

瘠薄亚表层施磷对大豆生长及产量的影响

高中超<sup>1,2</sup>, 萧长亮<sup>3</sup>, 孙磊<sup>1</sup>, 王翠玲<sup>2</sup>, 高文超<sup>2</sup>, 张俐俐<sup>2</sup>, 刘峰<sup>2</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. 黑龙江省农业科学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 黑龙江省农垦科学院 水稻研究所, 黑龙江 佳木斯 154007)

**摘要:**为促进大豆磷高效利用,通过盆栽模拟试验,在贫磷的亚表层土壤里施过磷酸钙,研究不同磷用量 0 kg·hm<sup>-2</sup> (T<sub>0</sub>)、30 kg·hm<sup>-2</sup> (T<sub>1</sub>)、60 kg·hm<sup>-2</sup> (T<sub>2</sub>)、120 kg·hm<sup>-2</sup> (T<sub>3</sub>)、240 kg·hm<sup>-2</sup> (T<sub>4</sub>) 对大豆黑农 48 的生育性状及产量的影响。结果表明:大豆苗期对磷的反应较弱,施磷处理与对照相比对株高、干物质质量的影响差异不显著,SPAD 值表现为 T<sub>3</sub> > T<sub>2</sub> > T<sub>4</sub> > T<sub>1</sub> > T<sub>0</sub>,其中 T<sub>3</sub> 与 T<sub>0</sub> 处理差异显著,其它各处理间差异未显著;大豆结荚期 (R4) 表现为:随着施磷量的增加,根系指标及干物质质量呈单峰曲线变化,施磷促进大豆根长、根表面积增大,根瘤数的增加,利于干物质的积累,施磷量 ≥ 120 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理与 ≤ 30 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理差异达显著;大豆产量施磷处理与不施磷处理间差异显著,但年季间略有差异,2016 年最佳施磷处理为 T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 比 T<sub>0</sub> 处理增产 10.5% ~ 12.1%,2017 年最佳施磷为 T<sub>3</sub> 处理,盆栽产量为 73.0 g,且表现为 T<sub>3</sub> > T<sub>2</sub> > T<sub>4</sub> > T<sub>1</sub> > T<sub>0</sub> 的趋势, T<sub>3</sub> 处理与其它各处理差异显著。两年的试验结果进一步证明,在瘠薄缺磷的土壤上进行亚表层磷培肥,最佳施磷处理为 T<sub>3</sub>,即 120 kg·hm<sup>-2</sup> 时为最佳施肥量,能够促进大豆根系的生长,对大豆高产具有重要的意义。

**关键词:**大豆;施磷;亚表层;根系;产量  
**中图分类号:**S565.1      **文献标识码:**A      **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2018.02.0258

Effect of Barren Subsurface Application of Phosphorus on Soybean Growth and Yield

GAO Zhong-chao<sup>1,2</sup>, XIAO Chang-liang<sup>3</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>, WANG Cui-ling<sup>2</sup>, GAO Wen-chao<sup>2</sup>, ZHANG Li-li<sup>2</sup>, LIU Feng<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 3. Rice Research Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Jiamusi 154007, China)

**Abstract:** In order to efficiently utilize phosphorus in soybean field, pot experiment was used to simulate the application of SSP on the phosphorus-depleted subsurface soils to study the effects of different amount of phosphorus(0 kg·ha<sup>-1</sup> (T<sub>0</sub>), 30 kg·ha<sup>-1</sup> (T<sub>1</sub>), 60 kg·ha<sup>-1</sup> (T<sub>2</sub>), 120 kg·ha<sup>-1</sup> (T<sub>3</sub>), 240 kg·ha<sup>-1</sup> (T<sub>4</sub>)) on the growth and yield of soybean Heinong 48. The results showed that:Soybean had weak response to phosphorus at the seedling stage, the difference of plant height and dry matter weight was not significant when the phosphorus was applied compared with the control, the SPAD value showed the trend of T<sub>3</sub> > T<sub>2</sub> > T<sub>4</sub> > T<sub>1</sub> > T<sub>0</sub>, T<sub>3</sub> treatment with 120 kg·ha<sup>-1</sup> had significant difference compared with T<sub>0</sub>. During the podding stage of soybean (R4), the effects on the nodule, root index and dry matter weight of soybean were single peak curve or straight line trend with the increase of phosphorus application. Phosphorus promoted the root growth, root length, root surface area and root nodule increased, which was conducive to the accumulation of dry matter. The difference of the treatment of phosphorus higher than 120 kg·ha<sup>-1</sup> and less than 30 kg·ha<sup>-1</sup> was significant. Phosphorus application on soybean yield compared with no phosphorus treatment showed significant difference, but there were slight differences between years, the best phosphorus application in 2016 was the treatments of T<sub>2</sub> and T<sub>3</sub>, the yield was increased from 10.5% to 12.1% than T<sub>0</sub> treatment. In 2017, the best phosphorus application was T<sub>3</sub> treatment, the pot yield was 73.0 g, which showed the trend of T<sub>3</sub> > T<sub>2</sub> > T<sub>4</sub> > T<sub>1</sub> > T<sub>0</sub>, T<sub>3</sub> treatment was significantly different from other treatments. Two years of test results further proved that in the poor phosphorus-deficient soil sub-surface, the best phosphorus application amount was T<sub>3</sub> treatment(120 kg·ha<sup>-1</sup>), which could promote the growth of soybean root system, which was of great significance for high yield of soybean.

**Keywords:** Soybean; Application of phosphorus; Surface layer; Root system; Yield

收稿日期:2018-01-16  
基金项目:黑龙江省科学基金(D2016006);国家科技支撑计划(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。  
通讯作者:萧长亮(1979-),男,硕士,副研究员,主要从事作物栽培与生理生态研究。E-mail:xiao\_changliang@163.com。

我国 65% 的耕地为中低产田<sup>[1]</sup>,其中瘠薄型的比例最大,占中低产田总面积的 27%<sup>[2]</sup>,开展中低产田特别是瘠薄型中低产田的改造有利于提高耕地质量、促进农业发展、增加和稳定作物产量。提高土壤磷素水平是改造中低产田的一个有效途径,但常规施肥方式一般只改变表层 0~20 cm 表层磷贮量,由于磷素在土壤中的移动性差,土壤养分磷很难向下迁移<sup>[3]</sup>,导致亚表层中磷素得不到有效补充,作物的磷肥利用率低,肥效差<sup>[4-5]</sup>,为了保证粮食产量,大量的磷肥施用,致使每年磷用量居高不下。关于供磷水平与大豆产量及磷营养效率关系研究较多<sup>[6-8]</sup>,吴冬婷等<sup>[9]</sup>、蔡柏岩等<sup>[10]</sup>研究表明大豆产量受供磷水平的影响呈单峰曲线的变化趋势,磷的用量过多或过少都不利于大豆产量的提高;王建国等<sup>[11]</sup>研究表明,土壤有效磷含量低于 20 mg·kg<sup>-1</sup>时,施入磷肥增产效果明显,而土壤有效磷含量高于 20 mg·kg<sup>-1</sup>时,再施磷肥对大豆增产效果有限。适当深施磷肥,才能满足作物中后期对磷的需求<sup>[12-13]</sup>。肥料的深层施用能够保证大豆中后期生长对磷素养分的需求,利于其根系下扎,对保障瘠薄亚表层土壤区大豆高产稳产具有重要意义。目前对于土壤瘠薄的亚表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。本研究通过研究亚表层不同磷素的施用量对大豆植株生长的影响,特别是对大豆根系指标的影响,明确瘠薄亚表层施磷对大豆产量贡献,探讨不同施磷量的增产效果,以解决瘠薄亚表层限制作物产量的问题,为大豆生产中科学施磷提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试大豆品种为黑农 48,生育期 115 d,活动积温 2 380℃。供试土壤为典型黑钙土,取自黑龙江省农业科技园区低磷土壤,分层 0~20 cm 的黑土和 40 cm 以下的黄土取回,风干后过筛,混匀备用。黑土养分为:土壤有机质 28.5 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 100.9 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 25 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 227 mg·kg<sup>-1</sup>、pH 6.92(v:w=2.5:1)。黄土养分为:有机质 5.49 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 34.6 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 10.4 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 112 mg·kg<sup>-1</sup>、pH7.4,风干后的土壤过 4 mm 筛,备用。

### 1.2 试验方法

试验采用盆栽(直径 30 cm,高 50 cm)的试验方法,于 2016、2017 年在黑龙江省农业科学院盆栽试

验场(N45°71',E126°56')进行。试验设置 5 个磷处理,表层统一施入复合肥,总养分含量为 45%,其中 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15,每盆用量 2 g,亚表层施磷量分别为 0 kg·hm<sup>-2</sup>(T<sub>0</sub>)、30 kg·hm<sup>-2</sup>(T<sub>1</sub>)、60 kg·hm<sup>-2</sup>(T<sub>2</sub>)、120 kg·hm<sup>-2</sup>(T<sub>3</sub>)、240 kg·hm<sup>-2</sup>(T<sub>4</sub>)。选用的磷源为重过磷酸钙,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)含量为 46%。顺序排列,10 次重复。黑土与黄土体积比为 1:1,即上层为黑土,下层为黄土,高度均为 20 cm,磷与下层黄土充分混匀,上层 5~10 cm 土壤与施入复合肥充分混匀。播种时间为每年的 5 月 20 日,保苗数 4 株·盆<sup>-1</sup>。

### 1.3 测定方法

土壤基础养分参照鲁如坤<sup>[14]</sup>编著的《土壤农业化学分析方法》。株高:大豆苗期(V5)、成熟期,用卷尺测量子叶痕至植株顶端的高度。干物质质量:将植株放入 105℃烘箱杀青 30 min,在 75℃下烘干至恒重,称得地上、地下干物质质量(以叶痕为分界点)。根系测定:在大豆结荚期(R4)取样,利用 SIN-TEK-LC-4800 型根系扫描仪扫描过后,使用其配套的图像分析软件 WinRH 2.0 Pro 2005 进行根系扫描,得到相同体积土层的根长、根表面积。根瘤数:在扫描根系前,将根系上的根瘤全部摘下放入培养皿中,计数。日本产 SPAD-502 型叶绿素计测定叶片的 SPAD 值,在大豆苗期(V5),测倒三叶即完全展开叶。

### 1.4 数据统计分析方法

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 亚表层不同磷用量对大豆苗期生长性状的影响

由表 1 可知,两年的试验结果趋势一致,随施磷量的增加,株高、SPAD 值和干物质质量呈现单峰曲线变化,且施磷处理均高于对照,其中 2016 年各项指标峰值出现在 T<sub>2</sub>,2017 年峰值位移到 T<sub>3</sub>处理,差异可能是磷在土壤里经过一个生产季消耗其含量降低引起。2016 年,T<sub>3</sub>与 T<sub>0</sub>处理株高差异显著,各处理间 SPAD 值差异不显著,T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>与 T<sub>0</sub>处理株干物质质量差异显著。2017 年,亚表层施磷对株高、干物质质量无显著影响,但与对照 T<sub>0</sub>相比高施磷处理 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>的 SPAD 值,差异显著。大豆苗期对磷的反应能力较后期弱,施磷处理 T<sub>1</sub>~T<sub>4</sub>间对以上项指标影响不明显,差异不显著。

表 1 不同施磷量对苗期大豆生长指标的影响

Table 1 Effects of different phosphorus levels on soybean growth index in seedling stage

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	SPAD 值 Value of SPAD	株干物质质量 Dry matter weight per plant/g
2016	T <sub>0</sub>	22.6 ± 5.13 b	43.1 ± 2.40 b	5.1 ± 0.13 bc
	T <sub>1</sub>	25.2 ± 4.68 ab	43.6 ± 1.65 ab	5.1 ± 0.09 bc
	T <sub>2</sub>	25.2 ± 4.91 ab	45.8 ± 2.37 a	5.5 ± 0.10 a
	T <sub>3</sub>	27.8 ± 2.85 a	44.2 ± 2.96 ab	5.4 ± 0.19 a
	T <sub>4</sub>	25.4 ± 4.76 ab	44.0 ± 2.38 ab	5.3 ± 0.15 ab
2017	T <sub>0</sub>	14.5 ± 1.73 a	40.4 ± 1.28 b	3.5 ± 0.19 a
	T <sub>1</sub>	14.8 ± 2.41 a	41.1 ± 2.84 ab	3.6 ± 0.15 a
	T <sub>2</sub>	14.9 ± 1.92 a	42.2 ± 2.45 ab	3.6 ± 0.14 a
	T <sub>3</sub>	15.2 ± 1.91 a	43.6 ± 2.08 a	3.7 ± 0.31 a
	T <sub>4</sub>	15.1 ± 1.97 a	43.1 ± 1.97 a	3.6 ± 0.18 a

表中数据是 4 次重复的平均值；不同字母代表处理间 0.05 水平差异显著，下同。

Values in the table are the mean of 4 replicates, different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same as below.

2.2 亚表层不同磷用量对大豆（结荚期 R4）根系及干物质质量的影响

2.2.1 根瘤数 不同施磷处理对根瘤数影响如图 1 所示,根瘤数随着施磷量的增加,呈先增加后降低的趋势,施磷处理大豆根瘤数显著高于对照,当施磷量为 120 kg·hm<sup>-2</sup> 时,根瘤数最多,与 ≤60 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理差异显著。可见,瘠薄(含磷低)的亚表层施入磷,可促进大豆根瘤数的增加。

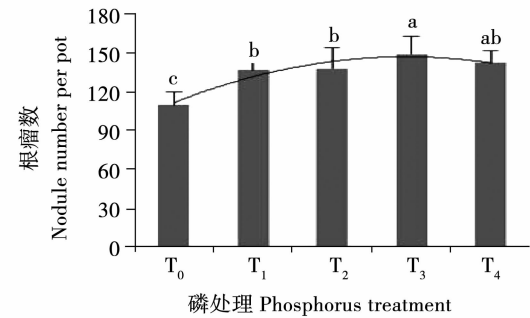


图 1 不同施磷量对大豆根瘤数的影响

Fig. 1 Effects of different phosphorus levels on the amount of nodule of soybean

2.2.2 根长及根表面积 根长是反映根系吸收能力的量化指标,不同施磷量对大豆根长的影响如图 2A,亚表层施磷处理与不施磷处理相比,对根长的影响差异显著,随着施磷量的增加,呈现单峰曲线变化,峰值出现在 T<sub>3</sub> 处理,施磷量 ≥120 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理与 ≤30 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理差异显著,而处理 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 间对根长的影响差异不显著。

根表面积的变化趋势与根长的变化趋势相一致(图 2B),随着施磷量的增加,根表面积增加,施磷量 ≥60 kg·hm<sup>-2</sup> 与不施磷处理差异显著,施磷量

120 kg·hm<sup>-2</sup> 时,根表面积最大,显著高于 ≤30 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理,但与施磷量 60 和 240 kg·hm<sup>-2</sup> 处理间差异不显著。

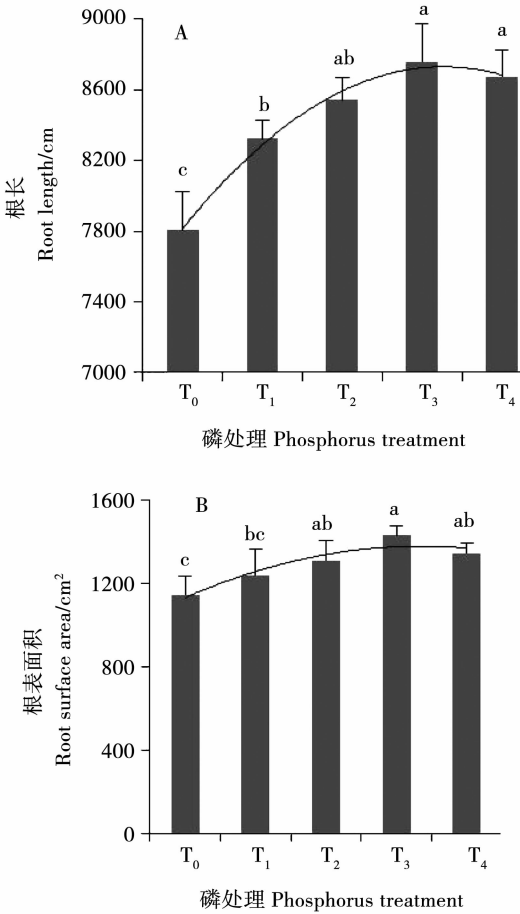


图 2 不同施磷量对大豆根表长及根表面积的影响

Fig. 2 Effects of different phosphorus levels on the length and surface area of soybean root

2.2.3 干物质积累的影响 大豆干物质的变化与大豆供磷水平关系密切,随着供磷量的增加大豆总干物质质量在增加,而对地下根干物质的影响表现为随着施磷量的增加先增加再减小,呈现单峰曲线变化,其峰值出现在 T<sub>2</sub> 的处理;地上干物质质量的变化随施磷量的增加而增加。施磷处理≥120 kg·hm<sup>-2</sup> 处理的总干物质显著高于施磷量≤30 kg·hm<sup>-2</sup> 处理,而与施磷为 60 kg·hm<sup>-2</sup> 处理差异不显著(图 3)。

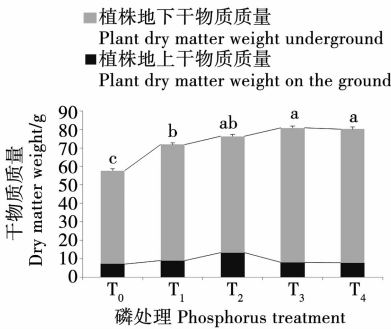


图 3 不同施磷量对大豆(结荚期)干物质质量的影响  
Fig. 3 Effects of different phosphorus levels on dry matter weight of soybean

2.3 亚表层不同施磷量对大豆产量构成因素的影响

表 2 结果表明,不同施磷量对大豆的分枝数及百粒重影响不显著,但对大豆的结荚数有一定的影响,且年季间有差异,2016 年结荚数随着施磷量的增加而增加,低施磷量≤30 kg·hm<sup>-2</sup>时,结荚数与不施磷对照差异不显著;磷施用量在 60 ~ 240 kg·hm<sup>-2</sup> 之间差异不显著,但显著大于对照。经过一个生产季,2017 年,施磷量 ≥120 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理与 T<sub>0</sub> 处理差异显著,但施磷处理间对结荚数影响差异不显著。大豆产量表现上:2016 年亚表层施磷量为 60 ~ 120 kg·hm<sup>-2</sup> 大豆产量最佳,比不施磷的处理增产 10.5% ~ 12.1%,磷的施入量对大豆产量的影响呈现单峰曲线的变化,其峰值出现在 T<sub>2</sub> 处理,但 T<sub>2</sub> 与 T<sub>3</sub> 处理差异不显著,2017 年产量峰值出现了位移,其峰值为 T<sub>3</sub> 的处理,产量表现 T<sub>3</sub> > T<sub>2</sub> > T<sub>4</sub> > T<sub>1</sub> > T<sub>0</sub>, T<sub>3</sub> 的处理与其它各处理差异显著。两年的试验结果进一步证明,贫磷的亚表层进行磷培肥,最佳的处理为 T<sub>3</sub> 即磷施用量为 120 kg·hm<sup>-2</sup>。

表 2 不同施磷量对大豆产量构成因素影响  
Table 2 Effects of different phosphorus levels on yield components of soybean

年份 Year	处理 Treatment	分枝数 Branch number	荚数 Pod number	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield per pot/g	增产 Increasing rate/%
2016	T <sub>0</sub>	0.6 ± 0.42 a	37.1 ± 1.68 b	21.6 ± 0.25 a	54.9 ± 2.36 bc	-
	T <sub>1</sub>	0.7 ± 0.38 a	37.8 ± 2.32 ab	21.8 ± 0.48 a	56.2 ± 3.27 b	2.8
	T <sub>2</sub>	0.8 ± 0.52 a	39.9 ± 1.88 a	22.1 ± 0.34 a	61.5 ± 4.02 a	12.1
	T <sub>3</sub>	0.8 ± 0.26 a	40.2 ± 2.31 a	21.7 ± 0.27 a	60.6 ± 2.84 a	10.5
	T <sub>4</sub>	0.9 ± 0.75 a	39.7 ± 3.44 a	21.9 ± 0.31 a	57.2 ± 3.10 b	4.2
2017	T <sub>0</sub>	0.7 ± 0.82 a	37.8 ± 1.34 b	21.2 ± 0.15 a	64.8 ± 2.75 c	-
	T <sub>1</sub>	0.7 ± 0.68 a	39.4 ± 2.05 ab	21.5 ± 0.26 a	67.3 ± 5.56 bc	3.9
	T <sub>2</sub>	0.7 ± 0.71 a	38.3 ± 1.26 ab	21.3 ± 0.32 a	69.7 ± 4.71 bc	7.1
	T <sub>3</sub>	0.8 ± 1.25 a	40.8 ± 4.41 a	21.4 ± 0.10 a	73.0 ± 4.24 a	12.7
	T <sub>4</sub>	1.0 ± 1.03 a	39.9 ± 3.10 a	20.4 ± 0.46 a	68.5 ± 4.20 bc	5.7

3 结论与讨论

在贫磷的亚表层土壤进行磷培肥,不同施磷量对大豆的株高、叶绿素含量、根系指标、干物质积累量以及大豆产量均存在一定差异。大豆苗期虽然需磷量少,但在亚表层施入不同量的磷,会影响大豆的株高、SPAD 值及干物质的积累。随着磷用量的增加,株高、SPAD 值变化呈现单峰曲线变化的趋势,峰值出现在 T<sub>3</sub> 处理;对干物质的影响峰值出现位移,苗期从 T<sub>2</sub> (第 1 年) 处理位移到 T<sub>3</sub> (第 2 年) 处理,但到结荚期峰值从 T<sub>3</sub> (第 1 年) 处理位移到 T<sub>4</sub> (第 2 年) 处理,但 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 处理间干物质积累的差异不显著。大豆的结荚期,不同施磷量的处理对大豆株高、叶绿素及干物质的积累与苗期变化趋势较一致,进一步说明,表层土壤磷养分仍未满足大豆生长对磷素的需求,亚表层补磷满足根系全方位营养,起到健根、强体、增产的效果,此试验结论与石

岩等<sup>[15-16]</sup> 在小麦上研究,较深层次施肥能明显提高作物产量的结论相似。大豆根系生长高峰值出现在 R<sub>4</sub> ~ R<sub>5</sub> 阶段,此时新生根的生长已基本停止,根量达最大<sup>[17-18]</sup>,是营养元素吸收的高峰期,也是产量形成的重要时期。此时期植株对磷的需要量也达到最大值,所以亚表层不同施磷量对 R<sub>4</sub> 时期大豆根瘤、根长、根表面积及干物质质量影响更为明显,其指标高低直接决定产量多少。本研究表明,随亚表层施磷量的增加,根瘤呈现单峰曲线变化,峰值出现在 T<sub>3</sub> 处理,磷用量为 120 kg·hm<sup>-2</sup>;对干物质的影响与根瘤变化趋势较一致,但高施磷量之间差异不显著。施磷量的变化影响大豆生长性状,进而影响大豆的产量,第 1 年的峰值为 T<sub>2</sub> 处理,第 2 年峰值位移到 T<sub>3</sub> 处理,因为土壤磷经过一个生产季的消耗,各处理磷含量会有所降低,此时亚表层土壤磷含量与表层磷施入量为大豆产量高点的最佳结合量。亚表层施磷的重要性与熊俊芬等<sup>[19]</sup> 研究

表明作物除主要从耕层吸收磷外,下层磷素营养也有重要意义相一致。亚表层施磷肥是目前解决土壤磷素缺乏的有效手段之一,但是磷肥的增产效果受很多因素控制,如土壤有效磷含量、施磷量、基因型等<sup>[20]</sup>。王维军等<sup>[21]</sup>研究表明:磷肥的施用量同样制约着大豆植株的增产效果,磷肥施入量少于 62 kg·hm<sup>-2</sup>时,随磷肥施入量增加,产量逐渐升高;当磷肥施入量超过 62 kg·hm<sup>-2</sup>以后,增产作用不大。但本试验亚表层产量最高时磷施入量为 120 kg·hm<sup>-2</sup>,过多或过少都不利产量的提高。研究结果不一致的主要原因有:一是试验供试品种需肥的差别;二是土壤基础养分的差异;三是大田试验与盆栽试验管理方式的不一致;四是肥料作用的位置不同。此试验进一步证明,低肥力亚表层土壤进行磷培肥,可改善大豆根系形态,促进大豆干物质的积累,对大豆产量提高具有重要意义。

参考文献

[1] 林鹏生. 我国中低产田分布及增产潜力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008. (Lin P S. Study on the distribution and possible production in-easement of medium and low-yield farmland in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. )

[2] 石全红, 王宏, 陈阜, 等. 中国中低产田时空分布特征及增产潜力分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(19): 369-373. (Shi Q H, Wang H, Chen F, et al. The spatial-temporal distribution characteristics and yield potential of medium-low yielded farmland in China [J]. Chinese Agricultural Science bulletin, 2010, 26(19): 369-373. )

[3] 徐明刚. 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. China's evolution of soil fertility[M]. 2nd edition, Beijing: China Agricultural Science Publishing House, 2015. )

[4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. (Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. )

[5] 刘峰. 白浆土混层改良的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2003. (Liu F. Study of subsoil mixing improvement on planosol [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2003. )

[6] 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 falcate* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(3): 242-249. )

[7] 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.

[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 Agricultural University, 2001, 22(3): 1-4. )

[9] 吴东婷, 张晓雪, 龚振平, 等. 磷素营养对大豆磷素吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 670-677. (Wu D T, Zhang X X, Gong Z P, et al. Effects of phosphorus nutrition on P absorption and yields of soybean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 670-677. )

[10] 蔡柏岩, 葛菁萍, 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, 2007, 13(3): 404-410. (Cai B Y, Ge Q P, Zu W. Effect of phosphorus levels on soybean phosphorus nutrition, yield and quality[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(3): 404-410. )

[11] 王建国, 李兆林, 李文斌, 等. 磷肥与大豆产量及品质的关系[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(1): 55-57. (Wang J G, Li Z L, Li W B, et al. Application of phosphorus in relation to soybean yield and quality[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2006, 22(1): 55-57. )

[12] 刘峰, 贾会彬, 赵德林, 等. 白浆土心土培肥效果的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1997(3): 1-4. (Liu F, Jia H B, Zhao D L, et al. Effect of subsoil-fertilizing of lessive soil [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 1997(3): 1-4. )

[13] 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 lessive soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1106-1109. )

[14] 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. )

[15] 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 system senescence of upland wheat after anthesis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 573-575. )

[16] 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 senescence of root system of spring wheat[J]. Soil, 2006, 38(1): 110-112. )

[17] Aulakh M S, Garg A K, Kabba B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics[J]. Soil Use and Management, 2007, 23: 417-427.

[18] Tang X, Li J, Ma Y, et al. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions[J]. Field Crop Research, 2008, 108: 231-237.

[19] 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. )

[20] 丁玉川, 陈明昌, 程滨, 等. 磷营养对不同大豆品种生长和磷吸收利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(1): 121-124. (Ding Y C, Chen M C, Cheng B, et al. Effect of phosphorus on plant growth and phosphorus uptake and use efficiency in different soybean cultivars [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 21(1): 121-124. )

[21] 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]. Scientia Agricultura Sinica, 1963(11): 41-44. )