



## 心土层施磷对大豆生长性状及产量的影响

高中超<sup>1</sup>, 杜春影<sup>2</sup>, 王翠玲<sup>3</sup>, 高文超<sup>3</sup>, 张丽丽<sup>3</sup>, 孙磊<sup>1</sup>, 刘峰<sup>3</sup>, 宋柏权<sup>4</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与资源环境研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省大庆市萨尔图区农业局, 黑龙江 大庆 163000; 3. 黑龙江省农业科学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 4. 黑龙江省寒地生态修复与资源利用重点实验室/黑龙江省普通高等学校甜菜遗传育种重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为探索黑钙土心土层磷的高效利用机制, 通过盆栽模拟试验, 对心土层土进行磷培肥, 研究不同施磷量  $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_0$ )、 $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_1$ )、 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_2$ )、 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_3$ )、 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_4$ ) 对大豆生育及产量的影响。结果表明: 随着磷施入量的增加, 对大豆生育期的各项指标影响呈现单峰曲线变化, 但峰值出现的处理略有不同。(1) 施磷  $30\sim 240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  与不施磷(对照)相比能够促进大豆苗期的株高增长、干物质质量增加, 即  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_0$ ; SPAD 值增大, 其中  $T_2 > T_3 > T_4 > T_1 > T_0$ , 且  $T_1$ 、 $T_2$  处理与  $T_0$  之间差异显著, 但施磷处理间差异不显著;(2) 大豆结荚期株高、SPAD 值曲线峰值从  $T_1$  处理变为  $T_2$  处理, 但干物质质量的峰值不变, 仍为  $T_1$  处理, 施磷处理间差异不显著; 对根瘤的影响, 随着施磷量的增加, 根瘤数减少, 而施磷量  $T_1\sim T_3$  的处理与  $T_0$  或  $T_4$  处理差异显著, 但峰值  $T_1$  与  $T_2$ 、 $T_3$  处理间差异不显著; 对根系指标的影响, 峰值出现  $T_2$  处理, 其趋势同根瘤一致; 对光合参数的影响, 其中蒸腾速率、净光合速率的曲线峰值出现在  $T_2$  处理, 而胞间  $\text{CO}_2$  浓度、气孔导度的曲线峰值为  $T_1$  处理, 峰值的处理与  $T_0$ 、 $T_4$  处理差异显著;(3) 大豆成熟期施磷处理对大豆产量构成因素均有所提高, 表现为第 1 年  $T_1$ 、 $T_2$  处理和第 2 年的  $T_2$ 、 $T_3$  处理分别与  $T_0$  处理相比差异显著, 综合分析得出推荐施肥量为  $T_2$  处理即磷施用量为  $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。研究表明, 心土层土壤施用磷肥可提高大豆产量, 但施磷过低或过高都不利于大豆产量增加, 初步得出了较为合理的推荐施肥量, 对指导黑钙土大豆科学施用磷肥具有重要的意义。

**关键词:** 心土层; 磷; 大豆; 干物质; 产量

## Effect of Phosphate Fertilizer Applied to Subsoil on Growth and Yield of Soybean

GAO Zhong-chao<sup>1</sup>, DU Chun-ying<sup>2</sup>, WANG Cui-ling<sup>3</sup>, GAO Wen-chao<sup>3</sup>, ZHANG Li-li<sup>3</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>3</sup>, SONG Bai-quan<sup>4</sup>

(1. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resource Heilongjiang Academy of Agricultural Science, Harbin 150086, China; 2. Saertu District Agricultural Bureau of Heilongjiang, Daqing 163000, China; 3. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 4. Heilongjiang Provincial Key Lab of Cold Region Ecological Restoration and Resource Utilization/Key Laboratory of Sugarbeet Genetic Breeding of the Normal University in Heilongjiang Province, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to explore the usage of phosphate fertilizer effectively in subsoil, phosphate fertilizing experiment was applied to subsoil. We studied the effect of different phosphate levels ( $0, 30, 60, 120, 240\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , marked  $T_0, T_1, T_2, T_3, T_4$ ) on growth and product of soybean by potted simulation. The results showed that various specifications presented a single-peak curve with increasing of phosphate fertilizer, however, treatments in the peak were different. (1) During the seedling stage, phosphate fertilizing ( $30\sim 240\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) promoted the height of plants and increased the quality of dry matter, compared to non-phosphate fertilizing treatments, that was  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_0$ . The SPAD value increased,  $T_2 > T_3 > T_4 > T_1 > T_0$ . The differences between  $T_1, T_2$  and  $T_3$  were obvious, however, the differences of treatments under phosphate fertilizing were not obvious. (2) There were some differences between pod filling stage and seedling stage. The peak value of plant height and SPAD changed from  $T_1$  to  $T_2$ , the peak value of the quality in dry matter was still treatment  $T_1$  and the differences of treatments under phosphate fertilizing were not obvious. Effect on root nodule showed that the number of root nodules was decreasing with increasing of phosphate fertilizer. The difference between  $T_1\sim T_3$  and  $T_0/T_4$  were obvious. The difference of peak value between  $T_1$  and  $T_2, T_3$  were not obvious. The peak value of root specifications appeared in treatment  $T_2$ , the tendency was the same as root nodule. The peak value of transpiration rate and net photosynthesis rate appeared in treatment  $T_2$ , the difference of the

收稿日期: 2018-01-23

基金项目: 黑龙江省科学基金(D2016006); 国家科技支撑(2017YFD0300405, 2013BAD07B01)。

第一作者简介: 高中超(1977-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事土壤改良研究。E-mail: gaozhongchao0713@163.com。

通信作者: 宋柏权(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事作物施肥技术研究。E-mail: 13212929229@163.com。

peak value( $T_1$ ) in intercellular  $CO_2$  concentration, stomatal conductance and the peak value( $T_0, T_4$ ) were obvious. (3) During the maturity stage, various specifications of soybean product were better under phosphate fertilizer.  $T_1, T_2$  in the first year and the  $T_2, T_3$  in the second year were quite different from  $T_0$ . It was better to apply phosphate fertilizer  $60\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  ( $T_2$ ) to the soil. The application of phosphate fertilizer to subsoil could increase soybean yield. However, less or more phosphate fertilizer was not good to promote the yield of soybean.

**Keywords:** Subsoil; Phosphate; Soybean; Dry matter; Yield

磷作为大豆生长的必需元素之一,与根系生长发育、根系形态性状密切相关<sup>[14]</sup>。尽管经过长期的耕作施肥,我国土壤有效磷平均含量由  $6.84\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  增加到  $27.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,增加 3.01 倍<sup>[5]</sup>,但由于磷在土壤中的移动性差,耕层磷素很难向下迁移<sup>[6]</sup>,扩散速率低,影响植物根系对磷的吸收,致使根周围出现磷的亏缺区,以致心土层磷养分不足,进一步抑制作物对养分的需求,进而影响产量。因此,虽然土壤磷含量呈现增长的趋势,但仍需立体全方位施用磷肥措施以保障粮食高产。土壤磷的空间有效性往往是限制植物吸收磷素的关键因素,增加作物对土壤磷的吸收容积是提高土壤磷空间有效性的重要途径<sup>[7]</sup>。目前研究多集中在磷素对提高大豆产量,改善大豆品质及磷营养效率关系上<sup>[8-13]</sup>,但是对于土壤心土层施磷对大豆根系形态与供磷水平之间关系的研究还鲜见报道。当下由于对土壤过度垦殖、掠夺式经营,导致黑土层越用越薄<sup>[14]</sup>,造成土壤养分失调,自然肥力呈现下降的大趋势<sup>[15]</sup>,提高心土层肥力是改良和培肥薄层黑土农田土壤的重要措施<sup>[16-17]</sup>。因此,本研究通过心土层施磷,合理构建不易移动磷素的空间分布,满足深层根系对养分的需求,促进作物生长发育。研究心土层不同施磷水平对大豆生育特征及产量的影响,对黑钙土大豆的科学施用磷肥具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 大豆品种 黑农 48,生育期 115 d,活动积温  $2\ 380^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.2 土壤 土壤为典型黑钙土,取自黑龙江省农业科技园低磷土壤,分层 0~20 cm 黑土和 40 cm 以下的黄土取回,风干后过筛,混匀备用,参照鲍坦<sup>[18]</sup>的方法进行土壤养分含量的测定。黑土养分为:土壤有机质  $28.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮  $100.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、有效磷  $25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、速效钾  $227.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、pH6.92 ( $v:w=2.5:1.0$ )。黄土养分为:有机质  $5.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮  $34.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、有效磷  $10.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、速效钾  $112.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、pH7.4,风干后的土壤过 4 mm 筛用于盆栽。

1.2 试验设计

采用盆栽试验方法,分别于 2016 和 2017 年在黑龙江省农业科学院盆栽试验场 ( $N45^{\circ}71'$ ,  $E126^{\circ}56'$ ) 进行。试验按心土层施用磷肥量 ( $P_2O_5$ ) 共设置 5 个水平,分别为  $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_0$ )、 $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_1$ )、 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_2$ )、 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_3$ )、 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $T_4$ ),表层统一施入复合肥,养分含量为  $N_{15}P_{15}K_{15}$  每盆(直径 30 cm,高 50 cm)2 g。选用的磷源为重过磷酸钙,磷( $P_2O_5$ )含量为 46%。试验顺序排列,10 次重复。黑土与黄土体积比为 9:1,即上层为黑土,下层的土按黑土:黄土=4:1 混匀,厚度均为 20 cm;上层 5~10 cm 土壤与施入复合肥充分混匀,下层 20 cm 的土壤与施入的过磷酸钙充分混匀。播种时间为每年的 5 月 20 日,保苗数 4 株 $\cdot$ 盆 $^{-1}$ 。于不同时期进行生长参数调查,9 月末测产。

1.3 测定项目与方法

采用日本产 SPAD-502 型叶绿素仪在大豆苗期及结荚期测量倒三叶;大豆苗期(V5)、结荚期、成熟期,用卷尺测量子叶痕至植株顶端的高度;将植株放入  $105^{\circ}\text{C}$  烘箱杀青 30 min,在  $75^{\circ}\text{C}$  下烘干至恒重,测定干物质质量;利用美国产 CIRAS-2 型便携式光合仪在大豆结荚期,选择晴天上午 10:00–12:00 测定倒三叶净光合速率等光合参数;地下根部用流水缓慢冲洗,冲洗时在根系下面放置 100 目筛防止根瘤丢失,并将根系上的根瘤全部摘下放入培养皿中计数;洗净后利用 SINTEK-LC-4800 型根系扫描仪扫描测定根长、根表面积。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 数据软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 心土层不同磷用量对大豆生长性状的影响

心土层不同施磷量对大豆生长指标的影响如表 1,两个时期的试验结果近一致,但施磷处理的株高、SPAD 值、干物质质量都高于对照,其中  $T_1, T_2$  的处理无论在苗期还是结荚期各性状与  $T_0$  处理差异显著,而施磷的各处理间差异不显著。随着施磷量增加各处理值的变化呈现单峰曲线变化,株高及 SPAD 值峰值出现在  $T_2$  处理,干物质质量的峰值却出现在  $T_1$  处理,施磷量过大不利于株高、干物质质量的增加,且造成肥料浪费。

表 1 心土层不同施磷量对大豆生长指标的影响  
Table 1 Effects of different phosphorus application in subsoil on soybean growth index

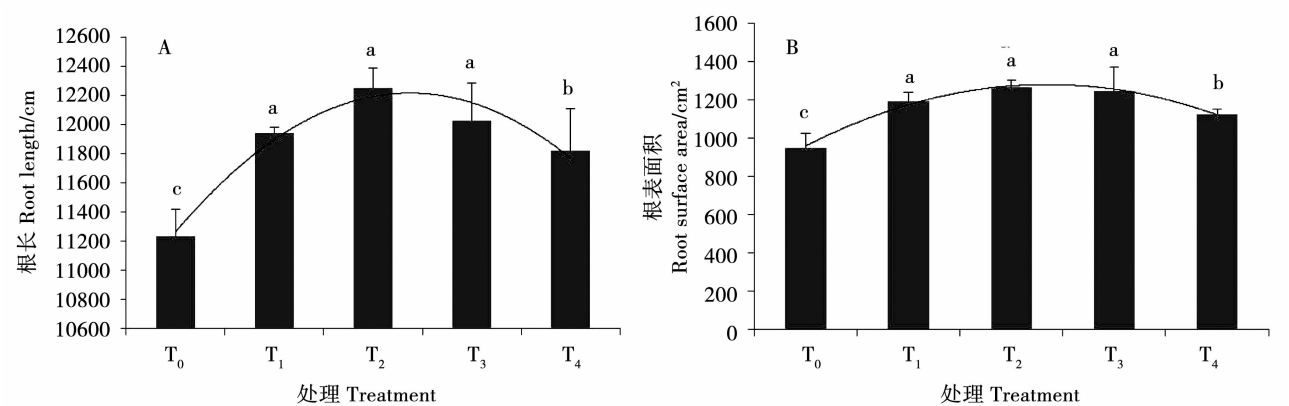
生育时期	处理	株高	SPAD 值	干物质质量
Growth stage	Treatment	Plant height/cm	SPAD value	Dry matter quality/g
苗期 Seedling stage(V5)	T <sub>0</sub>	19.8 ± 1.73 b	40.9 ± 1.17 b	4.5 ± 0.54 b
	T <sub>1</sub>	21.3 ± 1.31 a	42.7 ± 2.29 a	5.2 ± 0.08 a
	T <sub>2</sub>	21.2 ± 1.49 a	43.3 ± 1.22 a	5.1 ± 0.09 a
	T <sub>3</sub>	20.9 ± 0.52 ab	42.9 ± 1.85 a	4.8 ± 0.53 ab
	T <sub>4</sub>	20.6 ± 1.21 ab	42.8 ± 1.16 a	4.8 ± 0.21 ab
结荚期 Podding stage(R4)	T <sub>0</sub>	60.9 ± 2.70 b	40.0 ± 1.50 b	51.8 ± 1.52 b
	T <sub>1</sub>	64.8 ± 2.55 a	41.7 ± 0.90 a	55.2 ± 1.60 a
	T <sub>2</sub>	65.1 ± 3.31 a	42.2 ± 2.49 a	54.5 ± 0.69 a
	T <sub>3</sub>	63.3 ± 3.37 ab	41.9 ± 1.12 a	53.5 ± 1.15 ab
	T <sub>4</sub>	63.0 ± 1.51 ab	41.1 ± 1.74 ab	53.0 ± 0.72 ab

表中数据是 4 次重复的平均值;不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同。  
Data in the table are the mean of 4 replicates,different lowercase indicate significant difference ( $P < 0.05$ ). The same as below.

2.2 心土层不同磷用量对大豆 (R4) 根系的影响

2.2.1 对大豆根瘤数的影响 大豆根瘤能固定空气中的氮,减少肥料用量。施入磷肥影响根系生长,进而影响根瘤的数量,从图 1 可以看出,在肥沃的心土层施磷,随着施磷量的增加,根瘤数减少,但与不施磷的 T<sub>0</sub>处理相比根瘤数却有所增加。施磷处理 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>与 T<sub>0</sub>相比,根瘤增加效果显著,施磷处理间 T<sub>1</sub>与 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>处理差异达到显著,但 T<sub>1</sub>与 T<sub>2</sub>处理及 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>处理间,磷用量的变化对根瘤数的影响差异不显著。

2.2.2 对大豆根长和根表面积的影响 根表面积及根长可反映根系吸收能力,如图 2 所示,随着施磷量的增加,根长、根表积都呈现单峰曲线趋势变化,其峰值出现在 T<sub>2</sub>处理,施磷处理与不施磷处理相比差异显著。T<sub>1</sub> ~ T<sub>3</sub>处理与高磷处理 T<sub>4</sub>或无磷处理 T<sub>0</sub>差异达显著,而施磷 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>之间,施磷量的变化对根长及根表面积影响差异不显著。



A:根长; B:根表面积。  
A:Root length; B:Root surface area.  
图 2 不同施磷量对大豆根长 (A) 和根表面积 (B) 的影响  
Fig. 2 Effect of different P application on the root length(A) and root surface area(B) of soybean

### 2.3 心土层不同磷用量对大豆(R4)光合特性的影响

光合性状的变化是反映同化产物生产的最直观的参数,其变化直接或间接影响作物进行光合作用制造有机物质。心土层施磷后,影响大豆光合性状的变化,进而影响大豆生长及后期产量。从表2中可以看出,随着施磷量的增加,对*Pn*、*Tr*、*Ci*、*Gs*的影响,先增大后减少,并呈现单峰曲线变化,其峰值点的处理与T<sub>0</sub>相比,差异达到极显著。对净光合速

率的影响,其峰值出现在T<sub>2</sub>处理,但T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub>处理间施磷量的变化对净光合速率影响差异不显著;对蒸腾速率影响与净光合速率的趋势一致,但对胞间CO<sub>2</sub>浓度及气孔导度影响,峰值是T<sub>1</sub>处理,T<sub>1</sub>与其它各处理差异达到显著,而T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>与T<sub>0</sub>处理间差异不显著;对气孔导度的影响,峰值处理与胞间CO<sub>2</sub>浓度峰值一致,处理T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub>与T<sub>4</sub>或T<sub>0</sub>相比差异显著,而T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub>处理间差异不显著。

表2 心土层不同施磷量对大豆光合性状的影响  
Table 2 Effects of different P application in subsoil on photosynthesis characters of soybean

处理 Treatment	净光合速率 <i>Pn</i> /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率 <i>Tr</i> /( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 <i>Ci</i> /( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	气孔导度 <i>Gs</i> /( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
T <sub>0</sub>	16.5±0.58 bB	4.6±0.41 bB	313.1±10.64 cB	1.1±0.04 bB
T <sub>1</sub>	19.4±0.81 aA	5.8±0.38 aA	342.9±3.86 aA	1.4±0.05 aA
T <sub>2</sub>	20.2±0.52 aA	6.3±0.50 aA	333.1±5.60 bAB	1.3±0.01 aAB
T <sub>3</sub>	18.6±0.70 aAB	6.0±0.38 aAB	322.8±8.62 cB	1.3±0.09 aAB
T <sub>4</sub>	17.7±0.80 bAB	5.1±0.33 bAB	309.0±6.17 cB	1.2±0.02 bB

### 2.4 心土层不同施磷量对大豆产量及产量构成因素影响

表3结果表明,心土层不同施磷量对大豆产量性状影响不同,年季间也有差异;第1年施磷T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>处理与T<sub>0</sub>间及第2年T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>与T<sub>0</sub>间差异显著,但施磷处理间对产量影响差异不显著,考虑到效益的最大化,最佳处理为T<sub>2</sub>,即推荐施肥量为60 kg·hm<sup>-2</sup>。产量的变化必然是产量指标的变动带来的连锁反应:施磷促进株高的增高,处理T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>与T<sub>0</sub>相比,差异达显著水平,而施磷处理间差异不显著;施磷对

分枝数的影响,两年的趋势一致,T<sub>2</sub>处理与T<sub>0</sub>处理差异显著,施磷间差异不显著;对茎秆重的影响,第1年的T<sub>1</sub>与T<sub>0</sub>处理、第2年T<sub>2</sub>与T<sub>0</sub>处理差异显著,而施磷处理间差异不显著;对荚数的影响,年季间又有差异:第1年施磷处理T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub>与T<sub>0</sub>相比差异显著,而施磷间差异不显著,第2年T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>与T<sub>0</sub>相比差异显著,而施磷间差异不显著;对百粒重的影响,除了第1年的T<sub>2</sub>处理与T<sub>0</sub>相比差异显著,其它各处理差异不显著。

表3 心土层不同施磷量对大豆产量性状影响  
Table 3 Effect of different P application in subsoil on yield traits of soybean

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	单株分枝数 Branches	茎秆重 Stem weight/( $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ )	单株荚数 Pods per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield per pot/g
2016	T <sub>0</sub>	66.2±1.35 b	0.8±1.04 b	47.2±3.12 b	27.5±2.36 b	21.1±1.05 b	44.7±2.91 b
	T <sub>1</sub>	68.1±2.13 a	1.1±0.68 ab	52.9±2.58 a	29.1±3.65 a	21.9±0.69 ab	47.1±4.34 a
	T <sub>2</sub>	68.9±2.65 a	1.3±0.93 a	51.8±3.56 ab	28.7±1.98 a	22.3±1.23 a	48.1±1.71 a
	T <sub>3</sub>	67.8±1.91 ab	1.1±1.11 ab	50.3±4.35 ab	28.4±4.67 a	21.8±0.81 ab	46.4±3.15 ab
	T <sub>4</sub>	66.9±1.45 ab	1.0±0.33 ab	49.2±4.01 ab	27.9±3.22 ab	21.5±0.57 ab	46.3±1.25 ab
2017	T <sub>0</sub>	65.9±1.95 b	0.9±0.82 b	50.3±5.38 b	27.6±5.92 b	20.8±1.43 a	45.8±4.17 b
	T <sub>1</sub>	68.9±2.31 a	1.0±1.38 ab	56.0±6.38 ab	28.9±0.97 ab	21.2±0.37 a	46.9±2.90 ab
	T <sub>2</sub>	70.4±1.49 a	1.3±0.62 a	58.8±4.27 a	30.7±4.74 a	21.7±0.46 a	50.1±1.71 a
	T <sub>3</sub>	69.0±1.74 a	1.2±0.47 ab	54.8±4.72 ab	29.9±2.95 a	21.4±0.91 a	48.1±4.92 a
	T <sub>4</sub>	68.8±3.40 a	1.2±0.94 ab	51.5±3.32 ab	29.4±5.09 ab	21.4±1.08 a	46.6±2.93 ab

## 3 讨论

肥沃的心土层仍需进行磷培肥,培肥后增产效

果显著。不同施磷量对大豆的株高、SPAD值、光合参数、根系指标及大豆产量均存在一定差异。大豆苗期(V5)虽然需磷量小,但在肥沃的心土层施入

磷,仍影响到大豆植株的生长,其中磷用量  $30 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  对大豆株高、SPAD 值及干物质的积累与心土层不施磷(对照)的处理相比差异达显著水平;大豆随着生育期进展逐渐根繁叶茂,对磷元素的需求量也在增加。在大豆结荚期(R4)表现:不同磷施入量对大豆根瘤、根长、根表面积及干物质质量积累更为明显,其中大豆根瘤数量随施磷量的增加呈现单峰曲线变化,峰值出现在  $T_1$  处理,施磷量为  $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;施磷量过多或过少不利于大豆根瘤的增加和干物质的积累,这一结果与国内外一些研究结果相一致<sup>[19-21]</sup>。根长、根表面积的变化与根瘤变化趋势略有差异,最大值为施磷量  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的处理。不同施磷量对大豆产量性状的影响年季间有差异,适当的磷施入量促进株高增高、分枝数及荚数增加,进而提高产量。将磷肥施于表层土壤时,底土中磷含量很低,其结果造成磷的利用率低、肥效差<sup>[22]</sup>。同时作物又主要从耕层吸收磷,虽然施肥在一定程度上补充了土壤磷,但由于磷肥很难移动到  $20 \text{ cm}$  以下,所以在  $20 \sim 40 \text{ cm}$  处引起了很大的亏缺层<sup>[3]</sup>,适当深施磷肥,才能满足作物中后期对磷的需求<sup>[23-24]</sup>。石岩等<sup>[25]</sup>和张永青等<sup>[26]</sup>研究表明在  $20 \sim 40 \text{ cm}$  土层施肥,明显提高作物产量。心土层进行磷培肥其最佳处理为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理,处理间差异不显著,但考虑到生产效益最大化, $T_2$  处理两年来与对照相比,差异都达到显著水平,即施磷量  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  为最佳培肥量。施磷未涉及对大豆品质的改善,但前人研究,适量施磷有利于蛋白和脂肪的提高<sup>[27-29]</sup>。过低的供磷水平,不能满足大豆生长发育的需要,导致产量降低;而过高的供磷水平可能过度增强植株的呼吸强度,消耗更多的养分,并不利于植株的正常生长发育和产量形成<sup>[30]</sup>。上述进一步证明,肥沃的心土层土壤仍需施磷肥,施磷后可促进大豆根系发育,利于大豆干物质的积累,对大豆产量的提高具有重要意义。因此在生产实际中应结合深耕和心土层施肥,提高底土中磷的含量,提高肥料磷的利用率<sup>[31]</sup>。

## 4 结 论

心土层施磷能够促进大豆根系发育,根长增长、根表面积增加,根瘤数增多,其中施磷量为  $30 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  与不施磷或高量  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的处理相比对根长、根表面积的影响差异达显著水平,施磷利于根瘤的形成,但根瘤数随着施磷量的增加却呈现降低的趋势,最佳施磷量为  $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

心土层施磷能够促进大豆光合指标提高,利于干物质的积累。 $Pn$ 、 $Tr$ 、 $Ci$ 、 $G_s$  指标随着磷用量的增加呈

现单峰曲线变化,峰值处理施肥量为  $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;施磷处理干物质增加,但施磷处理间差异不明显。

肥沃的心土层施磷对大豆产量的提高效果明显,但施磷量过低或过高都不利于大豆产量的提高,本试验条件下施磷量  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时产量最高,盆栽产量达到  $47.1 \sim 50.1 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。

综合分析表明心土层施磷肥补充了大豆根系对磷养分的需求,起到了健根、壮苗、增产的效果。

## 参考文献

- [1] 赵静,付家兵,廖红,等. 大豆磷效率应用核心种质的根构型性状评价[J]. 科学通报,2004,49(13): 1249-1257. (Zhao J, Fu J B, Liao H, et al. Properties evaluation of phosphorus efficiency on roots structure of soybean[J]. Chinese Science Bulletin, 2004,49(13): 1249-1257. )
- [2] Chassot A, Richner W. Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedlings in a Bilayered soil [J]. Agronomy Journal, 2002,94:118-127.
- [3] Costa C, Dwyer L M, Hamilton R I, et al. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis [J]. Agronomy Journal, 2000,92: 621-627.
- [4] 廖红,戈振扬,严小龙. 水磷耦合胁迫下植物磷吸收的理想根构型模拟与应用[J]. 科学通报, 2001,46(8): 641-646. (Liao H, Ge Z Y, Yan X L. Optimized root architecture for phosphorus acquisition under water and phosphorus stress: Simulation and application[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46: 641-646. )
- [5] 辛景树,徐明岗,田有国,等. 耕地质量演变趋势研究—国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2008. (Xin J S, Xu M G, Tian Y G, et al. The quality of cultivated land evolution trend research—National soil monitoring data [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008. )
- [6] 徐明刚,张文菊,黄绍敏,等. 中国土壤肥力演变[M]. 2 版. 北京:中国农业科学出版社,2015. (Xu M G, Zhang W J, Huang S M, et al. Soil fertility evolution[M]. 2nd. Beijing: China's Agricultural Science Press, 2015. )
- [7] 苏德纯. 从土壤磷的空间分布特征探讨提高磷肥及土壤磷有效性的新途径[J]. 中国农学通报,1995,11(1): 38-40. (Su D C. From the spatial distribution characteristics of soil phosphorus to explore new ways of improving the effectiveness of phosphate fertilizer and soil phosphorus[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 1995, 11(1): 38-40. )
- [8] 王美丽,严小龙. 大豆根形态和根分泌物特性与磷效率[J]. 华南农业大学报,2001,22(3): 1-4. (Wang M L, Yan X L. Characteristics on root morphology and root exudation of soybean in relation to phosphorus efficiency[J]. Journal of South China Agriculture University, 2001,22(3): 1-4. )
- [9] Marschner P, Solaiman Z, Rengel Z. Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizosphere properties under P-limiting conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(1): 87-98.
- [10] 任立飞,张文浩,李衍素,等. 低磷胁迫对黄花苜蓿生理特性

- 的影响[J]. 草业学报,2012,21(3):242-249. (Ren L F, Zhang W H, Li Y S, et al. Effect of phosphorus deficiency on physiological properties of *Medicago falcata*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(3):242-249. )
- [11] Randall G W, Evans S D, Iragavarapu T K. Long-term P and Kappli-cations II. Effect on corn and soybean yields and plant P and K concentrations [J]. Journal of Production Agriculture, 1997,10(4):572-580.
- [12] Aulakh M S, Pasricha N S, Bahl G S. Phosphorus fertilizer responsein an irrigated soybean-wheat production systemon a sub-tropical, semi-arid soil[J]. Field Crops Research,2003,80(2):99-109.
- [13] Bly A, Woodard H J. Soybean growth and yield response to resid-ualfertilizer phosphorus bands [J]. Journal of Plant Nutrition, 1997,20(11):1527-1538.
- [14] 孟凯,张兴义. 松嫩平原黑土退化的机理及其生态修复[J]. 土壤通报,1998(3):100-102. (Meng K,Zhang X Y. The mech-anism and ecological restoration of degraded soil in Songnen Plain [J]. Chinese Journal of Soil Science,1998(3):100-102. )
- [15] 王其存,齐晓宁,王洋,等. 黑土的水土流失及其治理保育[J]. 地理科学,2013(3):361-365. (Wang Q C,Qi X N,Wang Y, et al. Soil erosion and conservation in black soil[J]. Scientia Geo-graphica Sinica,2013(3):361-365. )
- [16] 赵德林,刘丰,洪福玉,等. 白浆土土体构型改造的研究[J]. 中国农业科学,1989,22(5):47-55. (Zhao D L,Liu F,Hong F Y,et al. Studies on transforming constitution of plansol solum[J]. Scientia Agricultura Sinica,1989,22(5):47-55. )
- [17] 匡恩俊,刘峰,贾会彬,等. 心土培肥改良白浆土的研究 I 白浆土心土培肥的效果[J]. 土壤通报,2008,39(5):1106-1109. (Kuang E J,Liu F,Jia H B,et al. Study on subsoil amendment of Baijiang soil[J]. Chinese Journal of Soil Science,2008,39(5):1106-1109. )
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2008:22-24. (Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press,2008: 22-24. )
- [19] 吴明才,肖昌珍,郑普英. 大豆磷素营养研究[J]. 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[J]. China's Agricultural Science,1999,32(3):59-65. )
- [20] Myo W, Sutkhet N,Ed S. Effects of phosphorus on seed oil and-protein contents and phosphorus use efficiency in some soybean-varieties[J]. Kasetsart J. (Nature Science),2010,44:1-9.
- [21] Tsvetkova G E,Georgiev G I. Effect of phosphorus nutrition on thenodulation, nitrogen fixation and nutrient use efficiency of Bra-dyrrhizobium japonicum-soybean (*Glycine Max* L. Merr. ) Symbio-sis[J]. Bulgarian Journal of Plant Physiology,2003,331-335.
- [22] 李晓林,陈新平,崔俊霞,等. 不同水分条件下表层施磷对小麦吸收下层土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1995,1(2):40-45. (Li X L,Chen X P,Cui J X,et al. Uptake of nutri-entsfrom subsoil by wheat as affected P supply under different soil-moistures[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science,1995,1(2):40-45. )
- [23] 周建斌,李昌纬,赵伯善,等. 长期施肥对底土养分含量的影响[J]. 土壤通报,1993,24(1):212-231. (Zhou J B,Li C W,Zhao B S,et al. Influence of long-term fertilization on subsoil nutrient-content[J]. Chinese Journal of Soil Science,1993,24(1):212-231. )
- [24] 张喜成,韩润娥,袁小良. 局部施磷对小麦根系生长和分布的影响[J]. 土壤肥料,1993(5):38-40. (Zhang X C,Han R E, Yuan X L. Influence of wheat root growth and distribution with Lo-cal phosphorus[J]. Soil and Fertilizer,1993(5):38-40. )
- [25] 石岩,位东斌,于振文,等. 施肥深度对旱地小麦花后根系衰老的影响[J]. 应用生态学报,2001,12(4):573-575. (Shi Y, Wei D B,Yu Z W,et al. Influence of fertilization depth on root sys-tem senescence of upland wheat after anthesis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2001,12(4):573-575. )
- [26] 张永清,李华,苗果园. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响[J]. 土壤,2006,38(1):110-112. ( Zhang Y Q,Li H, Miao G Y. Effect of fertilization depth on distribution and late se-nescence of root system of spring wheat [J]. Soil,2006,38(1):110-112. )
- [27] 蔡柏岩,葛萍萍,祖伟. 磷素水平对不同大豆品种产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(1):65-70. (Cai B Y,Ge J P,Zu W. Yield and quality of different soybean varieties as affected by different phosphorus supplies[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2008,14(1):65-70. )
- [28] 张大勇,宁海龙,杨庆凯. 东北地区几个大豆品种的蛋白质、脂肪含量的差异[J]. 中国油料作物学报,2003,25(1):18-20. (Zhang D Y,Ning H L,Yang Q K. Difference of oil and protein contents of several soybean varieties to the ecological condition in northeast of China [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sci-ences2003,25(1):18-20. )
- [29] 郭庆元,李志玉,涂学文. 大豆高产优质施肥研究与应用[J]. 中国农学通报,2003,19(3):89-104. (Guo Q Y,Li Z Y,Tu X W. Studing and application of fertilization techniques for high-yield and good quality in soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bul-letin,2003,19(3):89-104. )
- [30] 王维军. 大豆的磷素营养与施肥[J]. 中国农业科学,1963(11):41-44. (Wang W J. Phosphorus nutrition and fertilization of soybean[J]. China's Agricultural Science,1963(11):41-44. )
- [31] 熊俊芬,石孝均,毛知耘. 定位施磷对土壤无机磷形态土层分-布的影响[J]. 西南农业大学学报,2000(2):123-125. ( Xiong J F,Shi X J,Mao Z Y. Effects of six-year phosphorus fertilization on the distribution of inorganic P forms in surface soil and subsoil [J]. Journal of Southwest Agricultural University,2000(2):123-125. )