

江西省春大豆品种及其骨干亲本的磷吸收和 利用效率解析

赵现伟, 孙丽萍, 厉苏宁, 赵朝森, 王瑞珍, 郭兵福

(江西省农业科学院作物研究所 / 国家油料改良中心南昌分中心 / 江西省油料作物生物学重点实验室, 南昌 330200)

摘要: 江西省春大豆主要种植于红壤丘陵旱地, 有效磷含量低严重制约了江西省春大豆生产, 选育磷高效春大豆品种有助于促进江西省春大豆生产发展。本研究采用低磷胁迫与正常供磷盆栽试验, 以净光合速率、生物量、磷吸收效率、磷利用效率和磷浓度等 12 个性状为指标, 结合主成分和隶属函数分析对 17 份江西省选育的春大豆品种及其骨干亲本的磷效率进行评价。研究发现不同大豆品种之间在净光合速率、磷吸收效率和磷利用效率等 12 个性状指标上存在显著差异。在供试材料中, 国外资源巴西 11 的综合磷效率最高, 黑农 35 最低, 而利用巴西 11 拓宽遗传基础选育的春大豆新品种赣豆 10 号、赣豆 11 号和赣豆 12 号与江西省选育的其他春大豆品种相比, 综合磷效率高、对低磷胁迫也具有更好的耐受性, 提高了江西省春大豆品种对低磷胁迫的耐受水平, 有助于促进江西省春大豆产业发展。

关键词: 春大豆; 低磷胁迫; 磷效率

Analysis of Phosphorus Absorption and Use Efficiency in Spring Soybean Cultivars and Their Foundation Parents from Jiangxi Province

ZHAO Xian-wei, SUN Li-ping, LI Su-ning, ZHAO Chao-sen, WANG Rui-zhen, GUO Bing-fu

(Crops Research Institute of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/Nanchang Branch of National Center of Oilcrops Improvement/Jiangxi Province Key Laboratory of Oilcrops Biology, Nanchang 330200)

Abstract: Spring-sowing soybean in Jiangxi province of China is mainly planted in the red hilly soil region, where low phosphorous availability restricts the yield production. Breeding for spring soybean cultivars showing high phosphorous use efficiency will hence become of interest to ensure its production in Jiangxi province. To understand the phosphorous efficiency of spring soybean cultivars and their foundation parents, 12 traits (i.e. net photosynthetic rate, biomass, phosphorous absorption efficiency, phosphorous use efficiency, and phosphorous concentration) were evaluated under normal and low phosphorous soil pot conditions, followed by the analysis of the principal component and associated membership functions. There were significant differences in 12 traits including net photosynthetic rate, phosphorus absorption efficiency and phosphorus use efficiency among 17 soybean cultivars. Gained from the comprehensive analysis, the cultivar Brazil 11 was qualified as a high-efficiency phosphorous germplasm, whereas Heinong 35 was a low-efficiency phosphorous germplasm. Moreover, the phosphorous efficiency of cultivars Gandou

收稿日期: 2021-11-06 修回日期: 2021-11-19 网络出版日期: 2021-12-08

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20211106001>

第一作者研究方向为大豆遗传育种, E-mail: zhaoxianwei-2620@126.com

通信作者: 郭兵福, 研究方向为大豆遗传育种, E-mail: gbfhq@163.com

王瑞珍, 研究方向为大豆遗传育种, E-mail: dadouzu@163.com

基金项目: 中国和乌拉圭联合实验室合作项目 (2018YFE0116900); 江西省重点研发计划项目 (20192BBF60003); 国家现代大豆产业技术体系建设 (CARS-04-CES27); 江西省“双千计划”项目 (jxsq 2019201073)

Foundation projects: Project of Sino-Uruguayan Joint Laboratory (2018YFE0116900), Key Research and Development Program of Jiangxi Province (20192BBF60003), China Agriculture Research System of Soybean (CARS-04-CES27), Jiangxi “Double Thousand Plan” (jxsq 2019201073)

10, Gandou 11 and Gandou 12 derived from the parental cultivar Brazil 11 was higher than that of other soybean cultivars in Jiangxi, showing higher tolerance under low phosphorous stress condition. These spring soybean cultivars significantly enhanced the tolerance to low phosphorus stress, and thus became important to promote the development of spring soybean in Jiangxi province.

Key words: spring soybean; low phosphorus stress; phosphorus efficiency

以江西省为代表的南方区域,酸性红壤是最重要的土壤类型之一,总面积约 5690 万 hm^2 ,占全国土壤总面积的 6.5%。其中江西省红壤旱地面积约为 40.73 万 hm^2 ,占全省旱地总面积的 71.8%^[1]。红壤旱地的土壤质量差,灌溉条件欠缺,多为中低产田^[2],且受土壤淋溶强烈、养分流失严重、pH 值偏低、磷素易被土壤吸附固定等因素影响,有效磷含量低已成为红壤旱地土壤肥力的主要特征^[3-4]。磷素参与了大豆生长的多种代谢过程,是大豆生长必需的三大营养元素之一^[5],在植株生长发育和养分代谢等多个过程起着至关重要的作用^[6-7]。缺磷对大豆的氮素积累^[8]、根瘤固氮^[9]、干物质积累^[10]、产量和品质^[11-12]、光合生理^[13-14]以及农艺性状^[13,15]等造成不利影响,进而严重影响单产和总产。而江西省春大豆主要种植于红壤丘陵旱地,因此,低磷胁迫已成为制约江西省春大豆发展的关键因素之一。

如何保证春大豆在低磷胁迫条件下高产稳产,选育耐低磷品种是最有效途径,因此培育磷高效春大豆品种对促进江西省春大豆产业发展和提质增效具有重要意义。已有研究分别采用水培^[16-18]、沙培^[19]和低磷土盆栽^[20-22]等方法对不同基因型大豆苗期耐低磷特性进行筛选鉴定,也有研究利用大豆根构型性状^[23]和酸性磷酸酶活性指标^[24]等来筛选磷高效大豆基因型,但选育耐低磷大豆品种的相关报道仍比较少^[20],尤其是目前针对江西省红壤旱地缺磷特性开展的大豆育成品种及其亲本资源磷效率分析鉴定的相关研究就更鲜有报道。本研究以江西省选育的春大豆品种(系)及其亲本为研究对象,采用蛭石加营养液的盆栽方法,对江西省育成大豆品种及其骨干亲本的磷效率进行评价,以期明确江西省春大豆品种(系)及其亲本资源的磷效率特性,为选育磷高效大豆新品种提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究共选用 17 个大豆品种(系)用于分析,包括江西省自主选育或审定的春大豆品种(系)10 个(赣豆 4 号、赣豆 8 号、赣豆 9 号、赣豆 10 号、赣

豆 11 号、赣豆 12 号、赣豆 15 号、赣春 19-15、赣春 19-34 和赣春 19-62),育种核心亲本 5 个(天隆 1 号、湘春豆 26 号、中豆 40、湘春豆 10 号和巴西 11),以及耐低磷对照品种(浙春 2 号)和北方春大豆(黑农 35)各 1 个。其中,巴西 11 为引种自巴西的国外春大豆资源,由华南农业大学年海教授课题组提供,其余供试品种(系)均由江西省农业科学院作物研究所大豆研究室保存。

1.2 试验方法

1.2.1 供试材料的培养和磷胁迫处理 试验参照武海燕等^[25]的方法,设置低磷和正常供磷 2 个磷浓度处理,使用直径 30 cm、装满等量蛭石的塑料花盆,每个处理种植 5 盆,每盆种植 9 粒饱满一致的大豆种子,出苗 10 d 后根据幼苗的生长状况,每盆选择健壮且大小一致的幼苗留苗 3 株。前 4 周视干旱情况等量浇水,4 周之后对供试植株分别进行低磷和正常磷 2 个水平的胁迫处理,每隔 7 d 处理 1 次,共处理 4 次。磷处理液以霍格兰营养液为基础,1 L 正常磷处理液包含硫酸钾 607.0 mg、磷酸二氢铵 115.0 mg、硫酸镁 493.0 mg、EDTA 铁钠盐 20.0 mg、硫酸亚铁 15.0 mg、硼酸 2.86 mg、硼砂 4.5 mg、硫酸锰 2.13 mg、硫酸铜 0.05 mg、硫酸锌 0.22 mg、硫酸铵 0.02 mg 和硝酸钙 945.0 mg;与正常磷处理液相比,低磷处理液除磷酸二氢钾和硫酸铵含量分别调整为 11.5 mg/L 和 118.9 mg/L 外,其他组分含量无差异。

1.2.2 生物量的测定 根据钟彩霞等^[20]介绍的方法,在大豆生长至盛花期时取样测定生物量,以子叶节为界对地上部分和地下部分分别收获并装于纸袋中,纸袋置于恒温烘箱中,先 120 °C 杀青 30 min,再调至 75 °C 烘干至恒重,称量冠干重和根干重,并计算总干重与根冠比。

1.2.3 净光合速率的测定 在盛花期,选择晴朗少云的天气,于 9:00-15:00 之间,采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪(配有 3×2 标准叶室),测定大豆植株叶片净光合速率。

1.2.4 磷含量指标的测定 委托江西省农业科学院绿色食品环境检测中心测定大豆地上部和地下部植株样品的全磷含量,采用钼锑抗比色法,检测标准为

NY/T2421-2013。植株磷效率主要包括磷吸收效率和磷利用效率,磷吸收效率为植株的磷吸收量,表示植株对介质中磷的吸收能力。磷利用效率为植株利用单位含量的磷所能产生的干物质量,表示植株对体内磷的代谢利用能力^[26]。

磷含量相关的指标定义及计算方法如下:冠磷浓度为植株地上部单位干重中所含磷素的量;根磷浓度为植株地下部单位干重中所含磷素的量;平均磷浓度为植株地上部和地下部单位干重中所含磷素量的平均值;冠磷吸收效率为植株地上部分所含磷素总量,即植株地上部干重 × 冠磷浓度;根磷吸收效率为植株地下部分所含磷素总量,即植株地下部干重 × 根磷浓度;总磷吸收效率为植株整株所含磷素总量;冠磷利用效率为冠干重 / 冠磷吸收效率;根磷利用效率为根干重 / 根磷吸收效率;总磷利用效率为植株总干重 / 总磷吸收效率;指标相对值为低磷水平条件下的测量指标 / 正常磷水平条件下的测量指标,即耐低磷指数。

1.3 数据分析

本研究所有数据利用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理和方差分析,并用指标相对值做相关性及主成分分析,最后利用隶属函数评价出 17 个大豆品种磷效率的高低^[16,20]。

隶属函数值的计算公式:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

反隶属函数值计算公式:

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中 X_i 为指标测定值, X_{\max} 和 X_{\min} 为所有参试材料某一指标的最大值和最小值。当某一性状与植物磷效率呈正相关时,用公式(1);当某一性状与植物磷效率呈负相关时,用公式(2)。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平下净光合速率分析

在低磷条件与正常磷条件处理下,不同大豆品种之间的净光合速率差异显著(表1)。在低磷条件下,湘春豆 10 号和湘春豆 26 号净光合速率较高,与湘春豆 10 号和湘春豆 26 号相比,赣春 19-34、赣豆 8 号、赣豆 9 号、巴西 11 和赣豆 4 号等 5 个品种的净光合速率显著下降,其他品种差异不显著。在正常磷条件下,赣豆 10 号的净光合速率最高,与赣豆 10 号相比,赣豆 11 号、赣春 19-62、湘春豆 26 号和赣春 19-34 的净光合速率下降但差异不显著,而其他品种的净光合速率均显著下降。赣豆 10 号、

赣豆 11 号和赣豆 12 号是以湘春豆 10 号为母本、巴西 11 为父本杂交选育的春大豆新品种,在正常磷条件下,相比于其杂交亲本,赣豆 10 号和赣豆 11 号的净光合速率分别为 $23.724 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 和 $21.756 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,显著高于其母本湘春豆 10 号的 $17.697 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 和父本的 $18.117 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,呈超亲遗传现象。与低磷处理相比,正常供磷条件下供试品种的净光合速率均明显提升,提升幅度位于 12.9%~74.4% 之间,增幅大于 50% 的品种有赣豆 10 号、赣豆 11 号、巴西 11、赣春 19-15、赣春 19-34、赣春 19-62 和赣豆 4 号等,尤以赣豆 10 号净光合速率增幅最明显,达 74.4%。

2.2 不同磷水平下生物量分析

植株生物量主要取决于品种特性,但也受低磷胁迫影响。研究表明,在低磷水平下,赣春 19-15 植株总干重最大,略高于赣春 19-34,但显著高于巴西 11、湘春豆 10 号、赣豆 8 号、赣豆 10 号、赣豆 15 号和黑农 35 等;在正常供磷水平下,赣豆 4 号生物量最大,与赣豆 11 号、赣春 19-62 和湘春豆 10 号相比差异不显著,但显著高于中豆 40、赣豆 10 号、天隆 1 号和黑农 35(表 2)。

根冠比是植物地下部分与地上部分的鲜重或干重的比值。在低磷条件下,赣豆 10 号的根冠比最高,与浙春 2 号、巴西 11、天隆 1 号、赣豆 15 号和赣春 19-15 相比差异不显著,但显著高于其他参试品种。且低磷水平下各植株的根冠比均高于正常供磷水平,表明在低磷胁迫条件下大豆植株优先促进根系生长以获取更多的营养。其中,赣豆 10 号、浙春 2 号和巴西 11 在低磷条件下根冠比均大于 0.5,表明其根系发育更旺盛,具有更强的耐低磷胁迫能力。

2.3 不同磷水平下磷吸收效率分析

在低磷与正常供磷水平下,部分供试大豆品种的根磷吸收效率、冠磷吸收效率和总磷吸收效率差异显著(表 3)。在低磷条件下,浙春 2 号、湘春豆 26 号和巴西 11 的根磷吸收效率较高,显著高于赣豆 10 号、赣豆 8 号和赣豆 15 号等品种,表明浙春 2 号、湘春豆 26 号和巴西 11 在根系中保留了较多的磷;赣豆 11 号的冠磷吸收效率和总磷吸收效率在 17 个参试品种中均居第一位,冠磷吸收效率显著高于除湘春豆 26 号之外的其他参试品种,总磷吸收效率与湘春豆 26 号、浙春 2 号和赣豆 12 号相比差异不显著,但显著高于其他品种。在正常磷水平下,赣豆 4 号的总磷吸收效率和冠磷吸收效率最高,均显著高于其他品种。

表 1 不同磷水平处理对供试大豆净光合速率的影响

Table 1 Net photosynthetic rate of soybean cultivars (lines) under different phosphorus levels

编号 No.	品种 (系) Cultivar (line)	亲本来源 Source	净光合速率 ($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) Pn		增幅 (%) Range
			低磷 LP	正常供磷 NP	
1	赣豆 10 号	湘春豆 10 号 × 巴西 11	13.606ab	23.724a	74.4
2	赣豆 11 号	湘春豆 10 号 × 巴西 11	13.928ab	21.756ab	56.2
3	赣豆 12 号	湘春豆 10 号 × 巴西 11	12.953ab	18.330bcde	41.5
4	湘春豆 10 号	六月白 × 四月白	15.678a	17.697cde	12.9
5	巴西 11	巴西大豆资源	11.263b	18.117bcde	60.9
6	赣春 19-15	中豆 40 × 巴西 11	13.002ab	19.562bcd	50.5
7	中豆 40	鄂农 W × 早枝豆	13.195ab	15.481ef	17.3
8	赣春 19-34	湘春豆 26 号 × 巴西 11	12.216b	19.726abcd	61.5
9	赣春 19-62	湘春豆 26 号 × 巴西 11	13.783ab	21.343abc	54.9
10	湘春豆 26 号	矮角毛 × 湘春豆 14 号	15.307a	21.241abc	38.8
11	赣豆 4 号	六月白 × 融豆 21	11.007b	18.223bcde	65.6
12	赣豆 8 号	浙春 3 号 × 赣豆 4 号	11.604b	13.655f	17.7
13	赣豆 9 号	油春 01-49 × 沔 035	11.460b	13.409f	17.0
14	赣豆 15 号	浙春 2 号 × 天隆 2 号	13.274ab	19.263bcde	45.1
15	浙春 2 号	德清黑豆 × 兖黄一号	13.887ab	17.715cde	27.6
16	天隆 1 号	中豆 32 × 中豆 29	13.429ab	17.996bcde	34.0
17	黑农 35	黑农 16 × 十胜长叶	12.760ab	16.370def	28.3

不同字母表示差异具有显著性水平 ($P < 0.05$), 下同

Different letters indicated significant differences ($P < 0.05$), Pn: Net photosynthetic rate, LP: Low phosphorus level, NP: Normal phosphorus level, the same as below

表 2 不同磷水平处理对供试大豆植株总干重及根冠比的影响

Table 2 Total dry weight and root-shoot ratio of soybean cultivars (lines) under different phosphorus levels

编号 No.	品种 (系) Cultivar (line)	总干重 (g) TDW		相对值 RV	根冠比 RSR		相对值 RV
		低磷 LP	正常供磷 NP		低磷 LP	正常供磷 NP	
1	赣豆 10 号	4.450ef	12.203bc	0.365	0.590a	0.299ab	1.971
2	赣豆 11 号	7.123ab	16.297a	0.437	0.445bcdef	0.300ab	1.485
3	赣豆 12 号	7.193ab	15.530ab	0.463	0.462bcde	0.323a	1.432
4	湘春豆 10 号	5.703cd	16.210a	0.352	0.436bcdef	0.204cd	2.140
5	巴西 11	6.100bcd	14.040ab	0.434	0.505abc	0.278ab	1.815
6	赣春 19-15	7.410a	15.673ab	0.473	0.475abcd	0.297ab	1.601
7	中豆 40	6.893ab	12.293bc	0.561	0.448bcdef	0.257bc	1.745
8	赣春 19-34	7.310a	15.770ab	0.464	0.376defgh	0.253bc	1.485
9	赣春 19-62	6.603abc	16.250a	0.406	0.389cdefg	0.192d	2.019
10	湘春豆 26 号	6.597abc	14.800ab	0.446	0.349efgh	0.191d	1.821
11	赣豆 4 号	6.670abc	16.683a	0.400	0.457bcde	0.181d	2.523
12	赣豆 8 号	5.377de	14.180ab	0.379	0.340fgh	0.213cd	1.593
13	赣豆 9 号	7.070ab	13.340ab	0.530	0.314gh	0.156d	2.011
14	赣豆 15 号	5.623cde	15.153ab	0.371	0.493abcd	0.330a	1.493
15	浙春 2 号	7.203ab	12.943ab	0.557	0.547ab	0.309ab	1.770
16	天隆 1 号	6.350abcd	12.100bc	0.525	0.496abc	0.278ab	1.780
17	黑农 35	4.020f	8.973c	0.448	0.263h	0.155d	1.691

TDW: Total dry weight, RSR: Root-shoot ratio, RV: Relative value, the same as below

表 3 不同磷水平处理下供试大豆的磷吸收效率分析

Table 3 Phosphorus absorption efficiency of soybean cultivars (lines) under different phosphorus levels

编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	冠磷吸收效率(mg/株)			根磷吸收效率(mg/株)			总磷吸收效率(mg/株)		
		PAE-S		相对值 RV	PAE-R		相对值 RV	PAE-P		相对值 RV
		低磷 LP	正常供磷 NP		低磷 LP	正常供磷 NP		低磷 LP	正常供磷 NP	
1	赣豆 10 号	1.907cde	5.790f	0.329	0.694bcd	1.395bc	0.497	2.601cdef	7.185e	0.362
2	赣豆 11 号	3.052a	7.978bcdef	0.383	0.945abc	1.721ab	0.550	3.998a	9.698bcde	0.412
3	赣豆 12 号	2.298bc	7.713cdef	0.298	0.884abc	1.575abc	0.562	3.183abcd	9.287bcde	0.343
4	湘春豆 10 号	2.040bcd	10.126bc	0.201	0.755bcd	1.373bc	0.550	2.794cde	11.498b	0.243
5	巴西 11	1.857cde	6.217f	0.299	1.202a	1.400bc	0.859	3.059bcde	7.617de	0.402
6	赣春 19-15	1.870cde	9.283bcde	0.201	1.038ab	1.886a	0.550	2.907cde	11.169bc	0.260
7	中豆 40	1.922cde	6.132f	0.313	0.839abc	1.225cd	0.685	2.761cde	7.356e	0.375
8	赣春 19-34	2.241bc	9.561bcde	0.234	0.858abc	1.517abc	0.565	3.099bcde	11.078c	0.280
9	赣春 19-62	2.109bc	10.637b	0.198	0.788bc	1.168cd	0.675	2.898cde	11.805b	0.245
10	湘春豆 26 号	2.656ab	9.821bcd	0.270	1.204a	1.218cd	0.989	3.861ab	11.040bc	0.350
11	赣豆 4 号	2.167bc	13.908a	0.156	0.871abc	1.505abc	0.579	3.039cde	15.413a	0.197
12	赣豆 8 号	1.332de	9.480bcde	0.140	0.602cd	1.256c	0.480	1.934fg	10.736bc	0.180
13	赣豆 9 号	1.715cde	9.624bcde	0.178	0.675bcd	0.816de	0.828	2.391defg	10.440bcd	0.229
14	赣豆 15 号	1.588cde	7.160def	0.222	0.774bc	1.843a	0.420	2.361efg	9.003bcde	0.262
15	浙春 2 号	2.143bc	6.151f	0.348	1.217a	1.465abc	0.831	3.360bc	7.616de	0.441
16	天隆 1 号	1.619cde	6.970ef	0.232	0.873abc	1.261c	0.692	2.491def	8.231cde	0.303
17	黑农 35	1.306e	9.785bcd	0.133	0.360d	0.568e	0.635	1.666g	10.353bcd	0.161

PAE-S: Phosphorus absorption efficiency of shoot, PAE-R: Phosphorus absorption efficiency of root, PAE-P: Phosphorus absorption efficiency of plant, the same as below

植株通过根系吸收并向地上部转运磷素的能力决定了植株磷吸收效率的有效性和收获指数^[27],相比正常供磷,总磷吸收效率的相对值反映品种在低磷水平下对磷素的吸收能力,而冠磷吸收效率的相对值则反映了品种在低磷水平下地上部对磷素的吸收能力。研究表明,浙春 2 号、赣豆 11 号和巴西 11 的总磷吸收效率相对值较高,表明这 3 个品种相对其他品种在低磷条件下,具有更强的磷素吸收能力;而赣豆 11 号的冠磷吸收率相对值最高,其次是赣豆 10 号和耐低磷对照品种浙春 2 号,表明这些品种在低磷水平下,具有更强的向地上部转运磷素的能力。同时,与赣豆 4 号和赣豆 8 号等江西省选育的其他春大豆相比,新审定的赣豆 10 号、赣豆 11 号和赣豆 12 号总磷吸收效率和冠磷吸收效率的相对值均明显提升,表明低磷条件下,赣豆 10 号、赣豆 11 号和赣豆 12 号具有更强的磷素吸收能力和向地上部转运磷素的能力。

2.4 不同磷水平下磷利用效率分析

磷利用效率体现了植株吸收利用土壤中的磷转化为干物质的能力。在低磷与正常供磷条件下,部分供试大豆品种在根磷利用效率、冠磷利用效率和总磷利用效率间差异显著(表 4)。其中,在低磷条件下,赣豆 9 号的总磷利用效率最高,显著高于除赣豆 8 号和天隆 1 号之外的其他品种;正常供磷条件下,巴西 11 的总磷利用效率最高,其次是浙春 2 号和赣豆 10 号,巴西 11、浙春 2 号和赣豆 10 号的总磷利用效率与赣豆 11 号、中豆 40、赣豆 15 号和赣豆 12 号相比差异不显著但显著高于其他供试品种。

与正常供磷相比,在低磷胁迫条件下供试大豆品种的总磷利用效率呈上升趋势,赣豆 10 号、赣豆 11 号、赣豆 12 号、湘春豆 10 号和巴西 11 差异不显著,其他品种低磷胁迫条件下的总磷利用效率均显著上升(表 4),且赣豆 10 号、赣豆 11 号和巴

西 11 总磷利用效率的相对值仅为 1.013、1.055 和 1.097。冠磷利用效率分析结果与总磷利用效率相似,与正常供磷相比,赣豆 10 号和赣豆 11 号的冠磷利用效率相对值分别为 0.920 和 1.012。表明这些品种在不同磷浓度胁迫下总磷利用效率和冠磷利用效率相对稳定,受低磷胁迫影响小,具有较强的耐低

磷能力。同时研究发现,与正常供磷相比,低磷处理下的根磷利用效率也总体呈上升趋势,但差异不显著,其中巴西 11、湘春豆 26 号和浙春 2 号的根磷利用效率相对值分别为 0.874、0.810 和 0.960,表明这三个品种在正常供磷条件下仍能保持较高的根磷利用效率。

表 4 不同磷水平处理下供试大豆的磷利用效率分析

Table 4 Phosphorus use efficiency of soybean cultivars (lines) under different phosphorus levels

编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	冠磷利用效率(g/mg)			根磷利用效率(g/mg)			总磷利用效率(g/mg)		
		PUE-S		相对值 RV	PUE-R		相对值 RV	PUE-P		相对值 RV
		低磷 LP	正常供磷 NP		低磷 LP	正常供磷 NP		低磷 LP	正常供磷 NP	
1	赣豆 10 号	0.501h	0.545ab	0.920	0.780abc	0.676bc	1.154	0.577h	0.569a	1.013
2	赣豆 11 号	0.539gh	0.532abc	1.012	0.777abc	0.689bc	1.126	0.593gh	0.562ab	1.055
3	赣豆 12 号	0.756cdef	0.504bcd	1.500	0.857ab	0.839a	1.022	0.778cdef	0.557ab	1.398
4	湘春豆 10 号	0.694efg	0.444de	1.563	0.770abc	0.691bc	1.114	0.711efg	0.471c	1.509
5	巴西 11	0.745cdef	0.597a	1.247	0.640cd	0.732ab	0.874	0.677fgh	0.617a	1.097
6	赣春 19-15	0.900abc	0.445de [#]	2.025	0.772abc	0.627bc	1.231	0.852bcd	0.475c [#]	1.793
7	中豆 40	0.826cde	0.536ab [#]	1.542	0.918a	0.694abc	1.322	0.840bcde	0.561ab [#]	1.496
8	赣春 19-34	0.794cde	0.442de [#]	1.800	0.786abc	0.712ab	1.104	0.791cdef	0.477c [#]	1.659
9	赣春 19-62	0.752cdef	0.426def [#]	1.765	0.787abc	0.760ab	1.035	0.760cdef	0.458c [#]	1.659
10	湘春豆 26 号	0.614fgh	0.425ef	1.446	0.535d	0.660bc	0.810	0.571h	0.450c [#]	1.268
11	赣豆 4 号	0.716def	0.350f [#]	2.048	0.793abc	0.563c	1.408	0.733def	0.369d [#]	1.984
12	赣豆 8 号	1.054a	0.411ef [#]	2.566	0.752abc	0.665bc	1.131	0.949ab	0.440cd [#]	2.156
13	赣豆 9 号	1.050ab	0.400ef [#]	2.622	0.836abc	0.728ab	1.149	0.990a	0.427cd [#]	2.320
14	赣豆 15 号	0.793cde	0.527abc [#]	1.505	0.808abc	0.676bc	1.195	0.795cdef	0.557ab [#]	1.426
15	浙春 2 号	0.760cdef	0.542ab [#]	1.401	0.668bcd	0.696abc	0.960	0.718efg	0.571a [#]	1.257
16	天隆 1 号	0.882bcd	0.455cde [#]	1.940	0.840abc	0.696abc	1.207	0.865abc	0.491bc [#]	1.760
17	黑农 35	0.817cde	0.265g [#]	3.089	0.793abc	0.709abc	1.118	0.805cdef	0.289e [#]	2.787

[#] 表示同一指标的低磷和正常供磷处理间差异显著 ($P < 0.05$)

[#] indicated significant differences between low and normal phosphorus level of the trait ($P < 0.05$), PUE-S: Phosphorus use efficiency of shoot, PUE-R: Phosphorus use efficiency of root, PUE-P: Phosphorus use efficiency of plant, the same as below

2.5 不同磷水平下磷浓度分析

磷浓度是指单位干重中所含磷素的量,与根磷浓度相比,地上部冠磷浓度越高表明植株由地下向地上转运磷的能力和地上部冠层富集磷素的能力越强。在低磷条件下,赣豆 10 号的冠磷浓度最高,与赣豆 11 号和湘春豆 26 号相比差异不显著,但显著高于其他参试品种。在低磷条件下,赣豆 10 号、赣豆 11 号和赣豆 12 号的冠磷浓度与根磷浓度比值位列前三,分别是 1.562、1.430 和 1.207,其次是

湘春豆 10 号、赣豆 4 号、赣春 19-62、中豆 40 和赣豆 15 号,比值处于 1.016~1.175 之间,其他品种的冠磷浓度均低于根磷浓度,比值均小于 1;而正常供磷条件下,供试品种冠磷浓度均明显高于根磷浓度(表 5)。以上结果表明,在正常供磷条件下,所有供试品种有充足的磷向地上部分转移,而在低磷条件下,赣豆 10 号、赣豆 11 号和赣豆 12 号表现出更强的向地上部分转运并富集磷元素的能力。

表 5 不同磷处理水平下供试大豆的磷浓度分析

Table 5 Phosphorus concentration of soybean cultivars (lines) under different phosphorus levels

编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	冠磷浓度 (mg/g)			根磷浓度 (mg/g)			冠磷浓度 / 根磷浓度	
		PC-S		相对值 RV	PC-R		相对值 RV	PC-S/R	
		低磷 LP	正常供磷 NP		低磷 LP	正常供磷 NP		低磷 LP	正常供磷 NP
1	赣豆 10 号	2.003a	1.854fg	1.080	1.282bc	1.493abc	0.859	1.562	1.242
2	赣豆 11 号	1.857ab	1.879fg	0.988	1.299bc	1.453bc	0.894	1.430	1.293
3	赣豆 12 号	1.409cde	1.986defg	0.709	1.168c	1.213c	0.962	1.207	1.637
4	湘春豆 10 号	1.540bcd	2.255cde	0.683	1.310bc	1.511abc	0.867	1.175	1.492
5	巴西 11	1.384cde	1.727g	0.801	1.777ab	1.375bc	1.293	0.779	1.257
6	赣春 19-15	1.116ef	2.270cde	0.491	1.317bc	1.595ab	0.826	0.847	1.423
7	中豆 40	1.212def	1.867fg	0.649	1.179c	1.475bc	0.799	1.028	1.265
8	赣春 19-34	1.265def	2.298cd	0.550	1.284bc	1.454bc	0.884	0.985	1.581
9	赣春 19-62	1.330de	2.349cd	0.566	1.283bc	1.333bc	0.963	1.037	1.762
10	湘春豆 26 号	1.654abc	2.359cd	0.701	2.042a	1.522ab	1.342	0.810	1.550
11	赣豆 4 号	1.407cde	2.947b	0.478	1.278bc	1.782a	0.717	1.101	1.654
12	赣豆 8 号	0.966f	2.434c	0.397	1.350bc	1.512abc	0.893	0.715	1.610
13	赣豆 9 号	0.955f	2.514c	0.380	1.196c	1.393bc	0.859	0.798	1.804
14	赣豆 15 号	1.264def	1.911efg	0.661	1.244bc	1.493abc	0.833	1.016	1.280
15	浙春 2 号	1.326cde	1.857fg	0.714	1.503abc	1.443bc	1.042	0.882	1.287
16	天隆 1 号	1.145ef	2.206cdef	0.519	1.238bc	1.437bc	0.861	0.925	1.535
17	黑农 35	1.228def	3.785a	0.324	1.312bc	1.411bc	0.930	0.935	2.683

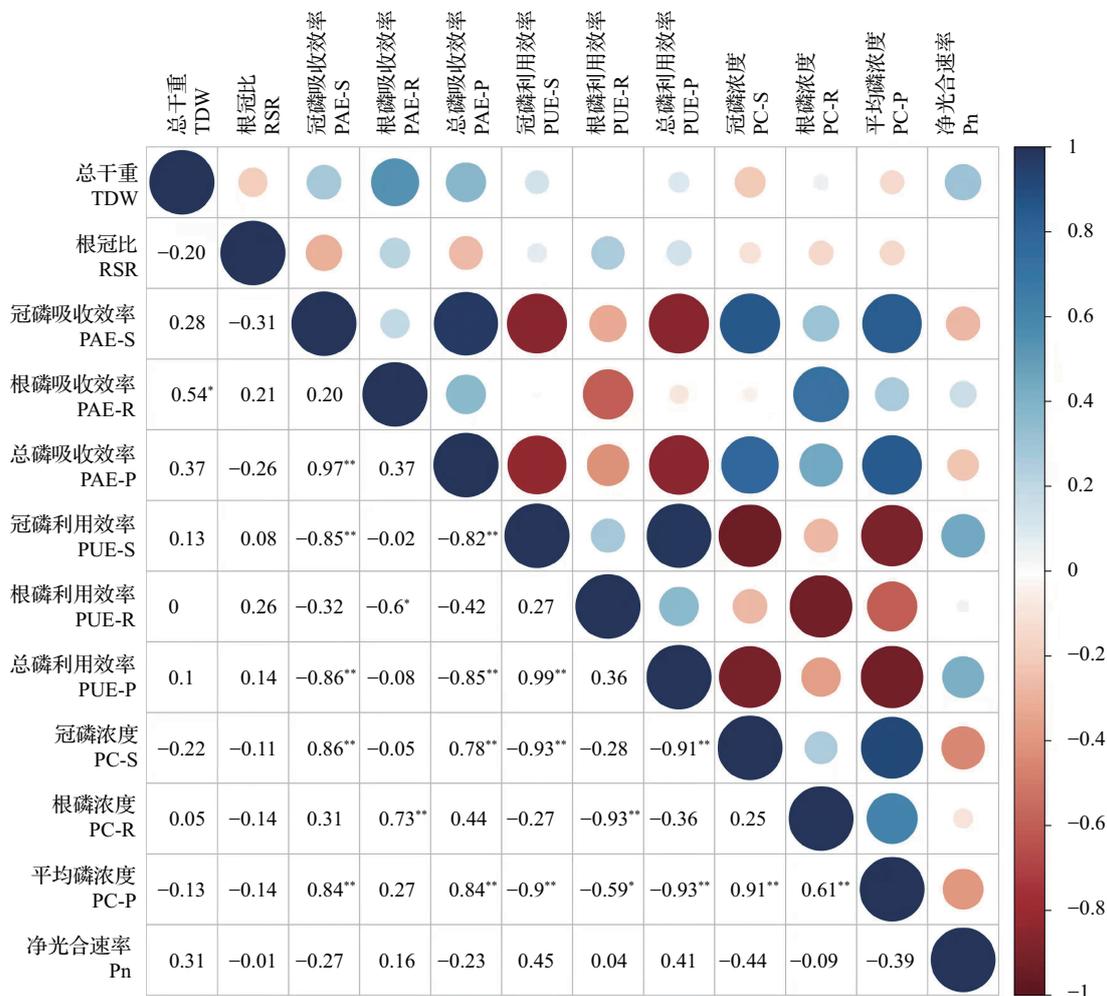
PC-S: Phosphorus concentration of shoot, PC-R: Phosphorus concentration of root, PC-S/R: Phosphorus concentration of shoot/root, the same as below

2.6 不同大豆品种的磷效率综合评价

2.6.1 相关性分析 对供试品种植株的总干重、根冠比、冠磷吸收效率、根磷吸收效率、总磷吸收效率、冠磷利用效率、根磷利用效率、总磷利用效率、冠磷浓度、根磷浓度、平均磷浓度和净光合速率等 12 个指标的相关性进行分析,结果表明,17 个供试品种的 12 个指标除根冠比和净光合速率外,其他 10 个指标分别与其中 1 个或多个指标之间存在显著或极显著相关(图 1)。其中植株总干重与根磷吸收效率显著正相关;冠磷吸收效率与总磷吸收效率、冠磷浓度、平均磷浓度极显著正相关,与冠磷利用效率、总磷利用效率极显著负相关;根磷吸收效率与总干重、根磷浓度分别呈显著、极显著正相关,与根磷利用效率显著负相关;总磷吸收效率与冠磷吸收效率、冠磷浓度、平均磷浓度极显著正相关,与冠磷利用效率、总磷利用效率极显著负相关;冠磷利用效率与总磷利用效率极显著正相关,与冠磷吸收效率、总磷吸收效率、冠磷浓度、平均磷浓度极显著负相关;根

磷利用效率与根磷吸收效率、平均磷浓度显著负相关,与根磷浓度极显著负相关;总磷利用效率与冠磷吸收效率、总磷吸收效率、冠磷浓度、平均磷浓度极显著负相关,与冠磷利用效率极显著正相关;冠磷浓度与冠磷吸收效率、总磷吸收效率、平均磷浓度极显著正相关,与冠磷利用效率、总磷利用效率极显著负相关;根磷浓度与根磷吸收效率、平均磷浓度极显著正相关,与根磷利用效率极显著负相关;平均磷浓度与冠磷吸收效率、总磷吸收效率、冠磷浓度、根磷浓度极显著正相关,与根磷利用效率、冠磷利用效率和总磷利用效率分别呈显著、极显著负相关。

2.6.2 主成分分析 结合相关性分析结果,对 10 个显著相关的指标进行主成分分析,并根据主成分的特征值和贡献率选择相应的主成分。分析结果表明,主成分 1、主成分 2 和主成分 3 的累积贡献率为 95.84%(表 6),表明这 3 个主成分已经包含了 17 个供试品种磷效率相关性状 95.84% 的信息。因



*: 在 $P < 0.05$ 水平上显著; **: 在 $P < 0.01$ 水平上极显著
*and** indicated significant correlation at 5% and 1% level respectively

图 1 供试大豆磷效率性状的相关性分析

Fig.1 Correlation coefficient of phosphorus efficiency traits of different soybean cultivars (lines)

此,选取这 3 个主成分作为评价 17 个供试品种磷效率差异的综合指标,并用于后续分析。

主成分 1 特征值为 5.93,贡献率为 59.33%,正向载荷指标最大的为平均磷浓度,其次是总磷吸收效率和冠磷吸收效率,负向载荷指标最大的为总磷利用效率,其次是冠磷利用效率和根磷利用效率(表 6)。由于磷效率各指标分析结果显示大豆植株冠磷效率和总磷效率对磷胁迫的影响在不同品种间的变化差异趋于一致,且主成分 1 载荷较大的指标均与冠磷效率有关,因此,将主成分 1 称为冠层磷效率因子。

主成分 2 特征值为 2.28,贡献率为 22.81%,正向载荷指标最大的为根磷吸收效率,其次是根磷浓度,负向载荷指标最大的则为根磷利用效率,这些指

标均与根系磷效率有关,因此将主成分 2 称为根系磷效率因子。

主成分 3 特征值为 1.37,贡献率为 13.71%,以植株总干重的载荷最大,因此将主成分 3 称为生物量因子。

2.6.3 隶属函数分析 由于主成分 1 和主成分 2 累积贡献率为 82.14%,已经包含了 17 个供试品种磷效率性状的大部分信息,因此选取冠层磷效率因子和根系磷效率因子进行隶属函数分析。采用隶属函数公式(1)计算冠磷吸收效率、总磷吸收效率、根磷吸收效率、冠磷浓度、根磷浓度、平均磷浓度的函数值;采用隶属函数公式(2)计算冠磷利用效率、根磷利用效率、总磷利用效率的函数值,同时计算供试品种 9 个指标隶属函数值的平均值,并根据平均

值大小对大豆磷效率高低进行评价。结果显示, 17 个供试品种的综合磷效率由高到低的顺序为: 巴西 11、湘春豆 26 号、浙春 2 号、赣豆 11 号、赣豆 10 号、

赣豆 12 号、中豆 40、赣春 19-62、湘春豆 10 号、赣春 19-34、赣豆 15 号、天隆 1 号、赣春 19-15、赣豆 9 号、赣豆 8 号、赣豆 4 号、黑农 35 (表 7)。

表 6 供试大豆磷效率性状的主成分分析及各因子载荷矩阵

Table 6 Component matrix and principal components analysis results of phosphorus efficiency traits of different soybean cultivars (lines)

指标 Index	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2	成分 3 Component 3
总干重 TDW	0.056	0.511	0.849
冠磷吸收效率 PAE-S	0.913	-0.131	0.340
根磷吸收效率 PAE-R	0.332	0.872	0.132
总磷吸收效率 PAE-P	0.930	0.046	0.347
冠磷利用效率 PUE-S	-0.910	0.364	-0.012
根磷利用效率 PUE-R	-0.575	-0.621	0.448
总磷利用效率 PUE-P	-0.937	0.276	0.016
冠磷浓度 PC-S	0.888	-0.406	-0.058
根磷浓度 PC-R	0.584	0.691	-0.397
平均磷浓度 PC-P	0.977	-0.052	-0.183
特征值 Eigenvalues	5.93	2.28	1.37
贡献率 (%) Contribution rate	59.33	22.82	13.71
累积贡献率 (%) Cumulative contribution rate	59.33	82.14	95.84

表 7 低磷条件下供试大豆的隶属函数指数

Table 7 Membership function index of soybean under low phosphorus treatment

编号 No.	品种 (系) Cultivar (line)	冠磷吸	总磷吸	平均磷	冠磷利	总磷利	冠磷	根磷吸	根磷利	根磷	均值 Mean
		收效率 PAE-S	收效率 PAE-P	浓度 PC-P	用效率 PUE-S	用效率 PUE-P	浓度 PC-S	收效率 PAE-R	用效率 PUE-R	浓度 PC-R	
5	巴西 11	0.663	0.859	1.000	0.849	0.953	0.631	0.771	0.893	0.921	0.838
10	湘春豆 26 号	0.550	0.674	0.875	0.757	0.856	0.499	0.999	1.000	1.000	0.801
15	浙春 2 号	0.861	1.001	0.695	0.778	0.863	0.516	0.723	0.750	0.519	0.745
2	赣豆 11 号	1.000	0.897	0.864	0.958	0.976	0.879	0.228	0.472	0.283	0.728
1	赣豆 10 号	0.785	0.718	0.929	1.000	1.000	1.000	0.136	0.425	0.227	0.691
3	赣豆 12 号	0.660	0.649	0.597	0.733	0.783	0.510	0.249	0.646	0.393	0.580
7	中豆 40	0.722	0.766	0.427	0.713	0.727	0.430	0.466	0.143	0.131	0.503
9	赣春 19-62	0.261	0.302	0.416	0.611	0.636	0.320	0.448	0.623	0.393	0.446
4	湘春豆 10 号	0.274	0.293	0.506	0.703	0.720	0.475	0.228	0.492	0.240	0.437
8	赣春 19-34	0.406	0.424	0.359	0.594	0.636	0.299	0.256	0.509	0.266	0.417
14	赣豆 15 号	0.355	0.362	0.467	0.730	0.767	0.446	0	0.357	0.186	0.408
16	天隆 1 号	0.397	0.506	0.311	0.530	0.579	0.258	0.478	0.336	0.231	0.403
6	赣春 19-15	0.274	0.355	0.265	0.491	0.560	0.222	0.229	0.295	0.174	0.318
13	赣豆 9 号	0.181	0.243	0.116	0.215	0.263	0.074	0.716	0.434	0.227	0.274
12	赣豆 8 号	0.030	0.069	0.185	0.241	0.356	0.096	0.105	0.463	0.281	0.203
11	赣豆 4 号	0.091	0.129	0.149	0.480	0.453	0.203	0.279	0	0	0.198
17	黑农 35	0	0	0	0	0	0	0.377	0.484	0.341	0.134

3 讨论

中国是大豆起源国,拥有世界上最丰富的大豆种质资源^[28-30],然而大豆资源在新品种培育中的利用率仅为1%左右,遗传基础趋于狭窄限制了突破性大豆新品种的产出^[31]。已有育种实践表明,利用国外大豆资源拓宽遗传基础对促进提升国内大豆育种的水平起着重要作用^[20, 32-33]。江西省春大豆主要种植在红壤丘陵地区,土壤缺磷严重制约了江西省大豆生产的发展,选育磷高效大豆品种是提高江西省大豆产量和经济效益的重要途径。巴西是世界上第二大大豆生产国,应用品种主要种植在酸性红壤区域,具有抗逆境胁迫能力好、产量高的特点,平均单产高达3390 kg/hm²,约是我国大豆平均单产的2倍^[34],因此利用巴西大豆种质拓宽遗传基础,有助于提升江西省大豆品种的耐低磷胁迫能力和产量水平。赵现伟等^[35]利用巴西优异资源巴西11为父本先后选育赣豆10号、赣豆11号和赣豆12号3个春大豆新品种,其隶属函数值的平均值为0.666,约是赣豆4号、赣豆8号和赣豆9号等前期选育品种隶属函数值平均值的3倍,同时优于母本湘春豆10号。此外,赣豆10号、赣豆11号向地上部转移分配磷素的能力均超过父母本,存在正向超亲遗传现象,而以中豆40、湘春豆26号为母本,巴西11为父本分别选育的春大豆新品系赣春19-15、赣春19-34和赣春19-62的综合磷效率却出现了负向超亲遗传现象,表明大豆磷效率属于复杂的数量性状,受多基因控制,与前人研究报道的大豆磷效率性状是受多基因控制的数量性状,在后代中存在超亲分离现象相一致^[20, 36]。

大豆成熟时根系中只有约26.3%的磷被转运到籽粒中,茎部约40%的磷被转运到籽粒,而叶和豆荚部位的磷分别转运到籽粒的比例高达87.9%和86.9%,可见植株通过根系由地下部向地上部运输的能力一定程度上决定了植株磷吸收效率的有效性和收获指数^[27]。植株磷吸收效率的相对值反映了植株应对低磷胁迫时对磷素的吸收能力,而地上部冠磷浓度则表示植株由根系向地上部转运磷的能力和冠层富集磷素的能力。在低磷条件下,赣豆10号、赣豆11号和赣豆12号的植株总磷吸收效率相对值和冠磷吸收效率相对值均显著优于赣豆4号、赣豆8号和赣豆9号,且在低磷条件下,赣豆10号、赣豆11号和赣豆12号的冠磷浓度分别高于

根磷浓度56.24%、42.97%和20.67%,而赣豆4号的冠磷浓度仅比根磷浓度高10.12%,赣豆8号和赣豆9号的冠磷浓度则分别低于根磷浓度28.45%和20.17%。相比前期育成的春大豆品种,赣豆10号、赣豆11号和赣豆12号在低磷条件下具有更强的磷素吸收能力和由地下部向地上部转运磷素的能力。此外,赣豆10号、赣豆11号、赣豆12号的总磷利用效率在低磷处理下与正常供磷处理下的数值相比,差异不显著,冠磷利用效率分析也获得相同的研究结果,而前期选育的赣豆4号、赣豆8号和赣豆9号等品种差异显著,表明赣豆10号、赣豆11号、赣豆12号在不同磷浓度胁迫下总磷利用效率和冠磷利用效率更稳定,受低磷胁迫影响更小,具有更强的由地下向地上部分转运富集磷素并转化为干物质的能力。因此,利用国外优异资源巴西11血缘选育的赣豆10号、赣豆11号和赣豆12号对低磷胁迫具有更好的耐受性,有效提升了育成春大豆品种在江西省及南方红壤丘陵地区对低磷胁迫的耐受水平。

4 结论

以净光合速率、生物量、磷吸收效率、磷利用效率和磷浓度等为指标,结合相关性分析和隶属函数分析,明确了在低磷胁迫与正常供磷处理下江西省春大豆选育品种及其骨干亲本的磷效率的差异。在低磷条件下,与骨干亲本和赣豆4号、赣豆8号和赣豆9号等品种相比,赣豆10号优先促进根系生长以吸收更多的磷向地上部转运,赣豆11号转运磷素的能力最强。利用耐低磷优异资源巴西11血缘选育的春大豆新品种赣豆10号、赣豆11号和赣豆12号比赣豆4号、赣豆8号和赣豆9号等前期选育品种对低磷胁迫具有更好的耐受性。

参考文献

- [1] 陶其骥,刘光荣,罗奇祥,李祖章,徐招莲. 江西省红壤旱地土壤钾素含量分布研究. 江西农业学报, 1994, 6(2): 93-99
Tao Q X, Liu G R, Luo Q X, Li Z Z, Xu Z L. Study on the distribution of potassium of red upland soil in Jiangxi. Acta Agriculturae Jiangxi, 1994, 6(2): 93-99
- [2] 孙波,张桃林,赵其国. 南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价. 土壤, 1995, 27(3): 119-128
Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. The comprehensive evaluation of soil nutrient barren about red soil in hilly region in south china. Soil, 1995, 27(3): 119-128
- [3] Yan X L, Wu P, Ling H Q, Xu G H, Xu F S, Zhang Q F. Plant nutriomics in China: An overview. Annals of Botany, 2006, 98(3): 473-482

- [4] 王伯仁,徐明岗,文石林. 长期施肥对红壤磷组分及活性酸的影响. 中国农学通报, 2007, 23(3): 254-259
Wang B R, Xu M G, Wen S L. The effect of long term fertilizer application on phosphorus in red upland soil. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(3): 254-259
- [5] 王忠. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社, 1999: 85
Wang Z. Plant physiology. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1999: 85
- [6] 蔡柏岩,葛菁萍,金惠玉,刘丽君,祖伟. 磷素水平对不同大豆品种钾素吸收效率的影响. 大豆科学, 2006, 25(1): 42-47
Cai B Y, Ge J P, Jin H Y, Liu L J, Zu W. The effect on phosphorus amount to potassium absorb efficiency of different soybean cultivars. Soybean Science, 2006, 25(1): 42-47
- [7] 蔡柏岩,葛菁萍,祖伟. 磷素水平对不同大豆品种氮素营养的影响. 中国油料作物学报, 2006, 28(2): 156-161
Cai B Y, Ge J P, Zu W. The effect of phosphorus level on nitrogen uptake of different soybean varieties. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2006, 28(2): 156-161
- [8] 姚玉波,吴冬婷,龚振平,马春梅. 磷素水平对大豆氮素积累及产量的影响. 核农学报, 2012, 26(6): 947-951
Yao Y B, Wu D T, Gong Z P, Ma C M. Effect of phosphorus level on nitrogen accumulation and yield in soybean. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(6): 947-951
- [9] 苗淑杰,乔云发,韩晓增,王树起,李海波. 缺磷对已结瘤大豆生长和固氮功能的影响. 作物学报, 2009, 35(7): 1344-1349
Miao S J, Qiao Y F, Han X Z, Wang S Q, Li H B. Effects of phosphorus deficiency on growth and nitrogen fixation of soybean after nodule formation. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(7): 1344-1349
- [10] 郭晓双,吴冬婷,周全,姚玉波,龚振平,马春梅,夏玄. 缺磷胁迫对大豆植株磷素与干物质积累的影响. 大豆科学, 2014, 33(4): 545-549
Guo X S, Wu D T, Zhou Q, Yao Y B, Gong Z P, Ma C M, Xia X. Effect of phosphorus deficiency stress on phosphorus and dry matter accumulation in soybean. Soybean Science, 2014, 33(4): 545-549
- [11] 曹立为,郭晓双,龚振平,马春梅. 磷素营养变化对大豆磷素积累及产量和品质的影响. 大豆科学, 2015, 34(3): 458-479
Cao L W, Guo X S, Gong Z P, Ma C M. Changes of phosphorus nutrition on P accumulation, yield and quality of soybean. Soybean Science, 2015, 34(3): 458-479
- [12] 吴冬婷,张晓雪,龚振平,马春梅,张磊. 磷素营养对大豆磷素吸收及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 670-677
Wu D T, Zhang X X, Gong Z P, Ma C M, Zhang L. Effects of phosphorus nutrition on P absorption and yields of soybean. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 670-677
- [13] 刘婧琦,谢甫缙,敖雪,张惠君,王海英. 磷对不同磷效率大豆品种光合生理和农艺性状的影响. 大豆科学, 2009, 28(2): 217-220
Liu J Q, Xie F T, Ao X, Zhang H J, Wang H Y. Effect of different phosphorus level on photosynthetic rate and agronomic traits between soybean cultivars with different phosphorus efficiency. Soybean Science, 2009, 28(2): 217-220
- [14] 谢甫缙,孙海妹,张惠君,王海英,傲雪,于翠梅,程海涛. 磷素对不同品质类型大豆光合生理的影响. 大豆科学, 2012, 31(2): 232-236
Xie F T, Sun H S, Zhang H J, Wang H Y, Ao X, Yu C M, Cheng H T. Effect of P₂O₅ on photosynthetic physiology of soybean cultivars with different quality types. Soybean Science, 2012, 31(2): 232-236
- [15] 丁玉川,陈明昌,程滨,李丽君. 磷营养对不同大豆品种生长和磷吸收利用效率的影响. 华北农学报, 2006, 21(1): 121-124
Ding Y C, Chen M C, Cheng B, Li L J. Effect of phosphorus on plant growth and phosphorus uptake and use efficiency in different soybean cultivars. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 21(1): 121-124
- [16] 武兆云,郭娜,赵晋铭,李丽红,盖钧镒,邢邯. 大豆苗期耐低磷主成分及隶属函数分析. 大豆科学, 2012, 31(1): 42-46
Wu Z Y, Guo N, Zhao J M, Li L H, Gai J Y, Xing H. Principal components and membership function analysis of low phosphate tolerance at seedling stage in soybean. Soybean Science, 2012, 31(1): 42-46
- [17] 赵艳红,陈怀珠,杨守臻,李初英,孙祖东. 大豆耐低磷鉴定指标研究. 大豆科学, 2009, 28(1): 175-177
Zhao Y H, Chen H Z, Yang S Z, Li C Y, Sun Z D. Identification indexes of the low-phosphorus tolerance of soybean. Soybean Science, 2009, 28(1): 175-177
- [18] 刘澜,李喜焕,王瑞霞,张彩英. 大豆耐低磷指标筛选与耐低磷品种鉴定. 中国农业科技导报, 2015, 17(4): 30-41
Liu Y, Li X H, Wang R X, Zhang C Y. Screen indexes for soybean tolerance to phosphorus deficiency and identification of low phosphorus tolerant soybean cultivars. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(4): 30-41
- [19] 赵婧,孟凡钢,于德彬,邱强,张鸣浩,饶德民,丛博韬,张伟,闫晓艳. 不同磷效率大豆农艺性状与磷/铁利用率对磷素的响应. 作物学报, 2021, 47(9): 1824-1833
Zhao J, Meng F G, Yu D B, Qiu Q, Zhang M H, Rao D M, Cong B T, Zhang W, Yan X Y. Response of agronomic traits and P/Fe utilization efficiency to P application with different P efficiency in soybean. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(9): 1824-1833
- [20] 钟彩霞,钟开珍,赵云云,陈林,年海,马启彬,杨存义. 巴西大豆资源及其在华南地区衍生品种的磷效率评价. 中国油料作物学报, 2013, 35(2): 162-170
Zhong C X, Zhong K Z, Zhao Y Y, Chen L, Nian H, Ma Q B, Yang C Y. Evaluation of Brazilian soybean resources and south China soybean cultivars derived from Brazilian soybean in phosphorus efficiency. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(2): 162-170
- [21] 吴俊江,钟鹏,刘丽君,刘德生,林蔚刚,董德建. 不同大豆基因型耐低磷能力的评价. 大豆科学, 2008, 27(6): 983-987
Wu J J, Zhong P, Liu L J, Liu D S, Lin W G, Dong D J. Evaluation on the low phosphorous tolerance of different soybean genotypes. Soybean Science, 2008, 27(6): 983-987
- [22] 曾维英,孙祖东,蔡昭艳,陈怀珠,杨守臻,唐向民,赖振光. 不同大豆新品种苗期耐低磷的鉴定与筛选. 广西农学报, 2015, 30(1): 14-17
Zeng W Y, Sun Z D, Cai Z Y, Chen H Z, Yang S Z, Tang X M, Lai Z G. The identification and selection of different new soybean varieties with high phosphorus efficiency in seedling stage. Journal of Guangxi Agriculture, 2015, 30(1): 14-17

- [23] 尹元萍,张雅琼,申毓哈,赵志勇,谢世清,杨生超,梁泉. 利用根系形态构型筛选磷高效大豆基因型. 分子植物育种, 2015, 13(5): 999-1008
Yin Y P, Zhang Y Q, Shen Y H, Zhao Z Y, Xie S Q, Yang S C, Liang Q. Screening of soybean genotype with high phosphorus efficiency using root morphology and architecture. *Molecular Plant Breeding*, 2015, 13(5): 999-1008
- [24] 刘渊,李喜焕,孙星,张彩英. 磷胁迫下大豆酸性磷酸酶活性变化及磷效率基因型差异分析. 植物遗传资源学报, 2012, 13(4): 521-528
Liu Y, Li X H, Sun X, Zhang C Y. Variation of acid phosphatase activity and analysis of genotypic difference in P efficiency of soybean under phosphorus stress. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2012, 13(4): 521-528
- [25] 武海燕,李喜焕,李文龙,孔佑宾,杜汇,张彩英. 大豆耐低磷性状鉴定及优异种质筛选. 河南农业科学, 2020, 49(1): 61-67
Wu H Y, Li X H, Li W L, Kong Y B, Du H, Zhang C Y. Identification of low phosphorus tolerant traits and selection of elite genotypes in soybean. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(1): 61-67
- [26] 耿雷跃,崔士友,张丹,邢邯,盖钧镒,喻德跃. 大豆磷效率 QTL 定位及互作分析. 大豆科学, 2007, 26(4): 460-466
Geng L Y, Cui S Y, Zhang D, Xing H, Gai J Y, Yu D Y. QTL mapping and epistasis analysis for P-efficiency in soybean. *Soybean Science*, 2007, 26(4): 460-466
- [27] 吴明才,肖昌珍,郑普英. 大豆磷素营养研究. 中国农业科学, 1999, 32(3): 59-65
Wu M C, Xiao C Z, Zheng P Y. Study on the physiological function of phosphorus to soybean. *Scientia Agricultura Sinica*, 1999, 32(3): 59-65
- [28] 中国农业科学院油料作物研究所. 中国大豆品种资源目录. 北京: 农业出版社, 1980: 1-124
Institute of Oil Crop in Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Catalog of Chinese soybean germplasm resources*. Beijing: Agriculture Press, 1980: 1-124
- [29] 中国农业科学院作物品种资源研究所. 中国大豆品种资源目录(续编一). 北京: 农业出版社, 1991: 1-60
Institute of Crop Germplasm Resources in Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Catalog of Chinese soybean germplasm resources (continued 1)*. Beijing: Agriculture Press, 1991: 1-60
- [30] 中国农业科学院作物品种资源研究所. 中国大豆品种资源目录(续编二). 北京: 中国农业出版社, 1996: 1-38
Institute of Crop Germplasm Resources in Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Catalog of Chinese soybean germplasm resources (continued 2)*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1996: 1-38
- [31] 邱丽娟,李英慧,关荣霞,刘章雄,王丽侠,常汝镇. 大豆核心种质和微核心种质的构建、验证与研究进展. 作物学报, 2009, 35(4): 571-579
Qiu L J, Li Y H, Guan R X, Liu Z X, Wang L X, Chang R Z. Establishment, representative testing and research progress of soybean core collection and mini core collection. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(4): 571-579
- [32] 盖钧镒,赵团结,崔章林,邱家训. 中国大豆育成品种中不同地理来源种质的遗传贡献. 中国农业科学, 1998, 31(5): 35-43
Gai J Y, Zhao T J, Cui Z L, Qiu J X. Nuclear and cytoplasmic contributions of germplasm from distinct areas to the soybean cultivars released during 1923-1995 in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(5): 35-43
- [33] 王彩洁,李伟,徐冉,张礼凤,张彦威,林延慧. 国外种质对黄淮海地区大豆育成品种的遗传贡献. 大豆科学, 2019, 38(2): 198-203
Wang C J, Li W, Xu R, Zhang L F, Zhang Y W, Lin Y H. Genetic contribution of foreign germplasm to soybean cultivars released during 1980 to 2016 in Yellow-Huai-Hai rivers valley. *Soybean Science*, 2019, 38(2): 198-203
- [34] 张彩霞,付桢. 国际背景下中国大豆的生产困境分析与对策. 河北经贸大学学报: 综合版, 2020, 20(4): 73-78
Zhang C X, Fu Z. Analysis and countermeasure of production dilemma of Chinese soybean under the international background. *Journal of Hebei University of Economics and Business: Comprehensive Edition*, 2020, 20(4): 73-78
- [35] 赵现伟,王瑞珍,赵朝森,郭兵福. 春大豆新品种赣豆 10 号的选育及配套栽培技术. 大豆科技, 2018(3): 40-42
Zhao X W, Wang R Z, Zhao C S, Guo B F. Breeding and cultivation technique of new spring soybean variety Gandou 10. *Soybean Science Technology*, 2018(3): 40-42
- [36] 黄兰兰,钟开珍,马启彬,年海,杨存义. 基于 Meta 分析的大豆磷效率相关 QTL 的整合. 中国油料作物学报, 2011, 33(1): 25-32
Huang L L, Zhong K Z, Ma Q B, Nian H, Yang C Y. Integrated QTLs map of phosphorus efficiency in soybean by Meta-analysis. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33(1): 25-32