



## 缺铁条件下磷素水平对不同磷效率大豆农艺性状的影响

张鸣浩,衣志刚,孟凡钢,于德彬,赵 婧,闫晓艳,张 伟,邱 强

(吉林省农业科学院 大豆研究所/大豆国家工程研究中心,吉林 长春 130033)

**摘 要:**为给缺铁地区磷肥的合理施用提供理论依据,以磷高效和磷低效基因型大豆为材料,采用砂培方式研究不同磷/铁处理对不同磷效率大豆生物学性状的影响,分析农艺性状与大豆植株磷、铁性状的关系,以及磷、铁性状对单株粒重的影响,并利用因子得分综合评价磷高效和磷低效基因型对不同磷/铁处理的响应。结果表明:磷高效基因型大豆在 R5 期的株高、茎粗、单株叶面积、叶片干重、茎干重、荚干重、地上部干重和根系干重的最高值均出现在磷/铁为 300:30 处理下。典型相关分析表明,磷高效基因型大豆 R5 期的地上部干重与 R8 期籽粒铁/磷浓度比呈正相关关系;磷低效基因型大豆 R5 期的地上部干重与 R3 期叶片磷浓度呈正相关关系。磷高效和磷低效基因型的单株粒重均与 R8 期籽粒铁浓度有关,但 R8 期籽粒铁浓度对两种基因型的作用相反,表明 R8 期籽粒铁浓度是影响低铁条件下不同品种单株粒重差异的重要指标。利用因子得分综合评价发现,磷/铁为 1~10 时,随着磷/铁比值的增大,磷高效基因型大豆的 ACE 值随之升高,而磷低效基因型大豆的 ACE 值随之下降。综上,缺铁胁迫下,磷高效基因型大豆在磷/铁为 300:30 处理下的综合表现最好,磷低效基因型大豆在磷/铁为 30:30 处理下的综合表现最好。

**关键词:**磷高效;磷低效;农艺性状;磷浓度;铁浓度

## Effects of Phosphate Levels on Agronomic Traits of Soybean Genotypes with Different Phosphate Efficiency Under Fe Deficiency

ZHANG Ming-hao, YI Zhi-gang, MENG Fan-gang, YU De-bin, ZHAO Jing, YAN Xiao-yan, ZHANG Wei, QIU Qiang

(Soybean Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center of Soybean, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to provide a theoretical basis for the rational application of phosphate fertilizer under Fe deficiency areas, in this study, the effects of different P: Fe ratios on biological traits of soybean and genotypic differences were analyzed by sand culture and split blot design, with P-efficient and P-inefficient soybean genotypes as the experimental materials, further explored the relationship between agronomic traits and P/Fe traits in soybean, as well as effect of these traits on seed weight per plant, and their genotypic differences, and comprehensively evaluated the response of P-efficient and P-inefficient soybean genotypes to different P: Fe treatments by factor scores. The results showed that, at R5 stage, the highest values of plant height, stem diameter, leaf area, leaf dry weight, stem dry weight, pods dry weight, shoot dry weight and root dry weight per plant of P-efficient genotypes reached their peak under P: Fe ratio of 300:30. Canonical correlation analysis showed that shoot dry weight at R5 stage of P-efficient genotypes was positively correlated with concentration ratio of Fe: P in seed at R8 stage, while shoot dry weight of P-inefficient genotypes was positively correlated with P concentration in leaves at R3 stage. The seed weight per plant of both P-efficient genotypes and P-inefficient genotypes were correlated with Fe concentration in seed at R8 stage. But the effects of Fe concentration in seed at R8 stage on seed weights per plant of the two genotypes were opposite, this indicated that Fe concentration in seed at R8 stage was an important indicator for genotypic difference of seed weight per plant under low Fe condition. Comprehensive evaluation by factor score showed that when the P: Fe ratio ranged from 1 to 10, the ACE value of P-efficient soybean genotypes increased with the increase of P: Fe ratio, while the ACE value of P-inefficient soybean genotypes decreased with the increase of P: Fe ratio. In conclusion, under iron deficiency stress, P-efficient soybean genotypes had the best comprehensive performance when the P: Fe ratio was 300:30, and P-inefficient soybean genotypes had the best comprehensive performance when the P: Fe ratio was 30:30.

**Keywords:** P-efficient; P-inefficient; Agronomic traits; P concentration; Fe concentration

尽管地壳中铁的丰度很高,但铁的有效性受到土壤溶液 pH、磷含量<sup>[1-2]</sup>以及铁的存在状态等因素影响,因而降低了铁的可利用率<sup>[3]</sup>。许多农作物常因发生缺铁失绿而生长不良<sup>[4-5]</sup>,造成大片植株黄

收稿日期:2020-10-20

基金项目:国家自然科学基金(31601245);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-PS12)。

第一作者:张鸣浩(1975—),男,学士,助理研究员,主要从事大豆栽培与生理研究。E-mail:zhao114434260@163.com。

通讯作者:张伟(1978—),男,博士,研究员,主要从事大豆栽培与生理研究。E-mail:zw\_0431@163.com;

邱强(1979—),男,硕士,研究员,主要从事大豆栽培研究。E-mail:qiuqiang051179@yeah.net。

化<sup>[6-7]</sup>、矮缩甚至绝收<sup>[6-8]</sup>。植物铁的吸收与土壤中磷含量密切相关,它能够在土壤、根表以及植物体内与磷相互作用<sup>[3]</sup>。磷与铁皆是植物必需营养元素,在结构组成和能量代谢过程中起着重要作用<sup>[9-10]</sup>。磷水平能够改变铁在植物体内的分布<sup>[11]</sup>,如高水平磷加重鹰嘴豆、花生、羽扇豆和高粱的铁黄化症状<sup>[12-13]</sup>,而在没有磷元素的情况下,当在营养液中供应足够的铁时木麻黄属植物不形成丛根,相反,在没有铁的情况下,即使加入磷也会形成丛根<sup>[14]</sup>。极少数作物能够建立保持磷铁平衡的完善机制,这些机制因物种和基因型不同而有所差异<sup>[15-17]</sup>。傅友强等<sup>[18]</sup>在水培条件下进行不同磷铁比试验,发现只有当磷铁比 $\leq 1:3$ 时,根表才能出现明显的红棕色铁膜。

综合现有的国内外研究<sup>[19-21]</sup>,还需进一步加强缺铁地区适宜磷肥施用的研究。大豆缺铁黄化严重<sup>[22]</sup>,而且还普遍伴随着缺磷现象,连年大量施用磷肥又导致磷在土壤中累积<sup>[23-24]</sup>。因此,为了使缺铁地区磷肥的投入量与之相适应,本研究以磷高效和磷低效基因型大豆为供试材料,研究缺铁胁迫下不同磷/铁配比对大豆农艺性状的影响。R3期,即始荚期,是营养生长与生殖生长并进的生育阶段,为了解大豆从生殖生长始期到成熟期体内磷、铁含量变化,本研究在缺铁胁迫下对R3和R8期大豆不同器官磷、铁性状进行测定。此外,由于大豆进入R5期以后,营养器官的生长逐渐停滞,而植株内的物质运转活动活跃,是大豆干物质积累最多的时期,故测定R5和R8期农艺性状。为了从总体上把握农艺性状与磷/铁性状两组指标之间的相关关系,对这两个综合变量进行了典型性相关分析。本研究还以不同磷效率基因型大豆单株粒重为因变量计算逐步回归方程,将这些多而杂的生物学性状反映到产量上,从而了解导致不同磷效率基因型产生产量差异的因素。最后利用隶属函数将不同磷/铁比与这些生物学性状的关系进行综合评价,以期在缺铁土壤中磷肥的合理施用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以6个磷高效基因型(长农15、吉育69、九农36、吉农23、吉育95和抗线6)和6个磷低效基因型(合丰25、吉农18、欧科豆25、九农27、吉农21和绥农22)为试验材料。

### 1.2 试验设计

试验于2017—2018年在吉林省农业科学院公主岭院区进行。选择大小均匀、健康饱满的种子,播种于长312 cm×宽117 cm×高29 cm、装满砂子的矩形种植箱中。试验采用裂区设计,主区设相同

程度缺铁胁迫下不同磷/铁处理,设4个水平磷浓度(表1),每个主区为2个种植箱;裂区为不同基因型处理,设6个磷高效基因型(A1)和6个磷低效基因型(A2),3次重复。每箱种植6个基因型,每个基因型种植2行,行距24 cm,行长117 cm,株距10 cm。

在第一个三出复叶期(V1)之前用自来水浇灌,从V1期开始进行缺铁胁迫处理,各处理浇灌缺铁胁迫处理液( $0.03\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe-EDTA}$ ),不同磷/铁比处理分别施用不同浓度的磷( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ),详见表1。施用Hoagland营养液, $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $0.75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{K}_2\text{SO}_4$ 、 $0.65\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MgSO}_4$ 、 $0.010\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{H}_3\text{BO}_3$ 、 $1\times 10^{-3}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MnSO}_4$ 、 $5\times 10^{-4}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CuSO}_4$ 、 $5\times 10^{-4}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ZnSO}_4$ 和 $5\times 10^{-5}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ ,用NaOH或HCl调节pH至 $5.8\pm 0.1$ 。种植箱每隔1 d浇水,并使用土壤测量仪(TDR 350)测定田间持水量,使其保持为60%。

表1 主区试验设计		
Table 1 Experimental design of the main plot		
处理 Treatment	$\text{KH}_2\text{PO}_4/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	磷:铁 P:Fe
CK	0	0:30
B1	30	30:30
B2	150	150:30
B3	300	300:30

### 1.3 方法

1.3.1 农艺性状分析 于鼓粒期(R5)和成熟期(R8)分别对大豆进行取样,从子叶节处剪断大豆植株,将根连同附着于根上的砂子用水浸泡,轻轻振荡,然后用自来水冲洗干净,105℃杀青1 h,然后85℃烘干,测定R5期株高、茎粗、单株叶面积、单株叶片干重、单株茎干重、单株荚干重、单株地上部干重和单株根系干重,以及R8期株高、茎粗、单株籽粒数、单株茎干重、单株荚干重、单株地上部干重和单株根系干重。每处理连续取有代表性植株4株,3次重复。

1.3.2 磷和铁浓度测定 于始荚期(R3)取各处理叶片,于成熟期(R8)取各处理籽粒,采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)<sup>[25-26]</sup>测定样品中的磷、铁浓度,3次重复。

1.3.3 典型相关性分析 将R5期株高( $X_1$ )、茎粗( $X_2$ )、单株叶面积( $X_3$ )、单株叶片干重( $X_4$ )、单株茎干重( $X_5$ )、单株荚干重( $X_6$ ),单株地上部干重( $X_7$ )和单株根系干重( $X_8$ ),以及R8期株高( $X_9$ )、茎粗( $X_{10}$ )、单株籽粒数( $X_{11}$ )、单株茎干重( $X_{12}$ )、单株荚干重( $X_{13}$ )、单株地上部干重( $X_{14}$ )和单株根系干重( $X_{15}$ )归为一组作为农艺性状指标;将R3期叶

片铁浓度( $Y_1$ )、R8 期籽粒铁浓度( $Y_2$ )、R3 期叶片磷浓度( $Y_3$ )、R8 期籽粒磷浓度( $Y_4$ )、R3 期叶片中铁/磷浓度比( $Y_5$ )和 R8 期籽粒铁/磷浓度比( $Y_6$ )归为一组作为磷、铁特性指标,做典型相关分析。评价不同磷效率大豆品种与不同农艺性状的相关性。

1.3.4 建立逐步回归方程 以  $X_1 \sim X_{15}$  和  $Y_1 \sim Y_6$  共 21 个性状为自变量,分别以磷高效基因型和磷低效基因型单株粒重为因变量,建立逐步回归方程,分析不同磷效率大豆品种的磷、铁性状对单株粒重的影响。

1.3.5 综合评价 采用隶属函数法,分别以磷高效和磷低效基因型的 21 个性状( $X_1 \sim X_{15}$ 和  $Y_1 \sim Y_6$ )做主成分分析,利用因子得分计算综合评价值(ACE), $ACE = \sum_1^n C_i/n, i = 1, 2 \cdots n$ ,式中,  $C_i$  为综

合因子得分,分别取磷高效和磷低效基因型 ACE 均值,评价不同磷效率大豆对不同铁/磷处理的响应。

1.4 数据分析

采用 DPS v18.0 软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 磷/铁处理对不同磷效率大豆农艺性状的影响

从表 2 和表 3 可以看出,磷高效基因型的  $X_1$ 、 $X_3$ 、 $X_4 \sim X_8$  以及  $X_{10}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$  均高于磷低效基因型,且达显著或极显著水平。随着磷/铁比例的升高,磷高效基因型的  $X_8$  也随之升高,而磷低效基因型则先升后降;磷高效基因型  $X_{15}$  先降后升,磷低效基因型则先升后降。此外,磷高效基因型在  $X_1 \sim X_8$  的最高值均出现在磷/铁为 300:30 处理。

表 2 磷/铁处理对不同磷效率基因型大豆 R5 期农艺性状的影响  
Table 2 The impact of P: Fe ratios on agronomic traits of different soybeans at R5 stage

性状 Trait	基因型 Genotype	CK	B1	B2	B3	平均 Mean	P
$X_1/\text{cm}$	A1	50.0 bB	50.6 bB	53.0 bB	60.0 aA	53.4 aA	G = 0.0232 *
	A2	44.3 bA	45.1 abA	45.6 abA	49.2 aA	46.0 bA	T = 0.0002 **
	平均 Mean	47.1 bB	47.9 bB	49.3 bB	54.6 aA	—	G × T = 0.3164
$X_2/\text{mm}$	A1	4.9 abA	4.4 bA	4.7 abA	5.0 aA	4.7 aA	G = 0.1265
	A2	4.3 aA	4.5 aA	4.3 aA	4.3 aA	4.4 aA	T = 0.8620
	平均 Mean	4.6 aA	4.5 aA	4.5 aA	4.7 aA	—	G × T = 0.2922
$X_3/\text{m}^2$	A1	0.016 aA	0.018 aA	0.015 aA	0.018 aA	0.016 aA	G = 0.0200 *
	A2	0.009 bAB	0.014 aA	0.006 bB	0.008 bAB	0.009 bA	T = 0.0617
	平均 Mean	0.012 abA	0.016 aA	0.010 bA	0.013 abA	—	G × T = 0.4030
$X_4/\text{g}$	A1	3.9 aA	4.0 aA	3.8 aA	4.1 aA	3.9 aA	G = 0.0003 **
	A2	1.6 aA	1.7 aA	1.4 aA	1.2 aA	1.5 bB	T = 0.5369
	平均 Mean	2.7 aA	2.9 aA	2.6 aA	2.7 aA	—	G × T = 0.4217
$X_5/\text{g}$	A1	4.4 aA	4.5 aA	4.4 aA	5.1 aA	4.6 aA	G = 0.0002 **
	A2	3.6 aA	2.1 abA	1.9 bA	1.9 bA	2.4 bB	T = 0.5178
	平均 Mean	4.0 aA	3.3 aA	3.1 aA	3.5 aA	—	G × T = 0.2888
$X_6/\text{g}$	A1	6.1 bB	7.4 bAB	7.6 abAB	8.9 aA	7.5 aA	G = 0.0011 **
	A2	6.3 aA	5.9 aA	5.6 aA	5.9 aA	5.9 bB	T = 0.2997
	平均 Mean	6.2 aA	6.6 aA	6.6 aA	7.4 aA	—	G × T = 0.1060
$X_7/\text{g}$	A1	15.2 bB	17.0 abAB	16.9 abAB	19.2 aA	17.1 aA	G = 0.0002 **
	A2	12.3 aA	10.5 aA	9.7 aA	10.2 aA	10.7 bB	T = 0.6549
	平均 Mean	13.7 aA	13.8 aA	13.3 aA	14.7 aA	—	G × T = 0.0782
$X_8/\text{g}$	A1	5.9 aA	6.2 aA	6.3 aA	7.7 aA	6.5 aA	G = 0.0073 **
	A2	4.2 abA	4.9 aA	2.8 bA	2.4 bA	3.6 bB	T = 0.6944
	平均 Mean	5.1 aA	5.5 aA	4.6 aA	5.0 aA	—	G × T = 0.0617

G: 基因型间差异; T: 磷/铁处理间差异; G × T 代表基因型与磷/铁处理间互作差异; \*:  $P < 0.05$  水平存在显著差异; \*\*:  $P < 0.01$  水平存在极显著差异。下同。  
G: Difference between genotypics; T: Differences among P: Fe treatments; \*: Significant difference at  $P < 0.05$  level; \*\*: Extremely significant difference at  $P < 0.01$  level. The same below.

表 3 不同磷/铁处理对不同磷效率基因型大豆 R8 期农艺性状的影响  
Table 3 The impact of P: Fe ratio on agronomic traits of different soybeans at R8 stage

性状 Trait	基因型 Genotype	CK	B1	B2	B3	平均 Mean	P
X <sub>9</sub> /cm	A1	55.1 aA	56.3 aA	60.1 aA	59.1 aA	57.6 aA	G=0.0672
	A2	53.8 aA	49.2 aA	50.7 aA	53.7 aA	51.9 aA	T=0.7056
	平均 Mean	54.5 aA	52.7 aA	55.4 aA	56.4 aA	—	G×T=0.6367
X <sub>10</sub> /mm	A1	4.7 aA	4.0 aA	4.2 aA	3.9 aA	4.2 aA	G=0.0186*
	A2	4.0 aA	3.7 aA	3.5 aA	4.0 aA	3.8 bA	T=0.5062
	平均 Mean	4.3 aA	3.9 aA	3.9 aA	4.0 aA	—	G×T=0.6479
X <sub>11</sub>	A1	22.8 aA	20.9 aA	22.8 aA	21.4 aA	22.0 aA	G=0.5407
	A2	20.3 aA	24.2 aA	22.9 aA	24.2 aA	22.9 aA	T=0.8557
	平均 Mean	21.5 aA	22.6 aA	22.8 aA	22.8 aA	—	G×T=0.3348
X <sub>12</sub> /g	A1	4.5 abA	4.2 bA	4.5 abA	4.8 aA	4.5 aA	G=0.0009**
	A2	1.5 aA	1.5 aA	1.6 aA	1.6 aA	1.5 bB	T=0.4271
	平均 Mean	3.0 aA	2.8 aA	3.1 aA	3.2 aA	—	G×T=0.7188
X <sub>13</sub> /g	A1	5.3 aA	5.0 aA	5.5 aA	6.0 aA	5.5 aA	G=0.1642
	A2	4.6 aA	4.6 aA	4.8 aA	4.6 aA	4.7 aA	T=0.8069
	平均 Mean	4.9 aA	4.8 aA	5.2 aA	5.3 aA	—	G×T=0.8556
X <sub>14</sub> /g	A1	17.8 aA	13.7 bA	15.6 abA	16.4 abA	15.9 aA	G=0.0072**
	A2	10.7 aA	10.0 aA	10.4 aA	10.3 aA	10.3 bB	T=0.3258
	平均 Mean	14.2 aA	11.8 aA	13.0 aA	13.3 aA	—	G×T=0.5793
X <sub>15</sub> /g	A1	3.4 aA	2.6 bB	2.5 bB	2.7 bAB	2.8 aA	G=0.0093**
	A2	1.5 aA	2.1 aA	1.6 aA	1.6 aA	1.7 bB	T=0.2406
	平均 Mean	2.5 aA	2.4 aA	2.0 aA	2.2 aA	—	G×T=0.0527

2.2 磷/铁处理对不同磷效率大豆磷和铁性状的影响

由表 4 可知,磷高效基因型的 Y<sub>3</sub> 显著高于磷低效基因型,而磷高效基因型的 Y<sub>4</sub> 显著低于磷低效基因型,不同基因型间其它性状差异不显著。

处理间 Y<sub>2</sub>、Y<sub>4</sub>、Y<sub>5</sub> 和 Y<sub>6</sub> 差异达显著或极显著水平。随着磷/铁比值的升高,磷高效和磷低效基因型 Y<sub>4</sub> 也随之升高,在 B3 处理时达峰值,分别达 3 830.0和4 451.7 mg·kg<sup>-1</sup>;而 Y<sub>5</sub> 和 Y<sub>6</sub> 随之先升后降,均在 B1 处理达峰值。此外,Y<sub>4</sub> 的基因型效应和处理间效应均达显著水平。

2.3 不同磷效率大豆品种农艺性状与磷和铁性状的相关性分析

对磷高效和磷低效基因型大豆的农艺性状与磷、铁性状的典型相关分析结果如表 5 所示,两类磷效率基因型大豆各得出 1 组典型相关变量,各性状

间达显著或极显著水平。

磷高效基因型的典型向量 U<sub>E</sub> 中 X<sub>7</sub> 的系数最大,达 13.52,V<sub>E</sub> 中 Y<sub>6</sub> 的系数最大,为 3.29,该结果主要反映了 X<sub>7</sub> 和 Y<sub>6</sub> 的正相关关系。

磷低效基因型典型变量 U<sub>IE</sub> 中 X<sub>7</sub> 的系数为负,但其绝对值最大,V<sub>IE</sub> 中 Y<sub>3</sub> 的系数也为负,其绝对值也最大,该结果主要反映了 X<sub>7</sub> 和 Y<sub>3</sub> 的正相关关系。

2.4 不同磷效率大豆品种磷和铁性状对单株粒重的影响

由表 6 可知,磷高效和磷低效基因型的逐步回归方程均具有显著意义。从磷高效基因型的逐步回归方程可以看出,W<sub>E</sub> 与 X<sub>15</sub>呈正相关,与 X<sub>14</sub>和 Y<sub>2</sub>呈负相关。表明 R8 期单株根系干重的增加有助于磷高效基因型单株粒重的增加,而 R8 期单株地上部干重和籽粒铁浓度的增加会导致磷高效基因型单株粒重下降。

表 4 磷/铁对不同磷效率大豆基因型磷和铁性状的影响

Table 4 The impact of P: Fe ratio on P and Fe traits of different soybeans

性状 Trait	基因型 Genotype	CK	B1	B2	B3	平均 Mean	P 值 P-Value
$Y_1/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	A1	318.2 aA	307.8 abA	299.7 abA	269.5 bA	298.8 aA	G = 0.7103
	A2	280.0 bA	347.0 aA	320.7 abA	288.2 bA	309.0 aA	T = 0.1047
	平均 Mean	299.1 abA	327.4 aA	310.2 abA	278.8 bA	—	G × T = 0.2317
$Y_2/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	A1	66.8 bA	74.2 aA	69.5 abA	71.3 abA	70.5 aA	G = 0.3593
	A2	61.3 bA	70.0 aA	67.7 abA	65.8 abA	66.2 aA	T = 0.0367 *
	平均 Mean	64.1 bB	72.1 aA	68.6 abAB	68.6 abAB	—	G × T = 0.8791
$Y_3/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	A1	2196.7 bcAB	2055.0 cB	2520.0 aA	2441.7 abA	2303.3 aA	G = 0.0146 *
	A2	1611.7 bB	1503.3 bB	1741.7 abAB	2036.7 aA	1723.3 bA	T = 0.002
	平均 Mean	1904.2 bcAB	1779.2 cB	2130.8 abA	2239.2 aA	—	G × T = 0.4806
$Y_4/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	A1	3176.7 cB	3246.7 cB	3515.0 bAB	3830.0 aA	3442.1 bA	G = 0.0459 *
	A2	3560.0 bB	3741.7 bB	4405.0 aA	4451.7 aA	4039.6 aA	T = 0.0000 **
	平均 Mean	3368.3 bB	3494.2 bB	3960.0 aA	4140.8 aA	—	G × T = 0.1807
$Y_5$	A1	0.16 abA	0.17 aA	0.13 bcA	0.12 cA	0.15 aA	G = 0.0650
	A2	0.16 bB	0.21 aA	0.16 bAB	0.14 bB	0.17 aA	T = 0.0030 **
	平均 Mean	0.16 abAB	0.19 aA	0.15 bAB	0.13 bB	—	G × T = 0.4444
$Y_6$	A1	0.020 abAB	0.022 aA	0.019 bAB	0.018 bB	0.020 aA	G = 0.3684
	A2	0.019 abAB	0.020 aA	0.017 bcB	0.016 cB	0.018 aA	T = 0.0016 **
	平均 Mean	0.019 abAB	0.021 aA	0.018 bcB	0.017 cB	—	G × T = 0.9649

表 5 不同磷/铁条件下大豆农艺性状与磷和铁性状的典型相关性分析

Table 5 Canonical correlation analysis between agronomic traits and P and Fe traits of soybean under different P: Fe ratios

基因型 Genotype	典型相关系数 Canonical correlation coefficient	P	典型向量 Canonical variables
磷高效基因型 P-efficient genotype	0.99	0.0353	$U_E = 0.05X_1 + 0.33X_2 - 0.23X_3 - 3.84X_4 - 4.34X_5 - 7.85X_6 + 13.52X_7 -$ $0.60X_8 - 0.50X_9 - 0.06X_{10} - 0.50X_{11} - 0.05X_{12} - 0.77X_{13} + 1.01X_{14}$ $+ 0.69X_{15}$
			$V_E = 0.71Y_1 - 3.00Y_2 - 0.42Y_3 + 1.62Y_4 - 1.44Y_5 + 3.29Y_6$
			$U_{IE} = -0.02X_1 + 0.53X_2 - 0.72X_3 + 1.82X_4 + 5.57X_5 + 3.57X_6 - 7.99X_7 +$ $0.20X_8 - 0.72X_9 + 1.10X_{10} - 0.10X_{11} - 0.30X_{12} - 0.64X_{13} + 0.94X_{14}$ $+ 0.18X_{15}$
磷低效基因型 P-inefficient genotype	0.88	0.0082	$V_{IE} = 2.19Y_1 - 1.22Y_2 - 2.28Y_3 + 0.70Y_4 - 2.01Y_5 + 1.25Y_6$

表 6 不同磷效率大豆品种磷和铁性状与单株粒重的逐步回归方程

Table 6 The stepwise regression equation of phosphorus and iron characters of different phosphorus efficiency soybean varieties with seed weight per plant

基因型 Genotype	回归方程 Regression equation	P	S
磷高效基因型 P-efficient genotype	$W_E = 8.29 - 0.09X_{14} + 0.38X_{15} - 0.05Y_2$	0.0114	0.0248
磷低效基因型 P-inefficient genotype	$W_{IE} = 2.74 - 0.79X_2 - 0.27X_{10} + 0.10X_{11} + 0.002Y_1 + 0.04Y_2 - 54.81Y_6$	0.0000	0.0153

磷低效基因型  $W_{IE}$  与  $X_{11}$ 、 $Y_1$  和  $Y_2$  呈正相关,与  $X_2$ 、 $X_{10}$  和  $Y_6$  呈负相关。表明 R3 期叶片铁浓度、R8 期单株籽粒数和籽粒铁浓度的增加有助于磷低效基因型单株粒重的增加,而 R5 和 R8 期的茎粗以及 R8 期籽粒铁/磷浓度比的增加反而导致磷低效基因型单株粒重下降。

2.5 不同磷效率基因型对磷/铁处理的响应

在低铁条件下,磷高效基因型的 ACE 值随着磷/铁比例的升高而先降后升,在 B1 处理下的综合表现最差,而在 B3 处理下的综合表现最好;磷低效基因型的表现正好与之相反,随着磷/铁比例的升高,磷低效基因型的 ACE 值先升后降,综合表现 B1 处理最好,B3 处理最差(表 7)。

表 7 不同基因型大豆在各处理下的综合评价

Table 7 The comprehensive evaluation for different soybean genotypes under each treatment				
基因型 Genotype	ACE			
	CK	B1	B2	B3
磷高效基因型 P-efficient genotype	0.021	-0.461	-0.057	0.497
磷低效基因型 P-inefficient genotype	0.124	0.287	-0.186	-0.225

3 讨 论

在过去的 50 年中,化肥的大量施用对作物营养利用效率和环境都产生了较严重的负面影响<sup>[24,27-28]</sup>。为了提高肥料的利用效率并减少环境污染,本研究以磷高效和磷低效大豆基因型为供试对象,探讨缺铁条件下大豆品种农艺性状对不同磷/铁处理的响应,以使缺铁地区磷肥的投入与之相适应。

磷与铁之间的拮抗作用多年来一直备受关注,在高粱、花生、玉米和大豆上都有相关研究<sup>[29-31]</sup>。在本研究采用了多种统计分析方法对缺铁胁迫下 R5 和 R8 期的农艺性状,以及 R3 和 R8 期不同器官磷铁含量进行典型性相关分析、逐步回归方程和因子得分综合评价。结果显示随着磷/铁比例的升高,磷高效基因型 R8 期根系干重先降后升,磷低效基因型则是先升后降,且通过逐步回归分析发现 R8 期单株根系干重的增加有助于磷高效基因型单株粒重的增加。此外,随着磷/铁比例的升高,磷高效和磷低效基因型 R3 期叶片铁/磷浓度比和 R8 期籽粒铁/磷浓度比随之先升后降。这些结果表明单株根系干重、R3 期叶片中铁/磷浓度比和 R8 期籽粒

铁/磷浓度比更能反映大豆对磷、铁配比的响应。而且本研究还发现 R8 期籽粒铁浓度是影响单株粒重基因型差异的重要指标之一。因为磷高效和磷低效基因型的单株粒重均与 R8 期籽粒铁浓度有关,但 R8 期籽粒铁浓度对两种基因型的作用相反,在磷高效基因型中,R8 期籽粒铁浓度对单株粒重有负向作用,而在磷低效基因型中,R8 期籽粒铁浓度对单株粒重有正向作用。

典型相关性分析还发现,磷高效和磷低效基因型的 R5 期地上部干重都与磷、铁性状有显著的相关关系。如磷高效基因型 R5 期地上部干重与籽粒铁/磷浓度比呈正比关系,这可能是因为地上部干重的增加会促使营养元素的重新分配。通常情况下,磷与铁不同,很容易在植物中重新分配,从一个器官转移到另一个器官,从最老的叶子转移到最年轻的叶子,再转移到花朵和种子<sup>[32]</sup>。但磷高效基因型 R8 期籽粒磷浓度显著低于磷低效基因型,这可能由于磷高效基因型大豆以此途径减少田间收获的磷输出以及避免磷以植酸的形式存在于种子中<sup>[33]</sup>。Rose 等<sup>[34]</sup>研究也认为低籽粒磷浓度可能是培育磷高效水稻的合适标准之一。此外,磷低效基因型 R3 期叶片磷浓度与 R5 期地上部干重的正相关关系也是因为磷参与光合作用、活性氧代谢、有机酸代谢等一系列生理生化过程。

磷肥可以改变缺铁土壤中铁的有效性<sup>[35-36]</sup>,因而会加重敏感植物的缺铁黄化症。而根据本研究综合评价结果来看,无论是磷高效还是磷低效大豆在磷/铁 0:30 处理下的 ACE 值并不是最低的,但为在 1~10 时,随着磷/铁比例的增大,磷高效大豆基因型的 ACE 值随之升高,而磷低效大豆基因型的 ACE 值随之下降,也就是说在缺铁地区种植磷高效大豆基因型时,磷/铁比例越高,磷高效大豆基因型综合表现越好,而种植磷高效大豆基因型时,磷/铁比例越低,磷低效大豆基因型的综合表现越好。因而,在缺铁条件下,当磷/铁比值为 1~10 时,磷高效基因型大豆对磷肥的响应能力要高于磷低效基因型大豆,如 Sánchez-Rodriguez 等研究<sup>[35,37]</sup>发现磷肥过量会引起石灰性土壤的缺铁黄化症。这也从侧面反映了缺铁条件下,磷肥需要与铁肥合理配比施用,而磷肥的施用量因基因型不同而表现不同,因而缺铁地区磷肥的投入应与之相适应,研究结果为缺铁土壤中磷肥的合理施用提供了理论依据。

4 结 论

磷高效基因型大豆在 R5 期的株高、茎粗、单株叶面积、叶片干重、茎干重、荚干重、地上部干重和根系干重的最高值均出现在磷/铁为 300:30 处理下。典型相关分析表明,磷高效基因型 R5 期的地上部干重与 R8 期籽粒铁/磷浓度比呈正相关关系,磷低效基因型 R5 期的地上部干重与 R3 期叶片磷浓度呈正相关关系。此外,磷高效和磷低效基因型的单株粒重均与 R8 期籽粒铁浓度有关,但 R8 期籽粒铁浓度对两种基因型的作用相反。结果表明 R8 期籽粒铁浓度是影响低铁条件下不同基因型大豆单株粒重差异的重要指标之一。在缺铁地区种植磷高效大豆时,当磷/铁比值为 1~10 时,比值越高,磷高效基因型大豆综合表现越好;而在缺铁地区种植磷高效大豆时,当磷/铁比值为 1~10 时,比值越低,磷低效基因型大豆的综合表现越好。

参考文献

[1] Rey G, Boudouf S, Boucherez J, et al. Iron and ferritin-dependent reactive oxygen species distribution: Impact on *Arabidopsis* root system architecture[J]. *Molecular Plant*, 2015, 8: 439-453.

[2] Ward J T, Lahner B, Yakubova E, et al. The effect of iron on the primary root elongation of *Arabidopsis* during phosphate deficiency[J]. *Plant Physiology*, 2008, 147: 1181-1191.

[3] 赵婧, 邱强, 张鸣浩, 等. 植物体内磷铁平衡与缺铁胁迫的关系研究进展[J]. *作物研究*, 2016, 30(3): 343-346. (Zhao J, Qiu Q, Zhang M H, et al. Research progress on the relationship between P-Fe balance and Fe deficiency stress [J]. *Crop Research*, 2016, 30(3): 343-346.)

[4] Ivanov R, Brumbarova T, Bauer P. Fitting into the harsh reality: Regulation of iron-deficiency responses in dicotyledonous plants[J]. *Molecular Plant*, 2012, 5(1): 27-42.

[5] Briat J, Dubos C, Gaymard F. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality[J]. *Trends Plant Science*, 2015, 20(1): 33-40.

[6] 高丽, 史衍玺, 周健民. 不同耐低铁基因型花生铁营养特性的差异[J]. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1393-1397. (Gao L, Shi Y X, Zhou J M. Genetic differences in iron nutrient characteristic of different peanut cultivars with resistance to iron deficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1393-1397.)

[7] 丁红, 宋文武, 张智猛. 花生铁营养研究进展[J]. *花生学报*, 2011, 40(1): 39-43. (Ding H, Song W W, Zhang Z M. Recent advances in research on iron nutrition of peanut[J]. *Journal of Peanut Science*, 2011, 40(1): 39-43.)

[8] 张伟, 赵丽梅, 韩喜国, 等. 吉林省白城地区大豆黄叶原因分析[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(11): 57- 60. (Zhang W, Zhao L M, Han X G, et al. Analysis of etiolated soybean leaves in Baicheng region of Jilin province [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(11): 57- 60.)

[9] 张辉, 朱德进, 黄卉, 等. 不同施肥处理对油菜产量及品质的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(6): 966-971. (Zhang H, Zhu D J, Huang H, et al. Effects of different fertilizer treatments on yield and quality of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Soil*, 2012, 44(6): 966-971.)

[10] 黄洁雪, 闫明科, 薛彩雯, 等. 外界铁浓度调控缺磷植物铁吸收相关基因的表达量[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 866-873. (Huang J X, Yan M K, Xue C W, et al. Phosphate deficiency induced down-regulation of iron acquisition genes is dependent on ambient iron concentration[J]. *Soil*, 2018, 50(5): 866-873.)

[11] Hirsch J, Marin E, Floriani M, et al. Phosphate deficiency promotes modification of iron distribution in *Arabidopsis* plants[J]. *Biochimie*, 2006, 88: 1767-1771.

[12] Zohlen A. Chlorosis in wild plants: Is it a sign of iron deficiency [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25: 2205-2228.

[13] Sánchez-Calderón L, López-Bucio J, Chacón-López A, et al. Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Cell Physiology*, 2005, 46: 174-184.

[14] Zaïd E H, Arahou M, Diem H G, et al. Is Fe deficiency rather than P deficiency the cause of cluster root formation in *Casuarina* species? [J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1-2): 229-235.

[15] 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. (Long W J, Wan N X, Gu T, et al. Comprehensive evaluation and forecast of low iron tolerant ability in maize seedling stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(4): 734-742.)

[16] 夏友霖, 廖伯寿, 毛金雄, 等. 四川丘陵紫色土花生品种耐缺铁性鉴定与评价[J]. *中国油料作物学报*, 2013, 35(3): 326-330. (Xia Y L, Liao B S, Mao J X, et al. Evaluation of lime induced iron-deficiency chlorosis tolerance of peanut on calcareous and purplish soil in Sichuan [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(3): 326-330.)

[17] 赵婧, 邱强, 张鸣浩, 等. 大豆在不同铁水平下生理特性与品种耐性的关系[J]. *核农学报*, 2016, 30(11): 2239-2247. (Zhao J, Qiu Q, Zhang M H, et al. Relationship between physiological traits and tolerance of soybean under different iron levels[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(11): 2239-2247.)

[18] 傅友强, 杨旭建, 吴道铭, 等. 磷素对水稻根表红棕色铁膜的影响及营养效应[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(6): 1072-1085. (Fu Y Q, Yang X J, Wu D M, et al. Effect of phosphorus on reddish brown iron plaque on root surface of rice seedlings and their nutritional effects[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(6): 1072- 1085.)

[19] 龙文靖, 辜涛, 万年鑫, 等. 低铁胁迫对玉米苗期根系生长和铁素吸收利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(8): 1163-1172. (Long W J, Gu T, Wan N X, et al. Comprehensive evaluation and forecast of low iron tolerant ability in maize seedling stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(4): 734-742.)

[20] Shah S R U, Agback P, Lundquist P O. Root morphology and cluster root formation by seabuckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) in response to nitrogen, phosphorus and iron deficiency[J]. *Plant & Soil*, 2015, 397(1-2): 75-91.

[21] Rengel Z, Marschner P. Nutrient availability and management in the rhizosphere: Exploiting genotypic differences [ J ]. New Phytologist, 2005, 168(2):305-312.

[22] 张伟,赵丽梅,韩喜国,等. 石灰性土壤大豆缺铁矫正[J]. 大豆科学, 2011, 30(3): 463-467. (Zhang W, Zhao L M, Han X G, et al. Remediation iron deficiency of soybean grown in lime soil[J]. Soybean Research, 2011, 30(3):463-467. )

[23] 卜玉山,梁美英,张广峰,等. 不同石灰性土壤磷素形态及其有效性差异[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2011, 31(3): 193-199. ( Bu Y S, Liang M Y, Zhang G F, et al. Difference of phosphorus fractions and availability of different calcareous soils [ J ]. Journal of Shanxi Agricultural University ( Natural Science Edition ) , 2011, 31(3): 193-199. )

[24] Rothstein S J. Returning to our roots: Mating plant biology research relevant to future challenges in agriculture [ J ]. The Plant Cell, 2007, 19: 2695-2699.

[25] 孟强,姜奇彦,牛风娟,等. 盐胁迫下不同抗性野生大豆 (*Glycine soja*)生理生化性状比较分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 25-32. (Meng Q, Jiang Q Y, Niu F J, et al. Comparative analysis of physiological and biochemical characters of *Glycine soja* under NaCl stress[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 25-32. )

[26] 张雷昌,汤利,郑毅. 根系互作对玉米大豆间作物磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1142-1149. (Zhang L C, Tang L, Zheng Y. Phosphorus absorption of crops affected by root interaction in maize and soybean intercropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5):1142-1149. )

[27] 郑亚萍,陈殿绪,信彩云,等. 施磷水平对花生叶源生理特性的影响[J]. 核农学报, 2014, 28: 727-731. (Zheng Y P, Chen D X, Xin C Y, et al. Effects of phosphorus application rate on physiology parameters of leaf source in peanut [ J ]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28: 727-731. )

[28] 姚玉波,吴冬婷,龚振平,等. 磷素水平对大豆氮素积累及产量的影响[J]. 核农学报, 2012, 26: 947-951. (Yao Y B, Wu D T, Gong Z P, et al. Effect of phosphorus level on nitrogen accumulation and yield in soybean [ J ]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26: 947-951. )

[29] 章爱群,斯琴朝克图,刘牛,等. 低铁胁迫对不同耐低磷玉米生长及磷、铁养分吸收的影响[J]. 作物杂志, 2014(6): 111-115. (Zhang A Q, Siqinchaoketu, Liu N, et al. Effects of Fe-deficiency on plant growth and uptake of P and Fe in different P-genotype maize[J]. Crops, 2014(6):111-115. )

[30] 陈远学,周涛,黄蔚,等. 小麦/玉米/大豆间套作体系中小麦施磷后效对大豆产量、营养状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 331-339. (Chen Y X, Zhou T, Huang W, et al. Phosphorous after effects on soybean yield and nutrition status in wheat/maize/soybean intercropping system [ J ]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 331-339. )

[31] 李志伟,刘建玲,廖文华,等. 过量供磷对花生生长和吸收铁的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 197-201. (Li Z W, Liu J L, Liao W H, et al. Effects of high concentration of phosphate on the peanut's yield and Fe uptake [ J ]. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 2013, 28(2): 197-201. )

[32] Carlos L, Rafael P, Francisco R, et al. Similarities and differences in the acquisition of Fe and P by dicot plants [ J ]. Agronomy, 2018, 8: 148-163.

[33] Richardson A E, Lynch J P, Ryan P R, et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture[J]. Plant and Soil, 2011, 349: 121-156.

[34] Rose T J, Pariasca-Tanaka J, Rose M T, et al. Genotypic variation in grain phosphorus concentration, and opportunities to improve P-use efficiency in rice[J]. Field Crops Research, 2010, 119: 154-160.

[35] Sánchez-Rodríguez A R, del Campillo M C, Torrent J. Phosphate aggravates iron chlorosis in carbonate iron oxide systems[J]. Plant Soil, 2013, 373: 31-42.

[36] Sánchez-Rodríguez A R, del Campillo M C, Torrent J. The severity of iron chlorosis in sensitive plants is related to soil phosphorus levels [ J ]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94: 2766-2773.

[37] Romera F J, Alcantara E, de la Guardia M D. Effects of bicarbonate, phosphate and high pH on the reducing capacity of Fe-deficient sunflower and cucumber plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 1992, 15: 1519-1530.