

# 不同基因型红花种质耐低磷筛选指标的鉴定及评价

许兰杰, 梁慧珍\*, 余永亮, 谭政委, 杨红旗, 董薇, 芦海灵, 夏伟 (河南省农业科学院芝麻研究中心, 河南郑州 450002)

**摘要** [目的] 获得耐低磷红花种质的形态鉴定指标, 并选择磷高效红花种质。[方法] 利用水培营养形成的低磷素水平和正常磷素水平对 17 份红花种质进行耐低磷筛选指标的鉴定及其综合评价。[结果] 低磷胁迫下, 除根冠比外, 苗高、叶长、叶宽、主根长、侧根数、根鲜重、地上部鲜重和根体积这 8 个指标的生长发育迟缓, 但不同品种不同指标间受低磷胁迫后的变异幅度不同。不同基因型红花种质耐低磷能力差异显著, 耐低磷能力较强的 3 份红花种质分别是“原阳红花-3”“封丘红花-1”和“永城红花”; 相对根体积、相对根鲜重和相对地上部鲜重可以作为红花耐低磷种质的筛选指标, 可利用红花苗期耐低磷能力的回归模型对红花进行耐低磷能力预测。[结论] 筛选出耐低磷能力较强的红花种质, 将为培育耐低磷红花新品种和克隆相关磷高效基因提供基础材料。

**关键词** 红花; 耐低磷; 鉴定筛选; 综合评价

**中图分类号** S56 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)33-0128-04

## Identifying and Evaluation of Different Genotypes Safflower with Low-phosphorus Tolerance

XU Lan-jie, LIANG Hui-zhen\*, YU Yong-liang et al (Sesame Research Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002)

**Abstract** [Objective] The research aimed to obtain the morphological indexes of low-phosphorus safflower germplasm, and select the phosphorus-efficient safflower germplasm. [Method] Identifying and evaluating 17 differences genotypes safflower under low-phosphorus and normal-phosphorus level through water culture experiment. [Result] Under the low phosphorus stress, in addition to root-shoot ratio, the growth and development of the eight indicators were slow, such as seedling height, leaf length, leaf width, main root length, lateral root number, root fresh weight, aboveground fresh weight and root volume. But the variation range of different indexes of different varieties was different after low phosphorus stress. The ability of low-phosphorus tolerance of different genotypes safflower germplasm was significantly different, and the three safflower germplasm with low-phosphorus tolerance were “Yuanyang safflower-3”, “Fengqiu safflower-1” and “Yongcheng safflower”. The relative root volume, relative root fresh weight and relative fresh weight could be used as the screening index of safflower germplasm with low-phosphorus tolerance. The regression model of the ability of low-phosphorus tolerance in safflower seedling could be used to predict the ability of low-phosphorus tolerance. [Conclusion] Identifying and evaluating safflowers with low-phosphorus tolerance provide basic-materials for breeding new sesame varieties and cloning potassium high-efficient utilizing genes in the future.

**Key words** Safflower; Low-phosphorus tolerance; Identification screening; Comprehensive evaluation

磷是植物生长发育不可缺少的大量元素之一, 直接参与光合作用、呼吸作用, 是糖类、脂肪、氮代谢、碳水化合物的合成与运输的重要调控者<sup>[1-2]</sup>。在植物生长发育过程中, 磷肥能够提高作物的产量, 抗旱、抗寒、抗病和抗倒伏等抗逆境能力<sup>[3]</sup>, 缺磷将导致植株矮小、根系发育差、成熟期推迟、产量和品质下降等问题<sup>[4]</sup>。我国大约有 2/3 的耕地缺磷, 据统计, 黄淮海地区严重缺磷的土壤占耕地面积的 67%, 属于我国最大的土壤缺磷区<sup>[5]</sup>。因此, 土壤有效磷缺乏是全球普遍存在的问题, 严重限制了作物产量和品质的提高。在农业生产中, 农民主要通过施用磷肥来解决土壤缺磷问题, 然而施入土壤中的磷素有 80% 被土壤固定, 不能被植物当季吸收, 这样不仅浪费磷矿资源、提高生产成本, 而且过量施用磷肥易造成土壤板结、环境污染等问题<sup>[6]</sup>; 而解决这一问题的根本途径是筛选土壤磷吸收利用效率高的作物品种。目前关于植物耐低磷能力的研究已广泛在玉米<sup>[7]</sup>、小麦<sup>[8]</sup>、水稻<sup>[9]</sup>等作物中开展, 并筛选出了一大批具有耐低磷能力的品种。

红花是一种集药材、油料、染料和饲料为一体的特种经

济作物, 主要分布在我国的新疆、河南、四川、云南等省份。红花籽油中亚油酸的平均含量为 75.33%, 油中含有大量的不饱和脂肪酸, 且多含有较丰富的维生素, 具有降血脂和血清胆固醇、动脉粥样硬化等功能<sup>[10-11]</sup>。目前, 关于红花的研究主要集中在品质分析<sup>[12-13]</sup>、栽培技术<sup>[14-15]</sup>、组织培养<sup>[16-17]</sup>等方面, 关于不同基因型红花耐低磷能力的评价研究鲜见报道。而直观、简便又可靠的筛选、鉴定指标是准确快速获得耐低磷红花基因型的关键。该研究采用水培试验对 17 份不同基因型红花进行苗期耐低磷能力研究, 旨在获得耐低磷红花种质的形态鉴定指标, 并选择磷高效红花种质, 为进一步研究红花耐低磷种质的生理机制和培育红花耐低磷品种提供科学依据和资源支持。

## 1 材料与方法

**1.1 供试材料** 选用 17 份红花种质为试验材料, 由河南省农业科学院芝麻研究中心提供, 品种编号及其名称见表 1。

**1.2 试验设计** 先将红花籽粒经 1% 的次氯酸钠溶液消毒 10 min 后, 用蒸馏水反复冲洗 5 次后置于发芽盒中, 并将发芽盒放入 (26 ± 1) °C 培养箱中暗培养 36 h; 转入光照培养箱中, 生长条件为 (26 ± 1) °C、16 h/8 h (日照/黑暗), 用 1/2 浓度的 Hoagland 标准营养液补充营养; 待红花幼苗长至一叶一心时, 移栽到 1/2 浓度的 Hoagland 标准营养液中。每个塑料容器移栽 6 株, 随机排列, 每日补充空气 2 次、每次 30 min, 7 d 更换一次营养液。共设置 3 次独立重复试验。磷源为磷酸二氢钾 (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)。设置对照组 (P<sub>0</sub>): 磷浓度为 5 mmol/L;

**基金项目** 河南省农科院科研发展专项资金项目 (201513110, 20157816); 河南省农科院院自主创新基金项目 (2016ZC71); 河南省农业科技攻关计划项目 (152102110140); 河南省超级产粮大省奖励资金扶持粮油良种培育项目“红花黄酮类化合物积累规律研究”。

**作者简介** 许兰杰 (1982—), 女, 河南郑州人, 助理研究员, 博士, 从事中草药栽培及育种研究。\* 通讯作者, 研究员, 博士, 硕士生导师, 从事中草药遗传育种及品质改良研究。

**收稿日期** 2017-09-13

低磷组(P<sub>1</sub>):磷浓度为 0.1 mmol/L,处理 50 d 后进行红花形态指标测定。

表 1 17 份红花种质编号及名称

| Table 1 Number and name of the 17 safflower germplasms |         |        |         |
|--------------------------------------------------------|---------|--------|---------|
| 编号 No.                                                 | 名称 Name | 编号 No. | 名称 Name |
| 1                                                      | 北京红花    | 10     | 延津红花    |
| 2                                                      | 封丘红花-1  | 11     | 延津红花-1  |
| 3                                                      | 封丘红花-2  | 12     | 永城红花    |
| 4                                                      | 河北红花    | 13     | 原阳红花-1  |
| 5                                                      | 陕西红花    | 14     | 原阳红花-2  |
| 6                                                      | 商丘红花    | 15     | 原阳红花-3  |
| 7                                                      | 四川红花    | 16     | 云南红花    |
| 8                                                      | 卫辉红花    | 17     | 郑州红花    |
| 9                                                      | 卫辉红花-1  |        |         |

1.3 测定指标及方法 苗高,直尺测定茎基部到顶部最高点高度;叶长,倒 2 叶的长度;叶宽,倒 2 叶的宽度;主根长,从子叶节到主根系顶点的长度;侧根数,除去主根外所有侧根的数量;根鲜重,子叶节以下根重量;地上部分鲜重,子叶节以上地上部重量;根冠比=根鲜重/地上部鲜重;根体积测定采用排水法。

1.4 数据处理 采用模糊隶属函数法评价 17 份红花种质耐低磷能力。以低磷处理下指标相对值  $X_{ij}$  反映低磷对第  $i$  品种第  $j$  指标影响大小, $X_{ij}$ =低磷处理下指标值/正常磷处理下指标值;以隶属函数值反映第  $i$  品种第  $j$  指标的耐低磷指

数, $P_{ij}=(X_{ij}-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin})(0\leq P_{ij}\leq 1)$ , $X_{jmax}$  为第  $j$  指标的最大值, $X_{jmin}$  为第  $j$  指标的最小值;以第  $j$  指标归一化的变异系数  $W_j$  为权重, $W_j=CV_j/\sum CV_j$ , $CV_j$  为第  $j$  指标的变异系数;以综合耐低磷指标  $P_i$  评价第  $i$  品种的综合耐低磷能力, $P_i=\sum P_{ij}\times W_j$ 。

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 数据分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫对不同红花种质生长发育的影响 从表 2 可以看出,低磷胁迫下,除根冠比外,其他 8 个指标均降低,不同品种不同指标降低的幅度不同。低磷胁迫下,苗高、叶长、叶宽、主根长、侧根数、根体积、根鲜重和地上部鲜重等 8 个指标分别下降 14.29%、19.31%、20.95%、20.86%、30.97%、49.46%、27.79%、37.77%,而根冠比增加 13.07%。根据李强等<sup>[18]</sup>研究结果,9 个指标相对值的大小可以反映该指标受低磷胁迫影响的大小,而各指标相对值的变异系数在一定程度上反映了不同品种该指标对低磷胁迫敏感程度的差异,因此可将相对值变异系数大的指标作为品种间耐低磷能力的筛选、评价指标。表 2 显示,相对根体积、相对根鲜重和相对地上部分鲜重的变异系数分别为 37.62%、23.35% 和 26.77%,因此选择相对根体积、相对根鲜重和相对地上部分鲜重为红花种质耐低磷能力的鉴定指标。

表 2 2 种磷水平下红花种质 9 个指标的统计值

| Table 2 Statistical value of 9 indexes of safflower germplasm under two postassium levels |                |                    |                   |                  |                         |                            |                                 |                         |                                    |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|-------------------|------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------|
| 处理 Treatment                                                                              | 统计值 Statistics | 苗高 Plant height cm | 叶长 Leaf length cm | 叶宽 Leaf width cm | 主根长 Main root length cm | 侧根数 Lateral root number//个 | 根体积 Root volume cm <sup>3</sup> | 根鲜重 Fresh root weight g | 地上部分鲜重 Aboveground fresh weight//g | 根冠比 Root-shoot ratio |
| 低磷处理 Low potassium treatment                                                              | 平均值            | 15.60              | 9.80              | 1.42             | 20.11                   | 12.58                      | 2.78                            | 0.33                    | 0.91                               | 0.38                 |
|                                                                                           | 变异系数//%        | 9.73               | 15.24             | 13.48            | 15.82                   | 18.44                      | 37.14                           | 32.49                   | 30.87                              | 29.80                |
| 正常磷水平 Normal-potassium treatment                                                          | 平均值            | 18.21              | 12.15             | 1.79             | 25.41                   | 18.22                      | 5.49                            | 0.46                    | 1.47                               | 0.34                 |
|                                                                                           | 变异系数//%        | 9.39               | 15.33             | 18.30            | 11.34                   | 30.09                      | 40.27                           | 39.11                   | 40.47                              | 30.32                |
| 处理相对值 Relative value                                                                      | 平均值            | 0.86               | 0.81              | 0.79             | 0.79                    | 0.69                       | 0.51                            | 0.72                    | 0.62                               | 1.13                 |
|                                                                                           | 变异系数//%        | 9.86               | 13.07             | 13.99            | 16.60                   | 18.62                      | 37.62                           | 23.35                   | 26.77                              | 8.49                 |

2.2 低磷胁迫下红花种质各性状相对值的相关性分析 对低磷胁迫下 9 个红花指标相对值进行相关性分析,结果发现(表 3),各指标间均存在着不同程度的显著或极显著相关;

其中根鲜重与地上部鲜重、根体积和侧根数、叶长和叶宽呈极显著相关;地上部鲜重与叶长、叶宽呈极显著相关,各性状之间不仅相互依赖,而且相互制约。

表 3 9 个指标相对值的相关性分析

| Table 3 Correlation analysis of relative value of 9 indexes |                       |                      |                     |                               |                                  |                       |                                |                                          |                                |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| 指标<br>Index                                                 | 苗高<br>Plant<br>height | 叶长<br>Leaf<br>length | 叶宽<br>Leaf<br>width | 主根长<br>main<br>Root<br>length | 侧根数<br>Lateral<br>root<br>number | 根体积<br>Root<br>volume | 根鲜重<br>Fresh<br>root<br>weight | 地上部分鲜重<br>Aboveground<br>fresh<br>weight | 根冠比<br>Root-<br>shoot<br>ratio |
| 苗高 Plant height                                             | 1                     | -0.298               | -0.535 *            | 0.737 **                      | -0.300                           | -0.488 *              | -0.211                         | -0.161                                   | -0.142                         |
| 叶长 Leaf length                                              | -0.298                | 1                    | 0.738 **            | -0.324                        | 0.843 **                         | 0.801 **              | 0.744 **                       | 0.724 **                                 | -0.269                         |
| 叶宽 Leaf width                                               | -0.535 *              | 0.738 **             | 1                   | -0.451                        | 0.753 **                         | 0.772 **              | 0.788 **                       | 0.729 **                                 | -0.148                         |
| 主根长 Main root length                                        | 0.737 **              | -0.324               | -0.451              | 1                             | -0.201                           | -0.623 **             | -0.147                         | -0.161                                   | 0.095                          |
| 侧根数 Lateral root number                                     | -0.300                | 0.843 **             | 0.753 **            | -0.201                        | 1                                | 0.704 **              | 0.785 **                       | 0.692 **                                 | -0.025                         |
| 根体积 Root volume                                             | -0.488 *              | 0.801 **             | 0.772 **            | -0.623 **                     | 0.704 **                         | 1                     | 0.675 **                       | 0.697 **                                 | -0.342                         |
| 根鲜重 Fresh root weight                                       | -0.211                | 0.744 **             | 0.788 **            | -0.147                        | 0.785 **                         | 0.675 **              | 1                              | 0.943 **                                 | -0.199                         |
| 地上部分鲜重 Aboveground fresh weight                             | -0.161                | 0.724 **             | 0.729 **            | -0.161                        | 0.692 **                         | 0.697 **              | 0.943 **                       | 1                                        | -0.505 *                       |
| 根冠比 Root-shoot ratio                                        | -0.142                | -0.269               | -0.148              | 0.095                         | -0.025                           | -0.342                | -0.199                         | -0.505 *                                 | 1                              |

注: \*、\*\* 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著水平检验  
Note: \*, \*\* indicate significant level test by 0.05 and 0.01, respectively

**2.3 低磷胁迫下红花各性状相对值的主成分分析** 为了将 9 个影响红花磷高效种质综合评价的变量减少为几个变量,并用少数几个变量概括大量数据的总体特征,采用主成分分析法对数据进行处理。利用 SPSS 19.0 软件对 9 个指标的相对值进行主成分分析,前 3 个主成分的贡献率分别为 58.27%、18.54%、11.88%,累计贡献率 88.69%,表明前 3 个主成分可以反映出所有数据的变化趋势,因此可以取前 3 个主成分作为数据分析的有效成分。这 3 个主成分与 9 个耐低磷性状的相对值反映了它们之间的相关性(表 4)。由此可计算出各主成分得分。

第 1 主成分:

$$C_1 = -0.22 X_1 + 0.39 X_2 + 0.40 X_3 - 0.22 X_4 + 0.37 X_5 + 0.40 X_6 + 0.38 X_7 + 0.38 X_8 - 0.13 X_9$$

第 2 主成分:

$$C_2 = 0.61 X_1 + 0.10 X_2 - 0.08 X_3 + 0.57 X_4 + 0.10 X_5 - 0.11 X_6 + 0.24 X_7 + 0.31 X_8 - 0.33 X_9$$

第 3 主成分:

$$C_3 = 0.001 X_1 + 0.07 X_2 + 0.12 X_3 + 0.34 X_4 + 0.37 X_5 - 0.18 X_6 + 0.20 X_7 - 0.10 X_8 + 0.81 X_9$$

式中, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$  分别代表苗高、叶长、叶宽、主根长、侧根数、根体积、根鲜重、地上部鲜重和根冠比的相对值。第 1 主成分可以解释 9 个耐低磷性状 58.27% 的变化,其中与叶长、叶宽、侧根数、根体积、根鲜重和地上部鲜重呈显著正相关,相关系数分别为 0.39、0.40、0.37、0.40、0.38、0.38,主要反映红花整体的生长状况;第 2 主成分可以解释 9 个耐低磷性状 18.54% 的变化,其中与苗高、主根长和地上部鲜重呈显著正相关,相关系数分别为 0.61、0.57、0.31,主要反映红花整体的生长状况;第 3 主成分可以解释 9 个耐低磷性状 11.88% 的变化,其中与主根长、侧根数和根冠比呈显著正相关,相关系数分别为 0.34、0.37、0.81,主要反映红花植株的根部性状。

表 4 各综合指标的系数、特征值和贡献率

Table 4 Coefficients,eigenvalues and contribution rates of the composite indicators

| 指标<br>Index                             | 主成分 1<br>Components 1 | 主成分 2<br>Components 2 | 主成分 3<br>Components 3 |
|-----------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 苗高 Plant height                         | -0.49                 | 0.78                  | 0.00                  |
| 叶长 Leaf length                          | 0.89                  | 0.13                  | 0.08                  |
| 叶宽 Leaf width                           | 0.91                  | -0.10                 | 0.12                  |
| 主根长 Main root length                    | -0.49                 | 0.74                  | 0.35                  |
| 侧根数 Lateral root number                 | 0.85                  | 0.13                  | 0.38                  |
| 根体积 Root volume                         | 0.91                  | -0.14                 | -0.18                 |
| 根鲜重 Fresh root weight                   | 0.87                  | 0.32                  | 0.21                  |
| 地上部分鲜重 Aboveground fresh weight         | 0.86                  | 0.41                  | -0.10                 |
| 根冠比 Root-shoot ratio                    | -0.30                 | -0.42                 | 0.84                  |
| 特征值 Eigenvalues                         | 5.24                  | 1.67                  | 1.07                  |
| 贡献率 Contribution rate//%                | 58.27                 | 18.54                 | 11.88                 |
| 累计贡献率 Accumulative contribution rate//% | 58.27                 | 76.81                 | 88.68                 |

**2.4 综合评价** 以各指标的相对值作为耐低磷能力评价指

标,将 9 个指标进行标准化处理,以消除量纲和数量级别的影响,使得不同指标间可以进行有意义的加和计算,能较好地红花品种的耐低磷能力进行综合评价。品种间变异系数能反映各指标不同品种对低磷胁迫的敏感程度,变异系数越大,不同品种间受低磷胁迫影响的差异越大,对不同品种耐低磷能力的贡献也越大,故该研究以各指标相对值的归一化变异系数值作为权重,进行不同品种耐低磷能力的模糊隶属函数综合评价。采用全部 9 个指标计算的耐低磷综合指数,其中 9 个指标权重最大为相对根体积,达到 22.3%,权重最小的是相对根冠比,仅为 5.04%,各指标权重差异明显。

不同红花品种耐低磷能力差异显著,耐低磷综合指数高低最大相差 5 倍以上(表 5)。采用全部 9 个指标进行综合评价时,耐低磷能力较强的 3 份红花种质分别是“原阳红花-3”“封丘红花-1”和“永城红花”,耐低磷综合指数均在 0.70 以上;耐低磷能力较弱的 3 份红花种质分别为“四川红花”“郑州红花”和“云南红花”。

表 5 17 份红花种质的综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of 17 safflower germplasms

| 编号<br>No. | 品种名称<br>Variety name | 综合评价<br>Comprehensive scores | 编号<br>No. | 品种名称<br>Variety name | 综合评价<br>Comprehensive scores |
|-----------|----------------------|------------------------------|-----------|----------------------|------------------------------|
| 1         | 北京红花                 | 0.585                        | 10        | 延津红花                 | 0.662                        |
| 2         | 封丘红花-1               | 0.798                        | 11        | 延津红花-1               | 0.695                        |
| 3         | 封丘红花-2               | 0.474                        | 12        | 永城红花                 | 0.817                        |
| 4         | 河北红花                 | 0.560                        | 13        | 原阳红花-1               | 0.565                        |
| 5         | 陕西红花                 | 0.641                        | 14        | 原阳红花-2               | 0.696                        |
| 6         | 商丘红花                 | 0.699                        | 15        | 原阳红花-3               | 0.782                        |
| 7         | 四川红花                 | 0.174                        | 16        | 云南红花                 | 0.282                        |
| 8         | 卫辉红花                 | 0.662                        | 17        | 郑州红花                 | 0.264                        |
| 9         | 卫辉红花-1               | 0.604                        |           |                      |                              |

**2.5 回归分析** 为分析红花耐低磷鉴定指标与耐低磷能力之间的关系,筛选有效的耐低磷鉴定指标,建立耐低磷能力评价的数学模型,进行耐低磷能力预测,将 17 个红花品种的 9 个鉴定指标进行了逐步回归分析,以耐低磷综合评价值为因变量,各个指标相对值作自变量,建立最优回归方程,建立得到红花低磷胁迫的回归方程: $Y = -0.273 + 0.232X_1 + 0.319X_6 + 0.231X_7 + 0.270X_8$ ( $X_1$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  分别代表红花低磷胁迫下相对苗高、相对根体积、相对根鲜重和相对地上部鲜重),方程决定系数  $R^2 = 0.966$ , $P < 0.001$ ,呈极显著,对 17 份红花种质的耐低磷综合评价值与预测值进行相关分析后发现,二者相关性  $r = 0.966$ ,达到极显著水平,说明使用此方程式预测红花苗期耐低磷能力可行,使鉴定工作简单化。

根据李强等<sup>[18]</sup>研究结果,9 个指标相对值的大小可以反映该指标受低磷胁迫影响的大小,而各指标相对值的变异系数在一定程度上反映了不同品种该指标对低磷胁迫敏感程度的差异,因此可将相对值变异系数大的指标作为品种间耐低磷能力的筛选、评价指标。相对苗高、相对根体积、相对根鲜重和相对地上部分鲜重的变异系数分别为 9.86%、37.62%、23.35% 和 26.77%,因此选择相对根体积、相对根鲜重和相对地上部分鲜重最为红花种质耐低磷能力的鉴定

指标。

### 3 讨论与结论

目前开展作物耐低磷能力筛选及评价研究所采用的方法主要有土培法、液培法、砂培法等。其中土培法又分为盆栽法和大田筛选法,土培法虽然简单易操作,但是不易于控制外界环境条件、磷浓度以及不便于根系观察,因此需要更多的田间种植经验<sup>[19]</sup>。目前土培法主要用于全生育期耐低磷基因型作物的复筛。砂培法可以模拟土壤进行操作,具有使磷素释放缓慢、扩散受到限制的特点。Gerloff<sup>[20]</sup>采用砂培法对玉米等作物的磷高效基因型进行鉴定和筛选,目前应用较少。液培法是耐低磷种质筛选使用最多的方法,可以精确控制磷浓度和直观植物的根系特征,但是需要选择合适的磷源,刘国栋等<sup>[21]</sup>以  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  为磷源,对小麦不同磷效率基因型进行了快速鉴定与筛选,液培法主要用于作物苗期耐低磷能力筛选。该研究主要采用 1/2 浓度 Hoagland 标准营养液,以磷酸二氢钾为磷源,50 d 内可以有效地对红花种质的耐低磷能力进行鉴定。

不同基因型植物对于有效磷含量低的土壤具有不同的适应能力,因此,利用植物固有的生物学特性,挖掘作为自身对磷的高效吸收利用潜力已成为植物营养研究领域的热点之一。而筛选磷高效利用型植物种质具有重要的意义,为进一步开展磷高效种质生理机制的研究提供重要的资源。前人采用不同的筛选指标获得了一批耐低磷作物材料。李华慧等<sup>[22]</sup>以水稻苗期相对根干重为筛选指标,获得了武糯 1 号、盐粳 2 号和双城糯等 14 份耐低磷种质;曾维英等<sup>[23]</sup>以苗期大豆根部干物质重、地上部分干重、总重为耐低磷筛选指标,获得粤春 2011-1、华春 5 号、桂春 8 号等 10 份大豆耐低磷品种;张燕等<sup>[24]</sup>利用相对存活叶、相对株高、相对茎粗、相对根干重与相对茎叶干重为筛选指标从 63 份玉米自交系中筛选到 10 份高耐低磷材料。该研究发现,低磷胁迫下,苗高、叶长、叶宽、主根长、侧根数、根体积、根鲜重和地上部鲜重等 8 个指标生长发育迟缓,而根冠比较对照增加;9 个指标间存在显著或极显著的相关,既相互制约又相互依赖。

隶属函数法已经被广泛应用于植物耐旱性、耐盐性、耐低铁能力、耐低氮等指标的筛选和综合评价,并获得较好的效果<sup>[18,25-26]</sup>。该研究首次利用隶属函数法对 17 个红花种质进行耐低磷能力鉴定,获得了“原阳红花-3”“云南红花”和“郑州红花”3 个耐低磷能力较强红花种质。为了解释 9 个指标对品种耐低磷能力的贡献率,采用主成分分析对指标的相对值进行了进一步的分析。前 3 个主成分的贡献率分别为 58.27%、18.54%、11.88%,累计贡献率 88.69%;第 1 主成分和第 2 主成分主要反映红花整体的生长状况;第 3 主成分主要反映红花植株的根部性状。

为分析红花耐低磷鉴定指标与耐低磷能力之间的关系,筛选有效的耐低磷鉴定指标,建立得到红花低磷胁迫的回归

方程:  $Y = -0.273 + 0.232X_1 + 0.319X_6 + 0.231X_7 + 0.270X_8$  ( $X_1$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  分别代表红花低磷胁迫下相对苗高、相对根体积、相对根鲜重和相对地上部鲜重)。在此基础上,比较相对苗高、相对根体积、相对根鲜重和相对地上部鲜重的变异系数,其中相对根体积、相对根鲜重和相对地上部分鲜重这 3 个指标的变异系数均大于其他 6 个指标 ( $>20\%$ ),可以作为红花能力筛选的形态指标。

### 参考文献

- [1] 郑建平,李明. 玉米耐低磷特性的研究进展[J]. 科技信息,2007(20): 72.
- [2] 陶佩琳. 低磷胁迫下玉米叶片的光合特性及叶蛋白质组学研究[D]. 济南:山东大学,2009.
- [3] 李银水,鲁剑巍,廖星,等. 磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响[J]. 中国油料作物学报,2011,33(1): 52-56.
- [4] 吴平,印莉萍,张立平. 植物营养分子生理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [5] 章明奎,麻万诺. 浙江平原土壤有效磷的农学-环境综合分级研究[J]. 农业环境与发展,2010,27(4): 83-87.
- [6] 鲁如坤,时正元,顾益初. 土壤累积态磷研究II. 磷肥的表观累积利用率[J]. 土壤,1995,27(6): 286-289.
- [7] 贺国因,郭荣发. 耐低磷基因型甜玉米的苗期筛选研究[J]. 中国农学通报,2010,26(2): 74-79.
- [8] 王兰珍. 冬小麦磷高效种质鉴定及其生理遗传分析[D]. 北京:中国农业大学,2003.
- [9] 韩胜芳. 水稻磷素吸收的生理和分子基础研究[D]. 保定:河北农业大学,2009.
- [10] ABDULLAEV F I, ESPINOSA-AGUIRRE J J. Biomedical properties of saffron and its potential use in cancer therapy and chemoprevention trials[J]. Cancer Detect Prev,2004,28(6): 426-432.
- [11] TAVAKKOL-AFSHARI J, BROOK A, MOUSAVI S H. Study of cytotoxic and apoptogenic properties of saffron extract in human cancer cell lines[J]. Food Chem Toxicol,2008,46(11): 3443-3447.
- [12] 杨玉霞,吴卫,郑有良,等. 不同品种(系)红花籽粕营养品质分析[J]. 中国粮油学报,2008,23(4): 174-178.
- [13] 谭勇,李国玉,成玉怀,等. 不同产地红花的矿质元素及羟基红花黄色素 A 含量分析[J]. 安徽农业科学,2009,37(12): 5488-5489,5491.
- [14] 王秀珍,周相军,王丽. 不同种植密度对红花产量及农艺性状的影响[J]. 新疆农业科学,2010,47(8): 1557-1560.
- [15] 赵玉新,杨莹光,王静华,等. 红花优质高产栽培技术[J]. 河北农业科学,2007,11(2): 91-92.
- [16] 李亚葵. 红花的组织培养及品质相关的基因克隆[D]. 上海:第二军医大学,2010.
- [17] 周云,杨松杰. 红花的组织培养及基因工程研究[J]. 安康学院学报,2008,20(2): 83-88.
- [18] 李强,罗延宏,谭杰,等. 玉米杂交种苗期耐低氮指标的筛选与综合评价[J]. 中国生态农业学报,2014,22(10): 1190-1199.
- [19] 陈晓静,陶红,沈会权,等. 浅谈盆栽土培试验方法[J]. 大麦与谷类科学,2007(2): 23-25.
- [20] GERLOFF G C. Intact-plant screening for tolerance of nutrient-deficiency stress[J]. Plant and soil,1987,99(1): 3-16.
- [21] 刘国栋,李振声,李继云. 筛选磷高效小麦种质的磷源液相控制释放系统建立的原理和方法[J]. 中国农业科学,1997,30(2): 70-76.
- [22] 李华慧,辜琼瑶,黄平,等. 苗期不同基因型水稻耐低磷能力的鉴定与评价研究[J]. 西南农业学报,2014,27(3): 925-930.
- [23] 曾维英,孙祖东,蔡昭艳,等. 不同大豆新品种苗期耐低磷的鉴定与筛选[J]. 广西农学报,2015,30(1): 14-17.
- [24] 张燕,陈波,肖源灵,等. 玉米自交系耐低磷特性鉴定[J]. 广东农业科学,2014,41(8): 35-38.
- [25] 杨升,刘正祥,张华新,等. 3 个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选[J]. 林业科学,2013,49(1): 91-98.
- [26] 龙文靖,万年鑫,辜涛,等. 玉米苗期耐低铁能力的综合评价及其预测[J]. 植物遗传资源学报,2015,16(4): 734-742.