

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.03.019

# 油茶耐低磷指标鉴定及芽苗砧筛选

曾进<sup>1</sup>, 赵兰<sup>2</sup>, 刘娟<sup>1</sup>, 段永康<sup>1</sup>, 王淑媛<sup>1</sup>,  
王振丽<sup>1</sup>, 盖甜甜<sup>1</sup>, 任志华<sup>1</sup>, 郭晓敏<sup>1</sup>, 胡冬南\*

(1. 江西农业大学林学院, 江西省森林培育重点实验室, 江西 南昌 330045; 2. 江西省林业科技推广和宣传教育中心, 江西 南昌 330045)

**摘要:** [目的] 本研究旨在探讨不同油茶半同胞子代实生苗的耐低磷能力, 筛选耐低磷性强的砧木以及可用来鉴定油茶耐低磷性的关键指标, 为油茶良种繁育以及耐低磷的机制研究奠定基础。[方法] 以 12 个品种油茶的半同胞实生苗为研究对象, 进行盆苗试验, 设定正常磷  $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ 、低磷  $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$  2 个浓度, 测定生物量、叶形态、根系形态、全磷等 14 个指标, 以耐低磷系数为衡量油茶耐低磷的依据, 建立逐步回归模型判别耐低磷关键指标。[结果] 低磷胁迫减少了大部分油茶地上部分和根系的生物量积累, 增加了根冠比和总磷利用效率。主成分分析将 14 个指标转化为 4 个独立的综合指标, 累计贡献率达 90.398%。依据综合评价价值 ( $D$ ), 12 个品种油茶半同胞子代聚类为 3 种类型, 其中, GF20、CL3、84-3 为相对不耐低磷类型; W1、CL53、GX48 为中间型; G8、CL4、W2、CL40、CL18、83-4 为相对耐低磷类型。 $PA$  (总磷积累量)、 $SPC$  (地上全磷)、 $TRA$  (总根表面积)、 $LW$  (叶宽)、 $RPC$  (根全磷) 指标的回归模型为:  $D = -0.960 + 0.666PA + 0.341SPC + 0.379TRA + 0.460LW + 0.197RPC$ 。[结论] 低磷胁迫或许会抑制油茶的生长, 但普遍增加根冠比和总磷利用效率。长林 18、长林 40、赣 8、长林 4、赣无 2、赣石 83-4 相对耐低磷。总磷积累量、地上全磷、总根表面积、叶宽、根全磷可作为油茶耐低磷性的判断指标。

**关键词:** 油茶; 磷缺乏; 指标鉴定; 综合评价; 逐步回归

**中图分类号:** S794.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2021)03-0166-08

磷是植物生长所必需的元素之一, 也是构成植物体内核酸、蛋白等大分子物质的重要组分, 对植物发育起着重要作用<sup>[1-2]</sup>。土壤中的磷主要以无机磷形式被植物吸收<sup>[3]</sup>, 由于铁、铝等金属离子易与土壤颗粒形成难溶性物质, 导致土壤中可以被植物吸收利用的有效磷含量极低, 施入土壤的磷肥当季利用率不足 25%<sup>[4-5]</sup>。施磷肥是解决植物缺磷的直接方法, 但过量磷肥会造成土壤板结, 污染水体<sup>[6]</sup>, 我国磷肥大多依赖进口, 价格高, 且目前磷库资源匮乏<sup>[7]</sup>, 施磷肥并不是最佳解决途径。研究发现, 植物在遗传过程中会形成不同的养分吸收策略<sup>[8]</sup>, 同一植物不同品种间的营养吸收、利用效率也有很

大差异<sup>[9]</sup>。因此, 从植物本身出发, 研究其在不同磷营养环境下生长及养分差异, 筛选不同磷营养效率品种, 是解决土壤有效磷缺乏, 提高植物养分吸收利用效率的有效途径。

油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 是重要的木本油料树种, 生产上油茶良种通常采用嫁接繁殖<sup>[10]</sup>, 砧木和穗条通过嫁接后成为一个共生体, 砧木为植物提供养分和水分, 砧木的营养状况直接影响了嫁接苗的成活率和生长发育<sup>[11]</sup>。目前, 砧穗互作研究主要集中在嫁接亲和性上<sup>[12-14]</sup>, 忽略了砧木本身营养吸收利用差异带来的影响。油茶主要分布在我国南方, 而南方林地土壤普遍有效磷含量低<sup>[15]</sup>, 限制

收稿日期: 2020-09-19 修回日期: 2021-03-07

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2018YFD1000603); 国家自然科学基金项目 (31760223); 2019 年度第二批林业科技创新专项 [2019]23 号

\* 通讯作者: 胡冬南, 女, 教授, 博士生导师. E-mail: dnhu98@163.com

了油茶的生长。贫磷会减少油茶生物量、磷积累量<sup>[16-17]</sup>,还会影响油茶发芽和结实<sup>[18]</sup>。耐低磷油茶有较强的根系生长能力,通过发达的根系分泌更多的酸性磷酸酶与有机酸来提高有效磷的利用<sup>[19-20]</sup>,还会通过调节磷转运蛋白来适应低磷环境<sup>[21-22]</sup>。油茶低磷适应性是从形态、生理多方面综合表现的<sup>[16,18]</sup>,通过多指标综合筛选出耐低磷及磷高效油茶才是解决油茶林地土壤有效磷缺乏的关键。不同油茶无性系及砧穗组合对低磷胁迫的响应有显著差异<sup>[17,23]</sup>。油茶为异花授粉植物,同一母本不同子代间为半同胞家系。其他植物研究表明,不同基因型半同胞家系的磷利用效率存在较大差异<sup>[24]</sup>,但油茶

不同基因型半同胞家系的磷利用效率差异还未知。因此,本试验采用沙培法,研究江西省主推的12个品种油茶半同胞实生子代的耐低磷能力差异,筛选油茶耐低磷指标,并得到耐低磷油茶砧木。油茶耐低磷指标判别以及耐低磷芽苗砧筛选,对油茶良种选育与缓解磷肥消耗有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试油茶材料

试验材料是江西省主推的12个品种油茶半同胞实生子代,主推品种详细信息见表1。

表1 试验材料

Table 1 Experimental material

编号 NO.	品种名称 Variety name	符号 Symbol	选育/生产单位 Breeding/production unit	命名号 Naming	适宜种植区 Suitable planting area
1	赣抚20	GF20	江西省林业科学院	国S-SC-CO-004-2007	江西、湖南
2	赣无1	W1	江西省林业科学院	国S-SC-CO-007-2007	江西、湖南
3	赣石84-3	84-3	江西省林业科学院	国S-SC-CO-023-2008	江西
4	赣8	G8	江西省林业科学院	国S-SC-CO-020-2008	江西、湖南、广西
5	长林4	CL4	中国林业科学研究院亚热带林业研究所	国S-SC-CO-006-2008	浙江、江西、广西、湖南、安徽、贵州、湖北
6	长林3	CL3	中国林业科学研究院亚热带林业研究所	国S-SC-CO-005-2008	油茶中心产区均可
7	赣无2	W2	江西省林业科学院	国S-SC-CO-026-2008	江西、湖南
8	长林40	CL40	中国林业科学研究院亚热带林业研究所	国S-SC-CO-011-2008	浙江、江西、广西、湖南
9	赣石83-4	83-4	江西省林业科学院	国S-SC-CO-025-2008	江西、湖南、广西
10	长林18	CL18	中国林业科学研究院亚热带林业研究所	国S-SC-CO-007-2008	油茶中心产区均可
11	长林53	CL53	中国林业科学研究院亚热带林业研究所	国S-SC-CO-012-2008	浙江、江西、广西、湖南、安徽、贵州、湖北
12	赣兴48	GX48	江西省林业科学院	国S-SC-CO-006-2007	江西、湖南

### 1.2 试验设计

2018年收集12个品种油茶的成熟果实,脱壳取种籽,12月份播种沙藏,待长出子叶后移至口径为20 cm、河沙为基质的圆底花盆中,每盆3株,每处理9盆,每盆底部放置托盘。所有油茶苗在江西农业大学科技园大棚内培养,根据基质湿度适当补充水分,每12 d左右浇灌1次营养液。霍格兰营养液配方为:Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 4 mmol·L<sup>-1</sup>,KNO<sub>3</sub> 3 mmol·L<sup>-1</sup>,MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 2 mmol·L<sup>-1</sup>,H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 50 μmol·L<sup>-1</sup>,ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 15 μmol·L<sup>-1</sup>,CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 2 μmol·L<sup>-1</sup>,MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 50 μmol·L<sup>-1</sup>,H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> 14 μmol·L<sup>-1</sup>,Fe-Na<sub>2</sub>-EDTA 100 μmol·L<sup>-1</sup>,磷源由KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>提供,不足的钾用KCl补充。2019年3月

开始浇灌霍格兰营养液,培养8个月后测定各品种油茶幼苗在正常磷(1 mmol·L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)和低磷(0 mmol·L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)下的各项生长及养分指标,3个生物学重复。

### 1.3 测定指标与方法

每个处理选长势较一致的油茶收获整株,洗净根系,将根、茎、叶分离。用Expression 10000XL 3.49 扫描仪扫描整个根系,Win RHIZO(Pro2012b)分析并计算总的根系指标。CI-203手持式激光叶面积仪测定整株叶片形态。分离后的根、茎、叶放入烘箱中,100℃杀青30 min后65℃烘至恒质量,用电子秤分别称量根、茎、叶干质量,并计算根冠比。H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>煮消根、茎、叶后,Smart Chem

200 全自动智能化学分析仪测定各组织全磷, 并计算磷积累量、磷利用效率。公式如下:

总磷积累量 (mg) = 总干质量/全磷

总磷利用效率 ( $\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ ) = 总干质量/总磷积累量

#### 1.4 数据统计与分析

用 SPSS 25.0 进行相关性、主成分、逐步回归分析, 结合隶属函数综合评价 12 个品种油茶半同胞实生子代的耐低磷顺序, 运用 Heml 1.0 Heat map Illustrator 软件进行聚类热图分析。相关指标计算公式<sup>[25]</sup>如下:

##### 1.4.1 各指标耐低磷系数

耐低磷系数 = 低磷指标值/正常磷指标值 (1)

##### 1.4.2 油茶综合指标隶属函数值

$$\sum \mu(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式(2)中:  $\mu(X_j)$  表示第  $j$  个综合指标的隶属函数值,  $X_j$  表示第  $j$  个综合指标值;  $X_{\max}$  表示第  $j$  个综合指标的最大值,  $X_{\min}$  表示第  $j$  个综合指标的最小值。

各综合指标权重:

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中:  $W_j$  表示第  $j$  个综合指标在所有综合指标中的重要程度及权重;  $P_j$  为各品种第  $j$  个综合指标的贡献率。

##### 1.4.3 油茶的耐低磷能力

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j] \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

式中:  $D$  表示在低磷胁迫条件下油茶耐低磷能力的综合评价值。

## 2 结果与分析

### 2.1 各指标耐低磷系数差异分析

由于不同品种油茶半同胞实生子代在低磷和正常磷下生长差异较大, 为消除种间误差, 用耐低磷系数能更准确的反映其耐低磷能力大小<sup>[26]</sup>。表 2 表明: 低磷下各油茶的地上干质量、总根长、总根表面积、叶面积、叶长、叶宽以及总磷积累量与正常磷 (P1) 相比均有所下降 (耐低磷系数 < 1), 其中, CL18 的地上干质量和叶面积耐低磷系数最接近 1。除 CL3 和 CL18 外, 其他油茶的根冠比耐低磷系数均大于 1, 除 W1 外的所有油茶总磷利用效率的耐低磷系数也都大于 1, 但是不同油茶的各项指标变化幅度不同。因此, 用单项指标的耐低磷系

表 2 油茶各指标的耐低磷系数

Table 2 Low-P tolerant coefficient of *C.oleifera*

品种 Variety	指标 Index													
	RS	RW	SW	TRL	TRA	TRV	LA	LL	LW	RPC	SPC	PPC	PA	PUE
GF20	2.030	0.671	0.322	0.555	0.564	0.602	0.588	0.747	0.755	0.780	0.766	0.774	0.358	1.340
W1	1.370	0.321	0.240	0.395	0.411	0.445	0.647	0.704	0.848	1.000	1.275	1.124	0.282	0.991
84-3	1.368	0.478	0.336	0.620	0.574	0.573	0.523	0.724	0.716	0.649	0.772	0.702	0.287	1.445
G8	1.230	0.779	0.609	0.624	0.674	0.824	0.760	0.822	0.881	1.075	0.901	0.934	0.533	1.251
CL4	2.208	1.264	0.574	0.663	0.633	0.624	0.573	0.711	0.778	1.230	0.790	0.938	0.620	1.060
CL3	0.871	0.448	0.470	0.611	0.582	0.502	0.722	0.937	0.779	0.716	0.918	0.840	0.366	1.253
W2	1.601	0.772	0.607	0.790	0.759	0.709	0.835	0.783	0.994	0.751	0.809	0.782	0.526	1.225
CL40	1.988	1.016	0.510	0.626	0.615	0.698	0.596	0.698	0.788	1.096	1.005	1.041	0.585	1.029
83-4	1.173	0.568	0.572	0.859	0.912	0.993	0.617	0.719	0.825	0.809	0.862	0.838	0.423	1.221
CL18	0.846	0.643	0.817	0.800	0.780	0.713	0.848	0.864	0.903	0.749	0.928	0.858	0.593	1.252
CL53	2.494	0.860	0.339	0.332	0.369	0.393	0.668	0.781	0.851	1.060	0.918	0.970	0.429	1.014
GX48	1.553	0.551	0.563	0.792	0.830	1.055	0.684	0.879	0.770	0.633	0.829	0.746	0.458	1.280

注: RS: 根冠比; RW: 根干质量; SW: 地上干质量; TRL: 总根长; TRA: 总根表面积; TRV: 总根体积; LA: 叶面积; LL: 叶长; LW: 叶宽; RPC: 根全磷; SPC: 地上全磷; PPC: 植株全磷; PA: 总磷积累量; PUE: 总磷利用效率。下同。

Notes: RS: Ratio of root to shoot; RW: Root dry weight; SW: Steam and leave dry weight; TRL: Total root length; TRA: Total root surface area; TRV: Total root volume; LA: Leave area; LL: Leave length; LW: Leave width; RPC: Root Pi concentration; SPC: Shoot Pi concentration; PPC: Plant Pi concentration; PA: Phosphate accumulation; PUE: Phosphate utilization efficiency. The same as below.

数来评判油茶的耐低磷能力大小,结果会有很大差异。

## 2.2 各指标相关性分析

由表3可以看出:许多性状指标间存在着较强关联性,如地上干质量与总根长、总根表面积、总

根体积、叶面积、总磷积累量呈显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )正相关,总磷积累量与根干质量、地上干质量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),根全磷、地上全磷、植株全磷均与总磷利用效率呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。

表3 油茶各指标耐低磷系数的相关性

Table 3 Correlation of low-P tolerant of each character of *C. oleifera*

指标 Index	RS	RW	SW	TRL	TRA	TRV	LA	LL	LW	RPC	SPC	PPC	PA
RW	0.659*												
SW	-0.391	0.311											
TRL	-0.472	0.034	0.782**										
TRA	-0.454	0.005	0.767**	0.976**									
TRV	-0.291	0.004	0.595*	0.814**	0.904**								
LA	-0.451	-0.113	0.632*	0.306	0.312	0.153							
LL	-0.501	-0.309	0.404	0.230	0.230	0.156	0.642*						
LW	-0.167	0.071	0.459	0.176	0.196	0.055	0.832**	0.145					
RPC	0.543	0.698*	-0.073	-0.445	-0.406	-0.286	-0.202	-0.480	0.092				
SPC	-0.175	-0.331	-0.286	-0.473	-0.427	-0.335	0.102	-0.147	0.201	0.327			
PPC	0.231	0.228	-0.205	-0.556	-0.504	-0.386	-0.038	-0.359	0.190	0.795**	0.824**		
PA	0.164	0.785**	0.798**	0.442	0.424	0.350	0.388	0.067	0.394	0.436	-0.214	0.153	
PUE	-0.461	-0.409	0.144	0.466	0.422	0.336	0.029	0.346	-0.243	-0.780**	-0.644**	-0.896**	-0.280

注: \*和\*\*分别表示两指标相关性达显著水平( $P < 0.05$ )和极显著水平( $P < 0.01$ )。

Note: \* and \*\* indicate significant correlation ( $P < 0.05$ ) and highly significant correlation ( $P < 0.01$ ) between two index.

## 2.3 主成分分析

根据表4可知:主成分分析将14个与耐低磷相关的指标转化为4个主成分,其特征根均大于1,其中,主成分1的贡献率为26.546%,主成分2的贡献率为22.948%,主成分3的贡献率为21.353%,主成分4的贡献率为19.550%。这4个主成分可作为评价油茶耐低磷的综合指标。

特征向量表明了各个性状对主成分负荷影响的程度和方向。表4表明:第1主成分中,总根长、总根表面积和总根体积有较大的正系数值,说明这3个指标对第1主成分有较大的正面影响,这3个指标反映了根系生长,因此,将第1主成分归为根系形态指标。第2主成分中,植株全磷、地上全磷有较大正系数值,植株总磷利用效率有较大负系数值,说明第2主成分大时,植株全磷、地上全磷会增大,而植株总磷利用效率会降低;第2主成分主要反映了植株的磷营养积累能力,第2主成分归为磷营养指标。第3主成分中,根干质量的系数

值最大,第3主成分归为根生物量指标。第4主成分中,叶面积、叶宽、叶长有较大的正向系数,第4主成分归为叶形态指标。

## 2.4 综合评价

2.4.1 隶属函数分析 根据公式(2)计算12个品种油茶半同胞实生子代4个综合指标 $CI(j)$ 的隶属函数值 $\mu(X_j)$ ,由表5可知:83-4隶属函数值最大( $\mu(X_7)=1$ ),CL53隶属函数值最小( $\mu(X_7)=0$ ),表明83-4在 $CI(1)$ 综合指标中耐低磷能力最强,而CL53耐低磷性最差。

2.4.2 权重计算 利用公式(3)计算其权重 $W_j$ ,得到4个综合指标的权重分别为0.294、0.254、0.236、0.216(表5)。

2.4.3 综合指标评价值( $D$ )计算及品种聚类 利用公式(4)计算油茶耐低磷综合评价值( $D$ ),根据 $D$ 值大小得到不同品种油茶的耐低磷能力顺序为:CL18 > CL40 > G8 > CL4 > W2 > 83-4 > GX48 > W1 > CL53 > CL3 > GF20 > 84-3。

表 4 各综合指标系数及贡献率  
Table 4 Coefficients of each comprehensive index and contributive ratio

	耐低磷指标 Low-P tolerant index	主成分 Principal component			
		1	2	3	4
特征根 Eigenvalue		5.482	3.487	2.473	1.214
贡献率 Contributive ratio/ %		26.546	22.948	21.353	19.550
累计贡献率 Cumulative contributive ratio/ %		26.546	49.495	70.848	90.398
特征向量 Eigenvector	总根表面积 <i>TRA</i>	0.943	-0.259	-0.049	0.157
	总根长 <i>TRL</i>	0.908	-0.324	-0.028	0.173
	总根体积 <i>TRV</i>	0.905	-0.159	-0.040	-0.023
	地上干质量 <i>SW</i>	0.725	-0.095	0.259	0.582
	植株全磷 <i>PPC</i>	-0.260	0.937	0.178	0.015
	地上全磷 <i>SPC</i>	-0.237	0.875	-0.376	0.095
	总磷利用效率 <i>PUE</i>	0.235	-0.827	-0.389	-0.037
	根干质量 <i>RW</i>	0.089	0.069	0.986	-0.028
	总磷积累量 <i>PA</i>	0.479	0.127	0.739	0.402
	根冠比 <i>RS</i>	-0.404	0.034	0.733	-0.373
	根全磷 <i>RPC</i>	-0.186	0.646	0.662	-0.112
	叶面积 <i>LA</i>	0.162	0.019	-0.090	0.972
	叶宽 <i>LW</i>	0.126	0.281	0.100	0.779
	叶长 <i>LL</i>	0.015	-0.401	-0.286	0.683

表 5 油茶的综合性状指标值、权重、 $\mu(X_j)$  及综合评价值 (D)

Table 5 The value of comprehensive index, weight,  $\mu(X_j)$ , and comprehensive valuation (D) in *C.oleifera*

品种 Variety	$CI(1)$	$CI(2)$	$CI(3)$	$CI(4)$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	综合评价值 (D) Comprehensive valuation	排名 Rank
GF20	-0.756	-1.162	0.091	-0.887	0.311	0.053	0.448	0.162	0.246	11
W1	-0.941	2.220	-1.490	-0.363	0.261	1.000	0.000	0.331	0.402	8
84-3	-0.433	-1.350	-0.831	-1.387	0.400	0.000	0.187	0.000	0.161	12
G8	0.350	0.313	0.239	0.791	0.613	0.466	0.489	0.703	0.566	3
CL4	0.230	0.179	2.043	-0.671	0.580	0.428	1.000	0.231	0.565	4
CL3	-0.779	-0.599	-1.071	0.835	0.305	0.210	0.119	0.718	0.326	10
W2	0.259	-0.489	0.411	1.405	0.588	0.241	0.538	0.902	0.556	5
CL40	0.440	1.189	0.954	-0.721	0.638	0.711	0.692	0.215	0.578	2
83-4	1.770	0.362	-0.615	-0.909	1.000	0.480	0.248	0.155	0.507	6
CL18	0.755	-0.009	-0.234	1.709	0.723	0.376	0.356	1.000	0.608	1
CL53	-1.899	0.127	0.981	0.349	0.000	0.414	0.699	0.561	0.392	9
GX48	1.002	-0.782	-0.478	-0.151	0.791	0.159	0.287	0.399	0.427	7
权重 Weight	0.294	0.254	0.236	0.216						

采用最大距离法对 D 值进行聚类分析 (图 1), 可以将 12 个品种油茶半同胞实生子代耐低磷能力分为 3 类, 第 I 类: GF20、CL3、84-3, 为相对不

耐低磷敏感类型; 第 II 类: W1、CL53、GX48, 为中间型; 第 III 类: G8、CL4、W2、CL40、CL18、83-4, 为相对耐低磷类型。

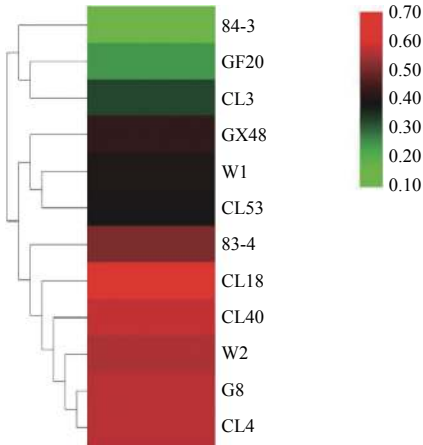


图1 油茶耐低磷性聚类图

Fig. 1 The cluster of low-P tolerance in *C.oleifera*

## 2.5 建立回归模型和筛选鉴定指标

为了解各项测定指标与  $D$  值间的相关程度, 筛选出关键的油茶耐低磷鉴定指标, 以综合评价值  $D$  为因变量, 各项测定指标为自变量, 做逐步回归分析, 建立回归模型为:  $D = -0.960 + 0.666PA + 0.341SPC + 0.379TRA + 0.460LW + 0.197RPC$ , (方程决定系数  $R^2 = 0.997$ ,  $P < 0.01$ )。根据方程结果, 14 个指标筛选出  $PA$  (总磷积累量)、 $SPC$  (地上全磷)、 $TRA$  (总根表面积)、 $LW$  (叶宽)、 $RPC$  (根全磷) 这 5 个相关性更强的指标。对回归方程的精度比较 (表 6) 发现: 精度均在 95% 以上, 证明这 5 个指标对油茶耐低磷性影响显著, 此方程可用来评价其他油茶耐低磷性。

表 6 回归方程的估计精度分析

Table 6 Analysis of estimated accuracy of regression equation

品种 Variety	原始值 Original value	回归值 Regression value	差值 Difference value	精度 Accuracy
GF20	0.246	0.254	-0.009	96.52
W1	0.402	0.405	-0.003	99.19
84-3	0.161	0.169	-0.008	95.42
G8	0.566	0.575	-0.009	98.50
CL4	0.565	0.562	0.003	99.47
CL3	0.326	0.317	0.010	97.07
W2	0.556	0.559	-0.003	99.47
CL40	0.578	0.584	-0.006	98.96
83-4	0.507	0.500	0.007	98.58
CL18	0.608	0.610	-0.002	99.71
CL53	0.392	0.379	0.013	96.78
GX48	0.427	0.421	0.005	98.75

## 3 讨论

油茶新造林面积在逐年增加, 大多数高产油茶已采取集约式经营, 但是产量仍然不高, 特别是单位面积的产量。调查发现, 同一林分, 相同管理措施下, 同一品种不同株之间的产量差别很大, 果实产量从 1 kg 到 20 kg 不等。油茶优良无性系主要通过芽苗砧嫁接的形式推广和应用, 实际生产中通常以实生苗胚根作为砧木, 在嫁接繁育时一般只注重选用良种穗条, 对砧木的选择往往是随机的, 大量研究表明, 抗逆性强的砧木能提高嫁接植株的抗逆能力, 且砧木相对穗条来说对植株的影响程度更大<sup>[21, 27]</sup>。磷缺乏是限制油茶高产的主要因素之一, 在矿质元素中, 磷是对光合作用及碳水化合物在地上部分与根系之间分配起重要作用的元素<sup>[8]</sup>。本研究结果表明, 不同品种油茶半同胞实生子代芽苗砧对磷的吸收和利用效率有很大差异, 砧木耐低磷性差异可能是单株产量差异大的原因之一。杨邵研究表明, 长林 18 号种子和砧木形态表现优, 发芽率高, 百粒质量大, 种间发芽率和百粒质量变异小, 但以长林 18 号为砧木嫁接长林 23 号、长林 40 号、长林 18 号穗条的油茶成活率低, 亲和性较差<sup>[14]</sup>。本研究发现, 长林 18 号实生后代的耐低磷能力较强, 但嫁接后成活率如何以及是否还能保持较强的耐低磷能力和优良性状, 还值得进一步研究。

本研究发现, 相对正常磷, 低磷环境下大部分油茶实生子代的根冠比增大。植物缺磷时, 受缺磷信号诱导, 同化产物向根系转运量增加, 由于缺磷使代谢紊乱, 从而使可溶性碳水化合物合成及运输受阻, 导致根系生物量增加同时减少地上生物量的积累, 但是绝对生长量是低于正常磷的<sup>[28-30]</sup>。根冠比增加被认为是植物适应低磷胁迫的反应标志<sup>[31]</sup>。相关性分析结果表明, 根冠比与根干质量显著正相关, 与地上干质量负相关但不显著, 根系干物质的大量积累或许是造成根冠比增加的主要因素。12 种油茶半同胞实生子代的地上干质量、叶面积、叶长、叶宽以及总磷积累量均受到低磷的抑制作用, 可能是由于低磷胁迫抑制了植物的磷吸收, 胞内磷浓度降低, 导致光合磷酸化水平下降, 叶肉细胞减少, 因此, 叶片生长受阻<sup>[32-33]</sup>。缺磷还会抑制油茶幼苗侧根分化和生长<sup>[34]</sup>, 低磷下 12 种油茶芽苗砧的总根长、总根表面积均减少了。

相关性结果表明, 地上干质量与总根长、总根

表面积、总根体积显著或极显著正相关,植物地上与地下生长存在异速相关性,对养分的吸收也会互相影响<sup>[35]</sup>。总磷利用率与植株全磷、地上全磷、根全磷极显著负相关。有研究表明,随着磷浓度的降低,油茶磷积累量会减少,而磷利用效率增加<sup>[17]</sup>。植物在调控耐低磷胁迫时有磷转运蛋白、转录因子等很多基因参与其中,是一个极为复杂的过程,与植物吸收和利用磷的相关指标有很多,用单个指标无法准确评判耐低磷性<sup>[36]</sup>。相关性分析发现,指标间存在显著关联性,说明指标间存在重叠信息,需要综合评价。用综合评价值评判磷效率类型的方法已在多个植物上应用<sup>[37-38]</sup>,因此,本研究以综合指标值聚类分析 12 个品种油茶半同胞子代实生苗的耐低磷性。

## 4 结 论

低磷胁迫下 12 个品种油茶半同胞子代实生苗生长受到抑制,根冠比和总磷利用效率增大是油茶适应低磷的普遍反应。GF20、CL3、84-3 为相对不耐低磷类型; W1、CL53、GX48 为相对中间型; G8、CL4、W2、CL40、CL18、83-4 为相对耐低磷类型。以综合评价值为自变量逐步回归方程,鉴别出总磷积累量、地上全磷、总根表面积、叶宽、根全磷这 5 个指标可用来判断油茶的耐低磷性。

## 参 考 文 献:

- [1] Zhang T C, Dahab M F, Nunes G S, *et al.* Phosphorus fate and transport in soil columns loaded intermittently with influent of high phosphorus concentrations[J]. *Water Environment Research*, 2007, 79(11): 2343-2351.
- [2] Bielecki R L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability[J]. *Ann. Rev. Plant Physiol*, 1973, 24: 225-252.
- [3] Takashi F, Mikio S, Hidehiro S. Kinetic characterization of two phosphate uptake systems with different affinities in suspension-cultured *Catharanthus roseus* protoplasts[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1992, 33(8): 1151-1157.
- [4] 向万胜,黄敏,李学垣.土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J].*植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 663-670.
- [5] 陈欣,宇万太,沈善敏.磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化 II.土壤有效磷及土壤无机磷组成[J].*土壤学报*, 1997, 34(1): 81-88.
- [6] 黄国勤.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J].*生态环境*, 2004, 13(4): 656-660.
- [7] 张艳,于汶加,陈其慎,等.化肥消费规律及中国化肥矿产需求趋势预测[J].*资源科学*, 2015, 37(5): 977-987.
- [8] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423-447.
- [9] 张焕朝,徐成凯,王改萍,等.杨树无性系的磷营养效率差异[J].*南京林业大学学报:自然科学版*, 2001, 25(2): 14-18.
- [10] 康红霞,刘斌,赵滑,等.良种油茶种苗嫁接繁殖技术研究[J].*现代农村科技*, 2015(16): 34-36.
- [11] 林国江.油茶砧、穗品种对嫁接体苗期低磷适应策略[J].*广东蚕业*, 2020, 54(8): 10-11.
- [12] 袁婷婷,钟秋平,丁少净,等.砧木和接穗对油茶芽苗砧嫁接苗愈合及生长的影响[J].*江西农业大学学报*, 2016, 38(6): 1076-1085.
- [13] 袁军,王慧,董文统,等.不同砧木对海南油茶嫁接成活率和苗木生长的影响[J].*热带作物学报*, 2017, 38(7): 1193-1197.
- [14] 杨邵.普通油茶砧木资源评价和砧穗互作机制的研究[D].合肥:安徽农业大学, 2015.
- [15] 何方,何柏.油茶栽培分布与立地分类的研究[J].*林业科学*, 2002, 38(5): 64-72.
- [16] 陈可丽.不同品种油茶磷效率差异的响应研究[D].福州:福建农林大学, 2014.
- [17] 陈隆升,陈永忠,彭邵锋,等.油茶对低磷胁迫的生理生化效应研究[J].*林业科学研究*, 2010, 23(5): 782-786.
- [18] 罗帅,钟秋平,葛晓宁,等.不同氮、磷、钾施肥比对油茶花芽分化的影响[J].*林业科学研究*, 2019, 32(2): 131-138.
- [19] 叶思诚,谭晓凤,袁军,等.油茶根系及分泌物中有机酸的 HPLC法测定[J].*南京林业大学学报:自然科学版*, 2013, 37(6): 59-63.
- [20] 郑芳奕,杨志坚,陈辉,等.接穗对油茶砧木根生理特性及解剖结构的影响[J].*森林与环境学报*, 2020, 40(6): 636-642.
- [21] 周俊琴,谭晓凤,袁军,等.油茶 *Phl1;1* 基因克隆及其表达分析[J].*植物遗传资源学报*, 2013, 14(3): 512-517.
- [22] 张宸辉,周俊琴,卢梦琪,等.油茶低磷响应转录因子 *CoPHR1*、*Co-PHR2* 基因的克隆与表达分析[J].*植物生理学报*, 2020, 56(4): 827-836.
- [23] 邹琳,陈可丽,李颖林,等.施磷肥对不同油茶品种生长和生理生化特性的影响[J].*四川农业大学学报*, 2016, 34(4): 464-470.
- [24] 童方平,刘振华,吴际友,等.湿地松半同胞家系磷素利用效率的研究[J].*中南林业科技大学学报*, 2012, 32(12): 154-157.
- [25] 戴海芳,武辉,阿曼古丽·买买提阿力,等.不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J].*中国农业科学*, 2014, 47(7): 1290-1300.
- [26] 栗振义,张绮芯,全宗永,等.不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形态与生理响应分析[J].*中国农业科学*, 2017, 50(20): 3898-3907.
- [27] Huang Y, Li J, Hua B, *et al.* Grafting onto different rootstocks as a means to improve watermelon tolerance to low potassium stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 149(4): 80-85DOI:10.1016/j.scienta.2012.02.009.
- [28] Qu X, Zhou J, Masabni J, *et al.* Phosphorus relieves aluminum toxicity in oil tea seedlings by regulating the metabolic profiling in the roots[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 152: 12-22.
- [29] 王剑,周志春,饶龙兵,等.马褂木种源磷效率特性差异研究[J].*林业科学研究*, 2006, 19(2): 211-215.
- [30] Nawaz M A, Imtiaz M, Kong Q, *et al.* Grafting: a technique to modi-

fy ion accumulation in horticultural crops[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 21(7): 1457.

- [31] 李青松. 大豆磷高效品种的筛选及磷高效生理机制的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [32] Yuan J, Tan X, Yuan D, *et al.* Effect of phosphates on the growth, photosynthesis, and P content of oil tea in acidic red soils[J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 2013, 32(6): 594-604.
- [33] He G, Zhang J, Hu X, *et al.* Effect of aluminum toxicity and phosphorus deficiency on the growth and photosynthesis of oil tea (*Camellia oleifera* Abel.) seedlings in acidic red soils[J]. *Acta Physiologicae Plantarum*, 2011, 33(4): 1285-1292.

- [34] 袁军, 谭晓风, 袁德义, 等. 微量元素对普通油茶幼苗根系形态及活力的影响[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(2): 314-316.
- [35] Kumar A, Shahbaz M, Koirala M, *et al.* Root trait plasticity and plant nutrient acquisition in phosphorus limited soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(6): 945-952.
- [36] 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.
- [37] 王培培, 姬俊华, 付军亮, 等. 不同基因型棉花苗期耐磷性评价及鉴定指标筛选[J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(8): 8-12.
- [38] 龚丝雨, 梁喜欢, 钟思荣, 等. 苗期耐低磷烟草基因型筛选及其磷效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 661-670.

## Screening of *Camellia oleifera* Rootstock Genotypes Tolerant to Low Phosphorus and Identification of Indexes Tolerant to Phosphorus Deficiency

ZENG Jin<sup>1</sup>, ZHAO Lan<sup>2</sup>, LIU Juan<sup>1</sup>, DUAN Yong-kang<sup>1</sup>, WANG Shu-yuan<sup>1</sup>,  
WANG Zhen-li<sup>1</sup>, GAI Tian-tian<sup>1</sup>, REN Zhi-hua<sup>1</sup>, GUO Xiao-min<sup>1</sup>, HU Dong-nan

(1. College of Forestry JAU, Key Laboratory of Forest Cultivation in Jiangxi Province, Nanchang 330045, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Forestry Science and Technology Promotion and Education Center, Nanchang 330045, Jiangxi, China)

**Abstract:** [Objective] To screen the rootstocks with high tolerance to low phosphorus and the key indexes which can be used to identify low phosphorus tolerance of *Camellia oleifera* through evaluating different cultivates rootstocks tolerant to the low phosphorus. [Method] The pot seedling experiment with normal-P ( $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) and low-P ( $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) was carried out. A total of twelve seedlings of *C. oleifera* genotypes were selected. Fourteen indexes of each seedling of *C. oleifera*, including biomass, leaf area, leaf morphology, root morphology, total phosphorus content and so on, were measured under two different treatments. The coefficient tolerant to low P was used to evaluate the low P resistance and distinguish index of the low P tolerance for *C. oleifera* using a regression model. [Result] Under low P stress, the biomass accumulation in the shoot and root of most *C. oleifera* cultivates was generally reduced, and the ratio of root to shoot and PUE was generally increased. The result of PCA analysis showed that the 14 indexes were transformed into 4 independent comprehensive indexes, and their cumulative contribution rate reached 90.398%. The 12 *C. oleifera* varieties were divided into three types by D-value clustering, among which GF20, CL3, 84-3 were clustered as a type of relatively intolerant to low P, W1, CL53, GX48 as the intermediate type, G8, CL4, W2, CL40, CL18, 83-4 as low P tolerance. The equation model of PA (Total phosphorus accumulation), SPC (Shoot phosphorus content), TRA (Total root surface area), LW (Leaf width), RPC (Root phosphorus content) was established by stepwise regression:  $D = -0.960 + 0.666PA + 0.341SPC + 0.379TRA + 0.460LW + 0.197RPC$ . [Conclusion] Low P will inhibit the growth and total P accumulation and increase the ratio of root to shoot and total PUE for *C. oleifera*. The cultivates of G8, CL4, W2, CL40, CL18, 83-4 should be considered as the relatively low P tolerance varieties. The total P accumulation, aboveground P content, total root surface area, leaf width and root P content could be identified as indicators for *C. oleifera* tolerant to low phosphorus.

**Keywords:** *Camellia oleifera*; phosphorus deficiency; index identification; comprehensive evaluation; stepwise regression