

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.08.007

# 不同种源马尾松种质耐低磷的主成分与灰色关联度分析<sup>①</sup>

崔博文<sup>1,2</sup>, 乔光<sup>1</sup>, 范付华<sup>2</sup>, 丁贵杰<sup>2</sup>, 文晓鹏<sup>1</sup>

1. 贵州大学 农业生物工程研究院/山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵阳 550025;

2. 贵州大学 贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025

**摘要:**通过对不同种源马尾松在磷胁迫下多项形态和生理指标的测定,利用主成分和灰色关联分析,筛选和鉴定了耐低磷种源.以广西桐棉(GT)、福建龙岩(FL)、福建武平(FW)、江西崇义(JC)、湖南汝城(HR)、四川眉山(SM)及贵州孟关(GM)等 7 个种源的马尾松幼苗进行盆栽试验,采用营养液培养,设置正常磷条件( $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 mg/L,对照)和低磷(2.0 mg/L)处理,测定株高、主根长、根质量、地上部鲜质量、根冠比、总叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖、丙二醛、可溶性蛋白、游离脯氨酸、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和根系活力等 15 个形态生理指标,以各项指标的耐低磷系数作为耐低磷指标,通过主成分和灰色关联分析对其耐低磷进行评价.主成分分析将 15 个单项指标转换成 4 个综合指标;隶属函数法计算耐低磷能力  $D$  值为四川眉山(SM)最大;灰色关联分析表明类胡萝卜素质量分数、根系活力、丙二醛质量分数和游离脯氨酸质量分数与马尾松耐低磷性关系密切.综上,主成分和灰色关联分析能够有效用于马尾松耐低磷种质筛选,四川眉山种源较耐低磷,福建龙岩(FL)和福建武平(FW)属中等耐低磷类型,贵州孟关(GM)与江西崇义(JC),广西桐棉(GT)与湖南汝城(HR)属于较弱耐低磷类型.

**关键词:**马尾松;种源;耐低磷特性;主成分分析;灰色关联分析

**中图分类号:** S718

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2017)08-0049-08

磷是植物体内核酸、蛋白质和磷脂等重要物质的必需组成成分,在核酸合成、光合与呼吸、细胞分裂增殖、生物膜的合成与稳定、酶的活化与失活、信号转导等过程发挥重要作用<sup>[1]</sup>.由于磷素在土壤中易固定,移动性差,使得植物可吸收的有效磷很低<sup>[2]</sup>,土壤速效磷的含量是维持喀斯特生态系统稳定的首要限制因子,对植被的机构和功能具有重要意义<sup>[3]</sup>.植物在低磷胁迫下,其形态、生理、生化等方面都会发生显著变化,进而影响植物的生长与繁殖,最终影响植物的产量<sup>[4]</sup>.大量研究表明,同一物种不同基因型活化土壤磷素能力不同,对磷素的吸收效率及有效利用能力不同<sup>[5-8]</sup>.因此,挖掘利用磷高效植物的基因资源,是解决土壤磷素生物有效性低下问题的有效途径.

马尾松是原产于我国南方地区的针叶树种,该地区土壤胶体含有大量氢离子、铝离子,土质黏重,通透性差,土壤中有效磷很低,严重制约了马尾松生长及经济产量<sup>[9-10]</sup>,因此挖掘和培育耐低磷新种质势在必行.前人通过研究筛选出许多与耐低磷相关的形态及生理指标,杨青等发现根构型的变化是马尾松高磷

① 收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 贵州省重大专项(20126011-1); 863 计划(2011AA10020301).

作者简介: 崔博文(1984-),女,河北秦皇岛人,博士研究生,主要从事森林培育的研究.

通信作者: 文晓鹏,教授,博士研究生导师.

素吸收效率的重要机制<sup>[11]</sup>. 秦晓佳等发现 MDA, 保护酶活性及游离脯氨酸质量分数等指标是马尾松适应低磷胁迫的主要生理影响机制<sup>[10]</sup>.

植物耐低磷特性是一个非常复杂的性状, 单一形态或生理指标并不能全面地反映特定基因型的遗传本质, 而多指标数据之间又存在一定的相关性, 导致多变量之间出现信息重叠现象. 前人有采用主成分分析法及灰色关联分析法进行常见作物新品种(系)的选育和评价<sup>[12-16]</sup>, 但迄今尚未见将这两种方法用于马尾松耐低磷种质筛选的报道. 本文对 7 个种源地马尾松幼苗进行低磷胁迫, 测定了 15 个形态及生理生化指标, 采用主成分分析法和灰色关联分析法筛选耐低磷特性指标, 并对不同种源地马尾松种质的耐低磷能力进行综合评价, 以期对马尾松耐低磷遗传改良提供理论参考.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试材料共 7 份, 采自在全国各地生长表现较好的 5 个马尾松种源<sup>[17-18]</sup>: 广西桐棉(GT)、福建龙岩(FL)、福建武平(FW)、江西崇义(JC)及湖南汝城(HR), 以及 2 个中部红壤低磷地区种源: 四川眉山(SM)及贵州孟关(GM).

### 1.2 试验设计

选择种粒饱满无破损的种子经灭菌、催芽处理后于育苗盘中育苗, 出苗 35 d 后移栽入塑料花盆(12 cm×11 cm)中, 栽培基质为珍珠岩. 每盆 6 株, 重复 3 次. 移栽 5 d 后开始浇营养液, 营养液配方参考秦晓佳等<sup>[10]</sup>并稍加修改, 在此基础上通过改变  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  质量浓度将 P 浓度调节成 2 个梯度: 1) 中磷(对照)处理(10 mg/L); 2) 低磷处理(2.0 mg/L), 相应改变  $\text{KNO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  质量浓度以满足正常的 N, K 供应. 处理在人工气候箱(上海新苗 QHX-250BS-III)中进行, 光照 10 h/d, 光照度 20 000 lx, 温度 18~22 °C, 湿度 75%.

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 形态指标的测定

胁迫处理 60 d 后, 小心取出整株幼苗, 清洗干净, 分别测定根系质量、地上部质量、根长(根颈部至主根生长点)、株高(根颈部至植株顶端生长点)等植株形态数据, 并计算根冠比(根系鲜质量与地上部鲜质量的比值).

#### 1.3.2 生理生化指标的测定

取各处理相同部位针叶簇及茎, 测定生理生化指标. 参照张志良等<sup>[19]</sup>的方法: 叶绿素质量分数采用乙醇提取法测定; 可溶性糖(SS)质量分数采用蒽酮比色法测定; 丙二醛(MDA)质量分数采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定; 可溶性蛋白(SP)质量分数采用考马斯亮蓝 G-250 染料结合法测定; 游离脯氨酸(Pro)质量分数采用酸性水合茚三酮显色法测定; 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氯化硝基氮兰四唑(NBT)光还原法测定; 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚氧化比色法测定; 过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定; 根系活力采用  $\alpha$ -萘胺氧化法测定.

### 1.4 数据处理与统计分析

#### 1.4.1 耐低磷系数(low phosphorus tolerance coefficients, LPTC)

$$LPTC/\% = \frac{\text{低磷处理测定值}}{\text{对照处理测定值}} \times 100$$

将各指标不同低磷处理的 LPTC 看作整体在 SPSS 20.0 中进行相关分析, 并通过 DPS 9.50 处理软件选取欧氏距离采用最长距离法对其进行聚类分析.

#### 1.4.2 隶属函数值

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

式中,  $Cl_i$  为第  $i$  个综合指标,  $Cl_{\min}$ ,  $Cl_{\max}$  为所有参试材料第  $i$  个综合指标的最小值和最大值.

### 1.4.3 指标权重

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

式中,  $W_i$  表示第  $i$  个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重;  $P_i$  为各种源第  $i$  个综合指标的贡献率.

### 1.4.4 综合值 $D$ 值

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

式中  $D$  值为各种源在低磷胁迫条件下综合耐低磷能力的大小(耐低磷性).

### 1.4.5 关联系数 $\epsilon_i(k)$ 及关联度 $\gamma_i$

$$\epsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) \cdots X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) + X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon_i(k) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中, “ $k$ ”指代第  $k$  个指标, 采用灰色关联分析法将低磷浓度下测定的 10 个生理生化指标(比较数列)与相应的  $D$  值(参考数列)进行关联分析<sup>[20-21]</sup>, 取分辨系数  $\rho=0.5$  计算出关联系数及关联度, 并按关联度大小得出关联序, 此过程在 Microsoft Excel 2010 中运算.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种源马尾松耐低磷系数和总相关性分析

在低磷浓度胁迫下, 不同种源马尾松的耐低磷系数差别较大(表 1): MDA( $X_9$ ), SOD( $X_{12}$ ), POD( $X_{13}$ )和 CAT( $X_{14}$ )质量分数在低磷胁迫下均有不同程度的增加( $LPTC > 1$ ); 总叶绿素( $X_6$ )有所下降, 耐低磷系数均小于 1; 其他指标的耐低磷系数因种源不同而表现较大差别. 可见, 各指标在马尾松耐低磷特性中所发挥的作用不尽相同, 不同测定指标因种源差异所表现出的耐受性并不一致, 因此, 仅使用一个单一指标评价各种源的耐低磷特性是不够的.

表 1 不同种源马尾松各处理下各指标的耐低磷系数

| 种源 | 株高<br>$X_1$ | 主根长<br>$X_2$ | 根质量<br>$X_3$ | 地上部鲜<br>质量 $X_4$ | 根冠比<br>$X_5$ | 总叶绿<br>素 $X_6$ | 类胡萝<br>卜素 $X_7$ | SS<br>$X_8$ | MDA<br>$X_9$ | SP<br>$X_{10}$ | 游离 Pro<br>$X_{11}$ | SOD<br>$X_{12}$ | POD<br>$X_{13}$ | CAT<br>$X_{14}$ | 根系活力<br>$X_{15}$ |
|----|-------------|--------------|--------------|------------------|--------------|----------------|-----------------|-------------|--------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| SM | 1.30        | 3.76         | 1.36         | 1.13             | 1.19         | 0.81           | 1.14            | 1.23        | 1.97         | 0.81           | 1.88               | 1.39            | 1.28            | 1.59            | 2.41             |
| GM | 0.25        | 1.07         | 0.86         | 0.84             | 1.06         | 0.60           | 1.16            | 1.22        | 1.63         | 0.94           | 1.37               | 1.31            | 1.16            | 1.33            | 1.18             |
| GT | 0.35        | 0.39         | 0.69         | 0.57             | 1.21         | 0.86           | 1.44            | 0.99        | 1.39         | 0.99           | 0.44               | 1.25            | 1.10            | 1.23            | 0.63             |
| FL | 1.13        | 1.22         | 0.87         | 0.89             | 0.98         | 0.90           | 0.91            | 1.05        | 1.29         | 1.17           | 1.23               | 1.35            | 1.26            | 1.29            | 1.40             |
| FW | 1.03        | 0.98         | 1.20         | 0.97             | 1.23         | 0.57           | 1.58            | 1.25        | 1.67         | 0.94           | 2.39               | 1.37            | 1.26            | 1.35            | 1.64             |
| JC | 0.26        | 1.53         | 0.43         | 0.68             | 0.63         | 0.73           | 0.50            | 0.97        | 1.15         | 0.88           | 0.79               | 1.43            | 1.35            | 1.40            | 0.73             |
| HR | 0.31        | 0.27         | 0.34         | 0.49             | 0.75         | 0.58           | 0.78            | 0.98        | 1.17         | 0.94           | 1.42               | 1.63            | 1.54            | 1.37            | 0.67             |

对各形态指标和生理生化指标进行相关性分析, 结果表明(表 2): 低磷胁迫下, 株高与游离 Pro 显著正相关, 与 SOD 和 POD 显著负相关, 与根系活力极显著正相关. 主根长与根系活力极显著正相关; 根系鲜质量与类胡萝卜素, SS 和根系活力极显著正相关; 地上部鲜质量与 SOD, POD 和根系活力等生化指标显著相关, 根冠比与类胡萝卜素, SS 和 MDA 极显著正相关, 与 CAT 显著相关. 不同形态指标间也存在相关性, 根系鲜质量与主根长显著正相关, 与株高、地上部鲜质量和根冠比极显著正相关; 地上部鲜质量与主根长呈显著正相关, 与株高极显著正相关( $r=0.82$ ). 同样, 各生理生化指标间也存在相关性, 总叶绿素与 SS, MDA, SOD 和 POD 显著负相关, 其中总叶绿素与 POD 相关性达到极显著水平; MDA 与

SS 极显著相关; SP 与游离 Pro 同其他指标间相关性最弱, 只有游离 Pro 与株高显著相关. 可见, 各指标间存在不同程度的相关性, 造成其所提供的信息存在叠加现象, 影响了不同源马尾松耐低磷特性的客观性及准确性评价.

表 2 低磷胁迫下各指标的相关系数

|          | $X_1$  | $X_2$  | $X_3$  | $X_4$  | $X_5$  | $X_6$   | $X_7$  | $X_8$  | $X_9$ | $X_{10}$ | $X_{11}$ | $X_{12}$ | $X_{13}$ | $X_{14}$ | $X_{15}$ |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $X_1$    | 1.00   |        |        |        |        |         |        |        |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_2$    | 0.41   | 1.00   |        |        |        |         |        |        |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_3$    | 0.68** | 0.50*  | 1.00   |        |        |         |        |        |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_4$    | 0.82** | 0.51*  | 0.88** | 1.00   |        |         |        |        |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_5$    | 0.27   | 0.28   | 0.79** | 0.43   | 1.00   |         |        |        |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_6$    | 0.39   | 0.30   | 0.11   | 0.34   | -0.07  | 1.00    |        |        |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_7$    | 0.25   | -0.17  | 0.60** | 0.38   | 0.62** | -0.27   | 1.00   |        |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_8$    | 0.04   | 0.18   | 0.60** | 0.32   | 0.70** | -0.53*  | 0.57** | 1.00   |       |          |          |          |          |          |          |
| $X_9$    | -0.06  | 0.33   | 0.38   | 0.04   | 0.62** | -0.51*  | 0.36   | 0.82** | 1.00  |          |          |          |          |          |          |
| $X_{10}$ | 0.35   | -0.25  | -0.11  | 0.00   | -0.19  | 0.29    | -0.02  | -0.38  | -0.34 | 1.00     |          |          |          |          |          |
| $X_{11}$ | 0.48*  | -0.18  | 0.35   | 0.42   | 0.06   | -0.33   | 0.41   | 0.42   | 0.17  | 0.16     | 1.00     |          |          |          |          |
| $X_{12}$ | -0.44* | -0.19  | -0.39  | -0.54* | -0.18  | -0.54*  | -0.25  | 0.10   | 0.31  | -0.02    | 0.08     | 1.00     |          |          |          |
| $X_{13}$ | -0.44* | -0.15  | -0.34  | -0.55* | -0.07  | -0.58** | -0.21  | 0.20   | 0.44* | -0.07    | 0.08     | 0.97**   | 1.00     |          |          |
| $X_{14}$ | -0.15  | 0.38   | 0.21   | -0.09  | 0.44*  | -0.35   | -0.08  | 0.43*  | 0.51* | -0.29    | -0.12    | 0.25     | 0.35     | 1.00     |          |
| $X_{15}$ | 0.77** | 0.66** | 0.77** | 0.88** | 0.32   | 0.32    | 0.23   | 0.24   | 0.06  | 0.01     | 0.30     | -0.34    | -0.40    | -0.02    | 1.00     |

注: \* 和 \*\* 分别表示  $p$  在 0.05 和 0.01 水平上差异有统计学意义.

## 2.2 不同种源马尾松耐低磷特性的主成分分析

为避免因指标间的相关性而造成的信息重叠, 客观反映不同种源在低磷胁迫下各指标的变化, 本研究将 5 个形态性状指标(株高, 主根长, 根系鲜质量, 地上部鲜质量, 根冠比)和 10 个生理生化指标(总叶绿素, 类胡萝卜素, SS, MDA, SP, 游离 Pro, SOD, POD, CAT, 根系活力)在不同低磷环境下的耐低磷系数进行主成分分析. 低磷胁迫下 15 个指标分成的 15 个主成分, 从表 3 可以看出, 前 4 个综合指标累积贡献率达 96.23%, 其中第一个主成分就贡献了 51.26% 的信息, 包括根质量, MDA, 根系活力, 地上部鲜质量, SS, 株高, 根冠比, 主根长, 游离 Pro 和类胡萝卜素等 10 个指标; 第 2 个主成分由 POD, SOD 和 CAT 组成, 可称为保护酶因子; 第 3 个主成分只反应了总叶绿素质量分数的部分; 第 4 个主成分反应了 SP 的信息. 因此, 根质量、保护酶因子、总叶绿素和可溶性蛋白(SP)可作为马尾松耐低磷种质的鉴定指标.

表 3 低磷胁迫下成分载荷矩阵与贡献率

| 指 标      | $Cl_1$ | $Cl_2$ | $Cl_3$ | $Cl_4$ | 指 标      | $Cl_1$ | $Cl_2$ | $Cl_3$ | $Cl_4$ |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|
| $X_3$    | 0.99   | -0.11  | 0.01   | 0.08   | $X_7$    | 0.58   | -0.57  | -0.48  | 0.00   |
| $X_9$    | 0.95   | 0.01   | -0.12  | -0.23  | $X_{13}$ | -0.38  | 0.85   | -0.07  | 0.32   |
| $X_{15}$ | 0.95   | 0.22   | 0.17   | 0.13   | $X_{12}$ | -0.39  | 0.84   | -0.16  | 0.26   |
| $X_4$    | 0.94   | 0.09   | 0.17   | 0.12   | $X_{14}$ | 0.55   | 0.76   | 0.25   | -0.24  |
| $X_8$    | 0.89   | 0.03   | -0.36  | -0.02  | $X_6$    | 0.07   | -0.43  | 0.88   | 0.06   |
| $X_1$    | 0.79   | 0.07   | 0.31   | 0.50   | $X_{10}$ | -0.29  | -0.57  | 0.17   | 0.72   |
| $X_5$    | 0.76   | -0.55  | -0.21  | -0.01  | 特征值      | 7.69   | 3.54   | 1.92   | 1.28   |
| $X_2$    | 0.72   | 0.40   | 0.51   | -0.24  | 贡献率/%    | 51.26  | 23.62  | 12.83  | 8.51   |
| $X_{11}$ | 0.70   | 0.41   | -0.45  | 0.37   | 累积贡献率/%  | 96.23  |        |        |        |

### 2.3 不同种源马尾松耐低磷特性的模糊隶属函数分析

在多指标测定和主成分分析的基础上, 本研究利用模糊数学中的模糊隶属函数法, 对 7 个马尾松种源的耐低磷特性进行了综合评价, 利用公式求出低磷条件下 7 个马尾松种源各主成分的隶属值  $U(i)$  和权重值  $W_i$ , 并计算出代表各种源耐低磷能力的  $D$  值. 由大到小为四川眉山(SM), 福建武平(FW), 福建龙岩(FL), 贵州孟关(GM), 江西崇义(JC), 湖南汝城(HR), 广西桐棉(GT).  $D$  值越大表示其忍耐低磷胁迫的能力越强, 由此可知, 四川眉山种源具有较强耐低磷特性, 其次是福建的两个种源, 武平略优于龙岩, 而广西桐棉、江西崇义和湖南汝城的种源对低磷环境最为敏感, 抗性最弱.

表 4 各种源马尾松低磷胁迫下耐低磷特性综合评价

| 种源          | $Cl_1$ | $Cl_2$ | $Cl_3$ | $Cl_4$ | $U(1)$ | $U(2)$ | $U(3)$ | $U(4)$ | $D$ 值 | 排名 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----|
| SM          | 1.81   | 1.19   | 0.82   | 1.22   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 0.36   | 0.94  | 1  |
| GM          | 1.09   | 0.66   | -0.16  | 1.10   | 0.36   | 0.42   | 0.19   | 0.23   | 0.34  | 4  |
| GT          | 0.80   | 0.28   | -0.10  | 0.98   | 0.12   | 0.00   | 0.25   | 0.10   | 0.10  | 7  |
| FL          | 1.11   | 0.70   | 0.34   | 1.65   | 0.38   | 0.45   | 0.61   | 0.82   | 0.47  | 3  |
| FW          | 1.42   | 0.76   | -0.40  | 1.82   | 0.65   | 0.52   | 0.00   | 1.00   | 0.56  | 2  |
| JC          | 0.76   | 0.88   | 0.37   | 0.88   | 0.08   | 0.65   | 0.64   | 0.00   | 0.29  | 5  |
| HR          | 0.67   | 0.84   | -0.30  | 1.40   | 0.00   | 0.61   | 0.08   | 0.55   | 0.21  | 6  |
| 权重( $W_i$ ) |        |        |        |        | 0.53   | 0.25   | 0.13   | 0.09   |       |    |

### 2.4 不同种源马尾松耐低磷特性的聚类分析

采用最长距离法对不同浓度下的所有  $D$  值进行系统聚类分析(图 1), 在欧氏距离等于 0.44 的位置, 7 个马尾松种源按耐低磷能力的强弱被划分为 3 类, 四川眉山种源具有最强的耐低磷特性自成一类; 福建龙岩(FL)和福建武平(FW)耐低磷能力较接近聚在第二类, 属于中等耐低磷类型; 贵州孟关(GM)与江西崇义(JC), 广西桐棉(GT)与湖南汝城(HR)这 4 个种源聚在第三类, 属于较弱耐低磷类型.

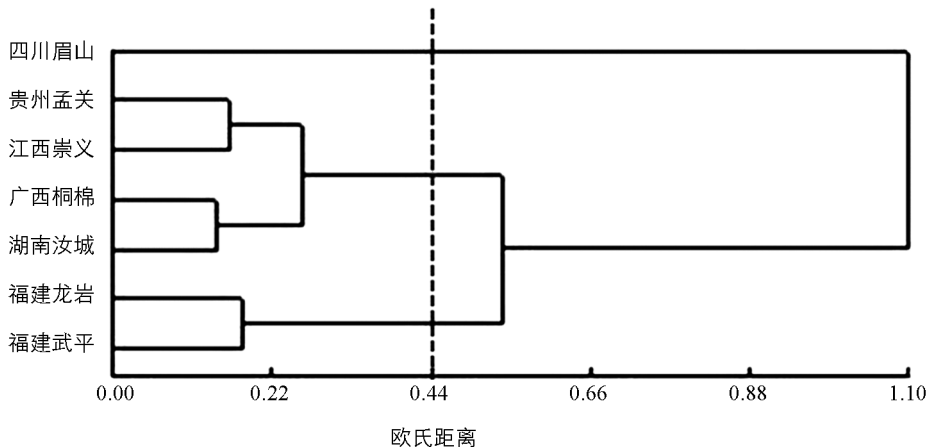


图 1 7 种源马尾松耐低磷特性的聚类图

### 2.5 灰色关联分析

本研究通过灰色关联分析法, 对总叶绿素, 类胡萝卜素, MDA, SS, SP, Pro, SOD, POD, CAT, 根系活力等 10 个生理生化指标进行综合评价, 旨在揭示比较序列与参考序列( $D$  值)关联关系, 从而评价各指标在耐低磷特性评定中的作用强弱. 通过计算所得的关联系数如表 5, 关联度由各指标关联系数的平均值来表示. 根据灰色关联系统理论分析原则, 关联度越大的指标, 其与耐低磷特性( $D$  值)的评价结果越接近. 由表 6 可以看出与马尾松耐低磷性关系最密切的是类胡萝卜素质量分数, 关联度为 0.566, 其次是 MDA, 根系活力和游离脯氨酸质量分数, 关联度分别为 0.554, 0.387 和 0.381.

表 5 低磷胁迫下生理生化指标的耐低磷系数与  $D$  值的关联系数

| 指 标    | 关 联 系 数 |       |       |       |       |       |       |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | SM      | GM    | GT    | FL    | FW    | JC    | HR    |
| 总叶绿素   | 0.666   | 0.162 | 0.153 | 0.214 | 0.258 | 0.401 | 0.625 |
| 类胡萝卜素  | 0.656   | 0.507 | 0.285 | 0.451 | 0.577 | 0.248 | 0.179 |
| MDA    | 0.147   | 0.168 | 0.107 | 0.245 | 0.135 | 0.419 | 0.152 |
| SS     | 0.335   | 1.000 | 0.153 | 0.902 | 0.223 | 0.372 | 0.280 |
| SP     | 0.245   | 0.945 | 0.272 | 0.747 | 0.212 | 0.301 | 0.275 |
| 游离 Pro | 0.308   | 0.925 | 0.157 | 0.402 | 0.182 | 0.878 | 0.177 |
| SOD    | 0.462   | 0.333 | 0.095 | 0.304 | 0.173 | 0.444 | 0.221 |
| POD    | 0.666   | 0.162 | 0.153 | 0.214 | 0.258 | 0.401 | 0.625 |
| CAT    | 0.656   | 0.507 | 0.285 | 0.451 | 0.577 | 0.248 | 0.179 |
| 根系活力   | 0.147   | 0.168 | 0.107 | 0.245 | 0.135 | 0.419 | 0.152 |

表 6 不同缺磷胁迫下各生理生化指标的关联度及其关联序

| 指标  | 总叶绿素  | 类胡萝卜素 | SS    | MDA   | SP    | 游离 Pro | SOD   | POD   | CAT   | 根活力   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 关联度 | 0.293 | 0.566 | 0.283 | 0.554 | 0.308 | 0.381  | 0.338 | 0.291 | 0.261 | 0.387 |
| 序位  | 7     | 1     | 9     | 2     | 6     | 4      | 5     | 8     | 10    | 3     |

### 3 讨 论

马尾松是我国南方主要的乡土造林和工业原料树种<sup>[22]</sup>,其分布范围广泛,分布区气候、土壤等生态条件存在较大差异,由于长期的适应性进化,产生了广泛的遗传变异,不同种源的马尾松对低磷环境的适应性存在差异,有必要通过一定的种源耐低磷试验,挖掘出对低磷胁迫下生长表现相对稳定的马尾松种源,同时探讨其适应低磷胁迫的应对机制。

马尾松应对低磷胁迫是一种受多基因控制的复杂生理反应,不同测定指标中所表现出的耐受性并不一致.因此,在植物耐低磷性研究中,往往采用多指标力求进行科学、客观的综合评判.但是评价指标过多时,指标间会存在一定的相关性,使得指标所提供的作物对逆境反映的信息发生交叉和重叠,且各指标在评价时因其本身之间权重差异直接导致评价结果发生偏差.主成分分析可通过降维的手段把多个复杂指标简化为少数几个综合指标,完全可以替代众多变量,并最大限度地反映原有多个变量的信息量<sup>[23]</sup>,进一步求出各个品种(系)抗逆性的综合评价(D值).由于D值是一个无量纲的数,从而使得各个品种(系)的特性差异具有可比性<sup>[24]</sup>.本研究采用主成分分析,避免重叠信息的干扰,准确分析马尾松耐低磷特性,从而挖掘出在不同程度的低磷胁迫环境下均表现优异的种源.结果表明,四川眉山的综合得分D值较大,在供试的7个马尾松种源中排名均位于前列,甚至优于前人普遍认可的磷高效型福建武平种源<sup>[10,17]</sup>.综合各成分的特征向量,地上部鲜质量、根系质量以及根系活力、保护酶系统和光合色素可以较好地反应马尾松的耐低磷特性。

灰色关联度分析是用来研究事物相互关联、相互作用等复杂因素的影响作用,使各种影响因素之间的“灰色”关系清晰化的一种统计分析方法<sup>[25]</sup>,近年来成功地应用在作物新品种(系)的选育和评价中<sup>[26-27]</sup>.灰色关联度分析通常把作物的多个农艺性状视为完整的一个灰色系统,通过关联度对作物各个农艺性状的重要性进行排序,也就是评价各指标在植物性状/特性评定中的作用强弱<sup>[28]</sup>.本文根据灰色关联系统理论分析原则,关联度越大的指标,其与耐低磷特性的评价结果越接近.结果表明,类胡萝卜素质量分数、根系活力、游离Pro和保护酶活性等指标与马尾松耐低磷特性联系密切。

主成分分析法和加权关联分析都具有可靠的统计学基础,主成分分析可以将众多彼此相关的变量通过去除相关关系缩减为少数几个彼此无关的主成分;灰色关联分析能够从多个变量指标中找出主要决定指标,并全面、科学地评价不同品种的综合性能<sup>[28]</sup>.本研究通过灰色关联分析获得的与马尾松耐低磷性密切相关的生理指标包括类胡萝卜素质量分数、根系活力、游离Pro和保护酶活性等,这些指标在主成分分析

中同样被分在第一主成分中, 证明两种方法在马尾松耐低磷种源筛选中同样可靠。

本文考查了 5 个农艺性状及 10 个生理生化性状, 基本上能够全面描述不同种源马尾松低磷胁迫下的生长情况, 但仍缺少其他相关的数据, 如光合特性等。下一步研究将完善该综合评价体系, 为其耐低磷良种资源的推广和应用提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 张丽梅, 贺立源, 龚阳敏, 等. 不同耐低磷玉米自交系生长发育特征研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 56—62.
- [2] 潘晓华, 刘水英, 李 锋, 等. 低磷胁迫对不同水稻品种幼苗生长和磷效率的影响 [J]. 江西农业大学学报(自然科学版), 2002, 24(3): 297—300.
- [3] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 等. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C, N, P 含量和空间异质性 [J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4187—4195.
- [4] 李 键, 黄锦湖, 洪 滔, 等. 低磷胁迫对雷公藤幼苗叶片生理生化特性的影响 [J]. 植物科学学报, 2013, 31(3): 286—296.
- [5] 李 鹏, 张永清, 闫江艳, 等. 不同基因型黍子幼苗对低磷胁迫的生理响应 [J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1306—1311.
- [6] 丁 艳, 韩 卓, 王泽港, 等. 不同基因型玉米幼苗对低磷条件的响应 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(30): 32—34.
- [7] 陈隆升, 陈永忠, 王 瑞, 等. 低磷胁迫对不同油茶优良无性系酶活性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(9): 23—25.
- [8] 马建华, 王玉国, 孙 毅, 等. 低磷胁迫对不同品种高粱苗期形态及生理指标的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1083—1091.
- [9] 徐向华, 丁贵杰. 马尾松适应低磷胁迫的生理生化响应 [J]. 林业科学, 2006, 42(9): 24—28.
- [10] 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.
- [11] 杨 青, 张 一, 周志春, 等. 低磷胁迫下不同种源马尾松的根构型与磷效率 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2339—2345.
- [12] 李 素, 姜鸿明, 宫德衬, 等. 48 份冬小麦主要田间农艺性状的主成分分析及抗旱性综合评价 [J]. 山东农业科学, 2014, 46(7): 25—30.
- [13] 张 军, 鲁 敏, 孙树贵, 等. 7 个冬小麦品种灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价 [J]. 植物科学学报, 2014, 32(2): 148—157.
- [14] 申忠宝, 王建丽, 潘多锋, 等. 大豆单株产量与主要农艺性状的灰色关联度分析 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(33): 75—77.
- [15] 郑金凤, 米少艳, 婧姝姝, 等. 小麦代换系耐低磷生理性状的主成分分析及综合评价 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 1984—1993.
- [16] 崔 翠, 周清元, 王利鹃, 等. 亚麻种质主要农艺性状主成分分析与综合评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(12): 10—18.
- [17] 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.
- [18] 秦国峰, 周志春. 中国马尾松优良种质资源 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [19] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [20] 周化如, 吕晓刚, 郝海荣, 等. 不同数据变换方法对灰色关联度分析结果的影响 [J]. 种子科技, 2005, 23(5): 280—283.
- [21] 赵晶怡. 9 种园林树木抗旱性生理指标的测定及评价 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2012.
- [22] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松种源磷效率研究 [J]. 林业科学, 2005, 41(4): 25—30.
- [23] 杨传宝, 姚俊修, 李善文, 等. 白杨派无性系苗期对干旱胁迫的生长生理响应及抗旱性综合评价 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 48—66.
- [24] 王 军, 周美学, 许如根, 等. 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2145—2152.
- [25] 吴晓丽, 包维楷. 不同类型冬小麦综合性状与产量间灰色关联分析 [J]. 西南农业学报, 2012, 25(2): 372—378.
- [26] 陈 奥, 龙明秀, 张 维, 等. 作物灰色育种理论在杂交黑麦草新品系筛选中的应用 [J]. 草地学报, 2012, 20(1): 102—107.

- [27] 王士强, 胡银岗, 余奎军, 等. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2452—2459.
- [28] 刘翔宇, 刘祖昕, 加帕尔, 等. 基于主成分与灰色关联分析的甜高粱品种综合评价 [J]. 新疆农业科学, 2016, 53(1): 99—107.

## Principal Component Analysis and Grey Correlation Analysis for Low Phosphorus Tolerance Evaluation in Masson Pine (*Pinus massoniana*) of Different Provenances

CUI Bo-wen<sup>1,2</sup>, QIAO Guang<sup>1</sup>, FAN Fu-hua<sup>2</sup>,  
DING Gui-jie<sup>2</sup>, WEN Xiao-peng<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education)/Institute of Agro-Bioengineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Research Center for Forestry Resources and Environment of Guizhou Province, Guizhou University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** The morphological and physiological parameters of masson pine (*Pinus massoniana*) seedlings from different provenances under phosphorus stress were studied through principal component and grey correlation analyses to select germplasms with high tolerance to low phosphorus stress. Seedlings of seven masson pine provenances from Tongmian of Guangxi (GT), Longyan and Wuping of Fujian (FL and FW), Chongyi of Jiangxi (JC), Rucheng of Hunan (HR), Meishan of Sichuan (SM) and Mengguan of Guizhou (GM) were used as materials for a pot experiment with different phosphorus concentrations, i. e. normal phosphorus ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 mg/L, control) and low phosphorus ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$  2.0 mg/L). Plant height, taproot length, root weight, fresh weight of the shoot, ratio of root to shoot, total chlorophyll content, carotenoids content, soluble sugars, MDA, soluble protein content, SOD activity, POD activity, CAT activity and root activity were determined. The low phosphorus tolerance coefficients of the above 15 morphological and physiological parameters were used as the indexes of tolerance to low phosphorus stress of the seedlings, and principal component analysis and grey correlation analysis were made to give a comprehensive evaluation. The principal component analysis classified the 15 single parameters into 4 independent comprehensive components. Based on the computation with the membership function method, SM had the maximum D value of tolerance to low phosphorus stress. Grey correlation analysis indicated that carotenoid content, root activity, MDA and free proline content were closely related to low phosphorus tolerance in masson pine. In conclusion, principal component analysis and grey correlation analysis could be effectively used for germplasm selection for high tolerance to low phosphorus stress in masson pine; of the 7 provenances studied SM had the highest tolerance to low phosphorus stress, followed by FL and FW, and GT and HR showed the lowest tolerance.

**Key words:** masson pine (*Pinus massoniana*); provenance; tolerance to low phosphorus stress; principal component analysis; grey correlation analysis

责任编辑 周仁惠  
崔玉洁



