

## ◆生态环境◆

磷铝胁迫对马尾松苗期生长的影响及评价<sup>\*</sup>陈钊铭<sup>1</sup>,李鹏<sup>2,3</sup>,陈虎<sup>2,4</sup>,杨章旗<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 广西师范大学生命科学院,广西桂林 541006;2. 广西壮族自治区林业科学研究院,广西南宁 530002;3. 广西优良用材林资源培育重点实验室(广西壮族自治区林业科学研究院),广西南宁 530002;4. 广西马尾松工程技术研究中心,广西南宁 530002)

**摘要:**为明晰磷铝胁迫下马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)苗期的生长变异规律,筛选出耐低磷酸铝型优良家系,本文以马尾松二代种子园54个优良家系幼苗为研究对象,对磷铝胁迫下其株高、地径、主根长和干重等生长指标进行测定并计算其耐低磷酸铝胁迫系数,将各指标的耐胁迫系数作为耐胁迫评价指标,运用相关性分析和因子分析将7个耐胁迫指标降维归纳为3个综合指标,并使用隶属函数法加权计算出综合评价值——*D*值,综合评价不同家系马尾松幼苗的耐低磷酸铝特性,并利用系统聚类分析进行分等定级。结果表明:低磷酸铝胁迫下,不同家系马尾松幼苗的生长均受到抑制,株高、主根长和地下部干重积累受抑制最严重;除株高与根冠比、地上部干重与根冠比呈负相关外,其他各指标之间呈正相关。家系间*D*值为0.155–0.919,17号家系耐低磷酸铝特性最好,25号家系最差。综上,低磷酸铝胁迫下,马尾松的长势特征为体矮径细,其干物质的积累受抑制、分配方式发生改变,使得其根冠比大幅度减少。

**关键词:**马尾松;磷铝胁迫;生长规律;评价;筛选

中图分类号:S718.3 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)03-0513-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20230710.010

近年来,工农业生产、人类活动和红壤自身发育等情况致使土壤的酸化不断加剧,使得植物遭受低磷和酸铝胁迫<sup>[1]</sup>。植物出现缺磷现象是由于在酸性环境下植物可吸收利用的有效磷被铁、铝氧化物等固定

成磷酸化合物,而且溶解度低,再加上磷易随土壤水运动而流失,导致环境中的有效磷不足以支撑植物的正常生长发育<sup>[2]</sup>。同时,酸性土壤还会引起铝的活化,当土壤pH值<5时,铝易被活化成Al<sup>3+</sup>,该形态

收稿日期:2022-12-15

修回日期:2023-02-05

\* 八桂学者项目(2019A026),广西院士后备人才培养项目(桂AD19254004)和广西优良用材林资源培育重点实验室自主课题“酸铝环境下马尾松幼苗铝胁迫的适应机制及其缓解铝毒的生长效应(2020-A-02-03)”专项资助。

## 【第一作者简介】

陈钊铭(1997-),男,在读硕士研究生,主要从事植物生理研究,E-mail:704970150@qq.com。

## 【\*\*通信作者】

杨章旗(1964-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事林木遗传育种及森林培育研究,E-mail:Yangzhangqi@163.com。

## 【引用本文】

陈钊铭,李鹏,陈虎,等.磷铝胁迫对马尾松苗期生长的影响及评价[J].广西科学,2023,30(3):513-523.

CHEN Z M, LI P, CHEN H, et al. Effect and Evaluation of Phosphorus and Aluminum Stress on the Growth of *Pinus massoniana* Lamb. Families Seedling [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(3): 513-523.

铝极具植物毒性<sup>[3]</sup>。我国南方各省区土壤主要为低磷酸铝红壤,土壤酸化日益严重,致使磷元素流失并加剧植物铝毒害程度,导致作物品质和产量下降,经济效益严重下滑<sup>[4]</sup>。马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是我国南方重要工业用材树种,具有生长快、用途广、蓄积量大等优良特点<sup>[5,6]</sup>。但南方土壤普遍为低磷酸铝红壤,是影响马尾松林生长、导致马尾松大面积衰退和减产的主要原因<sup>[7,8]</sup>。因此,研究磷铝胁迫下马尾松的生长变异情况,筛选出耐低磷酸铝特性的马尾松优良家系,提高马尾松的耐低磷酸铝能力,增加马尾松人工林的经济效益,已成为亟需解决的科学问题。

低磷条件下杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、油茶(*Camellia oleifera*)和玉米(*Zea mays*)根的活力显著下降,根系的吸收能力减弱,植物生长发育受到限制,导致植株生长缓慢、矮小,根系发育差等,充足的磷营养可增强植物对外界不利环境条件的抵抗能力<sup>[9-19]</sup>。高浓度铝对杉木、油茶和玉米均具有较强毒性,其通过抑制植物根、茎生长,致使根系坏死,减少根系对养分的吸收利用,从而减少植物的干物质积累<sup>[20-26]</sup>。马尾松的磷铝胁迫研究,多数为低磷或酸铝胁迫下的生长变化规律和优良家系筛选研究,而低磷、酸铝两者耦合胁迫的研究较少,且众多单一低磷或酸铝胁迫研究只停留在种源之间,对高世代尤其是以二代优良家系马尾松作为材料的研究仍有所欠缺<sup>[10-26]</sup>。不同种源、种质的马尾松具有丰富的遗传多样性,对低磷酸铝环境的敏感性差异较大,其株高、地径和主根长等各指标都会存在差异,且各指标对植物生长发育的指示作用存在重叠现象<sup>[10-12]</sup>。为此,本研究以二代种子园54个优良家系马尾松为材料,采用沙培方式进行酸性环境下不同浓度磷铝胁迫处理,并对各家系的耐低磷酸铝系数进行因子分析;再利用模糊数学中的模糊隶属函数法,计算出可综合评价各家系耐低磷酸铝能力的综合评价值——D值,探明马尾松幼苗在低磷酸铝胁迫下的生长变异规律并筛选出耐低磷酸铝的优良家系马尾松,为其推广应用提供理论基础和优良材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料为54个家系马尾松(编号1-55号,其中23号缺失),种子采自广西壮族自治区国有派阳山林场马尾松二代种子园,于2022年5月初在广西壮

族自治区林业科学研究院马尾松良种繁育苗圃(广西南宁)玻璃温室棚中进行试验。选取各家系饱满种子,清洗干净,经灭菌、催芽后于育种盘中发芽。发芽后,将其转移至装有石英砂的无纺纤维布容器中(直径8 cm,高12 cm),每杯1株,每个家系140株。正常培养30 d,期间每3 d浇灌1次1/5霍格兰氏完全营养液(其配方如表1所示),以维持马尾松幼苗正常生长,直至营养液同砂粒接触24 h内pH值基本无变化为止。缓苗14 d后选择各家系生长基本一致的苗木60株进行胁迫试验。

表1 霍格兰完全营养液配方

Table 1 Hoagland complete nutrient solution formula

成分 Ingredient	含量/ (mg/L) Content/ (mg/L)	成分 Ingredient	含量/ (mg/L) Content/ (mg/L)
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	607	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	4.50
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	11.50	MnSO <sub>4</sub>	2.13
MgSO <sub>4</sub>	493	CuSO <sub>4</sub>	0.05
C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> FeN <sub>2</sub> NaO <sub>8</sub>	20	ZnSO <sub>4</sub>	0.22
FeSO <sub>4</sub>	15	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	118.90
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	945
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	136		

### 1.2 胁迫试验设计

按家系与磷铝水平两因素设置完全随机区组试验,每个家系分别设置不同磷、铝浓度共4种处理,记为CK、-P、+Al、(-P、+Al),其中CK为对照,-P为低磷处理,+Al为酸铝处理,(-P、+Al)为低磷酸铝处理,各处理浓度如表2所示。将KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、AlCl<sub>3</sub>和KCl添加至1/5缺磷霍格兰营养液中(稀释5倍且缺KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>的霍格兰完全营养液),为胁迫溶液。每个处理3次重复,每个重复20株幼苗。用KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、AlCl<sub>3</sub>控制磷和铝的含量,根据设计分别供给不同水平的磷和铝;用NaOH和HCl调整土壤pH值,使得pH值维持在4.00 ± 0.05水平,每3d

表2 各处理的磷、铝浓度

Table 2 P, Al concentrations in each treatment

处理 Treatment	磷浓度/ (mmol/L) P concentration/ (mmol/L)	铝浓度/ (mmol/L) Al concentration/ (mmol/L)
CK	0.073	0.2
-P	0.015	0.2
+Al	0.073	1.0
-P、+Al	0.015	1.0

浇胁迫溶液1次,每次200 mL,中间酌情补充水分并适当补充KCl以维持各处理 $K^+$ 平衡,处理50 d后采样,测定各指标。

### 1.3 生长指标的测定

胁迫处理50 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)、株高和主根长(均精确到0.01 cm)。上述指标测量完成后用自来水不断冲洗沙杯,小心取出整株幼苗并冲洗干净,然后将幼苗分成地下部和地上部,105 ℃杀青5 min后再于65 ℃条件下烘干至恒重,测量各组分(地下部和地上部)的干重(精确到0.001 g),并计算根冠比(根冠比=地下部干重/地上部干重)。

### 1.4 数据分析

采用WPS 4.6.1和SPSS 26.0软件进行数据的统计与分析,Origin Pro 2021软件进行作图。

#### 1.4.1 耐低磷酸铝胁迫系数

耐低磷系数<sup>[10]</sup>是同一家系同一指标(如株高、地径和主根长等)在低磷处理下的测量值除以对照处理下的测量值所得,可将各指标归一化,使得各指标之间具有可比性。本研究以耐低磷系数为参考,计算各家系马尾松各指标的耐低磷酸铝胁迫系数,并进行相关性分析。耐低磷酸铝胁迫系数计算公式如下:

$$\text{耐低磷酸铝胁迫系数}/\% = \frac{\text{低磷酸铝处理测定值}}{\text{对照处理测定值}} \times 100\%。$$

#### 1.4.2 隶属函数值

利用马尾松各指标(株高、地径、主根长,地上部干重、地下部干重、单株干重和根冠比)进行耐低磷酸铝特性综合评价。由于指标之间存在正负相关性,且对胁迫所反映出的信息存在重叠现象,利用因子分析可通过降维手段将多个指标归类为几个彼此相对独立的综合指标。本研究将7个指标的耐低磷酸铝胁迫系数进行因子分析,得出主因子及各主因子方差贡献率,并计算各家系马尾松主因子的隶属函数值,算法如下:

$$U(Cl_i) = \frac{Cl_i - Cl_{\min}}{Cl_{\max} - Cl_{\min}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

式中, $U(Cl_i)$ 为第*i*个主因子的隶属函数值, $Cl_{\min}$ 、 $Cl_{\max}$ 分别为所有家系第*i*个主因子的最小值和最大值。

#### 1.4.3 指标权重

根据因子分析得到各主因子的方差贡献率,计算各家系马尾松不同主因子的指标权重,算法如下:

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n |P_i|, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

式中, $W_i$ 表示第*i*个主因子在所有主因子中的重要程度,即权重; $P_i$ 为各家系第*i*个主因子的贡献率。

#### 1.4.4 综合值D值

根据各家系马尾松各主因子的隶属函数值 $U(Cl_i)$ 和指标权重值 $W_i$ 计算综合值D值(D值为各家系马尾松在低磷酸铝胁迫条件下耐低磷酸铝能力的大小,D值越大表示其耐低磷酸铝能力越强,即耐低磷酸铝特性越好),算法如下:

$$D = \sum_{i=1}^n [U(Cl_i) \times W_i], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n。$$

## 2 结果与分析

### 2.1 磷铝胁迫对不同家系马尾松幼苗生长的影响

如图1所示,家系、磷铝处理及两者间的交互作用对马尾松幼苗株高、地径和主根长均具有极显著影响( $P < 0.001$ )。马尾松幼苗株高、地径和主根长变异系数为10.96% - 14.86%,变异系数平均值大小顺序为主根长(14.44%) > 地径(12.33%) > 株高(11.23%)。从各生长指标可看出,CK处理下马尾松幼苗长势最好,株高、地径和主根长平均值分别为13.35 cm、1.04 mm和9.80 cm;低磷酸铝胁迫下的长势最差,株高、地径和主根长平均值分别为12.85 cm、1.01 mm和9.43 cm,株高、地径和主根长均受到明显抑制,分别较CK减少了4.00%、3.00%和4.00%;低磷胁迫下的株高、地径和主根长平均值分别为12.95 cm、1.02 mm和9.78 cm,株高和地径的生长受抑制程度较高,分别较CK减少了3.00%、2.00%;酸铝胁迫下的株高、地径和主根长平均值分别为13.17 cm、1.03 mm和9.61 cm,主根的生长受抑制程度较高,较CK减少了2.00%。

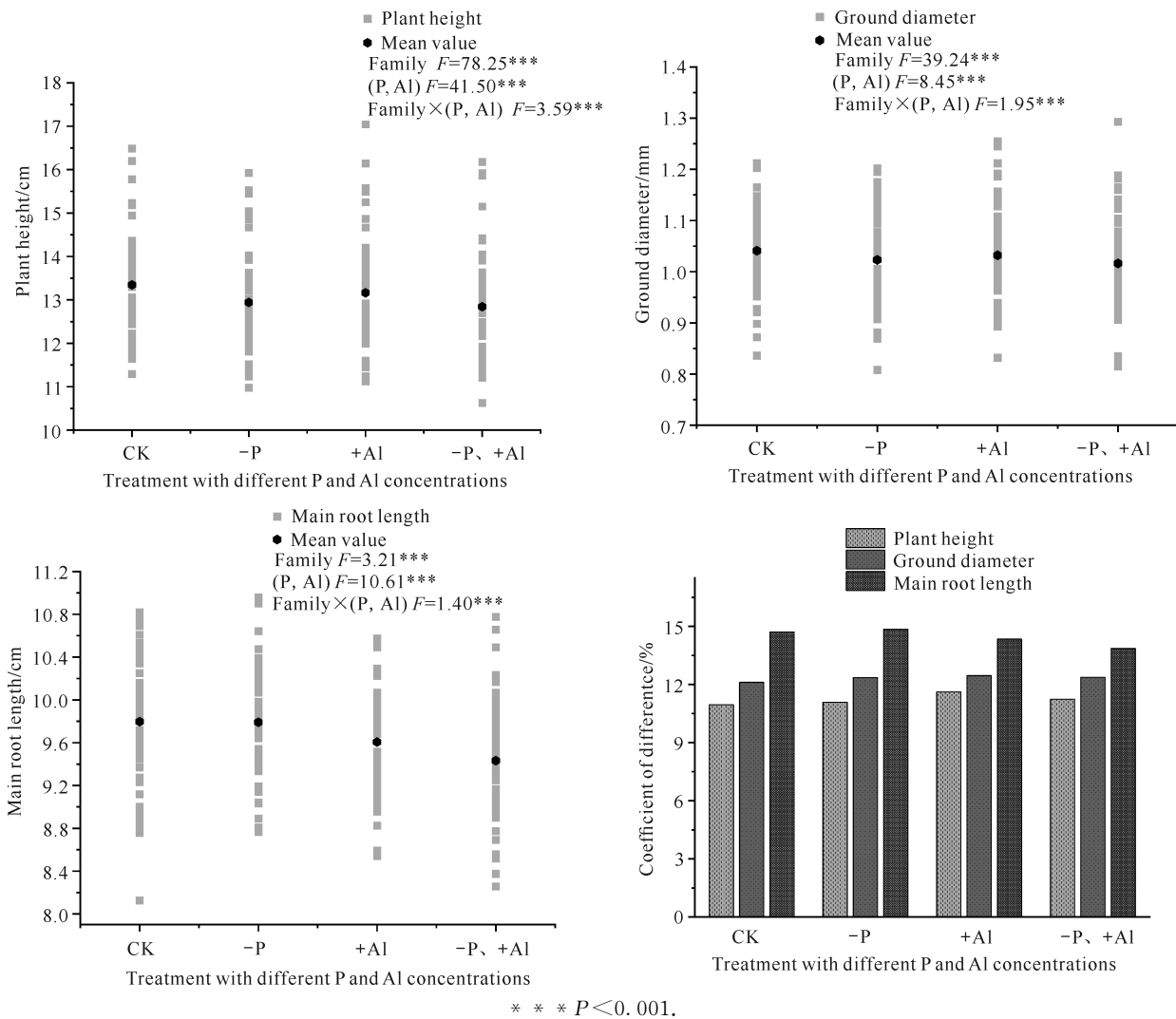


图1 不同浓度磷铝胁迫下马尾松的生长和变异系数

Fig. 1 Growth and CV of *P. massoniana* Lamb. under different concentrations of P and Al stress

## 2.2 磷铝胁迫对马尾松幼苗干重的影响

如图2所示,家系对马尾松幼苗地上部干重、地下部干重、单株干重和根冠比均具有极显著影响( $P < 0.001$ )。磷铝处理对马尾松幼苗地下部干重具有非常显著的影响( $P < 0.01$ ),对单株干重具有显著影响( $P < 0.05$ ),但对地上部干重和根冠比无显著影响。马尾松幼苗地上部干重、地下部干重、单株干重和根冠比变异系数为16.06%–35.51%,变异系数平均值大小顺序为地下部干重(32.61%)>单株干重(23.34%)>地上部干重(21.91%)>根冠比(19.45%)。CK处理下马尾松幼苗干物质的积累最

多,地上部干重、地下部干重、单株干重和根冠比平均值分别为0.108、0.032、0.140 g和0.296。低磷酸铝胁迫下马尾松幼苗地上部干重、地下部干重、单株干重的积累明显受到抑制,分别较CK减少4.00%、8.00%和5.00%,根冠比较CK减少4.00%;低磷胁迫下,马尾松地上部干重、地下部干重、单株干重的积累所受到的抑制相比低磷酸铝胁迫要轻,分别较CK减少3.00%、6.00%和4.00%,根冠比较CK减少3.00%;酸铝胁迫主要抑制马尾松幼苗地下部干重积累,较CK减少6.00%,根冠比较CK减少5.00%。

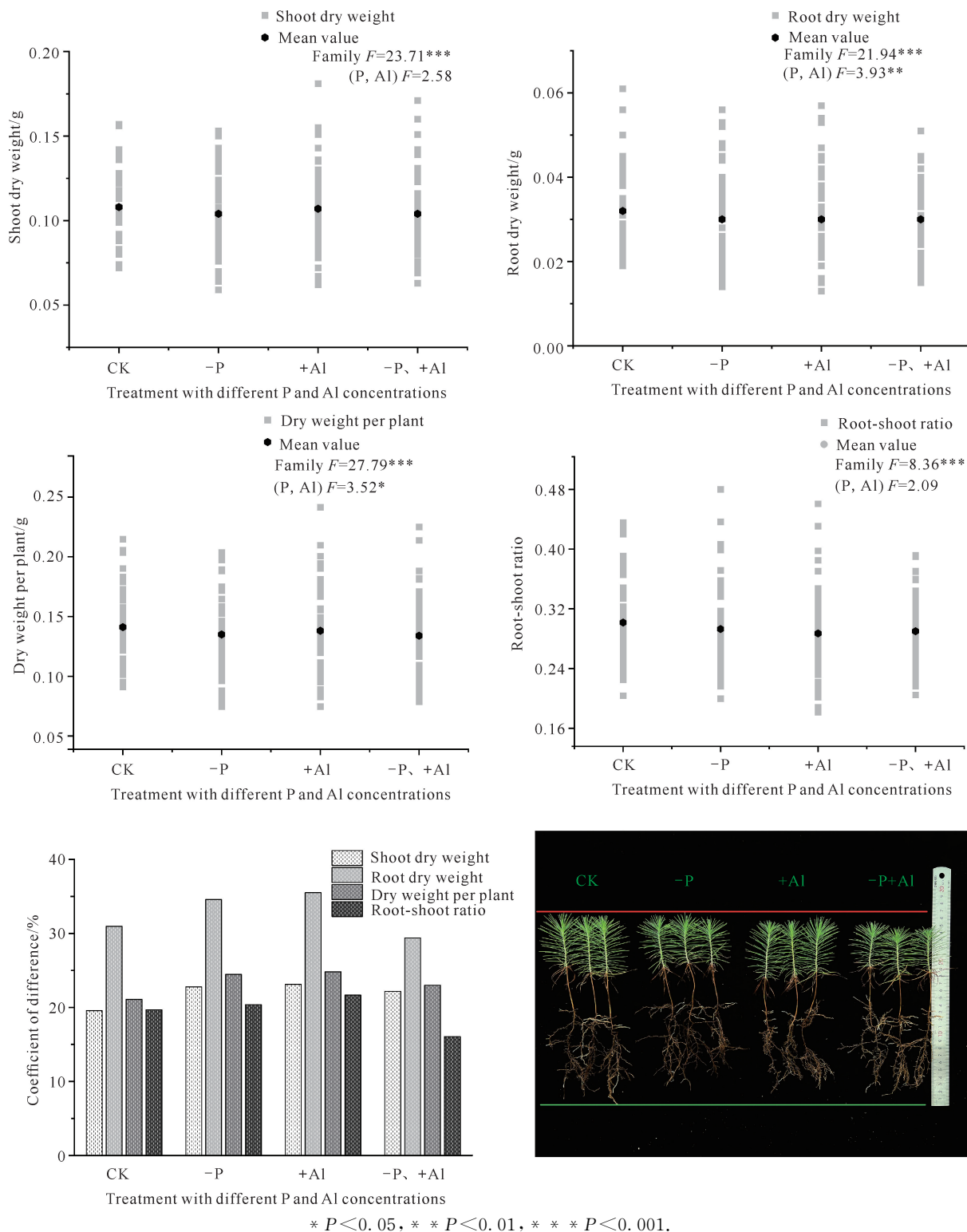


图2 不同浓度磷铝胁迫下马尾松干重、变异系数和形态特征

Fig. 2 Dry weight, CV and morphological characteristics of *P. massoniana* Lamb. under different concentrations of P and Al stress

## 2.3 不同家系马尾松耐低磷酸铝特性评价

### 2.3.1 耐低磷酸铝胁迫系数

如表3所示,在低磷酸铝胁迫下,不同家系马尾

松幼苗的相同指标和同一家系的不同指标的耐低磷酸铝胁迫系数差别较大,且各指标的胁迫系数变化区间各有不同。其中,株高的胁迫系数为 0.859 -

1.082, 地径的为 0.864 - 1.067, 主根长的为 0.850 - 1.086, 地上部干重的为 0.736 - 1.159, 地下部干重的为 0.574 - 1.364; 单株干重的为 0.700 - 1.138; 根冠比的为 0.634 - 1.293。

表 3 马尾松家系耐低磷酸铝胁迫系数

Table 3 Stress tolerance coefficients under the stress of low aluminum phosphate of *P. massoniana* Lamb. families

家系 Family	株高 Plant height	地径 Ground diameter	主根长 Main root length	地上部干重 Shoot dry weight	地下部干重 Root dry weight	单株干重 Dry weight per plant	根冠比 Root-shoot ratio
1	0.947	0.904	0.864	0.871	0.860	0.868	0.988
2	0.973	1.004	0.979	1.047	1.013	1.041	0.967
3	0.997	1.018	0.961	1.055	1.164	1.079	1.103
4	0.938	1.025	0.937	0.927	0.837	0.908	0.902
5	0.915	0.922	1.071	0.835	0.695	0.806	0.832
6	0.914	1.053	1.061	0.914	0.990	0.929	1.083
7	0.966	0.948	1.001	0.898	1.133	0.945	1.261
8	0.981	0.978	1.063	1.053	1.163	1.073	1.105
9	1.044	0.960	0.929	1.020	0.783	0.963	0.768
10	0.923	0.989	1.016	0.906	1.064	0.936	1.174
11	0.991	0.958	0.996	0.954	0.996	0.962	1.044
12	0.973	0.993	0.884	0.971	1.165	1.007	1.201
13	0.994	0.939	0.928	0.978	0.938	0.968	0.960
14	0.952	0.975	0.946	0.972	0.929	0.962	0.955
15	0.971	0.979	0.992	0.987	1.275	1.038	1.293
16	0.943	1.044	1.086	0.913	0.976	0.923	1.069
17	0.994	1.013	0.971	1.084	1.364	1.138	1.258
18	0.992	1.000	0.996	0.989	1.069	1.005	1.081
19	0.859	0.968	1.016	0.832	0.760	0.815	0.913
20	1.046	0.943	1.030	0.849	0.729	0.819	0.859
21	0.932	0.930	0.862	0.890	0.883	0.889	0.992
22	1.077	1.024	0.988	0.980	0.849	0.953	0.867
24	0.993	1.038	0.950	0.943	0.981	0.951	1.041
25	0.924	0.898	0.937	0.742	0.574	0.700	0.773
26	0.928	0.950	0.960	0.966	0.612	0.867	0.634
27	0.951	0.900	0.897	0.965	0.767	0.917	0.795
28	0.970	0.887	0.851	0.864	0.889	0.870	1.030
29	0.872	0.975	0.990	0.901	0.983	0.920	1.092
30	0.942	0.989	0.926	1.016	0.952	1.002	0.937
31	1.024	0.993	0.924	1.018	0.856	0.987	0.841
32	0.948	1.001	0.976	0.959	0.753	0.898	0.785
33	0.894	0.970	0.877	0.916	0.652	0.848	0.712
34	0.945	1.011	0.942	0.945	1.038	0.964	1.098
35	0.961	1.019	0.965	1.057	1.044	1.054	0.988
36	0.930	1.000	0.920	1.079	0.764	0.993	0.708
37	0.960	0.976	0.850	1.071	0.728	0.984	0.680

续表

Continued table

家系 Family	株高 Plant height	地径 Ground diameter	主根长 Main root length	地上部干重 Shoot dry weight	地下部干重 Root dry weight	单株干重 Dry weight per plant	根冠比 Root-shoot ratio
38	0.935	0.864	0.853	0.736	0.786	0.748	1.069
39	1.049	1.044	1.009	1.067	1.040	1.061	0.974
40	0.923	0.913	0.853	0.881	1.046	0.919	1.187
41	0.895	0.914	0.992	0.880	0.931	0.891	1.058
42	0.939	0.948	0.922	1.026	0.908	0.995	0.885
43	0.972	0.955	0.963	0.934	0.924	0.931	0.989
44	0.939	0.955	1.004	0.931	0.876	0.916	0.941
45	0.977	0.978	0.941	1.040	0.897	1.007	0.863
46	1.065	1.044	0.952	1.098	1.098	1.098	1.001
47	0.905	0.947	1.075	0.913	1.160	0.964	1.271
48	0.931	1.010	0.997	1.019	0.898	0.989	0.882
49	0.925	0.986	0.960	0.806	0.696	0.773	0.863
50	1.008	0.994	0.997	1.159	0.992	1.109	0.856
51	0.951	1.008	0.949	1.003	0.895	0.970	0.892
52	1.082	1.067	1.057	1.091	1.141	1.102	1.046
53	0.971	0.962	0.971	1.111	1.172	1.127	1.056
54	0.907	0.959	1.079	0.893	1.109	0.937	1.242
55	1.052	1.000	0.996	1.020	0.933	0.999	0.915

### 2.3.2 不同家系马尾松耐低磷酸铝指标的相关性分析

相关性分析(表4)表明,低磷酸铝胁迫下,株高与根冠比负相关,与主根长、地下部干重正相关,与地径、地上部干重、单株干重极显著正相关;地径与根冠比正相关,与地下部干重显著正相关,与主根长、地上

部干重、单株干重极显著正相关;主根长与地上部干重、单株干重正相关,与地下部干重、根冠比显著正相关;地上部干重与根冠比负相关,与地下部干重、单株干重极显著正相关;地下部干重与单株干重、根冠比显著正相关,单株干重与根冠比显著正相关。

表4 低磷酸铝胁迫下各指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of each index under the stress of low aluminum phosphate

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
X1	1						
X2	0.385 **	1					
X3	0.049	0.404 **	1				
X4	0.536 **	0.586 **	0.065	1			
X5	0.250	0.369 *	0.311 *	0.441 **	1		
X6	0.515 **	0.589 **	0.174	0.926 **	0.744 **	1	
X7	-0.042	0.064	0.294 *	-0.081	0.855 **	0.296 *	1

Note: X1, plant height; X2, ground diameter; X3, main root length; X4, shoot dry weight; X5, root dry weight; X6, dry weight per plant; X7, root-shoot ratio; \*  $P = 0.05$ , \*\*  $P = 0.01$ .

### 2.3.3 不同家系马尾松耐低磷酸铝的因子分析

前3个因子的累计贡献率达到96.62%,可作为有效的数据分析成分,其中载荷的高低反映主因子与各指标的相关程度(表5)。第1主因子与地上部干重(因子载荷:0.091)、地下部干重(因子载荷:0.071)和单株干重(因子载荷:0.086)相关性相对较大,主要反映各家系马尾松在低磷酸铝胁迫下对物质积累的能力,称为生物量因子;第2主因子与根冠比(因子载荷:0.156)相关性最大,主要反映各家系马尾松为适应低磷酸铝胁迫对地上部和地下部物质积累进行分配,称为调节因子;第3主因子与主根长(因子载荷:0.060)相关性最大,主要反映各家系马尾松在低磷酸铝胁迫下主根长的生长情况,可称为根长因子。因此,干重、根冠比和主根长可作为马尾松耐低磷酸铝种质的鉴定指标。

Table 5 Factor loading and variance contribution rates under the stress of low aluminum phosphate

指标 Index	第1 主因子 The first main factor	第2 主因子 The second main factor	第3 主因子 The third main factor
X1	0.030	0.000	0.002
X2	0.027	0.003	0.022
X3	0.002	0.011	0.060
X4	0.091	0.002	0.002
X5	0.071	0.152	0.024
X6	0.086	0.037	0.007
X7	-0.017	0.156	0.020
Variance contribution rate/%	68.89	23.00	4.73
Cumulative variance contribution rate/%	68.89	91.89	96.62

Note: X1, plant height; X2, ground diameter; X3, main root length; X4, shoot dry weight; X5, root dry weight; X6, dry weight per plant; X7, root-shoot ratio.

重(因子载荷:0.091)、地下部干重(因子载荷:0.071)和单株干重(因子载荷:0.086)相关性相对较大,主要反映各家系马尾松在低磷酸铝胁迫下对物质积累的能力,称为生物量因子;第2主因子与根冠比(因子载荷:0.156)相关性最大,主要反映各家系马尾松为适应低磷酸铝胁迫对地上部和地下部物质积累进行分配,称为调节因子;第3主因子与主根长(因子载荷:0.060)相关性最大,主要反映各家系马尾松在低磷酸铝胁迫下主根长的生长情况,可称为根长因子。因此,干重、根冠比和主根长可作为马尾松耐低磷酸铝种质的鉴定指标。

### 2.3.4 不同家系马尾松耐低磷酸铝的隶属函数分析

54个家系马尾松耐低磷酸铝能力的D值为0.155-0.919(图3)。排名前3的是17号(D值为0.919)、15号(D值为0.843)和12号(D值为0.752);排名后3的是25号(D值为0.155)、26号(D值为0.193)和33号(D值为0.241)。由此可知,在实验家系中,17号家系具有最强的耐低磷酸铝能力,其次是15号和12号,而25号家系对低磷酸铝胁迫抗性最弱。

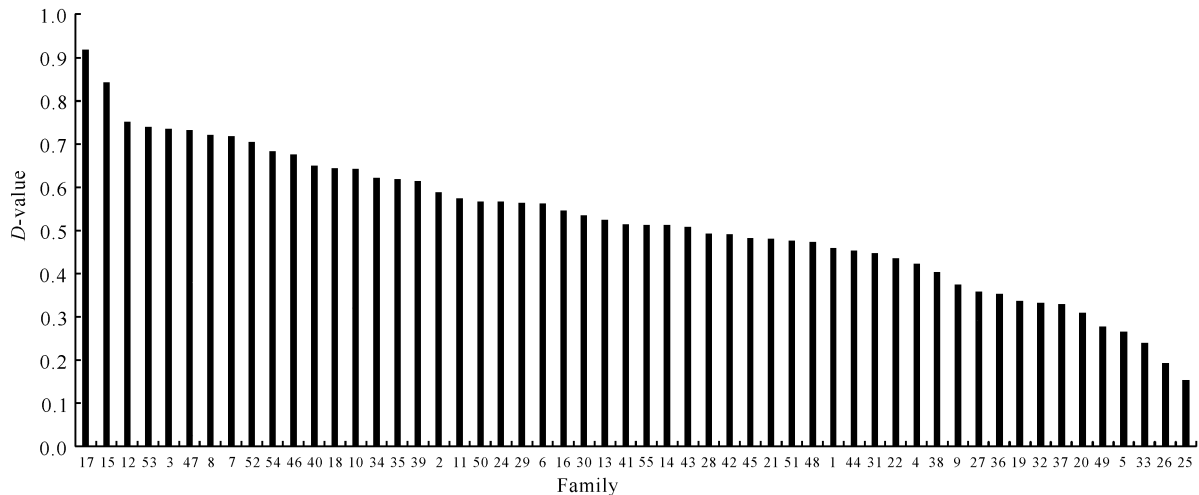


图3 不同家系马尾松的D值

Fig. 3 D-value of different *P. massoniana* Lamb. families

### 2.3.5 不同家系马尾松耐低磷酸铝特性的系统聚类分析

采用欧式距离对低磷酸铝胁迫下所有家系马尾松的D值进行系统聚类分析(图4)。在欧氏距离为15时,将54个家系按耐低磷酸铝能力的强弱划分为

3类:3号、7号、8号、12号、15号、17号、46号、47号、52号、53号、54号共11个家系具有较强的耐低磷酸铝特性,聚为第一类,属于高抗型;5号、9号、19号、20号、25号、26号、27号、32号、33号、36号、37号、49号共12个家系耐低磷酸铝特性较差,聚为第



三类,属于敏感型;其余 31 个家系耐低磷酸铝能力一般,聚为第二类,属于中等型。

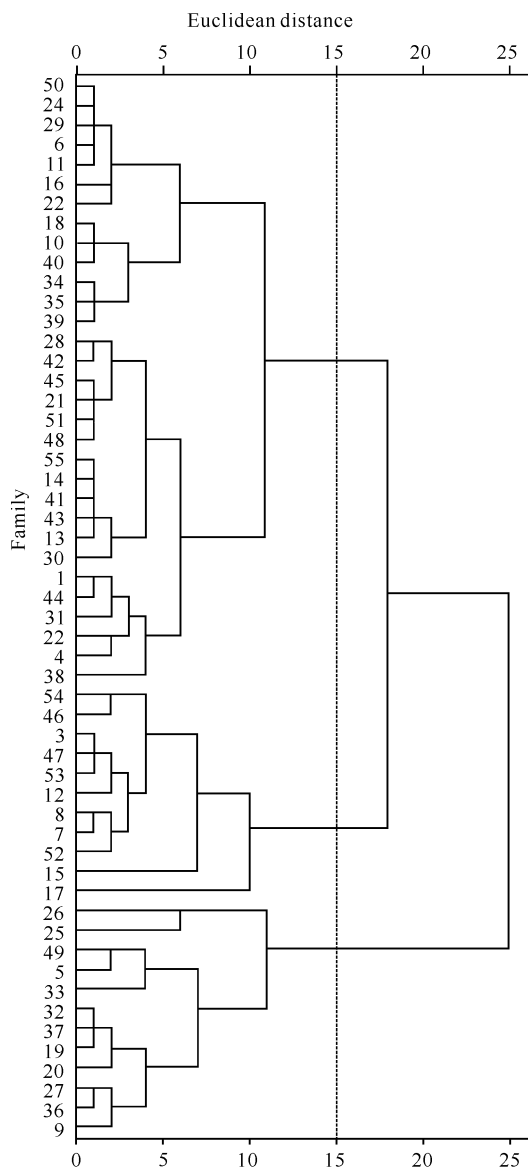


图 4 各家系马尾松耐低磷酸铝聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of low aluminum phosphate tolerance of *P. massoniana* Lamb. in each family

### 3 讨论

#### 3.1 磷铝胁迫对马尾松幼苗生长的影响

近年来,人类的不合理施肥和工厂的酸性物质排放等行为,致使全球酸性土壤面积不断扩大,给植物带来的低磷和酸铝胁迫现象日益普遍和严重,导致植物减产和品质低下,造成严重的经济损失。作为我国南方重要经济用材之一的马尾松,其林地为富含铁、铝物质的酸性土壤,经常遭受低磷和酸铝的影响<sup>[27]</sup>。低磷胁迫下马尾松幼苗的株高和地径生长受到抑制,

致使主根伸长,干物质的积累减少<sup>[14,26]</sup>;酸铝胁迫抑制马尾松幼苗的生长,致使地径生长,主根的生长受抑制,干物质的积累减少<sup>[23]</sup>。从家系、低磷酸铝处理及两者共同作用对马尾松幼苗生长的相互关系结果可以看出,家系本身对马尾松幼苗的胁迫生长影响最大,磷铝处理次之,两者共同作用影响最小。本研究结果与谢钰容<sup>[26]</sup>的研究结果一致,低磷胁迫促使马尾松幼苗主根生长,提高了其从外界汲取资源的能力,但抑制了马尾松幼苗地上部干物质积累,致使马尾松幼苗矮小瘦弱;酸铝胁迫抑制了马尾松幼苗主根的生长,造成马尾松矮小干粗,但加强了其地上部干物质的积累;低磷酸铝胁迫使马尾松幼苗矮小瘦弱效果加剧,地上部、地下部和单株干物质积累均受到抑制。

现有研究发现植物受到胁迫时根冠比增大;在受到胁迫时植物会进行适应性生长,将更多的资源运输给根部,增强其对外界资源的汲取能力,因此根冠比得以增大,其生存能力进一步提高<sup>[14]</sup>。而与对照相比,本研究中低磷、酸铝和低磷酸铝胁迫的马尾松幼苗根冠比均减小,是否是本研究所采用的胁迫浓度较低或者胁迫时间不够长,导致马尾松幼苗胁迫生长还处于抑制期,还未对胁迫环境做出足够的适应性调节,使得地下部和地上部先后受到抑制,根冠比减小,该现象有待在后续实验中进一步验证。

#### 3.2 耐磷铝胁迫优良家系的评价和筛选

目前,在众多马尾松胁迫研究中缺乏对不同家系耐低磷酸铝能力的评价与筛选。马尾松的抗性评价指标主要是生长指标,但单一生长指标并不能准确反映其耐低磷酸铝胁迫的能力,且生长指标之间存在正负相关性,无法客观准确地评价不同家系马尾松的耐低磷酸铝特性。因此,在一定程度上利用马尾松株高、地径、主根长和干重作为评价和筛选的指标,基于家系的各耐胁迫系数进行因子分析,再利用模糊数学中的模糊隶属函数法,计算出可综合评价各家系的耐低磷酸铝能力的  $D$  值,使得各家系耐低磷酸铝特性的差异具有可比性<sup>[10-12]</sup>。该方法不仅可以大规模筛选优良家系品种并能节约成本,还能快速有效地分析其在磷铝胁迫下的生长变化<sup>[10]</sup>。本研究综合评价 54 个马尾松家系,将其分为高抗型、中等型和敏感型 3 类,但本研究仅对马尾松幼苗期的生长指标进行分析和综合评价,并不能代表各家系未来的生长状况,需要在以后的试验中结合生理指标进一步佐证,或者追踪高抗型、中等型和敏感型家系在未来的生长状况,

以最终确定各家系的耐低磷酸铝能力。

#### 4 结论

在低磷酸铝胁迫下,马尾松幼苗的各项生长指标均受到抑制,特别是主根的生长发育受影响最大,株高次之,地径最小。低磷胁迫主要抑制马尾松幼苗的株高和地径,使得马尾松幼苗长势特征为体矮径细;酸铝胁迫主要抑制马尾松幼苗的主根长,使得马尾松幼苗长势特征为体矮径粗;低磷酸铝胁迫则使马尾松幼苗体矮径细效果加剧。马尾松幼苗在磷铝胁迫下干物质的积累受到一定的抑制;低磷胁迫主要抑制马尾松幼苗地下部干物质的积累,地上部干物质积累所受影响次之,造成根冠比减小;酸铝胁迫主要抑制马尾松幼苗地下部的干物质积累,造成根冠比较大程度减少;低磷酸铝胁迫则使马尾松幼苗地上部和地下部物质积累的抑制加剧,使其根冠比大幅度减小。本研究综合评价 54 个马尾松家系,将其分为高抗型、中等型和敏感型 3 类,为今后低磷、酸铝和低磷酸铝家系马尾松推广应用、生理机制解析,以及耐低磷酸铝优良家系的遗传改良提供材料。

#### 参考文献

- [1] 鲁艳红,廖育林,聂军,等. 我国南方红壤酸化问题及改良修复技术研究进展[J]. 湖南农业科学, 2015(3): 148-151.
- [2] 刘小玉,付登强,杨伟波,等. 酸性土壤植物磷铝互作研究进展[J]. 现代农业科技, 2014(8): 182-183, 195.
- [3] 刘玉民. 酸铝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.
- [4] 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.
- [5] 杨章旗,冯源恒,谭健晖,等. 广西马尾松高世代育种策略研究[J]. 广西林业科学, 2018, 47(3): 251-256.
- [6] 李鹏,零天旺,杨章旗,等. 马尾松人工林林龄对土壤和叶片养分含量的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 9-16.
- [7] 刘厚田,张维平,沈英娃,等. 重庆南山酸雨与马尾松衰亡的关系[J]. 环境科学学报, 1988, 8(3): 331-339.
- [8] 张璐,逢洪波,张雨欣,等. 我国土壤酸化的原因及改良措施研究进展[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(8): 49-52.
- [9] 石零珊. 杉木耐低磷和铝毒种质资源筛选及其耐性生理机制研究[D]. 福州:福建农林大学, 2017.
- [10] 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.
- [11] 崔博文. 马尾松种质评价及生长性状相关 QTL 的初步定位[D]. 贵阳:贵州大学, 2017.
- [12] 汪挺,谭健晖,李鹏,等. 二代种子园马尾松苗期耐旱型优良家系的筛选[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(6): 627-635.
- [13] 艾佐佐. 磷铝耦合对油茶幼苗生长及生理指标的影响[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2017.
- [14] 秦晓佳,丁贵杰. 低磷胁迫对不同种源马尾松幼苗的影响[J]. 林业科技, 2012, 37(3): 1-5.
- [15] SUN L L, ZHANG M S, LIU X M, et al. Aluminium is essential for root growth and development of tea plants (*Camellia sinensis*) [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2020, 62(7): 984-997.
- [16] 梁龙,胡德活,晏姝,等. 杉木低磷胁迫响应研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2022, 41(3): 42-48.
- [17] 张丽梅,贺立源,郭再华. 磷铝耦合胁迫对玉米自交系苗期生长及矿质元素吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 52-58.
- [18] 黄娟,孔国辉,夏汉平. 铝毒与有机酸和磷的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4): 498-503.
- [19] 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.
- [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] 章爱群,崔雪梅,李淑艳,等. 磷、铝胁迫对玉米幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 玉米科学, 2010, 18(1): 70-76.
- [22] 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.
- [23] LIU H Y, CHEN H Y, DING G J, et al. Identification of candidate genes conferring tolerance to aluminum stress in *Pinus massoniana* inoculated with ectomycorrhizal fungus [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 521.
- [24] 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.
- [25] 张涵,周香玉,陈立松,等. 铝胁迫对柑橘幼苗生长和光合作用的影响[J]. 南方园艺, 2019, 30(2): 1-8.
- [26] 谢钰容. 马尾松对低磷胁迫的适应机制和磷效率研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2003.
- [27] 孙红英. 低磷和铝毒对杉木幼苗若干生理过程的影响[D]. 福州:福建农林大学, 2010.

## Effect and Evaluation of Phosphorus and Aluminum Stress on the Growth of *Pinus massoniana* Lamb. Families Seedling

CHEN Zhaoming<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2,3</sup>, CHEN Hu<sup>2,4</sup>, YANG Zhangqi<sup>1,2\* \*</sup>

(1. College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning, Guangxi, 530002, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation (Guangxi Forestry Research Institute), Nanning, Guangxi, 530002, China; 4. Guangxi Masson Pine Engineering Technology Research Center, Nanning, Guangxi, 530002, China)

**Abstract:** In order to clarify the growth variation of *Pinus massoniana* Lamb. seedlings under phosphorus and aluminum stress and screen out the excellent families with low aluminum phosphate tolerance, 54 excellent families in the second generation seed orchard of *P. massoniana* Lamb. were selected as the research objects. The growth indexes such as plant height, ground diameter, main root length and dry weight were measured under phosphorus and aluminum stress, and the coefficient of low aluminum phosphate tolerance was calculated. The stress tolerance coefficient of each index was used as the evaluation index of stress tolerance. The seven stress tolerance indexes were reduced to three comprehensive indexes by correlation analysis and factor analysis, and the comprehensive evaluation value-*D* value was calculated by membership function method. The characteristics of low aluminum phosphate tolerance of *P. massoniana* Lamb. seedlings from different families were comprehensively evaluated, and the hierarchical clustering analysis was used for grading. The results showed that the growth of *P. massoniana* Lamb. seedlings in different families was inhibited under low aluminum phosphate stress, and the plant height, main root length and underground dry weight accumulation were most severely inhibited. Except that plant height was negatively correlated with root-shoot ratio and shoot dry weight was negatively correlated with root-shoot ratio, other indexes were positively correlated. The *D*-value between the families was 0.155 – 0.919, and the No. 17 family had the best resistance to low aluminum phosphate, and the No. 25 family was the worst. In summary, under the stress of low aluminum phosphate, the growth characteristics of *P. massoniana* Lamb. are short and thin, the accumulation of dry matter is inhibited, and the distribution mode is changed, so that the root-shoot ratio is greatly reduced.

**Key words:** *Pinus massoniana* Lamb. ; phosphorus and aluminum stress; law of growth; evaluation; screening

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>