

磷硼耦合胁迫对大豆生长和磷、硼吸收的影响
及基因型差异

黄玉芬^{1,2}, 黄隆斌², 严小龙^{1,2}, 廖红^{1,2}

(1 华南农业大学 根系生物学研究中心, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:以磷效率不同的5个大豆基因型为材料,通过水培试验研究磷、硼不同处理对大豆不同生育期植株生长和磷、硼吸收的影响及基因型差异.结果表明:磷、硼不同处理显著影响大豆生长,并且磷、硼对大豆生长的影响具有显著的交互作用.其中,磷有效性是影响大豆生长和硼吸收的重要因素.在相同硼水平下,增加磷有效性能显著提高各大豆基因型植株干质量、籽粒产量和单株磷硼积累量;在适量磷水平下,增加硼水平,能显著促进磷高效大豆基因型的生长和植株体内磷、硼的累积,但对磷低效品种则无显著影响.磷、硼对大豆生长的影响及其交互作用在成熟期表现更为明显,改善硼供应有利于提高磷高效大豆基因型的产量.

关键词:大豆;磷有效性;硼有效性;基因型差异
中图分类号:S565.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2012)02-0129-06

Effects of Phosphorus and Boron Coupled Deficiency on Soybean Growth,
Phosphorus, Boron Uptake and the Genetic Variations

HUANG Yu-fen^{1,2}, HUANG Long-bin², YAN Xiao-long^{1,2}, LIAO Hong^{1,2}

(1 State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, Root Biology Centre, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Five soybean genotypes contrasting in P efficiency were employed to investigate the effects of different P and B treatments on soybean growth, P, B uptake, and the genetic variations at different growth stages. The results showed: different P and B treatments significantly affected soybean growth, and there were significant interactions between P and B. Among which, P availability was the primary factor on soybean growth and B uptake. At the same B level, increasing P availability could significantly increase soybean plant dry mass, grain yield and P, B uptake. At the normal P level, increasing B availability only increased plant dry mass and P, B uptake of the P efficient genotypes, but not the P inefficient genotypes, particularly at mature stage. Improving B status could significantly increase the yield of P efficient soybean genotypes.

Key words: soybean; P availability; B availability; genetic variation

大豆 *Glycine max* (L.) Merr. 是全球种植最广泛的豆科植物,是当今世界市场上重要的油料、保健食品和新型工业原料,具有很高的经济价值^[1-2]. 影响大豆生产的障碍因子很多,在华南地区,土壤缺磷缺硼是制约大豆产业发展的重要因素. 据报道,华南地区发展大豆生产具有一定的优势和潜力,但该地区主要为酸性土壤,有效磷含量低且常常伴有铁、铝等离子毒害及微量元素的缺乏现象^[3-6]. 大豆是对硼较

敏感的作物,大豆植株需硼量高于小麦、玉米、棉花、油菜、洋葱、菠菜和卷心菜等作物^[7]. 大豆缺硼,其正常生长发育就会受到影响,并且氮、磷和钾等大量营养元素也难以发挥应有的效果,从而给产量和品质带来严重影响. 有研究表明,硼的吸收效率与植株根长成正相关^[8]. 因此,磷高效的根系特征可能也有利于硼的高效吸收. 硼与磷在植物体中相互间有明显的促进作用. 缺硼会阻碍体内磷的转移,缺磷也不利于硼的运输^[9]. 但上述结果大多是在油菜或小麦等材料中获得,在大豆中的研究较少,而磷硼耦合胁迫对大豆生长和磷硼吸收的影响及基因型差异更是鲜见报道,有待进一步的研究. 本研究利用不同磷效率的 5 个大豆基因型为材料,分春播和夏播 2 季,在营养液培养条件下,研究了磷、硼营养对大豆各时期生物量、籽粒产量和磷、硼吸收量的影响及基因型差异,以为实际生产中大豆的合理施肥及高产栽培提供科学依据.

1 材料与方法

供试大豆为本地 2 号 (BD2)、华春 2 号 (HC2)、华春 3 号 (HC3)、华夏 3 号 (HX3) 和华夏 1 号 (HX1). BD2 为广东普通栽培大豆基因型,其他 4 个品种是华南农业大学近年来通过国家审定的大豆品种. 其中,HC2 和 HC3 为春播品种,HX3 和 HX1 为夏播品种. 本研究采用 1/2 Hoagland 营养液. 移苗后 20 d 内硼浓度为 5 μmol/L、磷浓度为 25 μmol/L,之后进行磷硼处理,包括 2 个硼水平: B1 [$c(B) = 1.0 \mu\text{mol/L}$]、B2 [$c(B) = 50 \mu\text{mol/L}$] 和 2 个磷水平: P1 [$c(P) = 0.2 \mu\text{mol/L}$]、P2 [$c(P) = 500 \mu\text{mol/L}$]. 每处理重复 4 次,随机区组设计. 各处理除磷和硼用量有差异外,其他营养元素用量一致,分别为 KNO_3 2.5 mmol/L, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 2.5 mmol/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.0 mmol/L, K_2SO_4 0.25 mmol/L, Fe-EDTA (Na) 0.082 mmol/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 4.57 μmol/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.38 μmol/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1.57 μmol/L, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.09 μmol/L.

试验于 2009 年分春、夏 2 季在华南农业大学根系生物学研究中心温室进行. 2 季均种植 BD2 作为对照. 大豆消毒后,用卷纸培法在 0.5 mmol/L Ca_2SO_4 溶液中催芽萌发^[10], 3~4 d 后 2 片初生叶已完全展开,第 1 对三簇复叶叶芽还没有打开时移栽入营养液水培箱. 每箱营养液体积为 24 L,苗期前 20 d 不换营养液,之后每周换 1 次,每隔 2 d 测 1 次 pH 和 EC,保证 pH 为 5.8 ± 0.2 ,EC 不低于原始值的 70%. 分苗期 (移苗后 20 d)、盛花期和成熟期 3 次收获,苗期测植株干质量和磷积累量;盛花期测植株干

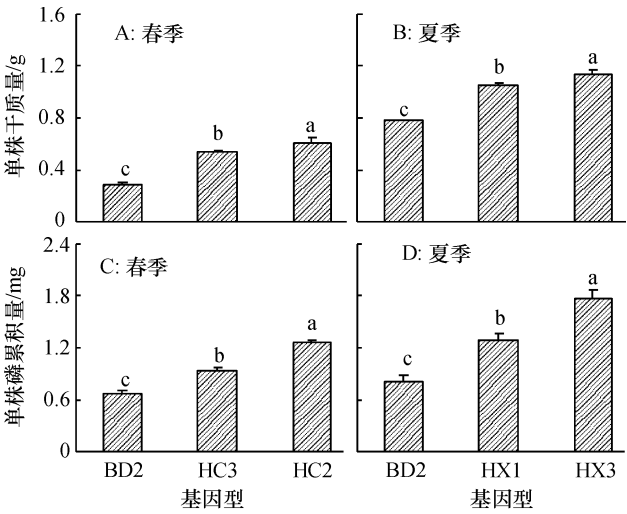
质量和磷、硼积累量;成熟期除测定与盛花期相同指标外,还测定籽粒产量. 磷 (硼) 积累量测定:大豆植株鲜样于烘箱 105 ℃ 杀青 30 min,调至 75 ℃ 烘干后粉碎,用于灰化-ICP 法^[11]测定植株的磷 (硼) 浓度. 植株磷 (硼) 积累量 = 植株磷 (硼) 浓度 × 生物量.

本试验所有数据都用 Microsoft Excel 2003 (Microsoft Company, USA) 进行平均数和标准差计算,并利用 SAS8.1 (SAS Institute Inc, 美国) 统计软件进行单因素、两因素或三因素方差分析,以及邓肯氏新复极差检验法 (Duncan's 法) 进行检验.

2 结果与分析

2.1 大豆磷效率评价

本研究运用 Lynch^[12] 对磷效率的评价方式,通过在磷胁迫条件下,大豆苗期植株干质量和磷积累量的绝对值来评价不同基因型大豆的磷效率. 研究结果 (图 1) 表明,无论是春大豆,还是夏大豆,其磷效率均表现出极显著的基因型差异. 方差分析结果表明,春大豆植株干质量和磷积累量的 F 分别为 64.24*** 和 89.09***,夏大豆为 64.40*** 和 36.26***. 供试春大豆基因型磷效率从大到小依次为: HC2 > HC3 > BD2; 夏大豆为: HX3 > HX1 > BD2. 因此,供试 5 个大豆基因型的磷效率可分为以下 3 类: HC2 和 HX3 为磷高效,HC3 和 HX1 为磷中效, BD2 为磷低效.



同一季节柱子上凡是有有一个相同小写字母者,表示差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法).

图 1 不同播种季节大豆植株干质量和磷积累量
Fig.1 Plant biomass and phosphorus uptake in soybean in different planting seasons

2.2 磷、硼胁迫对大豆生物量的影响及其基因型差异

作物体内光合产物的积累、分配是决定作物生

物产量、经济系数和经济产量的关键^[13]. 本研究结果(表1、表2)表明,无论是盛花期还是成熟期,磷和硼对供试大豆植株干质量均有极显著的影响,均表现为植株干质量磷高效品种>磷中效品种>磷低效品种. 在相同硼(B1和B2)水平下,增加供磷水平,盛花期和成熟期大豆的植株干质量得到显著提高;在P2水平下,增加硼浓度,显著提高除磷低效大豆基因型BD2外的其他大豆基因型植株干质量的积累量. 但在P1水平下,增加硼浓度对供试大豆基因型植株

干质量的影响不显著.

不同大豆基因型对磷、硼营养的反应具有显著的基因型差异(表1、表2). 磷低效品种BD2在低硼(B1)水平时,增加供磷对植株干质量的影响较大. 在B1条件下,增加供磷可分别提高BD2春、夏两季干物质质量95.5%和136.8%(盛花期),82.1%和426.1%(成熟期). 而其他4个大豆基因型,特别是磷高效的HX3和HC2,则是在B2水平时,增加供磷对植株干质量的促进作用较大.

表1 磷、硼不同处理对大豆植株干质量的影响 ¹⁾								
Tab.1 Effects of different P and B treatments on soybean plant dry mass								
g·株 ⁻¹								
生育期	处理	春大豆			夏大豆			
		BD2	HC3	HC2	BD2	HX1	HX3	
盛花期	P1B1	0.66±0.05bC	1.28±0.19cB	1.73±0.14cA	0.68±0.06bC	0.97±0.06cB	1.26±0.03cA	
	P2B1	1.29±0.11aC	3.27±0.06bB	9.16±0.40bA	1.61±0.02aC	5.35±0.32bB	9.35±0.76bA	
	P1B2	0.87±0.04bC	1.63±0.09cB	2.13±0.12cA	0.74±0.08bB	1.19±0.01cA	1.34±0.04cA	
	P2B2	1.31±0.13aC	3.72±0.06aB	11.22±0.61aA	1.65±0.03aC	7.33±0.32aB	13.42±0.87aA	
成熟期	P1B1	0.95±0.16bC	1.73±0.18cB	3.39±0.14cA	0.88±0.06bC	1.37±0.06cB	1.68±0.12cA	
	P2B1	1.73±0.11aC	4.56±0.10bB	14.46±0.21bA	4.63±0.14aC	14.89±0.86bB	22.31±0.68bA	
	P1B2	1.09±0.11bC	1.82±0.10cB	3.86±0.08cA	0.99±0.05bB	1.57±0.09cA	1.69±0.06cA	
	P2B2	1.86±0.08aC	5.99±0.17aB	19.32±0.43aA	4.72±0.15aC	17.14±0.86aB	32.57±1.93aA	

1) B1、B2 分别示硼浓度为0.50 μmol/L,P1、P2 分别示磷浓度为0.2、500.0 μmol/L;表中数据均是4次重复的平均值±标准误;纵向为相同生育期同一品种不同处理间比较(用小写字母表示),横向为相同生育期同一季节同一处理不同品种间比较(用大写字母表示),数据后凡是有一个相同字母者表示差异不显著($P>0.05$,Duncan's 法).

表2 大豆植株干质量的三因素方差分析结果¹⁾

Tab.2 Three-way ANOVA results of soybean plant dry mass

因子或互作	$F_{\text{春季}}$		$F_{\text{夏季}}$	
	盛花期	成熟期	盛花期	成熟期
磷(P)	724.13 ***	3164.40 ***	686.45 ***	1352.06 ***
硼(B)	18.70 ***	129.62 ***	26.97 ***	29.13 ***
基因型(G)	495.79 ***	2633.63 ***	208.19 ***	289.25 ***
P×B	3.79ns	82.99 ***	21.41 ***	26.28 ***
P×G	310.06 ***	1331.72 ***	163.63 ***	253.41 ***
B×G	6.23 **	52.81 ***	8.03 **	14.67 ***
P×B×G	4.56 **	38.67 ***	7.84 **	15.44 ***

1) “*” :0.05 > P > 0.01; “**” :0.01 > P > 0.001; “***” :P < 0.001; ns: 不显著.

2.3 磷、硼胁迫对大豆籽粒产量的影响及其基因型差异

由表3可知,与植株干质量的影响趋势相似,磷硼胁迫显著影响大豆的籽粒产量,并且这一影响还具有显著的基因型差异(春大豆: $F_{\text{磷}}=2\,193.25^{***}$, $F_{\text{硼}}=21.85^{***}$, $F_{\text{基因型}}=337.31^{***}$, $F_{\text{硼与磷互作}}=18.50^{***}$, $F_{\text{磷与基因型互作}}=330.75^{***}$, $F_{\text{硼与基因型互作}}=15.75^{***}$, $F_{\text{硼、磷与基因型互作}}=14.30^{***}$,夏大豆: $F_{\text{磷}}=$

696.26^{***}, $F_{\text{硼}}=8.80^{**}$, $F_{\text{基因型}}=88.80^{***}$, $F_{\text{硼与磷互作}}=8.28^{**}$, $F_{\text{磷与基因型互作}}=90.56^{***}$, $F_{\text{硼与基因型互作}}=4.81^{*}$, $F_{\text{硼、磷与基因型互作}}=4.95^{*}$). 其中,磷有效性对大豆籽粒产量的影响更大. 在同一硼水平下,施磷显著增加所有供试大豆基因型的籽粒产量,表现为在B1条件下,增加供磷,在春、夏两季,磷高效、中效和低效大豆基因型籽粒产量依次提高了2 067.9%、1 145.0%和506.4%(春大豆),4 013.3%、3 640.2%和868.7%(夏大豆);在B2条件下,增加供磷,其籽粒产量则依次提高了2 281.6%、1 113.3%和620.9%(春大豆),5 108.6%、3 662.4%和782.5%(夏大豆).

2.4 磷、硼胁迫对大豆磷、硼吸收的影响及基因型差异

由表4和表5可知,无论是春大豆还是夏大豆,磷、硼处理极显著影响各大豆基因型盛花期和成熟期单株磷积累量,并且不同品种对磷、硼处理的反应也具有极显著的基因型差异. 在相同磷、硼水平处理下,同一季节大豆盛花期和成熟期单株磷积累量均依次为:磷高效品种>磷中效品种>磷低效品种.

比较同一品种不同处理间的差异可知,无论是在B1还是B2水平,增加磷供应均能显著促进大豆

表 3 磷、硼不同处理对大豆籽粒产量的影响¹⁾

Tab.3 Effects of different P and B treatments on soybean yield g·株⁻¹

处理	春大豆			夏大豆		
	BD2	HC3	HC2	BD2	HX1	HX3
P1B1	0.27 ± 0.02bA	0.32 ± 0.03bA	0.28 ± 0.02cA	0.37 ± 0.03bA	0.31 ± 0.04bA	0.34 ± 0.03cA
P2B1	1.65 ± 0.09aC	3.69 ± 0.26aB	5.79 ± 0.26bA	3.24 ± 0.16aB	13.35 ± 0.56aA	12.05 ± 0.74bA
P1B2	0.29 ± 0.02bA	0.34 ± 0.03bA	0.34 ± 0.02cA	0.42 ± 0.01bA	0.35 ± 0.02bA	0.35 ± 0.05cA
P2B2	1.79 ± 0.10aC	3.76 ± 0.15aB	7.76 ± 0.23aA	3.35 ± 0.21aC	14.41 ± 0.18aB	17.75 ± 2.16aA

1) B1、B2 分别示硼浓度为 0、50 μmol/L,P1、P2 分别示磷浓度为 0.2、500.0 μmol/L;表中数据均是 4 次重复的平均值±标准误;纵向为同一品种不同处理间比较(用小写字母表示),横向为同一季节同一处理不同品种间比较(用大写字母表示),数据后凡是有一个相同字母者表示差异不显著($P>0.05$,Duncan's 法)。

表 4 磷、硼不同处理对大豆磷吸收的影响¹⁾

Tab.4 Effects of different P and B treatments on P uptake in soybean mg·株⁻¹

生育期	处理	春大豆			夏大豆		
		BD2	HC3	HC2	BD2	HX1	HX3
盛花期	P1B1	0.76 ± 0.04bB	1.86 ± 0.05bA	1.96 ± 0.09cA	0.96 ± 0.07bB	1.41 ± 0.22bB	2.06 ± 0.06cA
	P2B1	6.83 ± 0.14aC	21.24 ± 1.18aB	34.95 ± 2.59bA	8.74 ± 0.71aC	29.18 ± 2.62aB	37.61 ± 1.91bA
	P1B2	0.76 ± 0.05bC	1.94 ± 0.08bB	2.22 ± 0.03cA	0.99 ± 0.07bC	1.97 ± 0.09bB	2.50 ± 0.21cA
	P2B2	7.04 ± 0.34aC	23.20 ± 1.99aB	40.59 ± 1.35aA	9.31 ± 0.44aC	33.23 ± 1.73aB	43.66 ± 2.00aA
成熟期	P1B1	1.34 ± 0.12bC	3.01 ± 0.23cB	4.04 ± 0.48cA	2.15 ± 0.09bC	3.09 ± 0.19cB	4.08 ± 0.32cA
	P2B1	11.52 ± 0.36aC	37.92 ± 0.54bB	66.66 ± 1.78bA	27.94 ± 1.63aC	105.87 ± 7.57bB	147.76 ± 2.74bA
	P1B2	1.80 ± 0.15bC	3.85 ± 0.13cB	5.51 ± 0.68cA	2.65 ± 0.04bC	3.45 ± 0.19cB	4.72 ± 0.19cA
	P2B2	12.15 ± 0.40aC	45.01 ± 1.20aB	82.64 ± 3.45aA	31.02 ± 1.78aC	130.31 ± 3.17aB	192.93 ± 6.76aA

1) B1、B2 分别示硼浓度为 0、50 μmol/L,P1、P2 分别示磷浓度为 0.2、500.0 μmol/L;表中数据均是 4 次重复的平均值±标准误;纵向为相同生育期同一品种不同处理间比较(用小写字母表示),横向为相同生育期同一季节同一处理不同品种间比较(用大写字母表示),数据后凡是有一个相同字母者表示差异不显著($P>0.05$,Duncan's 法)。

磷积累.但在 P1 水平时,增加供硼对大豆磷积累无显著影响;但在 P2 水平时,增加供硼对磷低效品种单株磷积累量没有明显影响,而对磷中、高效大豆基因型则表现出显著的促进作用.其中,HC2 和 HX3 盛花期 P2B2 处理单株磷积累量比 P2B1 处理单株磷积累量分别增加 9.9% 和 16.1%;成熟期增加了 24.0% 和 30.6%。

表 5 大豆磷吸收的三因素方差分析结果¹⁾

Tab.5 Three-way ANOVA results of P uptake in soybean

因子或互作	<i>F</i> _{春大豆}		<i>F</i> _{夏大豆}	
	盛花期	成熟期	盛花期	成熟期
磷(P)	1101.04 ***	3119.41 ***	1259.06 ***	2995.13 ***
硼(B)	4.71 *	39.13 ***	7.46 **	43.49 ***
基因型(G)	221.03 ***	730.53 ***	186.51 ***	494.11 ***
P×B	4.00ns	24.46 ***	5.08 *	40.05 ***
P×G	186.04 ***	596.22 ***	159.14 ***	467.71 ***
B×G	1.80ns	11.32 ***	1.48ns	10.56 ***
P×B×G	1.49ns	8.69 ***	1.06ns	10.44 ***

1) “*” :0.05 > P > 0.01; “**” :0.01 > P > 0.001; “***” : P < 0.001; ns; 不显著。

由表 6 和表 7 可知,无论是春大豆还是夏大豆,磷、硼不同处理水平对大豆盛花期和成熟期硼吸收的影响均达到极显著水平.所有供试大豆硼吸收量随供磷水平的增加而增加,表现出与磷吸收变化一致的趋势.值得一提的是,磷高效品种对硼的吸收能力受磷水平的影响最大.在 B2P2 处理下,HC2 和 HX3 的硼吸收量分别比 B2P1 处理高 274.5 % 和 352.3 % (盛花期),220.3% 和 533.8 % (成熟期).可见,磷、硼处理对大豆单株磷和硼的积累有不同程度的促进作用.磷与硼在大豆植株中有明显的交互作用,适量磷和硼处理时,各大豆基因型磷硼的吸收相应增加;当磷不足时,各大豆基因型对硼的吸收减少,但硼不足时,对磷的吸收却无明显影响;适量硼水平时,增加磷水平能显著促进各大豆基因型单株磷和硼的吸收,而适量磷水平时,增加硼水平对磷低效大豆基因型却无明显影响,但对磷高效和中效大豆基因型单株磷和硼的吸收有明显的促进作用,且磷高效大豆基因型表现得更显著.在同等硼供应水平下,磷高效品种的硼吸收效率高于磷低效品种。

表 6 磷、硼不同处理对大豆硼吸收的影响¹⁾

Tab. 6 Effects of different P and B treatments on B uptake in soybean μg · 株⁻¹

生育期	处理	春大豆			夏大豆		
		BD2	HC3	HC2	BD2	HX1	HX3
盛花期	P1B1	20.03 ± 2.01bC	29.32 ± 0.73cB	52.97 ± 2.51cA	24.81 ± 1.31bC	31.20 ± 0.85cB	57.29 ± 1.31cA
	P2B1	38.16 ± 3.71aC	78.03 ± 6.51bB	107.98 ± 3.39bA	44.25 ± 2.39aC	77.99 ± 8.54bB	110.40 ± 2.25bA
	P1B2	22.46 ± 2.73bC	39.85 ± 2.61cB	59.53 ± 2.06cA	24.94 ± 2.04bC	47.26 ± 4.13bcB	62.82 ± 3.11cA
	P2B2	44.79 ± 1.19aC	94.44 ± 7.57aB	222.97 ± 11.97aA	47.38 ± 2.40aC	143.07 ± 18.08aB	284.13 ± 18.50aA
成熟期	P1B1	20.44 ± 1.31bC	46.40 ± 2.92cB	86.41 ± 5.30cA	27.75 ± 1.54bC	55.67 ± 2.94cB	93.07 ± 2.96cA
	P2B1	63.64 ± 4.16aC	114.04 ± 8.91bB	180.50 ± 12.66bA	78.51 ± 2.30aC	161.36 ± 10.67bB	221.97 ± 15.48bA
	P1B2	21.56 ± 0.86bC	56.81 ± 3.74cB	106.41 ± 14.81cA	32.04 ± 1.63bC	71.76 ± 8.42cB	110.30 ± 4.34cA
	P2B2	70.79 ± 6.99aC	180.56 ± 7.66aB	340.87 ± 14.04aA	83.46 ± 1.30aC	404.64 ± 18.82aB	699.04 ± 19.41aA

1) B1、B2 分别示硼浓度为 0.50 μmol/L, P1、P2 分别示磷浓度为 0.2、500.0 μmol/L; 表中数据均是 4 次重复的平均值 ± 标准误; 纵向为相同生育期同一品种不同处理间比较 (用小写字母表示), 横向为相同生育期同一季节同一处理不同品种间比较 (用大写字母表示), 数据后凡是有一个相同字母者表示差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

表 7 大豆硼吸收的三因素方差分析结果¹⁾

Tab. 7 Three-way ANOVA results of B uptake in soybean

因子或互作	<i>F</i> _{春大豆}		<i>F</i> _{夏大豆}	
	盛花期	成熟期	盛花期	成熟期
磷 (P)	438.61 ***	449.61 ***	265.29 ***	1315.71 ***
硼 (B)	82.99 ***	84.55 ***	87.57 ***	483.58 ***
基因型 (G)	259.73 ***	262.76 ***	132.65 ***	508.05 ***
P × B	46.96 ***	49.17 ***	61.09 ***	392.90 ***
P × G	81.72 ***	50.57 ***	51.39 ***	236.73 ***
B × G	36.65 ***	27.00 ***	29.40 ***	146.66 ***
P × B × G	35.75 ***	16.58 ***	27.47 ***	131.39 ***

1) “*” : 0.05 > P > 0.01; “**” : 0.01 > P > 0.001; “***” : P < 0.001; ns: 不显著。

3 讨论

酸性土壤约占世界总耕地面积的 30% ~ 40%, 是全球面积最大的“问题土壤”^[6]。我国华南地区广泛分布着各种红色或黄色的酸性土壤, 酸性土壤对作物生长的主要限制因素是铝离子毒害, 同时铁铝氧化物对磷有强烈的固定作用, 因而酸性土壤往往伴随着严重的缺磷现象^[5-6]。华南地区面临的另外一个严峻问题是微量元素含量偏低。在南方酸性土壤中, 由于土壤母质硼含量较低, 又遭受强烈淋溶流失, 同时土壤 pH 低也影响硼的有效性, 常常出现土壤缺硼问题^[4]。本试验结果表明, 缺磷、缺硼处理时, 供试大豆基因型表现出严重的缺素症状: 植株矮小、僵直, 叶片数少, 新叶卷缩, 老叶出现紫红色, 叶片脉间失绿, 根短小, 侧根少且仅停留于瘤状突起, 顶芽死亡。而生理指标结果也表明: 缺磷、缺硼显著抑制供试大豆植株干质量的生长和籽粒产量的提高, 具体表现在供试大豆的植株干质量和籽粒产量 B2P2 处理显著优于 B1P1 处理。可见, 缺磷和缺硼是制约大豆生长发育的重要因素, 解决华南地区磷、硼缺乏问题有利于该地区大豆产业的发展。

关于磷、硼耦合胁迫对植物的生长及体内养分吸收和利用的影响已见许多报道。石磊等^[14]采用营养液培养方法, 研究甘蓝型油菜不同硼效率基因型苗期对硼、磷缺乏的反应。试验结果表明: 缺硼处理时各品种植株矮小, 叶片呈针尖状畸形, 生长点萎缩。缺磷处理时植株叶色较深, 且出现紫红色, 子叶逐渐变黄脱落, 根系较适量磷、硼处理的长。缺磷、缺硼处理各品种的生长和地上部干物质的积累均受到严重抑制。严红等^[15]也采用溶液培养方法研究不同水平硼与小麦体内磷的积累关系。结果表明, 在小麦生长发育过程中, 无硼处理始终影响磷的积累。因为缺硼影响根系伸长和根尖细胞的功能^[16], 施硼处理下, 随着硼施用量的增加, 磷的积累量呈下降趋势, 磷积累量随供硼水平提高而提高。缺硼会抑制体内磷的吸收, 因为缺硼抑制顶端生长和根尖细胞膜的 H⁺ - ATP 泵, 所以磷的吸收受抑制; 缺磷也不利于植物对硼的吸收, 因为光合蒸腾受抑制, 而植物对硼的吸收与蒸腾量成正相关。

本试验结果表明: 供试大豆基因型磷效率间具有显著的基因型差异: 磷高效 (HC2 和 HX3) > 磷中效 (HC3 和 HX1) > 磷低效 (BD2)。磷、硼不同处理水平对不同磷效率基因型大豆的植株干质量和籽粒产量均有不同程度的影响, 适量磷、硼处理效果最佳, 缺磷、缺硼处理效果最差; 适量硼水平下, 增加供磷能显著促进供试大豆基因型的植株干质量和籽粒产量; 适量磷水平下, 增加供硼能显著促进磷高效大豆基因型植株干质量和籽粒产量的积累, 但对磷低效品种则无显著影响。这可能说明磷高效与硼高效有相关性。

磷、硼对不同磷效率基因型大豆植株磷、硼吸收和利用也有不同程度的正向交互效应。适量磷和硼处理, 供试大豆对磷、硼的吸收均相应增加; 当磷不

足时,供试大豆对硼的吸收减少,硼不足时,对磷的吸收却是叠加效应;适量硼水平,增加磷水平,能显著促进供试大豆植株磷和硼的吸收;适量磷水平,增加硼水平,对磷低效大豆基因型无明显影响,但对磷高效和中效大豆基因型植株磷和硼的吸收有明显的促进作用,且磷高效大豆基因型表现得更显著。

以上结果表明,植物必需营养元素磷和硼都对大豆的生长和养分吸收具有重要影响,并且这种影响与大豆基因型差异密切相关.因此,华南酸性土壤地区在发展大豆产业时,不仅要注重选种和育种工作,还应注重磷和硼的科学配施,充分满足大豆对磷的需求,并在此基础上,改善硼的供应以利于磷高效大豆基因型产量的进一步提高。

致谢:感谢华南农业大学根系生物学研究中心全体老师和研究生对本研究的支持和帮助,同时也感谢佛山科学技术学院的喻敏博士对本研究的关注和悉心指导!

参考文献:

[1] GRAHAM P H, VANCE C P. Legumes: Importance and constraints to greater use [J]. *Plant Physiol*,2003,131: 872-877.

[2] 张秋红,张香香,王文香. 大豆低聚糖的生理功能及在食品中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2005, 26: 166-168.

[3] GOLDBERG S. Reactions of boron with soils [J]. *Plant Soil*,1997,193:35-48.

[4] SHORROCKS V M. The occurrence and correction of boron deficiency [J]. *Plant Soil*,1997,193:121-148.

[5] BALIGAR V C, FAGERIA N K, ESWARAN H, et al. Nature and properties of red soils of the world [M]//WILSON M J , HE Z , YANG X. *The red soils of China*. [S. l.]:Kluwer Academic Publishers,2004:7-28.

[6] KOCHIAN L V, HOEKENGA O A, PINEROS M A. How do crop plants tolerate acid soils;Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency [J]. *Ann Rev Plant Biol*,2004,55:459-493.

[7] 刘鹏. 大豆钼、硼营养研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2001,17:41-44.

[8] STANGOULIS J, WEBB M, GRAHAM R. Boron efficiency in oilseed rape: II: Development of a rapid lab-based screening technique [J]. *Plant Soil*, 2000, 225:253-261.

[9] 刘鹏,杨玉爱. 钼硼对大豆氮磷钾吸收及产量的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2000,22:57-63.

[10] LIAO Hong, WAN Hui-yan, SHAFF J, et al. Phosphorus and aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance, exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system [J]. *Plant Physiol*,2006,141:674-684.

[11] HUANG C Y, SCHULTE EE. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*,1985,16:943-958.

[12] LYNCH J. The role of nutrient-efficient crops in modern agriculture [J]. *J Crop Pro*,1998,1:241-264.

[13] BERNACCHI C J, KIMBALL B A, QUARLES D R, et al. Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO₂] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration [J]. *Plant Physiol*, 2007,143:134-144.

[14] 石磊,赵华,徐芳森. 硼、磷缺乏对甘蓝型油菜不同硼效率基因型苗期生长的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2004,26:50-53.

[15] 严红,李文雄. 不同水平硼与小麦体内磷积累的关系 [J]. *东北农业大学学报*,2001,32:209-213.

[16] DELL B, HUANG L B. Physiological response of plants to low boron [J]. *Plant Soil*,1997,193:103-120.

【责任编辑 周志红】

(上接第 128 页)

[7] TICCONI C A, ABEL S. Short on phosphate: Plant surveillance and countermeasures [J]. *Trends in Plant Science*,2004,9(11):548-555.

[8] ZHAO Jing, FU Jia-bing, LIAO Hong, et al. Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004,49(15):1611-1620.

[9] 刘鹏,周国权,严小龙,等. 低磷对大豆主根伸长生长的影响[J]. *植物生理学通讯*,2008,44(4):726-728.

[10] 劳家桢. *土壤农化分析手册* [M]. 北京:农业出版社, 1988:229-299.

[11] YAN Xiao-long, WU Ping, LING Hong-qing, et al. Plant nutriomics in China:An overview [J]. *Annals of Botany*,

2006,98(3):473-482.

[12] LIAO Hong, GE Zheng-yang, YAN Xiao-long. Ideal root architecture for phosphorus acquisition of plants under water and phosphorus coupled stresses: From simulation to application [J]. *Chinese Science Bulletin*,2001,46(16): 1346-1351.

[13] HE Yong, LIAO Hong, YAN Xiao-long. Localized supply of phosphorus induces root morphological and architectural changes of rice in split and stratified soil cultures [J]. *Plant and Soil*,2003,248:247-256.

[14] FORDE B, LORENZO H. The nutritional control of root development [J]. *Plant and Soil*,2001,232:51-68.

【责任编辑 周志红】