文章编号:1000-7601(2018)05-0116-06 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2018.05.18

东北黑土区长期不同磷肥施用量对大豆生长及产量的影响

赵家煦[1],张一鹤[1],韩晓增[2],邹文秀[2],陆欣春[2],严 君[2],丁 娇[3]

(1. 东北农业大学资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030;2. 中国科学院东北地理与农业研究所,黑龙江 哈尔滨 150081;
3. 黑龙江省伊春环境保护局,黑龙江 伊春 153000)

摘 要:以中国科学院海伦生态实验站的长期定位试验为基础,分析了不同磷肥施用量包括对照(CK)、低磷处理(25.58 P_2O_5 kg·hm^{-2},N1P1K)、中磷处理(51.75 P_2O_5kg·hm^{-2},N1P2K)和高磷处理(77.65 P_2O_5 kg·hm^{-2},N1P3K)对大豆生长、结瘤及产量的影响。结果表明:不同处理对大豆株高和生物量的影响表现为 N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK(鼓粒期株高除外),说明当前黑土磷素水平下,磷肥的施用能够显著促进大豆植株的生长;与 CK,N1P1K 和 N1P2K 相比,N1P3K 苗期的根瘤数量和根瘤干重分别增加了 56.7%~152.8%和 87.4%~463.1%;与 CK 相比,N1P3K 和 N1P2K 处理固氮酶活性分别增加了 74.0%和 94.0%;大豆的单株荚数和单株粒数均表现为随着磷肥施用量的增加而增加,虽然百粒重和产量表现出了相似的趋势,但是 N1P3K 和 N1P2K 处理之间没有显著差异($P>0.05$),说明过多磷肥的施用在东北黑土区对大豆增产效果不明显。因此,在东北黑土区在考虑生产成本、大豆产量等因素的情况下,建议适宜的磷肥施用量为 N1P2K,即磷肥的施用量为51.25 P_2O_5 kg·hm^{-2}。

关键词:磷肥;施肥量;大豆;根瘤;产量;东北黑土区

中图分类号:S143.2 **文献标志码**:A

The effect of different dosage of phosphorous fertilizer application on growth and yield of soybean in a Mollisol in Northeast China

Zhao Jia-Xu[1], Zhang Yi-He[1], Han Xiao-Zeng[2], Zou Wen-Xiu[2], Lu Xin-Chun[2], Yan Jun[2], Ding Jiao[3]

(1. *College of Resource and Environment Northeast Agricultural University*, *Harbin*, *Heilongjiang* 150030; 2. *Northeast Institute of Geography and Agroecology Chinese Academy of Sciences*, *Harbin*, *Heilongjiang* 150081; 3. *Yichun Municipal Environmental Protection Bureau*, *Yichun*, *Heilongjiang* 153000)

Abstract: The effect of P fertilizer dosage, including no fertilizer (CK), low P treatment (25.58 P_2O_5 kg·hm^{-2}, N1P1K), medium P treatment (51.75 P_2O_5kg·hm^{-2}, N1P2K) and High P treatment (77.65 P_2O_5 kg·hm^{-2}, N1P3K) on growth, nodulation and yield of soybean was investigated based on a long-term experiment in Hailun Ecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. The results showed that the effect of different treatment on plant high and biomass of soybean ranked as N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK with exception of plant height in seed filling stage. The nodule number and nodule weight of seedling stage under N1P3K treatment had increased significantly, by 56.7%~152.8% and 87.4%~463.1% respectively, compared with CK, N1P1K and N1P2K treatments, Nitrogenase activity under N1P2K and N1P3K treatments had increased by 74.0% and 94.0% compared with CK. Pod number per plant and seed number per plant both were increasing with the increased dosage of P fertilizer application. No significant difference was observed in 100-seed weight and yield under N1P2K and N1P3K treatments, although P fertilizer application had increased 100-seed weight and yield of soybean, indicating that overdose of P fertilizer application has no significant effect on yield increase. Therefore, recommended a-

收稿日期:2017-01-24 **修回日期**:2018-04-05

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300806-1, 2016YFD0200309-6);国家自然科学基金(41571219,41371296);现代农业产业技术体系建设专项 CARS-04)

作者简介:赵家煦(1991-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,研究方向为黑土生态研究。E-mail:343787481@qq.com

通信作者:韩晓增(1957-),男,学士,主要从事黑土生态研究。E-mail:xzhan@iga.ac.cn

mount of P fertilizer application was 51.25 P_2O_5 kg · hm^{-2} in a Mollisol in Northeast China in consideration of factors such as product cost, soybean yield and so on.

Keywords: phosphorous fertilizer; fertilizationdosage; soybean; nodule; yield; mollisol in northeast china

在大豆生长发育过程中磷素是至关重要的[1-2],其以多种方式参与大豆体内各种生物化学过程,对促进植物的生长发育和新陈代谢起着非常重要的作用[3]。磷素胁迫条件下能够影响植株中核蛋白和核酸的合成,抑制细胞分裂和增殖,使生长发育停滞,植株发育不良[4];恢复磷素供应后,随着供磷水平的提高,大豆利用叶片的光作合用,合成大量的 ATP,为其生长提供能量,加速细胞分裂增殖,促进植株生长[2]。研究表明,在磷素缺乏的土壤,施用磷肥能增加根干重和根长等,进而促进大豆根系快速地生长,为其对矿质营养元素的吸收和利用提供良好的基础[5]。磷不仅能够促进大豆生长发育过程根瘤的形成[6],同时也能促进根瘤固氮能力[7]。

已有研究表明施用磷肥能够改善大豆的产量构成,显著提高其产量[8],但是施用磷肥对大豆的增产效果与土壤磷素含量密切相关。在磷素缺乏的条件下,磷素无法满足大豆植株的生长发育的需求,降低叶面积指数、叶片数量和节数等,限制大豆植株对其它养分的吸收,导致产量下降[9-11];而过高的磷素供应则可能导致植株徒长,呼吸作用加强,养分大量消耗,反而更不利于大豆植株的正常生长发育,进而导致干物质和产量的下降[12],因此适当的磷肥施用量对大豆生长发育是至关重要的。众所周知,黑土自身全磷素含量较高,同时磷的有效性也比较高[13,14],但是由于黑土区春季气温较低,降低了土壤中磷的有效性,不能满足作物对大豆生长发育的需求[15],因此磷肥的施用是非常必要的。严君等通过盆栽研究发现黑土适宜的磷肥施用量 40 kg · hm^{-2}[16],但是东北黑土区农户磷肥施用量普遍高于 40 kg · hm^{-2},由此可见,盆栽试验的试验数据不能代表作物在田间的实际情况,生产上需继续进行关于磷肥适宜施用量的研究。因此,本研究拟利用中国科学院海伦农业生态实验站内的长期定位试验,分析不同磷肥施用量对大豆生长、结瘤及产量的影响,旨在提出研究区域内适宜的磷肥施用量,指导区域农业生产。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验在中国科学院海伦农业生态实验站内的养分试验场进行。海伦站地处黑土区中部,地势平坦,属于温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同季,年平均气温 1.5℃,极端最高温度为 37℃,极端最低温度为-39.5℃,年降水量为 500~600 mm,主要集中在 7、8、9 月份,年均有效积温 2 450℃,年均日照时数为 2 600~ 2 800 h,无霜期为 125 d。土壤类型为中厚层黑土,是在第四纪形成的黄土状母质上发育起来的地带性土壤,质地以粘性土为主,土壤物理性粘粒大于 60%,土壤固相比大于 50%,土壤膨胀性大于 25%,土体结构致密,渗透能力弱,毛管水运移速率较慢,土壤持水能力和保水能力较强,储水库容较大。地下水埋深 20~30 m。

1.2　试验设计与测定项目

试验开始于 1990 年,包括三个磷素水平,分别是高磷处理(N1P1K),中磷处理(N1P2K)和低磷处理(N1P3K),无肥处理(CK)为对照。不同处理的肥料施用量见表 1。施肥处理的化肥均作为底肥在大豆播种时施入。小区面积为 50.4 m^2,完全随机排列,4 次重复。

表 1　不同处理肥料施用量

Table 1　The dosage of chemical fertilizer application/(kg · hm^{-2})

处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0
N1P1K	10.13	25.88	60
N1P2K	10.13	51.75	60
N1P3K	10.13	77.63	60

2014 年大豆生长季节分别在大豆的苗期,盛花期和鼓粒期取样并测定其株高、生物量(105℃杀青,80℃烘干至恒重)、根瘤数量和根瘤重量(105℃杀青,80℃烘干至恒重)。固氮酶活性采用乙炔还原法活体测定,仪器为日本岛津 GC-2010 气象色谱[16]。大豆成熟以后每个小区取 2 m^2,进行测产和考种。

1.3　数据处理与分析

采用 SPSS 17.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD 法,$\alpha = 0.05$),利用 Excel 2011 和 sigmplot 10.0 画图。

2　结果与分析

2.1　长期施用磷肥对大豆株高的影响

大豆苗期对磷肥施用量不敏感(图 1),少量的

磷肥施用即可满足大豆对磷肥的需求。与 CK 处理相比,磷肥的施用显著增加了大豆的株高,但是不同施用磷肥处理之间没有显著差异;随着生育时期的推进,进入盛花期,大豆株高表现为 N1P3K > N1P2K > N1P1K > CK,与 CK 相比,分别增加了 59.1%、43.9%、37.6%,说明增加施磷量能够促进大豆生长,N1P3K 与 N1P2K,N1P1K 和 CK 之间差异显著(P<0.05);与 N1P2K 相比,N1P3K、N1P1K 和 CK 处理大豆株高降低了 5.7%~65.1%,说明适量的磷肥施用能够促进大豆植株的生长,增加株高,但是过量磷肥施用在大豆生长的后期表现出轻微抑制作用。本研究得到了与 Win 等[17]研究结果相一致的结论,过高的磷肥施用会增强植株的呼吸强度,不利于植株的生长发育,适当的磷肥施用能够促进大豆株高的增加[18,19]。

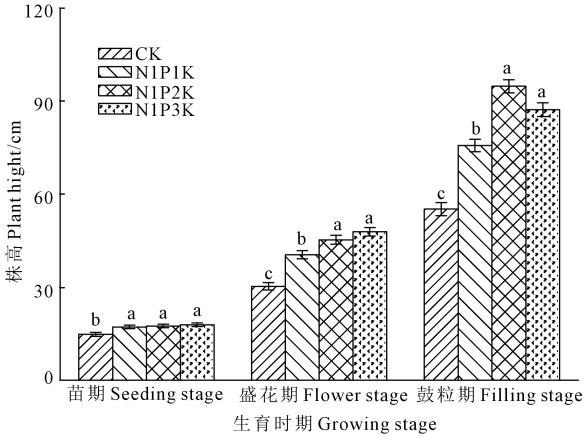

图 1 东北黑土区大豆株高对磷肥施用量的响应

Fig.1 The effect of P fertilizer on soybean plant height in Mollisol in the Northeast China

2.2 长期施用磷肥对大豆生物量的影响

在大豆的生长发育过程中,影响生物量形成与积累的因素有很多,其中适当的施用磷肥可以显著地促进碳水化合物在大豆植株体内的运移,有利于大豆植株的生长发育,增加干物质积累[1]。不同施磷量对大豆地上部生物量的影响在大豆不同生育时期存在差异(图 2)。大豆苗期,磷肥的施用能够显著增加大豆地上部分生物量(P < 0.05),但 N1P1K,N1P2K 和 N1P3K 处理间无显著差异(P> 0.05);进入盛花期,不同处理表现为 N1P3K > N1P2K > N1P1K > CK,与 CK 处理相比,N1P1K,N1P2K 和 N1P3K 处理分别增加了 61.2%、132.1% 和 180.2%;鼓粒期表现出了与盛花期一致的变化趋势,与 CK 相比,N1P1K,N1P2K 和 N1P3K 处理分别增加了11.2%、133.4% 和 160.2%,说明增加施磷量能够明显增加地上干物质的积累[20]。

不同处理对大豆地下部生物量的影响,表现出了与地上部生物量相似的变化趋势(图 3)。在大豆苗期,与 CK 相比,磷肥的施用能够显著增加大豆地下部生物量,但是施磷处理之间没有显著性差异(P >0.05),说明苗期大豆生长对磷的需求较小,少量的磷肥既能够满足大豆根系生长的需求;在盛花期不同处理地下部生物量的表现为 N1P3K>N1P2K> N1P1K>CK,与 CK 相比 N1P1K,N1P2K 和 N1P3K 的地下生物量分别增加了 54.93%,154.93% 和 191.55%;其中 N1P2K 和 N1P3K 与 CK 和 N1P1K 达到了 P<0.05 的显著水平;鼓粒期不同处理地下部生物量也表现出了 N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK,与 CK 相比,N1P1K,N1P2K 和 N1P3K 的地下生物量分别增加了 15.13%,121.38% 和 128.97%,其中 N1P2K 和 N1P3K 处理显著增加大豆的地下部生物量(P<0.05),N1P2K 和 N1P3K 处理之间没有显著差异,说明适量施磷量能够显著增加地下部生物量的积累,但过多的施用磷肥对大豆地下生物量的形成与积累作用不明显。

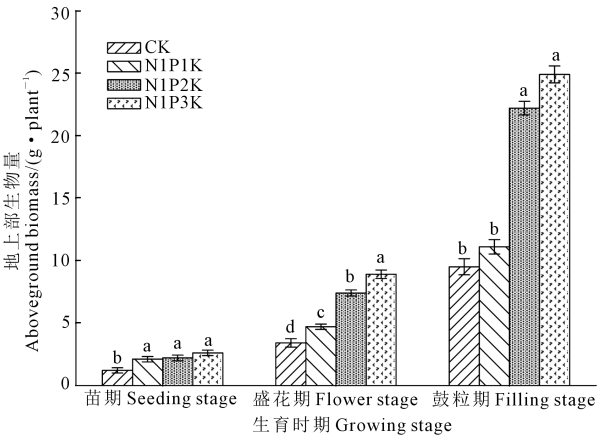

图 2 东北黑土区大豆地上部生物量对磷肥施用量的响应

Fig.2 The effect of P fertilizer on soybean shoot dry weight in Mollisol in the Northeast China

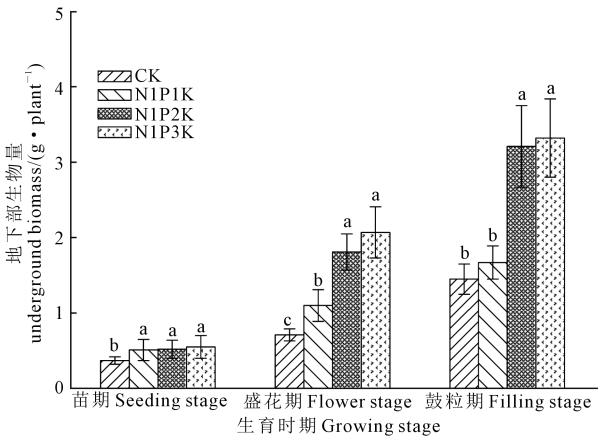

图 3 东北黑土区大豆地下部生物量对磷肥施用量的响应

Fig.3 The effect of P fertilizer on soybean root dry weight in Mollisol in the Northeast China

2.3　大豆根瘤数和干重对长期施用磷肥的响应

磷是促进大豆根瘤形成的重要元素之一,适当地施用磷肥能促进大豆结瘤,增加大豆根瘤数量[21]。在大豆苗期,与 CK 相比,N1P1K 和 N1P2K 处理虽然也能够增加大豆根瘤的数量,但差异不显著($P>0.05$),但是当磷肥施用量继续增加后(N1P3K),根瘤数量显著增加了($P<0.05$),与其它三个处理相比增加了 56.7%－152.8%。进入盛花期,不同处理之间均达到了 $P<0.05$ 的差异显著水平,与 CK 处理相比,N1P1K、N1P2K、N1P3K 处理根瘤数分别增加了 483.1%,561.4%和 681.2%;鼓粒期,不同处理对大豆根瘤数的影响表现为 N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK,与 CK 相比,N1P1K、N1P2K、N1P3K 分别增加了 80.1%,99.2%和 106.7%,磷肥的施用显著增加了大豆根瘤数量,说明磷肥的施用对大豆根瘤的形成是至关重要的,但是 N1P2K 与 N1P3K 之间差异不显著($P>0.05$),说明过多磷肥的施入并不会继续增加大豆根瘤数量,而是有一个适宜的磷肥施用量。有研究已经表明在磷素供应不足的情况下,大豆植株向根瘤提供碳水化合物的量减少,限制根瘤的形成[22],磷肥施用以后通过促进根瘤原基的增加,促进根瘤的形成,进而有利于根瘤的生长发育[23,24]。

大豆苗期,与 N1P3K 相比,CK,N1P1K 和 N1P2K 显著增加了大豆根瘤数量($P<0.05$),分别增加了 463.1%,87.4%和 93.0%(图 5);进入盛花期,不同处理对大豆根瘤干重的影响表现为 N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK,不同处理间均差异显著($P<0.05$),与 CK 相比,施用磷肥处理根瘤干重增加了 4.0 倍－18.3 倍。鼓粒期,与 CK 相比,N1P1K、N1P2K、N1P3K 处理根瘤干重分别增加了 98.1%,89.8%和 122.7%,说明了充足磷肥的施用能够促进根瘤形成和干物质积累,当磷素供应不足时,大豆新陈代谢受到抑制、间接影响根瘤的生长[25]。研究已经证实,氮肥的施用会限制大豆根系的结瘤[26],而磷肥的施用则可以促进结瘤,并缓解氮肥对大豆根系结瘤的抑制作用[27]。

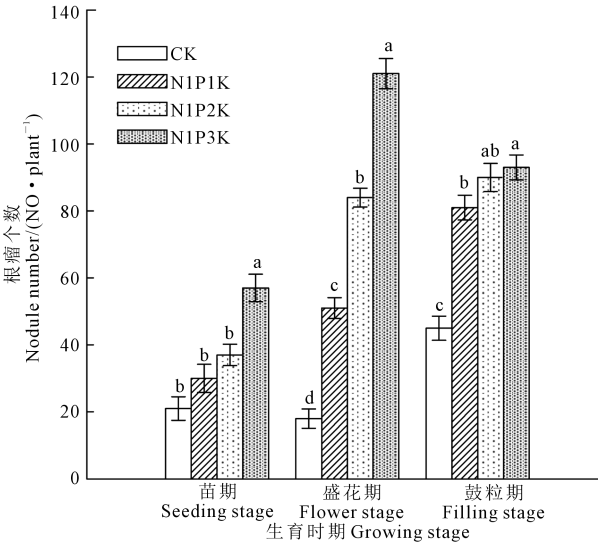

图 4　东北黑土区大豆根瘤数量对磷肥施用量的响应

Fig.4　The effect of P fertilizer on soybean nodule number in Mollisol in the Northeast China

2.4　长期施用磷肥对大豆固氮酶活性的影响

不同处理对大豆根瘤固氮酶活性具有显著的影响(图 6)。磷肥的施用能够提高大豆根瘤固氮酶活性(N1P1K 除外),不同处理表现为 N1P2K>N1P3K>CK>N1P1K,与 CK 相比,N1P3K 和 N1P2K 处理的固氮酶活性分别增加了 74.0%和 94.0%,N1P1K 处理下降了 40.0%。N1P2K 和 N1P3K 处理之间根瘤固氮酶活性差异不显著($P>0.05$)。与 CK 相比 N1P1K 大豆根瘤固氮酶的活性表现为降低,主

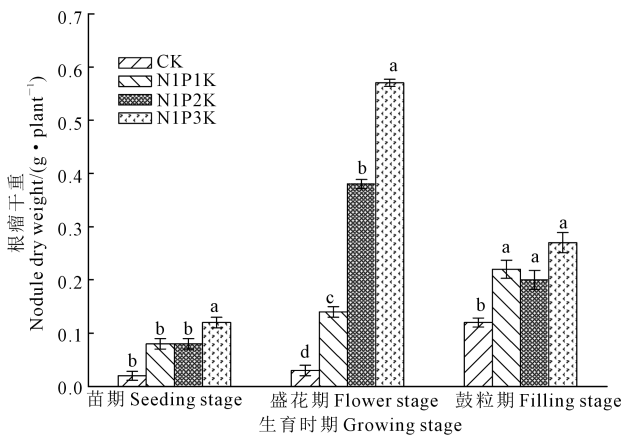

图 5　东北黑土区大豆根瘤干重对磷肥施用量的响应

Fig.5　The effect of P fertilizer on soybean nodule dry weight in Mollisol in the Northeast China

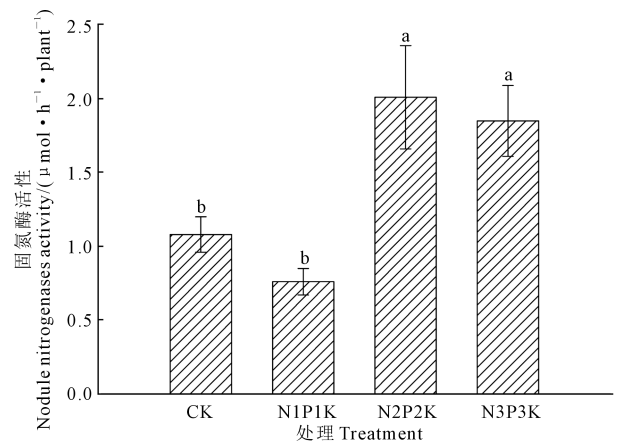

图 6　东北黑土区大豆固氮酶活性对磷肥施用量的响应

Fig.6　The effect of P fertilizer on soybean nitrogenase activity in Mollisol in the Northeast China

要是由于氮肥的施用对固氮酶活性具有抑制作用，当磷肥施用量为P1时，不能抵消氮肥施用对固氮酶活性的影响[16]；而当磷肥施用量继续增加时，氮对固氮酶活性的抑制作用逐渐减弱[23]，表现为N1P2K处理固氮酶活性显著高于CK和N1P1K处理。N1P3K处理的固氮酶活性稍有降低，说明施磷促进了根瘤固氮酶活性的提高，但过多施磷对根瘤固氮酶活性有抑制作用。

2.5 长期不同磷肥施用量对大豆产量性状的影响

不同的磷肥施用量能够影响大豆的产量及产量构成因子(表2)。不同处理大豆的单株荚数和粒数表现为N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK，说明磷肥的施用能够促进大豆结荚，增加单株粒数。不同处理对大豆百粒重的影响表现为N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK，N1P2K、N1P3K处理的百粒重显著高于CK和N1P1K处理($P<0.05$)，与CK相比，N1P1K、N1P2K、N1P3K处理百粒重分别增加了3.9%，5.4%和5.9%，说明增加磷肥的施用能够促进大豆籽粒的形成。不同处理对大豆产量的影响与百粒重呈现相同的趋势即N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK，与CK、N1P1K和N1P2K处理，N1P3K处理大豆产量相比分别增产27.3%，11.0%和1.4%；但是N1P2K处理和N1P3K处理没有显著性差异，说明磷肥的施用能够增加大豆的产量，但是过多磷肥施用大豆增产效果不显著。大豆产量对磷肥的反应与土壤速效磷含量密切相关[28]，在棕黄土的研究表明土壤速效磷含量低于20 mg·kg^{-1}时，施用磷肥能够促进大豆产量的增加，而在草甸土的研究则表明土壤速效磷含量为60 mg·kg^{-1}时，施用磷肥对大豆产量没有显著的增加作用[29]。本研究试验开始前土壤速效磷的含量为41.2 mg·kg^{-1}，说明该速效磷的含量仍然不能满足作物对磷素的需求，随着磷肥施用量的增加，大豆产量呈增加的趋势，但是当磷肥施用量达到51.25 P_2O_5 kg·hm^{-2}(N1P2K)时，再增加磷肥的施用量对产量没有显著地增加作用。因此，推荐东北黑土区大豆的磷肥施用应该是51.25 P_2O_5 kg·hm^{-2}。陆欣春等通过分析“3414”试验中磷肥对大豆产量的影响，得出黑龙江黑土区磷肥的推荐施用量为60 P_2O_5 kg·hm^{-2}左右[15]，与本研究结果相近。

表2 东北黑土区大豆产量性状对磷肥施用量的响应

Table 2 The effect of P fertilizer on soybean yield components in Mollisol in the Northeast

处理 Treatment	CK	N1P1K	N1P2K	N1P3K
单株荚数 Pods /(Number·plant^{-1})	27.8±0.9b	29.2±1.1b	25.6±0.7b	40.2±2.3a
单株粒数 Seeds /(Number·plant^{-1})	75.6±3.4b	77.6±4.7b	71.8±2.5b	113.5±6.6a
百粒重 100-seeds /(g·100-seeds^{-1})	14.6±0.4c	15.1±0.7b	15.3±1.1a	15.4±1.0a
产量 Yield/(kg·hm^{-2})	1956.9±3.8c	2245.0±5.6b	2454.8±4.9a	2491.0±5.3a

3 结 论

利用长期定位试验分析了东北黑土区不同磷肥施用量对大豆生长、结瘤及产量的影响。在生长前期，大豆株高和生物量随着磷肥施用量的增加而增加，但是鼓粒期大豆株高在中等磷肥施用量时达到了最大值，说明适当磷肥施用量能够显著地促进大豆的生长，而过量磷肥的施用则没有显著的作用。磷肥的施用能够增加大豆根瘤数量和干重，不同处理表现为N1P3K>N1P2K>N1P1K>CK，说明磷肥的施用能够促进大豆根瘤的形成；固氮酶活性在N1P2K处理达到了最大值，说明适当磷肥施用能够促进大豆根瘤固氮。大豆的单株荚数和单株粒数均表现为随着磷肥施用量的增加而增加，百粒重和产量虽然表现出了相同趋势，但是N1P2K和N1P3K两个处理间没有显著差异，说明过度磷肥投入对产量的增加没有意义。因此，从大豆植株生长、固氮效率、产量和生产成本的角度出发，N1P2K中51.25 P_2O_5 kg·hm^{-2}是最佳的值得推荐的磷肥施用量。

参 考 文 献：

[1] 张小明，曾宪楠，孙羽. 磷素对大豆生长发育影响的研究进展[J]. 大豆科学，2016，35(1)：176-180.

[2] 王旭明，张铮，史刚荣. 磷素营养和土壤含水量对大豆光合特性的交互影响[J]. 干旱地区农业研究，2010，28(5)：143-148.

[3] 单守明，刘国杰，李绍华，等. DA-6对草莓叶绿体光化学反应和Rubisoo活性的影响[J]. 中国农业大学学报，2008，13(2)：7-10.

[4] 王树起，韩晓增，严君，等. 缺磷胁迫对大豆根系形态和氮磷吸收积累的影响[J]. 土壤通报，2010，41(3)：644-651.

[5] 马兆惠，车仁君，张惠君，等. 磷酸二铵施肥量和单混种植对超高产大豆根系性状的影响研究[J]. 干旱地区农业研究，2014. 32(2)：199-207.

[6] Tsvetkova G，Georgiev G. Effect of phosphorus nutrition on the nodulation，nitrogen fixation and nutrient use efficiency of Bradyrhizobium japonicum-soybean (Glycine max L. Merr.) symbiosis

[J]. General & Applied Plant Physiology , 2003, Special Issue: 331 - 335.

[7] Israel D W. Investigation of the role phosphorus in symbiotic dinitrogen fixation [J]. Plant Physiology, 1987, 84: 835 - 840.

[8] 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(6): 0947 - 0951.

[9] 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.

[10] 郭晓双, 吴冬婷, 周全, 等. 缺磷胁迫对大豆植株磷素与干物质积累的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(4): 545 - 549.

[11] Chaudhary M I, Adu-Gyamfi J J, Saneoka H, et al.The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean [J]. Acta Physiol.Plant, 2008, 30(4) : 537 - 544.

[12] 王政, 高瑞凤, 李文香, 等. 氮磷钾肥配施对大豆干物质积累及产量的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(4):588 - 594 .

[13] 陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1536 - 1542.

[14] 宋春, 韩晓增. 不同土地利用下黑土磷素肥力特征的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 928 - 933.

[15] 陆欣春, 韩晓增, 邹文秀, 等. 减量化施肥对大豆和玉米产量及效益影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(4): 240 - 247.

[16] 严君, 韩晓增, 丁娇, 等. 东北黑土区大豆生长、结瘤及产量对氮、磷的响应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 318 - 325.

[17] Win M, Nakasathien S, Sarobol E, et al. Effects of phosphorus on seed oil and protein contents and phosphorus use efficiency in some soybean varieties [J].Kasetsart Journal Natural Sciences, 2010, 44: 1 - 9.

[18] Chiezey U F, Odunze A C. Soybean response to application of poultry manure and phosphorus fertilizer in the Sub-humid Savanna of Nigeria [J].Journal of Ecology & the Natural Environment, 2009, 1(2):25 - 31.

[19] Abbasi M K, Majeed A, Sadiq A, et al. Application of Bradyrhizobium japonicum and phosphorus fertilization improved growth, yield and nodulation of soybean in the sub-humid hilly region of Azad Jammu and Kashmir, Pakistan [J]. Plant Production Science, 2008,11(3): 368 - 376.

[20] 蔡柏岩, 葛菁萍, 祖伟. 不同磷肥水平对大豆磷营养状况和产量品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 404 - 410.

[21] Sa T M, Israel D W. Energy status and functioning of phosphorus-deficient soybean nodules [J]. Plant Physiology, 1991, 97(3): 928 - 935.

[22] Schulze J, Kupietz A, Merbach W. N2 fixation in different varieties of Vicia faba L. and Pisum sativum L. during pod-filling [J]. Agribiological Research, 1998, 51(3): 261 - 269.

[23] Kuang R B, Liao H, Yan X L, et al. Phosphorus and nitrogen interactions in field-grown soybean as related to genetic attributes of root morphological and nodular traits [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(5): 549 - 559.

[24] Miao S J, Qiao Y J, Han X Z, et al. Nodule formation and development in soybeans (Glycine max L.) in response to phosphorus supply in solution culture [J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 36 - 43.

[25] Tang C H, Hinsinge P, Drevon J J. Phosphorus deficiency impairs early nodule functioning and enhances proton release in roots of medicago truncatula [J]. Annals of Botany, 2001, 88: 131 - 138.

[26] 严君, 韩晓增, 王守宇, 等.不同施氮量及供氮方式对大豆根瘤生长及固氮的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(1):75 - 79.

[27] 寸植贤, 周志刚, 何霞红, 等. 氮、磷施用量对大豆结瘤和生长的调节[J]. 大豆科学, 2014, 33(2): 215 - 218.

[28] 吴冬婷, 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: 670 - 677.

[29] Ferguson R B, Shapiro C A, Dobermann A R, et al. Fertilizer recommendations for soybean [M]. University of Nebraska Lincoln: Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, 2003.