling height ; X3, height-diameter ratio, X4, root biomass ; X5, aboveground biomass ; x6, whole plant biomass ; X7, root-shoot ratio ; X8, total root length ; X9, root surface area ; X10, root volume. The same in Table 1 and Fig.5

属强度耐铝家系 (I)，占总家系的 5.45%；248、248、249、201、239、253、238、202、204、234、216、211 共 11 个家系，CEV 变化幅度为 44.1%~51.15%，属中度耐铝家系 (II)，占总家系的 20%；250、246、208、243 共 4 个家系

(IV)，CEV 变化幅度为 22.1%~25.85%，属铝敏感型家系，占总家系的 7.27%；其它 37 个家系 CEV 变化幅度为 27.98%~42.51%，属一般耐铝家系 (III)，占总家系的 67.28%。

## 4 讨论

### 4.1 铝胁迫下马尾松二代家系幼苗生长规律

铝胁迫作为亚热带酸性红壤地区植物生长主要的胁迫因素之一<sup>[1]</sup>，适宜浓度铝能够促进植物生长，而铝含量增加时，会产生植物毒性，抑制植物对其他营养元素的吸收，致使植物摄取营养元素和微量元素较少，从而影响植物的生长<sup>[25]</sup>。本研究中，在酸性环境下 (pH=4.0) 随铝浓度增加马尾松幼苗地径、苗高、生物量和根系形态指标均呈现先升后降趋势，马尾松适宜铝浓度为 0.3~0.6 mmol·L<sup>-1</sup>，尤其是 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> 时二代马尾松家系幼苗适应酸铝环境的生长效应最佳。这与汪远秀<sup>[26]</sup>、张盛楠<sup>[14]</sup> 等研究结果相似，即耐铝范围内能够促进马尾松幼苗根系生长及生物量的积累。而不同研究中适宜马尾松幼苗生长酸铝环境并不一致，汪远秀等<sup>[26]</sup> 研究中 pH=5.0 ± 0.5 条件下马尾松适应 Al<sup>3+</sup> 的浓度范围为 0~0.4 mmol·L<sup>-1</sup>；纪雨

表 1 铝胁迫下成分载荷矩阵与指标权重

Table 1 Component loading matrix and index weight under aluminum stress

指标	主成分				荷载占比 $\Delta_i$	权重 $W_i/\%$
	PC1	PC2	PC3	PC4		
X1 地径	-0.404	-0.141	0.681	-0.269	-2.539	7.85
X2 苗高	-0.628	0.329	0.664	-0.153	0.716	8.32
X3 高径比	-0.542	0.493	0.529	-0.048	3.733	8.78
X4 根生物量	-0.147	-0.729	0.536	0.246	-4.216	7.62
X5 地上部分生物量	0.073	0.848	-0.151	0.360	14.631	10.66
X6 整株生物量	0.058	0.447	0.362	0.734	18.509	11.43
X7 根冠比	0.127	-0.663	0.249	0.568	0.584	8.30
X8 总根长	0.795	0.083	0.475	-0.201	21.812	12.12
X9 根表面积	0.879	0.122	0.419	-0.147	23.673	12.53
X10 根体积	0.864	0.155	0.313	-0.054	23.096	12.40
特征值	3.048	2.307	2.187	1.215		
方差贡献率 /%	30.483	23.067	21.865	12.152		
累积方差贡献率 /%	30.483	53.550	75.415	87.568		

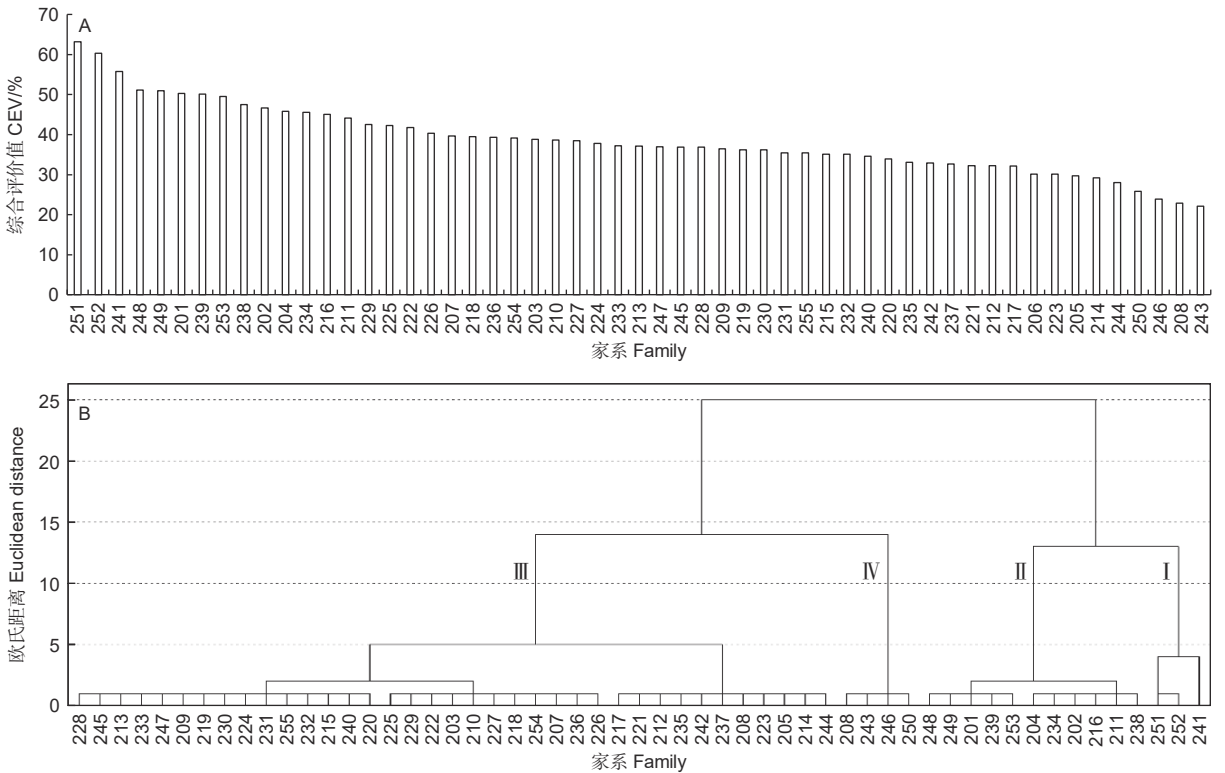


图 5 不同家系马尾松耐铝特性综合评价价值和聚类分析谱系图

Fig. 5 Comprehensive evaluation value and cluster analysis pedigree diagram of aluminum resistance characteristics of different families of *P. massoniana*

薇<sup>[20]</sup> 研究表明 pH=4.0 ± 0.5 条件下马尾松在低浓度 0.2 mmol·L<sup>-1</sup> 一定程度上促进马尾松根系和茎的生长; 赵志刚等<sup>[27]</sup> 研究表明, 当 pH 低于

4.5, Al<sup>3+</sup> 浓度达到 0.37 mmol·L<sup>-1</sup> 时, 即可对马尾松芽苗的生长产生明显的抑制作用; 而本研究中所采用的酸环境为 pH=4.0 ± 0.05 偏强酸性, 其适宜

铝浓度为  $0.3\sim 0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，其原因可能是一方面酸性环境的改变导致马尾松生长适应铝浓度的差异<sup>[28-29]</sup>，另一方面，南方土壤主要偏酸性，通过林木长期环境适应性进化<sup>[30]</sup>，加之试验材料为马尾松二优良家系，在酸铝环境下具有更优越耐铝特性。

在耐铝范围内，适量  $\text{Al}^{3+}$  的添加能够增加细胞外渗透压，维持植物根系内外的渗透压以及促进植物对矿质等养分元素的吸收<sup>[31]</sup>，这也解释了低铝浓度下  $0\sim 0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  处理下马尾松幼苗生长、生物量和根系形态并未显著增加的原因，而大量  $\text{Al}^{3+}$  增加则会抑制植物对  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收。此外，根系生物量、总根长、根表面积和体积指标变异系数分别为： $26.75\%$ 、 $26.28\%$ 、 $29.98\%$ 、 $40.13\%$ ，均达到中等变异水平，表明根系可能是马尾松幼苗适应酸铝环境敏感性器官，这与赵志刚等<sup>[27]</sup> 研究结果一致，即根系对环境胁迫的反应最敏感，具有重要的生理功能，如吸收传输水分、合成运输养分、固持植物体等功能<sup>[32]</sup>。

#### 4.2 马尾松二代家系幼苗耐铝和敏感型家系筛选

植物生长（地径、苗高）、生物量反应了植物的生长状况，同时苗高、生物量等指标都具有较高的遗传力，而根系作为环境胁迫变化的敏感型器官，可直接采用容易测定的生长和根系形态指标作为评估植物抗逆性的重要指标，进行耐性评价<sup>[33]</sup>。本研究中，马尾松生长、生物量、根系形态指标的耐铝系数因家系不同而表现较大差别，各指标在马尾松耐铝特性中所发挥的作用不尽相同，不同测定指标因家系差异所表现出的耐受性并不一致，这与崔博文等<sup>[24]</sup> 研究结果相一致。因此，选择马尾松生长、生物量、根系形态等指标为评价指标构建酸铝适应性评价体系。与适宜铝浓度相比，在铝胁迫条件下，植物相对生长量可以反映耐铝毒能力，植物较高的相对生长量，说明铝胁迫对它们的生长抑制程度较小，对铝胁迫忍耐程度较高，具有较高的耐铝毒能力<sup>[34]</sup>。通过耐铝系数计算，并结合主成分分析和隶属度函数加权计算得到综合评价值，最终通过聚类分析将 55 个二代马尾松家系划分为 4 类，I 类：强度耐铝型家系 3 个：251、252、241（占  $5.45\%$ ，CEV 变幅  $55.74\%\sim 63.19\%$ ）；II 类：中度耐铝型家系 11 个（占  $20\%$ ，CEV 变幅  $44.1\%\sim 51.15\%$ ）；III 类：一般耐铝型家系 37 个（占  $67.28\%$ ，CEV 变幅  $27.98\%\sim 42.51\%$ ）；

IV 类：铝敏感型家系 4 个（占  $7.27\%$ ，CEV 变幅  $27.98\%\sim 42.51\%$ ）。与纪雨薇<sup>[20]</sup> 利用不同种源马尾松幼苗进行耐铝性家系筛选结果相比，参试家系间在耐铝程度上具有差异，与本文结果相似。最终获得 3 个强度耐铝型家系，11 个中度耐铝型家系，其 CEV 值均在  $44\%$  以上，这些耐铝型家系可作为今后酸化严重和铝含量较高的区域种植的首选家系，同时结合筛选的 4 个铝敏感型家系，对马尾松高世代耐铝材料选育和机制研究提供了理想材料。此外，本研究仅以马尾松幼苗的生长表型指标作为评价依据，而未涉及植物生理生化等特性的研究，下一步将在表型指标筛选的基础上进行生理生化特性、耐铝胁迫抗性机制的结合分析，并与植物代谢组和转录组学等进行结合，从分子、生理方面揭示马尾松优良家系的抗性机制及其分子调控过程，以期为马尾松的分子育种和遗传改良提供基础，同时本研究拟为进一步开展马尾松耐铝环境优良家系选择育种提供材料。

## 5 结论

(1) 在酸性环境下 ( $\text{pH}=4.0$ ) 随铝浓度增加马尾松幼苗地径、苗高、生物量和根系形态指标均呈现先升后降趋势，均在  $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  铝浓度下最大，显著高于  $0$ 、 $2.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  处理，而与  $0.3\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  处理无显著差异，表明沙培条件下马尾松适应铝浓度范围为  $0.3\sim 0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2) 根系生物量、总根长、根表面积和体积指标变异系数分别为： $26.75\%$ 、 $26.28\%$ 、 $29.98\%$ 、 $40.13\%$ ，均达到中等变异水平，表明根系可作为反映马尾松幼苗适应酸铝环境敏感性器官。

(3) 55 个参试家系筛选出 3 个强度耐铝型家系，11 个中度耐铝型家系，37 个一般耐铝型家系，4 个铝敏感型家系，所筛选材料对马尾松耐铝特性的高世代育种、遗传改良和利用具有重要作用。

#### 参考文献：

- [1] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J]. 土壤, 2013, 45 (4): 577-584.
- [2] BALAKUMAR T, HEMANTARANJAN A. Mechanisms of aluminum toxicity and tolerance in plants - perspective and prospective[J]. Advances in Plant Physiology, 2000, 3: 321-333.
- [3] SANCLEMENTS M D, FERNANDEZ I J, NORTON S A. Phosphorus in soils of temperate forests: Linkages to acidity and



- aluminum[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6): 2175-2186.
- [4] KOCHIAN L V, PIÑEROS M A, LIU J P, *et al.* Plant adaptation to acid soils: The molecular basis for crop aluminum resistance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2015, 66(1): 571-598.
- [5] 肖厚军, 王正银. 酸性土壤铝毒与植物营养研究进展[J]. 西南农业学报, 2006, 19(6): 1180-1188.
- [6] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137-3143.
- [7] LIU J P, PIÑEROS M A, KOCHIAN L V. The role of aluminum sensing and signaling in plant aluminum resistance[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2014, 56(3): 221-230.
- [8] 俞元春, 丁爱芳. 模拟酸雨对酸性土壤铝溶出及其形态转化的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 87-90.
- [9] FAN J S, LI Y F, XIE F G, *et al.* Physiological and growth response of sweet corn hybrids to aluminum-induced stress[J]. Journal of Agricultural Science, 2020, 12(8): 71.
- [10] 蒋 琪, 高智席, 吕朝燕, 等. 植物耐铝毒作用机制研究进展[J]. 南方农业, 2016, 10(18): 211-213 + 215.
- [11] 宋 鑫, 徐 杉, 何映辉. 植物耐铝毒机制研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(5): 31-34.
- [12] ISHIKAWA S, WAGATSSUMA, TAWARAYA K. Effect of temporary contact with Al ions on the plasma membrane permeability of root-tip cells in seven plant species[J]. Plant Nutrition Springer Netherlands, 2001, 92: 501-511.
- [13] HUANG W J, YANG X D, YAO S C, *et al.* Reactive oxygen species burst induced by aluminum stress triggers mitochondria-dependent programmed cell death in peanut root tip cells[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2014, 82: 76-84.
- [14] 张盛楠, 刘亚敏, 刘玉民, 等. 马尾松幼苗生长及生理特性对铝胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2016, 36(10): 2022-2029.
- [15] 孙冬花, 田秋英, 张文浩. 铝对秋葵、小麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 云南植物研究, 2006, 28(5): 523-528.
- [16] 罗红艳, 陈潇潇, 石零珊, 等. 不同耐铝型杉木幼苗叶片抗氧化系统对铝胁迫的响应特征[J]. 西北植物学报, 2018, 38(7): 1306-1314.
- [17] SUN P, TIAN Q Y, CHEN J, *et al.* Aluminium-induced inhibition of root elongation in *Arabidopsis* is mediated by ethylene and auxin[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(2): 347-356.
- [18] 杨章旗. 广西松脂原料林发展现状、存在问题与对策研究[J]. 广西林业科学, 2007, 36(3): 143-146.
- [19] 仝雅娜, 丁贵杰. 1, 2代马尾松林土壤不同形态铝含量[J]. 林业科学, 2012, 48(6): 8-11.
- [20] 纪雨薇. 马尾松铝胁迫生理响应机制[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [21] 周思婕, 王 平, 张 敏, 等. 酸胁迫对马尾松幼苗生长及根际铝形态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(6): 1292-1300.
- [22] 刘玉民. 铝酸环境马尾松根系分泌物特性及其缓解铝毒的根际效应[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [23] WANG T, HU Y, CHEN H, *et al.* Transcriptome analysis of response to aluminum stress in *Pinus massoniana*[J]. Forests, 2022, 13(6): 837-837.
- [24] 崔博文, 乔 光, 范付华, 等. 不同种源马尾松种质耐低磷的主成分与灰色关联度分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(8): 49-56.
- [25] ZHANG H H, JIANG Z, QIN R, *et al.* Accumulation and cellular toxicity of aluminum in seedling of *Pinus massoniana*[J]. BMC plant biology, 2014, 14(1): 264.
- [26] 汪远秀, 李快芬, 丁贵杰, 等. 铝对马尾松菌根苗生长及营养元素吸收的影响[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(2): 119-125.
- [27] 赵志刚, 丁贵杰, 唐 敏. 酸、铝胁迫对马尾松种子萌发与芽苗生长的影响[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 111-115.
- [28] SADE H, MERIGA B, SURAPU V, *et al.* Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils[J]. Biometals, 2016, 29(2): 187-210.
- [29] 徐仁扣, 季国亮. pH对酸性土壤中铝的溶出和铝离子形态分布的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 162-171.
- [30] DEBORAH A. S, MESFIN T. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils – a review[J]. Plant Cell Tissue & Organ Culture, 2003, 75(3): 189-207.
- [31] LI C L, LIU G C, GENG X Y, *et al.* Local regulation of auxin transport in root-apex transition zone mediates aluminium-induced *Arabidopsis* root growth inhibition[J]. The Plant Journal, 2021, 108(1): 55-66.
- [32] 吴若菁, 庄 捷, 黄 婧, 等. 马尾松幼苗对模拟酸雨与铝胁迫的响应及其抗性机制[J]. 林业科学, 2009, 45(12): 22-29.
- [33] 崔博文, 乔 光, 范付华, 等. 基于生长指标筛选耐低磷马尾松幼苗优良种源[J]. 种子, 2017, 36(1): 63-67.
- [34] 王水良, 王 平, 王趁义. 铝胁迫对马尾松幼苗根系形态及活力的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2097-2101.

# Growth Regularity and Selection of Second-generation *Pinus massoniana* Family Seedlings under Aluminum Stress

LI Peng<sup>1</sup>, TAN Jian-hui<sup>1</sup>, YANG Zhang-qi<sup>1</sup>, LUO Qun-feng<sup>1</sup>, LING Jin-yan<sup>2</sup>,  
CHEN Hu<sup>1</sup>, CHEN Zhao-ming<sup>2</sup>, JIA Jie<sup>1</sup>

(1. Guangxi Academy of Forestry, National Forestry and Grass Administration, Masson Pine Engineering Technology Research Center, Guangxi Masson Pine Engineering Technology Research Center, Guangxi Key Laboratory of Fine Timber Forest Resources Cultivation, Nanning 530002, China; 2. Collage of Life Science Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541006, China)

**Abstract:** [Objective] Acid-aluminum stress is an important abiotic stress factor limiting plant growth, which seriously restricts the productivity of acid soil forests in southern China. In order to explore the growth variation law under acid aluminum environment of *Pinus massoniana* seedlings, sselect aluminum-tolerant families and sensitive families adapted to aluminum stress, and provide basis for genetic improvement of *Pinus massoniana* under aluminum stress. [Method] The seedlings of 55 second-generation superior families (201 - 255) were used to study the growth and root morphological changes under 0, 0.1, 0.3, 0.6, 1.2 and 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> aluminum concentration in acidic environment by sand culture of *P. massoniana*. The aluminum tolerance characteristics were graded by principal component analysis and cluster analysis. The excellent aluminum tolerance, the superior families of the seedlings were sselected and identified. [Results] There were significant differences in seedling height, ground diameter, height-diameter ratio, biomass (aboveground biomass, root biomass, total biomass, root-shoot ratio), root morphology (total root length, root surface area, root volume) between families and aluminum concentration treatments ( $p < 0.05$ ). The ground diameter, seedling height, biomass and root morphological indexes increased first and then decreased with the increase of aluminum concentration of the seedlings, which was the highest at 0.6 mmol·L<sup>-1</sup> aluminum concentration, significantly higher than that of 0 and 2.4 mmol·L<sup>-1</sup> treatment. There were no significant differences with 0.3 mmol·L<sup>-1</sup> treatment. The coefficient of variation of root biomass and root morphology was large, with an average of 30.79%. Using the above 10 indicators to calculate the comprehensive evaluation value (CEV) and analyze for systematic clustering of aluminum resistance characteristics among families, 3 families with strong aluminum resistance (accounting for 5.45%) and 11 families with moderate aluminum resistance (accounting for 20%) were selected. 37 families (67.28%) with general aluminum tolerance, and 4 families (7.27%) with aluminum sensitivity were evaluated. [Conclusion] Suitable aluminum concentration can promote the growth, especially at the concentration of 0.3-0.6 mmol·L<sup>-1</sup> aluminum. Selecting aluminum-tolerant and sensitive families is of great significance for the improvement of aluminum tolerance of *P. massoniana*.

**Keywords:** *Pinus massoniana*; second generation family; aluminum stress; aluminum resistance characteristics; principal component analysis

(责任编辑: 崔 贝)