

# 不同种源枫香磷响应指标的主成分分析<sup>①</sup>

冷华妮<sup>1,2</sup>, 段红平<sup>2</sup>, 陈益泰<sup>1\*</sup>, 孙海菁<sup>1</sup>, 胡韵雪<sup>3</sup>

(1 中国林业科学院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; 2 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201;

3 四川农业大学林学院园艺学院, 四川雅安 625014)

**摘要:** 采用裂区砂培试验, 研究枫香对 P 水平响应性状的相关性, 进行了主成分分析, 旨在找出影响其生物量的主导因子、不同种源的最适生长 P 浓度及优良耐 P 胁迫种源。相关分析表明, 除 P 利用率具有一定的稳定性外, 生物量与其他响应性状相关性显著; 低 P 胁迫造成的 N 吸收利用的变化对枫香影响更大。主成分分析表明, 枫香生物量差异的主导因子是 N、P 吸收性状, 其次是 P 利用性状。标准化主成分得分排序认为南昌种源具有较好的 N、P 吸收利用机制; 南丹种源具有较好的种源特性, P 利用率较稳定。根据我国土壤有效 P 含量多样性的现状筛选出具有广适性特点的南昌种源和具有较好耐低 P 胁迫特性的南丹种源。

**关键词:** 不同种源枫香; 磷水平; 磷响应指标; 主成分分析; 相关性分析

**中图分类号:** S722; S792.99

红壤约占我国土地面积的 15.7%<sup>[1]</sup>, 目前仍有四分之一的荒山荒地。枫香 (*Liquidambar formosana*) 作为南方林区主要森林树种, 适应性强 (红黄壤土上生长良好); 耐火力、耐污能力、天然更新能力强。对枫香、湿地松、杉木 3 树种的造林试验发现枫香是成活率、保存率及成长状况最好的树种<sup>[2]</sup>。影响植物生长和生物量的因素数量多, 且相互关联。对这类问题的统计分析, 近年来在生物科学中应用较多的手段为主成分分析<sup>[3-4]</sup>。主成分分析是一种采用降维方法把多个指标化为几个综合指标, 并使这些综合指标尽可能地反映原来变量信息量的统计分析方法, 往往可以找出判断某种事物或现象的综合指标, 使所观测的数据无信息重叠, 揭示事物内在的规律<sup>[5]</sup>, 并且不存在回归分析和相关分析中由于舍弃某些因素以及固定某些指定因素而存在的局限性。

目前关于枫香对环境因子的生理生态适应性研究较少, 国内外仅有北美枫香 N、P 胁迫下光合作用及对营养元素吸收的响应特性研究<sup>[6]</sup>, 中国乡土树种枫香相关响应性状的主成分分析研究鲜有报道。生物量是众多性状的综合表达; 细根 ( $\leq 2\text{ mm}$ ) 在生物量分配和养分吸收中起着重要的作用。鉴于枫香 (*Liquidambar formosana*) 作为先锋树种的生态价值及南方红壤缺 P 的现状, 本文测量了 7 个种源枫香的 15 个 P 响应性状

进行主成分分析, 以期发现对枫香生长影响较大的性状, 明确各个性状与生长的关系。同时, 分析不同供 P 水平对不同种源枫香植株性状的影响, 找出不同种源枫香最适生长 P 环境及耐 P 胁迫种源, 以期为我国开荒造林树种的选择及耐 P 胁迫树种目标性状的选育提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在中国林业科学院亚热带林业研究所大棚内进行, 地理位置为 30°03' N, 119°57' E, 海拔为 12 m。棚内平均温度 28°C, 相对湿度 75% 以上, 光照 12~13 h/d。供试材料见表 1, 主要参考何贵平等<sup>[7]</sup>对 8 省(区)的 20 个枫香种源的造林试验。

### 1.2 试验设计

砂培试验按种源与 P 两因素裂区设计。以无 P ( $P_0$ , 不添加 P 素)、低 P ( $P_{1/2}$ , 0.28 mmol/株)、标准 P ( $P_1$ , 0.56 mmol/株)、高 P ( $P_2$ , 1.12 mmol/株) 4 个水平为主处理, 种源为副处理。整区处理与裂区处理均随机区组排列, 共设 3 个区组, 每裂区 5 杯 (每杯 1 株)。将采自 6 省(区)7 个种源健壮成熟的种子于 2007 年 5 月上中旬播于苗床, 40 天后将生长一致的枫香幼苗 (三叶一心) 根系冲洗干净, 移至装有河砂 (多次水洗

①基金项目: 国家科技支撑项目 (2006BAD03A1401) 和浙江省科技厅重大项目 (2006C12065) 资助。

\* 通讯作者 (ytc.yalin@yahoo.com.cn)

作者简介: 冷华妮 (1981—), 女, 山东海阳人, 硕士研究生, 从事植物营养方面的研究。E-mail: lenghuani8245760@163.com

至不含任何养分)的有孔塑料杯,置于另一一次性饮水杯(上杯杯底距下杯杯底 2~3 cm为宜)。经过约 20 天的生长,于 7 月中旬进行处理。每隔 2 天浇 1 次营养液(20 ml/杯)(期间喷雾供水)。营养液采用 Bollard 大量元素配方和 Arnon 微量元素混合液配方<sup>[8]</sup>(表 2),调节 pH 为 5.5~6.0。10 月中旬终止处理,11 月初收获。

表 1 不同枫香种源

Table 1 Provenances of 7 typical Formosan sweet gums

种源	纬度	经度	海拔 (m)	年均气温 (°C)
江苏宜兴	31.21°N	119.49°E	250	15.4
安徽泾县	30.41°N	118.24°E	300	15.0
浙江永康	29.54°N	120.01°E	310	17.5
江西南昌	28.40°N	115.55°E	420	17.0
福建邵武	27.20°N	117.29°E	560	17.7
福建延平	26.38°N	118.10°E	480	19.3
广西南丹	24.59°N	107.32°E	380	16.9

表 2 P 处理营养液成分

Table 2 Nutrition components of different phosphorus supplies

营养元素	P <sub>0</sub>	P <sub>1/2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
KNO <sub>3</sub>	4	3	2	-
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	-	0.5	1	-
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1	2	2	4
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	3	3	2
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	-	1
MgSO <sub>4</sub>	2	2	2	2
KHP <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	2
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2	2	2	2
P 浓度	0	0.5	1	2

### 1.3 测定项目和方法

**1.3.1 植株及根系形态指标测定** 每小区选取 4 株生长状况一致的幼苗,用游标卡尺、卷尺分别测定苗高、基茎;采用加拿大 Regent 公司(Regent Instruments Inc.)的 STD1600+、双光源专用扫描仪对根系扫描,根系图像分析采用该公司的根系图像分析软件 WinRHIZO Pro 2005 b,得出根系长度、根系表面积等指标。

**1.3.2 生物量及 N、P 含量测定** 以小区为单位,选取 4 株生长状况一致的幼苗混合取样,根茎叶用 1/100 电子天平分别称量。样品在 105℃ 杀青 30 min,75℃ 烘至恒重,称重;取样品各器官(叶片 0.1 g、根

系 0.2 g 左右),参照 Lowther 等<sup>[9]</sup>方法用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消煮,依照 Mukherjee 等<sup>[10]</sup>方法测定各器官全 P 含量,用全自动凯氏定氮仪测定全 N 含量。有关计算方法<sup>[11]</sup>:

$$P \text{ 效率} = P_0 \text{ 时单株生物量} / P_1 \text{ 单株生物量} \times 100\%$$

吸收量 = P (或 N) 吸收量/株 (植物从土壤介质中获得 P (或 N) 的能力)

利用效率 = 总生物量/P (或 N) 吸收量 (单位吸收的 P (或 N) 量所产生的干物质量)

### 1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2003 软件进行枫香性状变异系数等统计分析;利用 SPSS 13.0 统计软件进行枫香幼苗性状间的主成分分析;为了评价各处理优劣及影响因素,输出了每个处理标准化后的主成分得分,并且按分值大小进行了排序。

## 2 结果与分析

### 2.1 枫香植株性状相关关系

植物生物量是众多性状综合的表达。由表 3 可以看出,生物量与 N (或 P) 吸收量、基茎、根生物量、根长、根表面积、株高、叶 P 含量、根 N 含量都呈极显著正相关,与根冠比和 N 利用效率极显著负相关;与 P 利用效率不存在显著相关性。即生物量较高的枫香植株具有较大的 N (或 P) 吸收量、基茎、根生物量、根长、根表面积、株高、叶 P 含量、根 N 含量和较小的根冠比和 N 利用效率;P 利用效率主要由种源决定,受其他因素影响较小,具有一定的稳定性。根据枫香植株性状相关分析结果,可以认为低 P 胁迫会抑制整个植株的生长,并且对地上部的抑制大于根系<sup>[12]</sup>;会影响根系对 N 的吸收,使 N 利用效率相对增大。根生物量与 N (或 P) 吸收量、叶 P 含量呈显著正相关。低 P 时,植株体内的 P 可以满足根系生长对 P 的需求,随着生长发育,植株为了适应低 P 环境,通过促进根系生长来提高对根际环境中 P 素的吸收,导致根系的形态特征指标与植株体内含 P 量呈显著正相关<sup>[13]</sup>。表 3 还可以看出, N 吸收量与 P 吸收量极显著正相关,显著系数达 0.91,表明植株体内的 P 含量会影响 N 的吸收。N (或 P) 吸收量均与根冠比呈显著负相关,有研究表明 P 高效植物或者少根高流量或者多根低流量<sup>[14]</sup>; N 吸收量与其他性状均呈显著正相关;P 吸收量仅与根 P 含量不存在显著相关性。相关性分析表明,低 P 胁迫引起植株 N 吸收利用的变化对植株生长的影响更大。

表 3 枫香植株性状间的相关矩阵  
Table 3 Correlation matrix of plant traits in Formosan sweet gum

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.00														
2	0.77**	1.00													
3	-0.45**	0.15	1.00												
4	0.66**	0.64**	-0.17	1.00											
5	0.66**	0.38*	-0.42*	0.79**	1.00										
6	0.65**	0.16	-0.70**	0.39*	0.79**	1.00									
7	0.84**	0.57**	-0.48**	0.61**	0.58**	0.51**	1.00								
8	0.27	0.27	-0.10	0.32*	0.02	-0.20	0.49**	1.00							
9	0.47**	0.28	-0.36*	0.18	0.14	0.18	0.54**	0.60**	1.00						
10	0.53**	0.51**	-0.16	0.32*	0.09	0.03	0.53**	0.56**	0.55**	1.00					
11	-0.01	0.01	-0.10	-0.09	-0.40*	-0.39*	0.25	0.58**	0.45**	0.53**	1.00				
12	0.86**	0.69**	-0.40*	0.52**	0.36*	0.36*	0.82**	0.50**	0.61**	0.80**	0.46**	1.00			
13	0.91**	0.60**	-0.57**	0.58**	0.54**	0.55**	0.87**	0.53**	0.70**	0.62**	0.22	0.91**	1.00		
14	-0.06	-0.12	0.05	-0.02	0.31	0.36*	-0.25	-0.57**	-0.45**	-0.70**	-0.89**	-0.55**	-0.31	1.00	
15	-0.44**	-0.13	0.57**	-0.24	-0.18	-0.21	-0.53**	-0.67**	-0.82**	-0.54**	-0.46**	-0.64**	-0.76**	0.57**	1.00

注: 1 为生物量; 2 为根生物量; 3 为根冠比; 4 为根长; 5 为根表积; 6 为株高; 7 为基茎; 8 为叶N量; 9 为根N量; 10 为叶P量; 11 为根P量; 12 为P吸收量; 13 为N吸收量; 14 为P利用率; 15 为N利用率。下表同。

## 2.2 枫香植株性状变异

性状变异系数可以为品种改良的目标性状选择及栽培措施的实施提供参考。由表 4 可以看出, 同一种源不同性状变异差异较大, 广西南丹种源具有最小的变异系数变化范围 (3.94 ~ 23.09), 安徽泾县和江西南昌种源次之, 福建邵武和延平种源的较大 (6.33 ~ 35.36, 7.7 ~ 35.85)。同一种源各性状变异

排序表明, 除江西南昌种源的总生物量和安徽泾县种源的 N、P 吸收量变异系数较小外, 其他各种源的 N、P 吸收量, 根冠比, 根系生物量和总生物量变异均较大, N、P 利用效率变异均较小。不同种源同一性状的变异系数差异也较大, 其中, 江西南昌和广西南丹种源的总生物量和根干重变异系数均较小, 是最大的 1/2。

表 4 不同种源枫香性状变异  
Table 4 Variation of plant traits in Formosan sweet gum

性状	广西南丹		福建延平		福建邵武		江西南昌		浙江永康		安徽泾县		江苏宜兴	
	均数	变异系数	均数	变异系数	均数	变异系数	均数	变异系数	均数	变异系数	均数	变异系数	均数	变异系数
1	0.89	13.27	0.80	24.30	0.68	19.89	0.94	11.59	0.82	25.31	0.60	18.56	0.72	23.87
2	0.36	14.36	0.38	25.93	0.37	21.98	0.45	14.50	0.46	26.10	0.31	21.60	0.40	22.72
3	0.74	23.09	0.98	25.34	1.31	35.36	1.08	31.33	1.31	15.68	1.08	15.80	1.36	26.66
4	736	9.48	709	19.06	693	9.99	752	13.78	710	14.26	688	10.95	715	13.46
5	60.85	11.09	49.04	25.37	45.58	12.58	51.29	14.03	44.88	14.94	43.41	11.88	44.80	16.66
6	13.08	14.62	9.20	18.12	6.73	8.14	8.64	16.94	8.43	14.56	7.19	13.07	6.91	10.88
7	2.54	14.83	2.45	13.51	2.37	10.14	2.72	9.33	2.35	12.80	2.31	7.93	2.41	12.94
8	17.21	7.65	19.22	8.92	20.57	14.16	21.18	13.77	17.44	10.67	18.49	3.23	21.89	11.38
9	8.81	10.80	9.42	8.33	9.67	15.18	9.73	11.70	9.03	6.78	7.66	14.87	8.68	9.56
10	3.29	12.14	3.95	22.92	3.98	9.97	3.93	11.33	3.76	13.91	3.39	16.15	3.65	8.98

续表 4

11	3.05	5.54	4.52	18.45	4.67	10.88	4.18	19.40	3.83	8.68	4.51	15.06	4.11	6.79
12	8.43	13.53	9.53	35.85	7.97	24.27	10.53	21.28	8.78	32.12	177.36	0.89	7.70	29.51
13	105.03	3.94	86.88	12.83	85.84	7.58	91.57	12.78	95.84	9.38	106.53	6.27	94.26	5.60
14	28.40	21.03	27.55	29.21	24.66	25.27	34.96	15.47	25.76	19.56	128.93	2.67	26.12	22.31
15	31.68	9.62	29.41	10.11	27.83	7.17	27.16	7.83	31.04	7.58	65.23	5.20	27.48	6.84

### 2.3 不同种源枫香主成分分析

枫香植株性状主成分分析表明（表 5），在所有的成分构成中，信息主要集中在前 3 个主成分，其累积贡献率为 83.264%。其中第一主成分贡献率 48.446% 为最大，第二、三主成分的贡献率分别为 23.586%、11.233%。在第一主成分的特征向量中，特征向量值较高且为正的性状有 N、P 吸收量，基茎，总生物量。特征向量值较高且为负的性状有 N、P 利用效率和根冠比。说明第一主成分大的处理（P 水平），高 P 时，枫香根冠比，N、P 利用效率较小，种源间生物量差异由 N、P 吸收量决定，且 N 吸收利用的影响更大。第一主成分主要包含营养吸收状况性状，是养分吸收性状因子。第二主成分的特征向量中，特征向量值较高且为正的性状有根表积、P 利用效率、株高。特征向量值较高且为负的性状是根茎叶 N、P 含量。第二主成分主要是营养利用状况性状，是养分利用性状因子。说明枫香 P 利用效率高，株高及根系生长快，植株生长速度大于 N、P 吸收速度，根茎叶 N、P 含量表现低。第三主成分的特征向量中，特征向量值较高且为正的性状有根冠比、根生物量和根长。特征向量值较高且为负的性状是茎 N、P 含量，株高。说明枫香保证较好地地下部生长时，地上部生长受抑制主要表现为茎 N、P 含量低，植株矮小。第三主成分是反映根系性状，是根系性状因子。

表 6 是标准化的主成分得分和各处理所处的位置。从第一主成分得分排序看，基本是供 P 处理的得分最多，排在前面；而无 P 处理（P<sub>0</sub>）得分最少，几乎全排在最后。表明 P 水平在第一主成分起主导作用，是影响 N、P 吸收状况的重要因素，即不同种源枫香的 N、P 吸收量随供 P 水平的增加而增加。不同种源最佳适肥水平不等，江西南昌、江苏宜兴、浙江永康和安徽泾县种源在 P<sub>2</sub> 时得分最高；广西南丹、福建延平和福建邵武种源在 P<sub>1</sub> 时得分最高。可以说前 4 个种源较后 3 个种源耐高 P 胁迫。按照供 P 水平看，7 个种源枫香相比，P<sub>0</sub> 时，江西南昌>广西南丹>福建邵武>福建延平>浙江永康>江苏宜兴>安徽泾县；

表 5 不同种源枫香性状的主成分分析

Table 5 Principle component analysis for plant traits in Formosan sweet gum

主成分	第一主成分	第二主成分	第三主成分	性状
特征向量	0.872	0.385	0.152	1
	0.624	0.171	0.699	2
	-0.516	-0.246	0.749	3
	0.634	0.413	0.381	4
	0.528	0.749	0.007	5
	0.462	0.747	-0.380	6
	0.889	0.164	0.025	7
	0.609	-0.512	0.066	8
	0.723	-0.309	-0.253	9
	0.736	-0.394	0.213	10
	0.363	-0.829	-0.074	11
	0.943	-0.102	0.128	12
	0.970	0.114	-0.070	13
	-0.448	0.809	-0.018	14
	-0.755	0.324	0.425	15
特征根	7.778	3.656	1.976	
贡献率	48.446	23.586	11.233	
累计贡献率	48.446	72.032	83.264	
因子	养分吸收	养分利用	根系	

P<sub>1/2</sub> 时，福建延平>江西南昌>广西南丹>江苏宜兴>福建邵武>浙江永康>安徽泾县；P<sub>1</sub> 时，江西南昌>福建延平>福建邵武>广西南丹>浙江永康>江苏宜兴>安徽泾县，P<sub>2</sub> 时，江西南昌>江苏宜兴>浙江永康>福建邵武>福建延平>广西南丹>安徽泾县。表明江西南昌具有较好的 N、P 吸收机制。从第二主成分得分排序看，广西南丹、江西南昌和浙江永康种源得分较高，基本都在前面；福建邵武和江苏宜兴种源得分较低，基本都在后面。表明种源在第二主成分起主导作用，是影响养分利用性状的重要因素，即广西南丹、江西南昌、浙江永康 3 个种源具有较好的 N、P 利用机制。第三主成分得分排序没有明显的规律性，说明根系生长状况受种源、施肥及其他外界因素共同作用，不同种源根系受影响的主导因素不同。

表 6 各处理标准化的主成分得分与排序

Table 6 Standardized scores and sorting of principal components for all traits

种源	第一主成分	种源	第二主成分	种源	第三主成分
江西南昌P <sub>2</sub>	2.102	广西南丹P <sub>1</sub>	2.205	福建邵武P <sub>0</sub>	1.696
江西南昌P <sub>1</sub>	1.547	广西南丹P <sub>0</sub>	2.119	浙江永康P <sub>2</sub>	1.453
江苏宜兴P <sub>2</sub>	1.394	广西南丹P <sub>1/2</sub>	1.939	浙江永康P <sub>1</sub>	1.234
福建延平P <sub>1</sub>	1.324	广西南丹P <sub>2</sub>	1.285	江苏宜兴P <sub>2</sub>	1.227
广西南丹P <sub>1</sub>	1.161	江西南昌P <sub>0</sub>	0.782	江苏宜兴P <sub>0</sub>	1.087
福建延平P <sub>1/2</sub>	0.864	福建延平P <sub>1/2</sub>	0.773	浙江永康P <sub>1/2</sub>	0.946
福建邵武P <sub>1</sub>	0.753	浙江永康P <sub>1/2</sub>	0.745	江西南昌P <sub>1/2</sub>	0.924
浙江永康P <sub>2</sub>	0.714	江西南昌P <sub>1/2</sub>	0.350	福建延平P <sub>1/2</sub>	0.823
浙江永康P <sub>1</sub>	0.604	浙江永康P <sub>2</sub>	0.252	江西南昌P <sub>0</sub>	0.707
福建邵武P <sub>2</sub>	0.484	江西南昌P <sub>1</sub>	-0.002	福建邵武P <sub>1</sub>	0.658
福建延平P <sub>2</sub>	0.382	安徽泾县P <sub>1</sub>	-0.017	安徽泾县P <sub>1</sub>	0.313
广西南丹P <sub>2</sub>	0.178	浙江永康P <sub>1</sub>	-0.090	江苏宜兴P <sub>1/2</sub>	0.142
江西南昌P <sub>1/2</sub>	0.050	江苏宜兴P <sub>2</sub>	-0.114	江西南昌P <sub>1</sub>	0.054
江苏宜兴P <sub>1</sub>	-0.084	福建邵武P <sub>0</sub>	-0.137	福建邵武P <sub>1/2</sub>	-0.119
江西南昌P <sub>0</sub>	-0.185	浙江永康P <sub>0</sub>	-0.156	江西南昌P <sub>2</sub>	-0.134
安徽泾县P <sub>2</sub>	-0.194	安徽泾县P <sub>0</sub>	-0.273	福建延平P <sub>1</sub>	-0.186
广西南丹P <sub>1/2</sub>	-0.360	江苏宜兴P <sub>0</sub>	-0.429	江苏宜兴P <sub>1</sub>	-0.238
广西南P <sub>0</sub>	-0.455	福建延平P <sub>0</sub>	-0.478	安徽泾县P <sub>0</sub>	-0.307
浙江永康P <sub>1/2</sub>	-0.530	安徽泾县P <sub>1/2</sub>	-0.538	安徽泾县P <sub>2</sub>	-0.411
福建邵武P <sub>1/2</sub>	-0.606	安徽泾县P <sub>2</sub>	-0.564	浙江永康P <sub>0</sub>	-0.423
安徽泾县P <sub>1</sub>	-0.662	江苏宜兴P <sub>1/2</sub>	-0.635	广西南丹P <sub>0</sub>	-0.492
江苏宜兴P <sub>1/2</sub>	-0.685	江苏宜兴P <sub>1</sub>	-0.652	广西南丹P <sub>1/2</sub>	-0.528
福建延平P <sub>0</sub>	-0.938	江西南昌P <sub>2</sub>	-0.701	安徽泾县P <sub>1/2</sub>	-0.663
福建邵武P <sub>0</sub>	-0.959	福建延平P <sub>2</sub>	-0.740	福建延平P <sub>0</sub>	-0.887
安徽泾县P <sub>1/2</sub>	-1.251	福建邵武P <sub>1/2</sub>	-0.780	广西南丹P <sub>1</sub>	-1.387
浙江永康P <sub>0</sub>	-1.480	福建邵武P <sub>1</sub>	-0.913	福建邵武P <sub>2</sub>	-1.687
江苏宜兴P <sub>0</sub>	-1.509	福建延平P <sub>1</sub>	-1.068	福建延平P <sub>2</sub>	-1.839
安徽泾县P <sub>0</sub>	-1.655	福建邵武P <sub>2</sub>	-2.163	广西南丹P <sub>2</sub>	-1.964

### 3 讨论与结论

从吸收利用角度出发,根毛和较细的根系是土壤养分、水分的主要吸收者,较粗根系的养分和水分吸收利用能力相对较弱,其物质合成、运输和贮藏能力较强。所以,根系对植物养分的吸收利用至关重要。本试验对生物量、根系、N(或P)吸收利用和各器官N(或P)含量进行了相关分析表明,除P利用率外,生物量与其他性状均极显著相关,生物量差异主要是由N(或P)吸收随P水平的变化引起的;P利用率主要与种源相关,具有一定的稳定性,这与枫香各性状变异系数分析结果一致。低P胁迫引起植株N吸收利用的变化对植株生长的抑制影响更大,并且对地上部的抑制大于根系。相关分析还表明枫香植株体内的P吸

收量与N吸收量、根系的形态特征指标显著正相关,即枫香植株体内P含量会影响根系对N、P的吸收。枫香植株性状变异系数分析还表明江西南昌和广西南丹种源的总生物量和根干重较稳定,具有较好的生物量分配调控机制。

主成分分析方法是研究相关变量共同关系的技术,可以根据变量在主成分上的得分判断变量的影响程度,对主成分贡献大的变量其影响程度也大<sup>[15]</sup>。陈俊意等<sup>[16]</sup>研究表明,对玉米基因型P效率的影响的第一主成分为P吸收率因子,第二主成分为P利用率因子。本试验通过不同种源枫香P响应性状的主成分分析,第一主成分为枫香N、P吸收量因子,随P水平的变化较大;第二主成分为枫香P利用效率因子,种源起主导作用,随P水平的变化较小,具有一定稳定性,与枫香性状相关

分析结果一致; 第三主成分为枫香根系因子。本试验对各处理标准化主成分得分与排序表明江西南昌种源具有较好的 N、P 吸收机制; 广西南丹、江西南昌和浙江永康种源具有较好的 N、P 利用机制, 与冷华妮等<sup>[17]</sup>分析结果基本一致。利用主成分分析法选择耐 P 胁迫种源, 较采用相对株高、相对地上部干重、相对地下部干重、P 吸收效率、P 利用效率等性状中一个或者几个性状的加权更为科学和准确, 而且可以按照育种需要将枫香种源进行分类选择。本试验选出江西南昌为 P 吸收利用机制都较好的种源。

### 参考文献:

- [1] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况. 土壤学报, 1989, 26(3): 280-286
- [2] 陈芳, 李战礼, 陈鹤修. 枫香造林成效分析. 安徽林业科技, 2003 (4): 19-20
- [3] Shukla MK, Lal R, Ebinger M. Principal component analysis for predicting corn biomass and grain yields. Soil Science, 2004, 3(169): 215-224
- [4] 郭笃发, 王秋兵. 主成分分析法对土壤养分与小麦产量关系的研究. 土壤学报, 2005, 42(3): 523-528
- [5] 胡良平. 现代统计学与 SAS 应用. 北京: 军事医学科学出版社, 2002
- [6] Chang SX. Seedling sweetgum half-sib family response to N and P fertilization: Grown, leaf area, net photosynthesis and nutrient uptake. Forest Ecology and Management, 2003, 173: 281-291
- [7] 何贵平, 陈益泰, 唐雪元. 枫香地理种源幼林生长性状变异研究. 江西农业大学学报, 2005, 27(4): 585-589
- [8] 毛达如. 植物营养研究方法. 北京: 中国农业大学出版社, 2005
- [9] Lowther JR. Use of a single sulphuric acid-hydrogen peroxide digest for the analysis of Pinus radiata needles. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1980, 11: 175-188
- [10] Mukherjee SK, Asanuma S. Possible role of cellular phosphate pool and subsequent accumulation of inorganic phosphate on the aluminum tolerance in Bradyrhizobium japonicum. Soil Biol. Biochem., 1998, 30(12): 1511-1516
- [11] 曹靖, 张福锁. 低磷条件下不同基因型小麦幼苗对磷的吸收和利用效率及水分的影响. 植物生态学报, 2000, 24(6): 731-735
- [12] 范曾丽, 王三根. 缺磷胁迫对不同玉米幼苗生长的影响. 中国农学通报, 2007, 23 (3): 231-236
- [13] 苗淑杰, 乔云发, 韩晓增. 大豆根系特征与磷素吸收利用的关系. 大豆科学, 2007, 26(1): 16-21
- [14] Pratapbhanu SB, Bernd S, Norbert C. Phosphorus efficiency of wheat and sugar beet seedlings grown in soils with mainly calcium, or iron and aluminium phosphate. Plant and Soil, 2002, 246: 41-52
- [15] 黄宁. 关于主成分分析的应用与思考. 数理统计与管理, 1999, 18(5): 44-52
- [16] 陈俊意, 蔡一林, 王国强. 玉米基因型磷效率的主成分分析. 玉米科学, 2008, 16(1): 67-70
- [17] 冷华妮, 陈益泰, 段红平, 饶龙兵, 王永军. 磷胁迫对不同种源枫香生长及氮、磷吸收利用率的影响. 应用生态学报, 2009, 20(4): 754-760

## Principal Component Analysis of Response-Related Traits to Phosphate Rate in Formosan Sweet Gum Provenances

LENG Hua-ni<sup>1,2</sup>, DUAN Hong-ping<sup>2</sup>, CHEN Yi-tai<sup>1</sup>, SUN Hai-jing<sup>1</sup>, HU Yun-xue<sup>3</sup>

(1 Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang, Zhejiang 311400, China; 2 College of Resource and Environmental, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3 College of Forestry and Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**Abstract:** Plot experiment was conducted to determine the dominant factors which influence the biomass, optimal phosphorus concentration of different provenances and excellent P stress-resistance-type provenances of Formosan sweet gum. Correlation analysis showed that, apart from stable P utilization, there were significant correlations between biomass of Formosan sweet gum and the other response-related traits, and the change of N absorption caused by low-phosphorus stress had a greater impact on the growth of Formosan sweet gum. Principal component analysis showed that N and P absorption were the dominant factors for the differences in biomass, followed by P utilization. Standardized scores and sorting of principal components showed the better mechanism of N and P absorption and utilization in Nanchang provenance and the better characteristics of provenance with a relative stable P utilization efficiency in Nandan. According to the diversity of available soil phosphorus in China, seven typical Formosan sweet gum provenances were selected from Nanchang with the wide adaptive characteristics and from Nandan with P-stress-resistant characteristics.

**Key words:** Formosan sweet gum provenances, Phosphate rate, Response-related traits to phosphate rate, Principal component analysis, Correlation analysis