



## 基于 GGE-biplot 的大豆耐低磷资源筛选

王金生<sup>1</sup>, 王 君<sup>2</sup>, 吴俊江<sup>1</sup>, 刘庆莉<sup>1</sup>, 王树林<sup>1</sup>, 张 鑫<sup>1</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院 大豆研究所/农业部大豆栽培重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省德强生物股份有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

**摘 要:** 为了准确评价大豆耐低磷基因型在不同环境中的稳定性和适应性, 采用 GGE 双标图, 通过 4 种评价指标数据计算耐性因子 GGE 双标图数学模型对前期鉴定、评价获得的 7 个大豆耐低磷种质资源分别进行不同环境下耐低磷能力分析评价。结果表明: 耐低磷性强且多环境下稳定性较好的品种为丰收 24。以地下部干重计算耐性因子双标图显示垦鉴 27 表现出多环境下稳定的耐低磷性, 而以地上部干重为评价指标则显示其耐低磷性较好但并不稳定; 同样, 以单株磷含量为评价指标显示克交 05-1397 同样表现出多环境下较稳定的耐低磷性, 而以根系活跃吸收表面积评价指标显示其耐低磷性较好但不稳定。因此在利用 GGE-biplot 筛选耐低磷大豆资源时应结合具体的环境条件。研究结果对适于黑龙江地区不同环境条件下耐低磷大豆的应用具有重要的指导意义。

**关键词:** 大豆; 耐低磷; GGE 双标图

## Screening of Soybean Germplasm Tolerant to Low Phosphorus Based on GGE-biplot

WANG Jin-sheng<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, WU Jun-jiang<sup>1</sup>, LIU Qing-li<sup>1</sup>, WANG Shu-lin<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>

(1. Soybean Research Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Soybean Cultivation, Ministry of Agriculture, Harbin 150086, China; 2. Deqiang Biology Company Limited in Heilongjiang Province, Harbin 150060, China)

**Abstract:** To accurately evaluate the stability and adaptability of the soybean genotype with resistance to low phosphorus in different environments, the acquired 7 tolerant soybean species were used to evaluate the ability of tolerance to low phosphorus in different environments by GGE double plot mathematical model method, which patience factor calculated thought four evaluation index data. The results showed that Fengshou 24 was the variety that with high tolerance to low phosphorus and stability in multi-environment. Kenjian 27 showed stable tolerance to low phosphorus in multi-environment according to underground dry weight while showed high but not stable tolerance according to overground dry weight. In the same way, with the content of single plant phosphorus as evaluation index, Kejiao 05-1397 showed stable tolerance to low phosphorus in the multi-environment, while it showed high but not stable tolerance with root activity surface area as evaluation index. Thus, it must be considerate the environment when screening low phosphorus resistant soybean resource. The results are with great guiding significance to the application of low phosphorus tolerant soybean in different environment in Heilongjiang.

**Keywords:** Soybean; Tolerent to low phosphorus; GGE-Biplot

磷作为作物生长发育必需的三大营养元素之一, 参与作物体内许多重要有机化合物的组成<sup>[1]</sup>, 因此缺磷是一个限制作物产量的重要因子。生产上常以增加磷源投入作为解决办法, 但长时间过量施用磷肥不但造成当季利用率低下, 资源浪费, 而且破坏生态环境<sup>[2]</sup>。深入研究作物低磷胁迫下的特性并筛选获得磷高效农作物品种, 可以提高土壤磷的利用效率, 节约资源。同时, 对减少农业污染、保护生态环境以及农业的增产增收等具有重要意义。

针对磷高效基因型品种的筛选来说, 有效的指标选择是关系品种筛选成功与否的关键因素。为增加试验的可操作性, 常利用一些与磷效率显著相关的性状作为耐低磷基因型的筛选指标, 例如根系形态和许多生理生化指标<sup>[3-9]</sup>, 一般要求该性状测定方法简单、测定结果可靠。通常根系发育良好的品种对磷的吸收力较强, 而作为衡量根系大小的指标, 诸如根重、根体积、根数量、根长<sup>[10]</sup>、根表面积<sup>[11]</sup>、根系体积和根冠比等, 均具有较高的遗传率, 可以用于磷效率筛选, 作为选择的重要评价依据。

收稿日期: 2018-03-22

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0101306); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金 (2013RFXJY043); 国家现代农业产业技术体系 (nycyt-004)。

第一作者简介: 王金生 (1981 -), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事大豆耕作与栽培研究。E-mail: jinshengwang1981@163.com。

通讯作者: 吴俊江 (1970 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事大豆耕作与栽培研究。E-mail: nkywuji@126.com。

磷素营养对大豆干物质积累与分配起着非常重要的作用。相关研究表明,施磷后植株干物质积累在不同大豆品种间有较大差异,施磷量显著影响植株干物质的积累,以此作为大豆基因型磷效率特性的重要指标切实可行。在低磷条件下,植株吸磷量表明吸磷能力的大小。相关研究表明,不同磷效率基因型大豆品种的植株冠部磷素吸收量相对值差异较大。植株干物质积累和冠部磷素吸收量两者关系密切,因此可以作为评价大豆基因型磷效率特性的重要指标。

植物品种的特性由植物本身的遗传特性所决定,但同样受气候、土壤、耕作制度、栽培措施等条件的影响,品种与环境的互作效应对其特性的表达起到至关重要的作用。因此,在耐低磷特性品种筛选时应结合环境条件加以评价。1971年 Gabriel<sup>[12]</sup>提出了双标图(Biplot)数据分析方法,用于分析环境因子对表型性状的影响。以大豆生长不同区域生态环境为基础,利用耐低磷评价指标衍生的耐性因子模拟区域产量,利用双标图数据分析法评价大豆在特定环境下的耐低磷性及稳定性。同以往以耐性因子单一数据的分析评价相比其模型分析的结果可以把数据的内在结构模式用图形的方法直观地表达解析,该方法的利用在相关研究邻域尚属

首次,其拓展了双标图(Biplot)应用的范畴,为大豆资源抗逆性的筛选提供了一个全新的方法。

本研究以前期鉴定、评价获得到的7个大豆磷高效基因型品种为材料,采用盆栽试验,设置低磷和高磷两个处理,以根干重、冠干重、根系活跃吸收表面积、植株单株磷含量为选择指标计算耐性因子,利用双标图数据分析法进行耐低磷鉴定、评价,以期筛选出耐低磷且多环境下稳定的大豆基因型品种,为大豆的区域生产提供指导和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

黑河 27、垦鉴 27、绥农 4 号、丰收 24、克交 05-1397、黑河 43、绥农 10 号,均由黑龙江省农业科学院提供。

1.2 试验设计

试验分别在哈尔滨、建三江、海伦进行,以速效磷含量较低的当地 1 m 以下深层黑土和粘土进行盆栽试验(表 1)。设施磷肥(+P),不磷肥(-P)两个处理。以含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%,总氮 16% 的磷酸二铵为肥料分底肥和追肥 2 次施入。试验设置 3 次重复,随机区组排列。5 月上旬播种,在适宜水分下大豆出苗后培养 35 d 整株收获大豆植株。

表 1 盆栽土壤养分状况  
Table 1 Soil nutrient status in potted

地点 Site	有机质含量 Organic content /%	pH	全量养分 Full amount of nutrients/%		速效养分 The available nutrient/(mg·kg <sup>-1</sup> )		
			全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
建三江 Jiansanjiang	5.6	6.4	0.28	0.21	58.4	6.4	139.9
海伦 Hailun	5.4	6.1	0.26	0.12	38.4	5.6	150.4
哈尔滨 Harbin	5.3	5.6	0.14	0.11	32.6	6.3	145.5

1.3 测定项目与方法

根系活跃吸收表面积:根据计算公式  $S = 2(\pi VL)^{1/2}$  获得,  $V$  是根系体积,  $S$  是活性吸收表面积、 $L$  为根长,数据均由 Epson 根系扫描仪扫描获得<sup>[13-15]</sup>。

生物量的测定:将植株整株取回后,以报纸包裹并置于烘箱中,105℃杀青 10 min,然后在 75℃烘干至恒重,分别称量根干重和地上部干重。

单株磷含量测定:采用浓硫酸消煮法和钒钼黄比色法<sup>[13-15]</sup>。

1.4 数据分析

以各项指标测定值计算耐性因子,耐性因子(endurable fator,EF)是各指标的低磷胁迫下测定值与施磷下测定值的比值,表示植物忍耐低磷胁迫能力的大小。

采用 GGE Biplot 5.2 软件分析大豆耐性因子在

不同环境下的综合表现,分析表型的主效应及表型与环境互作的效应,通过图示化的结果予以表现,挖掘耐低磷性较强且多环境稳定的优良材料。

2 结果与分析

2.1 以根系活跃吸收表面积为指标的大豆耐低磷资源的筛选

在双标图 1 中,第 1 主成分 PC1 解释了 43.8% 的效应,第 2 主成分 PC2 解释了 32.3% 的效应,PC1 和 PC2 共解释 G 与 GE 互作效应的 76.1%,据此分析推断可靠性较大。通过品种远端连线,并以中心对 5 条边做 5 条垂线,将双标图分为 5 个扇区,位于五边形顶角的品种是扇区内环境下耐低磷特性最高的品种。由此可知,丰收 24 在建三江的环境下耐性因子最高,即耐低磷性最强,垦鉴 27 在绥化地区耐低磷性表现最好,克交 05-1397 在哈尔滨地区耐低磷性表现最好。

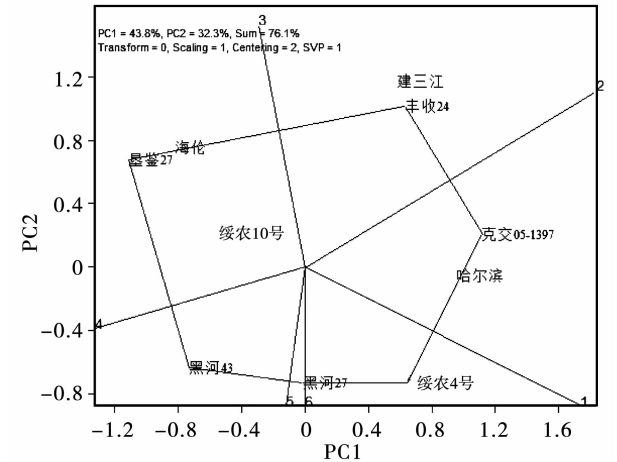


图 1 以根系活跃吸收表面积分析大豆品种在 3 个环境中的分组

Fig. 1 Divide the soybean varieties with the active absorption surface area of the root system in 3 environments

在 GGE 双标图分析中,AEA 代表了品种的某一特定性状平均值,在 AEA 的投影,箭头所示方向为正,即各个品种在 AEA 轴上的投影点越靠右,其耐低磷特性越强。在 AEC 纵轴右边的品种,其特性值大于平均值,而在 AEC 纵轴左边的品种,其特性值小于平均值;AEA 纵轴代表了性状的稳定性,AEA 横轴上垂线的长短显示品种特性稳定性的大小,此值越接近于 0,稳定性越好。由此可知,在双标图 2 中,供试品种耐低磷性顺序为丰收 24 > 克交 05-1397 > 垦鉴 27 > 绥农 10 号 > 绥农 4 号 > 黑河 27 > 黑河 43,品种的稳定性顺序为丰收 24 > 黑河 27 > 绥农 4 号 > 丰收 24 > 垦鉴 27 > 克交 05-1397 > 黑河 43。综合比较而言,以根系活跃吸收表面积为指标耐低磷性强且稳定性较好的品种为丰收 24。

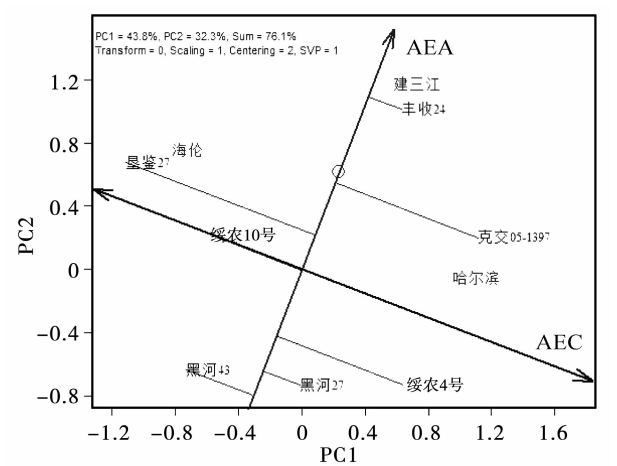


图 2 以根系活跃吸收表面积为指标比较参试品种耐低磷性表现及其稳定性

Fig. 2 Comparisons of tested varieties on low phosphorus tolerance and its stability based on active absorption surface area of the root system

2.2 以地上部干重为指标的大豆耐低磷资源的筛选

在双标图 3 中,第 1 主成分 PC1 解释了 42.0% 的效应,第 2 主成分 PC2 解释了 38.4% 的效应,PC1 和 PC2 共解释 G 与 GE 互作效应的 80.4%,推断可靠性较大。丰收 24 在哈尔滨、海伦的环境条件下耐低磷性表现最好,垦鉴 27 在建三江的环境条件下耐低磷性表现最好。由双标图 4 可以得出供试品种耐低磷性顺序为丰收 24 > 垦鉴 27 > 绥农 4 号 > 克交 05-1397 > 黑河 43 > 黑河 27 > 绥农 10 号,其中丰收 24、垦鉴 27、绥农 4 号、克交 05-1397 耐低磷性状(耐性因子)大于平均耐低磷性性状值。品种的稳定性顺序为绥农 10 号 > 黑河 27 > 绥农 4 号 > 丰收 24 > 垦鉴 27 > 克交 05-1397 > 黑河 43。综合比较而言,耐低磷性强且稳定性较好的品种为绥农 4 号和丰收 24。

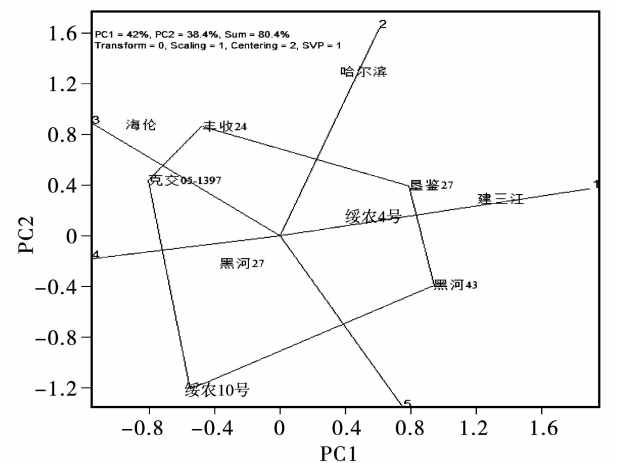


图 3 以地上部干重分析大豆品种在 3 个环境中的分组

Fig. 3 Divide the soybean varieties with the overground dry weight in 3 environments

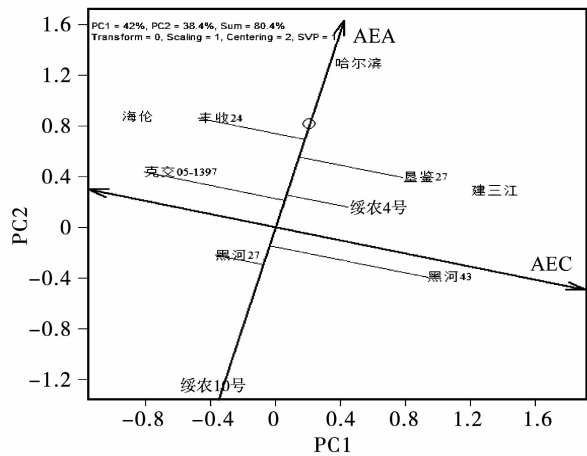


图4 以地上部干重为指标经较参试品种耐低磷性表现及其稳定性

Fig. 4 Comparisons of tested varieties on low phosphorus tolerance and its stability based the overground dry weight

2.3 以地下部干重为指标的大豆耐低磷资源的筛选

在双标图5中,第1主成分PC1解释了42.6%的效应,第2主成分PC2解释了35.3%的效应,PC1和PC2共解释G与GE互作效应的77.9%,推断可靠性较大。垦鉴27在建三江的环境条件下耐低磷性表现最好,丰收24在海伦、哈尔滨的环境条件下耐低磷性表现最好。由双标图6可以得出供试品种耐低磷性顺序为丰收24>垦鉴27>绥农10号>黑河27>克交05-1397>黑河43>绥农4号,其中垦鉴27、丰收24耐低磷性状(耐性因子)大于平均耐低磷性性状值。品种的稳定性顺序为黑河27>黑河43>垦鉴27>绥农4号>丰收24>绥农10号>克交05-1397。综合比较而言,耐低磷性强且稳定性较好的品种为垦鉴27和丰收24。

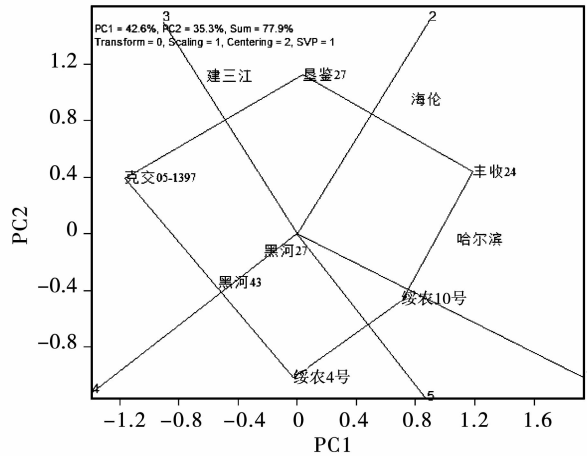


图5 以地下部干重分析大豆品种在3个环境中的分组

Fig. 5 Divide the soybean variety with the underground dry weight in 3 environments

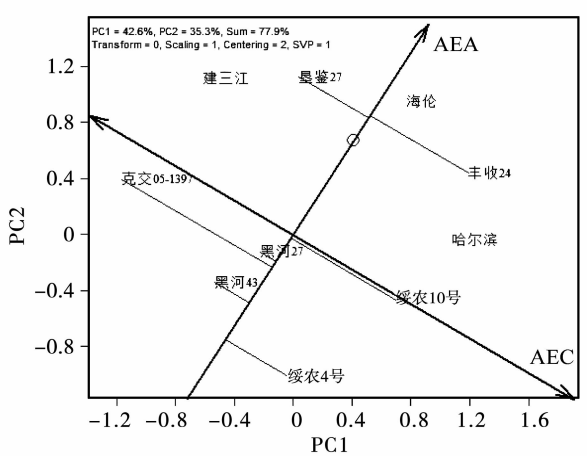


图6 以地下部干重为指标分析参试品种耐低磷性表现及其稳定性

Fig. 6 Comparisons of tested varieties on low phosphorus tolerance and its stability based on the underground dry weight

2.4 基于单株磷含量为指标的大豆耐低磷资源的筛选

在双标图7中,第1主成分PC1解释了55.9%的效应,第2主成分PC2解释了31.6%的效应,PC1和PC2共解释G与GE互作效应的87.5%,推断可靠性较大。绥农10号在建三海的环境条件下耐低磷性表现最好,丰收24在建三江的环境条件下耐低磷性表现最好。由双标图8可以得出供试品种耐低磷性顺序为丰收24>绥农10号>克交05-1397>绥农4号>黑河43>垦鉴27>黑河27,其中丰收24、绥农10号、克交05-1397、绥农4号耐低磷性状(耐性因子)大于平均耐低磷性性状值。品种的稳定性顺序为丰收24>克交05-1397>绥农4号>黑河43>黑河27>绥农10号>垦鉴27。综合比较而言,耐低磷性强且稳定性较好的品种为丰收24。

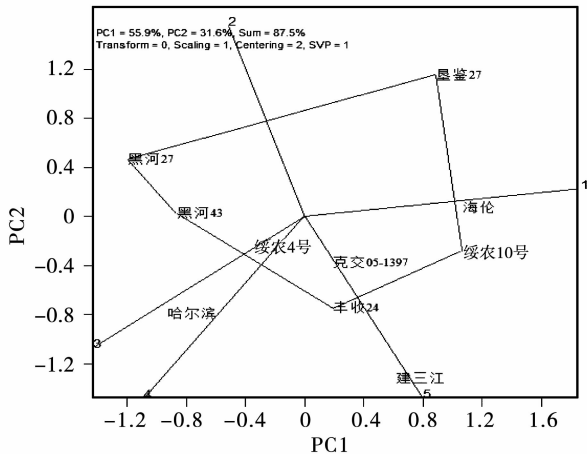


图7 以单株磷含量为指标分析大豆品种在3个环境中的分组

Fig. 7 Divide the soybean varieties with single plant phosphorus content in 3 environments

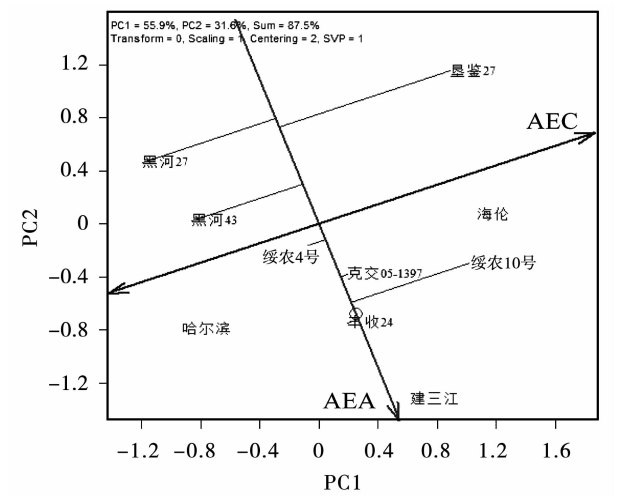


图 8 以单株磷含量为指标分析比较参试品种耐低磷性表现及其稳定性

Fig. 8 Comparisons of tested varieties on low phosphorus tolerance and its stability based on single plant phosphorus content

3 讨论

传统的耐低磷资源筛选方法常采用以经济产量为指标进行全生育期重复田间筛选,虽然筛选结果可靠,但试验本身有局限性。另外,并未考虑环境因素的对其结果的影响,因此难以真正反映出作物的耐低磷性状潜力。同时,选择指标的有效性 & 代表性对于耐低磷基因型品种的筛选来说至关重要。在以往的研究中不同学者提出并应用了许多选择指标<sup>[16-17]</sup>,但终究由于指标本身的局限性,使其在具体的研究工作中难以推广应用。本研究避开前人采用指标的局限性,为缩短试验周期选择苗期,为减少工作量而选择与耐低磷性状密切相关的简单生理生化特异性指标作为快速准确的筛选指标,测定方法简单、测定结果可靠,大大提升了筛选效率及可靠性;另外,本研究发现针对同一个品种不同的选择指标筛选结果不尽相同,这与黄亚群等<sup>[18]</sup>研究的结果相同。因此,在今后的耐低磷资源筛选工作中,除了因试验目的有效地选择筛选指标外,致力于建立统一的指标或标准将是新的工作重点。

GGE 双标图数学模型方法考虑品种效应的同时结合了品种和环境互作效应,以此对品种特性进行综合性的评价。由于其具有直观性和便利性的优点,现如今已广泛适用于所有二向数据资料的分析方面<sup>[19]</sup>,本研究也是对其应用的一个新的拓展。

本研究利用 GGE 双标图法分析比较了 7 个大豆品种不同生态区的耐低磷性数据,直观地展现出了耐性因子与环境的关系,以图示的方式明确多环

境试验条件下表现最好且稳定的品种,能加清晰地鉴别出了耐低磷性较强的大豆品种。通过 4 种评价指标数据计算耐性因子 GGE 双标图数学模型方法评价结果显示耐低磷性强且多环境下稳定性较好的品种均为丰收 24。以地下部干重计算耐性因子双标图显示垦鉴 27 表现出多环境下稳定的耐低磷性,而以地上部干重评价指标计算耐性因子双标图显示其耐低磷性较好但并不稳定;同样,以单株磷含量为评价指标计算耐性因子双标图显示克交 05-1397 同样表现出多环境下较稳定的耐低磷性,而以根系活跃吸收表面积评价指标计算耐性因子双标图显示其耐低磷性较好但不稳定,因此对该品种耐低磷特性的利用过程中应结合当地具体环境条件。

对于不同评价指标利用 GGE 双标图法获得的结果不尽相同的现象,原因可能由于不同品种适应低磷状态下的生理机制不同,从而导致耐低磷评价指标变化不一致。原因还需做进一步研究才能确定。因此,在今后的试验中还需要针对品种进一步扩大筛选指标,以多种指标的综合评价来评估其耐低磷特性。

4 结论

通过 4 种评价指标数据计算耐性因子 GGE 双标图数学模型方法评价结果显示耐低磷性强且多环境下稳定性较好的品种为丰收 24。

参考文献

[1] 王艳,李晓林,张福锁. 不同基因型植物低磷胁迫适应机理的研究进展[J]. 生态农业研究,2000, 8(4):34-36. (Wang Y, Li X L, Zhang F S. Current research on suitable mechanisms on different plant genotypes under phosphorous stress[J]. Eco-agriculture Research,2000,8(4):34-36. )

[2] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(3): 193-205. (Li S X. Current situation and outlook of plant nutrition and fertilizer science[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,1999, 5 (3): 193-205. )

[3] 赵华,徐森,石磊. 植物根系形态对低磷胁迫应答的研究进展[J]. 植物学通报,2006, 23(4):409-417. (Zhao H, Xu S, Shi L. Advances in plant root morphology adaptability to phosphorous deficiency stress[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2006, 23(4): 409-417. )

[4] 吴平,印莉萍,张立平,等. 植物营养分子生理学[M]. 北京:科学出版社,2001:103 -105. (Wu P, Yin L P, Zhang L P, et al. Plant nutrition and molecule physiology [M]. Beijing Science Press,2001:103-105. )

[5] 郭再华,贺立源,徐才国. 低磷胁迫时植物根系的形态学变化[J]. 土壤通报,2005,36(5):760-763. (Guo Z H, He L Y, Xu C G. Morphological variety of plants tolerance to low P stress[J]. Chinese Journal of Soil Science,2005, 36(5):760-763. )

[6] 曹敏建,佟占昌,韩明祺. 磷高效利用的大豆遗传资源的筛选与评价[J]. 作物杂志,2001(4):22-24. (Cao M J ,Tong Z C, Han M Q. Evaluation and filter on phosphate high active exploit of soybean inheritance resources[J] . Crop Magazine,2001 (4):22-24. )

[7] 曹爱琴,严小龙. 不同供磷条件下大豆根构型的适应性变化[J]. 华南农业大学学报,2000,22(1):21. (Cao A Q, Yan X L. Adaptation of soybean root architecture under different P conditions [J] . Journal of South China Agricultural University, 2000, 22 (1):21. )

[8] 丁洪,李生秀,郭庆元. 酸性磷酸酶活性与大豆耐低磷能力相关研究[J]. 植物营养与肥料学报,1997,3(2):123-128. (Ding H, Li S X, Guo Q Y. Study on correlation between acid phosphate activity and low phosphorus tolerance of soybean[J] . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(2):123-128. )

[9] Gerloff G C, Gabelman W H. Genetic basis of inorganic plant nutrition[M]//Lauchli A,Bieleski R I. Encyclopedia of P lint physiology. Springer verlay Berlin,1983;453-480.

[10] 王应祥,寥红,严小龙. 大豆适应低磷胁迫的机理初探[J]. 大豆科学,2003,22(3):208-212. (Wang Y X, Liao H ,Yan X L. Preliminary studies on the mechanisms of soybean in adaption to low P stress[J] . Soybean Science, 2003, 22(3):208-212. )

[11] 王毅. 植物耐低磷胁迫遗传学研究策略[J]. 热带农业科学, 2004, 24(2):34-41. (Wang Y. Strategy genetics research on plant tolerant to low phosphorus[J]. Chinese Journal Tropical Agriculture, 2004 ,24 (2):34-41. )

[12] Gabriel K R. The Biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis[J]. Biometrika, 1971,58:453-467.

[13] 张宪政. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 2000;5-96. (Zhang X Z. Guide of phytophysiological experiment [M]. Beijing: China Agriculture Press,2000;5-96. )

[14] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 1990;5-8. (Zhang Z L. A guide of phytophysiological experiment [M]. Beijing: High Education Press,2000;5-8. )

[15] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2000;59-60, 173-174. (Zou Q. Guide of phyto physiological experiment [M]. Beijing: High Education Press, 2000;59-60,173-174. )

[16] 李继云,刘秀娣,周伟,等. 有效利用土壤营养元素的作物育种新技术研究[J]. 中国科学(B辑),1995,25(1):41-48. (Li J Y, Liu X D, Zhou W, et al. . Studies on new breeding technology of efficiently utilizing soil nutritions[J] Science in China (Series B), 1995, 25(1):41-48. )

[17] 丁洪,李生秀,郭庆元. 酸性磷酸酶活性与大豆耐低磷能力的相关研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997,3(2):123-128. (Ding H, Li S X, Guo Q Y. Study on correlation between acid phosphatase activity and low phosphorus tolerance of soybean [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3 (2):123-128. )

[18] 黄亚群,马文奇,刘社平,等. 春小麦品种磷效率相关性状的遗传[J]. 河北省科学院报,1999,16(2):1-7. (Huang Y Q, Ma W Q, Liu S P, et al. Study on varieties of spring wheat inheritance of characters related to the phosphorus efficiency[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences,1999,16(2):1-7. )

[19] Vincent J M. A manual for the practical study of root-nodule [M]. Oxford: IBP Handback, 1970;164.