

心土层肥力差异对大豆生长特性及产量的影响

姚春雨¹,王秋菊²,高中超²,张劲松²,刘 峰³

(1. 东北农业大学 资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所,黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 黑龙江省农业科学院,黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要:采用盆栽方法研究了不同肥力心土层及不同施磷量对大豆生长特性和产量的影响。结果表明:随着心土层肥力和施磷量的增加,株高和叶绿素显著增加;干物质积累量不同肥力间无规律性变化,磷肥施用量 120 kg·hm⁻² 的高肥力心土干物质积累量最高,为 116.68 g·盆⁻¹,中肥力心土施磷肥量 180 kg·hm⁻² 的干物质积累量较高,为 107.60 g·盆⁻¹,低肥力施用磷肥 240 kg·hm⁻² 干物质积累量为 103.76 g·盆⁻¹,心土肥力水平与施肥量达到一定关系有利于干物质积累,处理间差异显著;不同肥力心土层大豆垂直根长差异显著,依次为高>中>低肥力处理,根干重、根瘤个数和根瘤干重均与不同肥力心土层和施肥量呈正相关;不同肥力心土大豆产量差异显著,高肥力心土施用 120 kg·hm⁻² 磷肥大豆产量最高,达到 318 g·盆⁻¹;中等肥力施用 180 kg·hm⁻² 磷肥产量次之,为 299.8 g·盆⁻¹;低等肥力施用 240 kg·hm⁻² 磷肥居第三,为 283.5 g·盆⁻¹;不同肥力心土施用适量肥料才能达到最佳效果。
关键词:心土层;肥力;大豆;生育特性;产量
中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2016.05.0776

Effects of Different Subsoil and Phosphate Fertilizing Treatments on Growth Characteristics and Yield of Soybean

YAO Chun-yu¹, WANG Qiu-ju², GAO Zhong-chao², ZHANG Jin-song², LIU Feng³

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150086, China; 2. Soil Fertilizer and Environment Resources Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 3. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: This study mainly aimed to clarify the relationship of different subsoil and fertilizing treatments on growth characteristics and yield of soybean. The result showed that with the increase of subsoil fertility and P fertilizer, the plant height and chlorophyll of soybean increased significantly. There was no difference on dry matter accumulation, the most one was high subsoil with fertilized P 120 kg·ha⁻¹, reached 116.68 g·pot⁻¹, the next one was middle subsoil with fertilized P 180 kg·ha⁻¹ (107.60 g·pot⁻¹), the last one was low subsoil with fertilized P 240 kg·ha⁻¹ (103.76 g·pot⁻¹), it was significantly beneficial for the dry matter accumulation when different subsoil and fertilizing treatments reached a certain relationship. The root length of soybean was shown in decreasing order of high > middle > low, there was a positive correlation between different subsoil and fertilizing treatments on root biomass, root nodule and root nodule dry mass, it was significant on yield of soybean of different subsoil, the most one was high subsoil with fertilized P 120 kg·ha⁻¹ (318 g·pot⁻¹), the next one was middle subsoil with fertilized P 180 kg·ha⁻¹ (299.8 g·pot⁻¹), the last one was low subsoil with fertilized P 240 kg·ha⁻¹ (283.5 g·pot⁻¹).
Keywords: Subsoil; Fertilizer; Soybean; Growth characteristics; Yield

心土层是指表层土下面的土层,是作物生长发育重要的养分、水分储存库^[1]。近年来有关心土养分对作物的影响受到了学者们的广泛关注。刘峰等^[2]研究表明白浆土心土施肥可使大豆增产 15.8%^[3]。匡恩俊等^[4]采用磷、钙培肥白浆土心土,平均增产 15%~20%;心土培肥后增效持久,增产效果年衰减率为 0.66%~1.7%。但是有关于心土培肥在其它土壤上的应用效果研究,尚未见报道。在黑土耕层土壤越用越薄^[5],自然肥力呈现下降的大趋势下^[6],提高心土层肥力是改良和培肥瘠薄黑土农田土壤的重要研究方向。本文以黑龙江省的薄层黑土为研究对象,采用盆栽试验,研究了心土培肥技术在具有不同肥力(高、中、低)心土层的土壤上的应用效果,试图明确心土层肥力与大豆

产量的关系,不同肥力的心土条件下的心土培肥效果,为心土培肥和改良低产的薄层黑土提理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为黑农 68,由黑龙江省农业科学院大豆研究所选育。土壤取自黑龙江省农业科学院科技园区民主乡,土壤为典型黑土,黑土层厚度为 25 cm,其下为黄土层。土壤基本化学性质见表 1。

将表 1 中的黑土与黄土按照一定比例混合配成高、中、低 3 种肥力的心土,不同肥力心土层土壤基本化学性质如表 2 所示。

收稿日期:2016-03-27
基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303126-7);国家“十二五”科技支撑计划(2014BAD11B01-A027);黑龙江省农业科学院创新工程项目。
第一作者简介:姚春雨(1989-),男,硕士,主要从事土壤学研究。E-mail:ycy881225@126.com。
通讯作者:刘峰(1957-),男,研究员,主要从事土壤改良研究。E-mail:liufengjms@163.com。

表 1 供试黑土化学性质
Table 1 Chemical properties of black soil

土壤 Soil	全氮 Total-N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total-P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total-K /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N /(g·kg ⁻¹)	有效磷 Vailable P ₂ O ₅ /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Aailable K /(mg·kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	有机质 O. M. /(g·kg ⁻¹)
黑土 Black soil	1.48	1.56	51.30	69.0	31.46	135.21	6.86	31.5
黄土 Loess	0.67	0.70	28.13	31.7	17.50	94.67	5.48	14.1

表 2 不同肥力心土层土壤化学性质
Table 2 Chemical properties of different subsoil

肥力水平 Fertility level	全氮 Total-N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total-P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total-K /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N /(g·kg ⁻¹)	有效磷 Vailable P ₂ O ₅ /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Aailable K /(mg·kg ⁻¹)	pH	有机质 O. M. /(g·kg ⁻¹)
高 High	0.98	1.02	35.60	49.0	21.45	102.63	6.36	26.8
中 Middle	0.74	0.82	30.88	42.0	18.74	96.54	5.98	21.0
低 Low	0.66	0.65	28.65	31.5	17.69	90.57	5.42	14.0

1.2 试验设计

试验于2015年在黑龙江省农业科学院盆栽场进行,采用二因素试验设计:A因素设3个心土肥力水平,分别为高、中和低肥力;B因素设5个施磷量水平:分别为0,60,120,180和240 kg·hm⁻²,计算单位为五氧化二磷,折合成每盆施用重过磷酸钙(含量46%)分别为0,0.6,1.2,2.4和4.8 g·盆⁻¹。采用盆栽试验进行盆高50 cm,直径为30 cm,先按照试验设计要求将一定量的磷肥与配好的心土层土壤充分混合,装入盆底部,夯实后的深度为20 cm,然后在其上装填耕层土壤(20 cm),耕层土施用基肥2.5 g·盆⁻¹(N:P:K=15:15:15),混施在0~10 cm土层中。8次重复,120盆。

6月1日播种,每盆保苗4株,定量浇水,9月30日收获测产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品测定项目 取土时采集土壤不同土层(0~10 cm,10~20 cm,20~30 cm)土壤样本测定土壤全氮、全磷、全钾、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量、pH。全氮用凯氏定氮法测定,碱解氮用扩散吸收法测定,全磷用HF-硝酸混合消煮,钼锑蓝比色法测定,全钾用HF-硝酸混合消煮、原子吸收分光光度法测定,有效磷测定采用碳酸氢钠提取、钼锑蓝比色法测定,速效钾用盐酸浸提、AAS法测定,有机质用重铬酸钾外加热法测定,pH采用pH计测定^[7]。

1.3.2 植株测定项目 在大豆苗期、开花期和结荚期采用SPAD-501叶绿素仪测定植株叶绿素含量;出苗15 d开始采用皮尺从茎基部至顶部每隔7 d测定植株株高;鼓粒期调查植株黄叶数;于大豆盛花期取盆栽试验的1盆作为样本取样,每盆取3株植株样本,采用烘干法测定地上部植株干物质质量;地下根部用流水缓慢冲洗,冲洗时在根系下面放置100目筛防止损伤根系,测定垂直根长、根干重、根瘤数量、根瘤干重,干重在80℃恒温下烘干12 h后

称重^[8-11];于大豆成熟期测定所有植株产量及产量性状,记录单株荚数、单株粒数、单株茎秆干重、单株籽粒重、产量及相对产量(相对产量为不施用肥料时大豆单位面积的籽粒产量占施用肥料时单位面积的籽粒产量的百分比)。

1.4 数据分析

采用SPSS 19.0和Excel 2010软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同肥力心土层和施磷量对大豆株高的影响

从图1看出,大豆在开花期(7月12日)之前,各处理间株高差异不大,因为大豆的根系还没有下扎到较深土层,开花期后心土层肥力对大豆株高的影响逐渐明显,依次为高>中>低处理。尤其在低肥力心土上随施肥量增加株高增高明显。

2.2 不同肥力心土层和施磷量对大豆叶绿素含量的影响

从图2看出,大豆叶绿素含量为鼓粒期>开花期>苗期;不同心土肥力水平为高肥力>中肥力>低肥力,差异达到显著水平;随着施肥量的增加,叶绿素含量也在增大,达到差异显著水平。

2.3 不同肥力心土层和施磷量对大豆干物质积累的影响

大豆在开花后两周磷供应充足,能增加大豆荚数及粒重,而在始花期磷素供应不足将影响营养体的形成,并延迟生殖器官的形成,因此盛花期是大豆磷营养的最大效率期^[12-13]。图3是盛花期大豆干物质积累量的测定结果。从图3看出,各心土不同肥力水平间干物质积累量差异明显,均表现为高肥力>中肥力>低肥力;高肥力在施用120 kg·hm⁻²肥料时干物质积累量达到最高,为116.68 g·盆⁻¹、中肥力在施用180 kg·hm⁻²肥料时干物质积累量达到最高,为107.60 g·盆⁻¹、低肥力在施用240 kg·hm⁻²肥料时干物质积累量达到最高,为103.76 g·盆⁻¹。

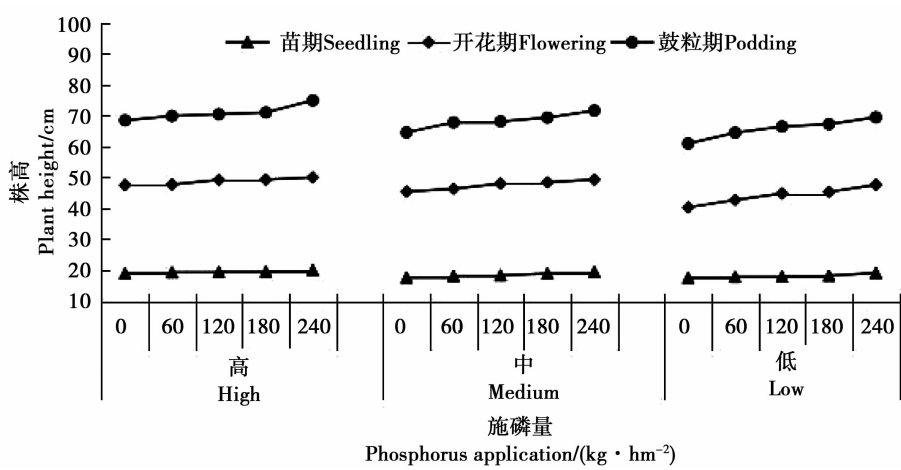


图1 不同肥力心土层和施肥量对大豆株高的影响

Fig. 1 The effect of different subsoil and fertilizing treatments on plant height

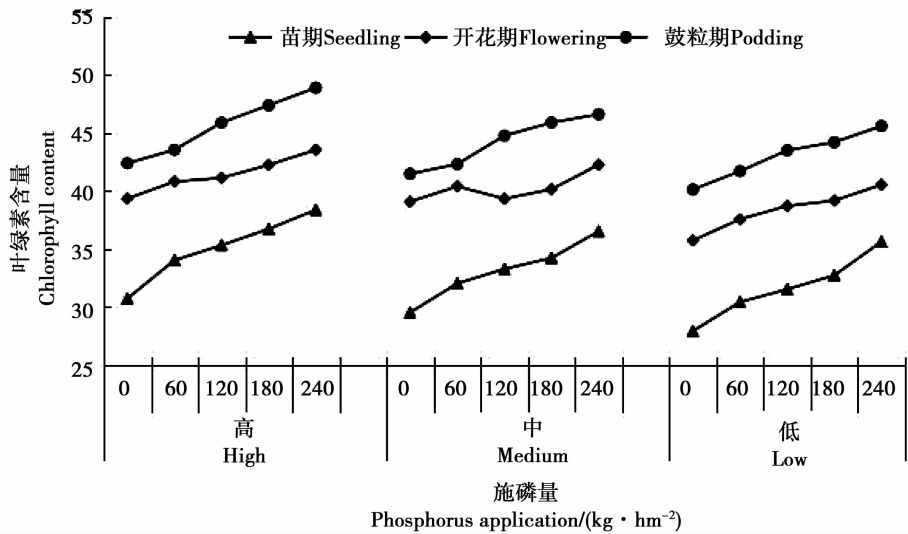
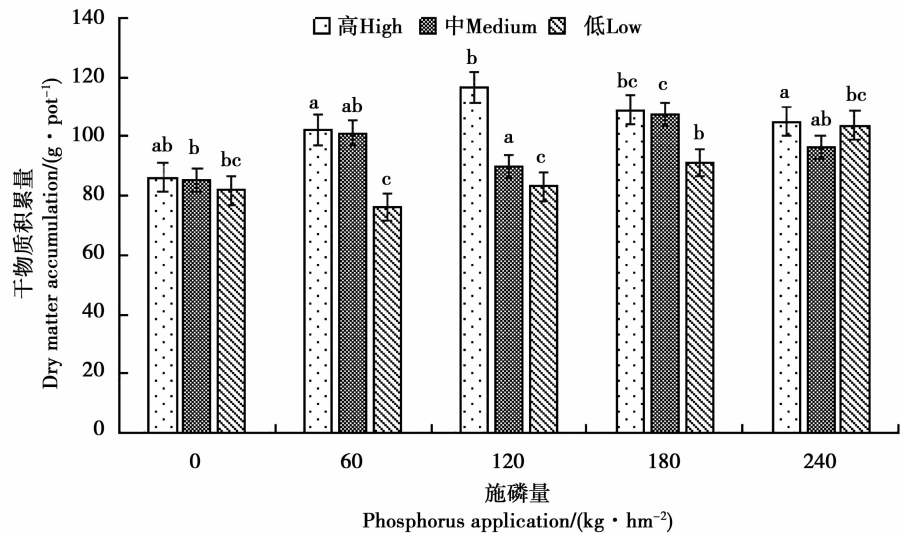


图2 不同肥力心土层和施肥量对大豆叶绿素的影响

Fig. 2 The effect of different subsoil and fertilizing treatments on chlorophyll content of soybean



同一施肥量处理不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Different letters represent significant difference at 0.05 level among the same P application treatments. The same below.

图3 不同肥力心土层和施肥量对大豆干物质积累量的影响

Fig. 3 The effect of different subsoil and fertilizing treatments on dry matter accumulation of soybean

2.4 不同肥力心土层和施磷量对大豆黄叶数影响

图 4 为鼓粒期大豆黄叶数调查结果,总体来看,低肥力心土黄叶数最多,高于中肥力和高肥力,分别为 23,18,17 片·盆⁻¹;不同的施磷量对大豆黄叶数有一定的影响,高中低肥力处理均为施用 120 kg·hm⁻² 磷肥时黄叶数最少。

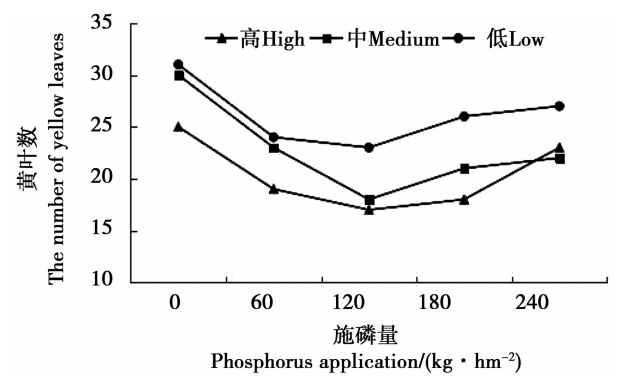


图 4 不同肥力心土层和施肥量对大豆黄叶数的影响
Fig. 4 The effect of different subsoil and fertilizing treatments on yellow leaves of soybean

2.5 不同肥力心土层和施磷量对大豆根系发育影响

从表 3 看出,3 种不同肥力大豆垂直根长、根干重、根瘤数和根瘤干重顺序依次为高>中>低肥力处理,说明心土层肥力的高低对大豆根系生长发育有重要影响;且不同施磷量对大豆根系发育影响明显,高肥力在施用 120 kg·hm⁻² 肥料处理时根系各项指标最高,且不同处理间存在显著性差异。

2.6 不同肥力心土层和施磷量对大豆产量的影响

由表 4 可知,不同心土层肥力处理大豆产量表现为高肥力>中肥力>低肥力。此外,不同施磷量对大豆产量有一定影响,其中高肥力在施 120 kg·hm⁻² 肥料时大豆产量最高,达到 318g·盆⁻¹;中肥力在施 180 kg·hm⁻² 肥料时大豆产量最高,为 299.8 g·盆⁻¹;低肥力施 240 kg·hm⁻² 肥料时大豆产量最高,为 283.5 g·盆⁻¹,不同处理间差异显著。从心土培肥在不同肥力水平土壤上的增产效果看,在低肥力水平土壤上增产效果最佳,之后依次为中肥力和高肥力土壤。由此看出,心土培肥技术应优先在黑土层薄、心土费力低的土壤上应用,才能发挥出其应有的改土和培肥的增产效果。

表 3 不同肥力心土层和施肥量对大豆根系的影响
Table 3 The effect of different subsoil and fertilizing treatments on soybean root of

心土层肥力水平 Fertility level of subsoil	施肥量 Fertilizing amount /(kg·hm ⁻²)	垂直根长 Root length/cm	根干重 Root biomass/g	根瘤个数 Root nodule No.	根瘤干重 Root nodule dry mass/g
高 High	0	60 ± 1.6 ab	2.81 ± 0.07 b	331 ± 5.5 c	0.75 ± 0.09 cd
	60	64 ± 2.7 c	2.94 ± 0.26 ab	393 ± 3.8 b	0.83 ± 0.12 b
	120	70 ± 1.5 a	4.23 ± 0.35 a	396 ± 5.1 a	0.92 ± 0.05 a
	180	63 ± 5.1 bc	3.18 ± 0.32 d	356 ± 4.4 ab	0.89 ± 0.09 b
	240	60 ± 2.8 b	2.67 ± 0.18 ab	324 ± 4.8 c	0.87 ± 0.09 bc
平均值 Mean	/	63 ± 3.7 a	3.17 ± 0.23 a	360 ± 4.7 a	0.85 ± 0.08 a
中 Middle	0	57 ± 2.0 ab	2.30 ± 0.08 ce	243 ± 5.4 ad	0.65 ± 0.03 b
	60	59 ± 1.1 bc	2.79 ± 0.34 c	256 ± 4.3 ad	0.73 ± 0.04 d
	120	61 ± 2.2 b	3.22 ± 0.12 c	272 ± 4.8 b	0.69 ± 0.07 c
	180	67 ± 1.5 a	3.39 ± 0.24 a	352 ± 5.9 a	0.77 ± 0.07 a
	240	59 ± 1.7 de	2.56 ± 0.32 ab	260 ± 4.2 ab	0.73 ± 0.04 b
平均值 Mean	/	61 ± 1.7 ab	2.85 ± 0.22 b	276 ± 4.9 b	0.71 ± 0.03 b
低 Low	0	51 ± 3.5 d	2.07 ± 0.33 ab	228 ± 3.5 ac	0.55 ± 0.05 bc
	60	55 ± 3.0 c	2.45 ± 0.16 be	236 ± 3.7 ad	0.64 ± 0.02 c
	120	56 ± 2.4 ab	2.52 ± 0.24 cb	259 ± 4.7 b	0.64 ± 0.03 c
	180	57 ± 1.5 bc	3.05 ± 0.13 bc	272 ± 2.3 b	0.59 ± 0.05 b
	240	65 ± 1.2 a	3.12 ± 0.08 a	288 ± 4.3 a	0.73 ± 0.06 a
平均值 Mean	/	57 ± 2.3 b	2.64 ± 0.18 b	257 ± 3.7 b	0.63 ± 0.04 c

表中数据是 5 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 5 replicates, different letters indicate significant difference at 0.05 level, the same below.

表 4 不同肥力心土层和施肥量对大豆产量的影响

Table 4 The effect of different subsoil and fertilizing treatments on yield of soybean

心土肥力水平 Fertility level of subsoil	施肥量 Fertilizing amount /(kg·hm ⁻²)	单株荚数 Pods per plant	单株粒数 Seeds per plant	产量 Yield/(g·pot ⁻¹)	相对产量 Relative yield/%
高 High	0	44.7±1.5 bc	83.7±1.8 bc	293.1±1.7 c	100
	60	47.5±1.5 b	89.8±0.1 cd	291.5±1.4 bc	99.5
	120	50.3±1.0 a	107.1±2.1 a	318.0±2.2 a	108.5
	180	45.9±1.7 bd	92.5±2.6 b	310.3±2.7 b	105.9
	240	44.5±1.0 ae	90.9±2.7 c	278.1±2.3 ad	94.9
平均值 Mean	/	46.5±1.1 a	92.8±1.8 a	298.1±2.1 a	/
中 Medium	0	42.6±1.4 d	75.8±0.6 bd	267.8±2.2 bd	100
	60	43.4±1.6 b	82.0±1.5 b	271.8±0.8 ab	101.1
	120	44.0±1.5 c	85.2±0.8 c	275.7±2.6 c	102.9
	180	46.0±1.1 a	99.3±2.4 a	299.8±2.1 a	111.9
	240	43.2±0.5 d	71.4±1.5 ac	277.2±2.0 ac	103.6
平均值 Mean	/	43.8±1.2 b	82.7±1.3 b	278.4±1.9 ab	/
低 Low	0	41.8±1.8 de	72.6±2.7 be	248.4±3.2 ad	100
	60	42.6±0.9 d	74.9±1.2 c	250.5±3.7 ac	100.8
	120	43.4±1.0 c	79.4±2.3 b	269.4±1.6 c	108.3
	180	44.7±2.0 b	81.3±3.6 ac	280.4±1.8 b	112.8
	240	45.1±1.2 a	96.4±1.3 a	283.5±2.1 a	113.9
平均值 Mean	/	43.5±1.3 b	80.9±2.2 ab	266.4±2.4 b	/

3 结论与讨论

在不同肥力心土层及不同施磷量处理下,大豆的株高、叶绿素含量、黄叶数、干物质积累量、根系指标以及大豆产量均存在一定差异。大豆开花期后心土层肥力对大豆株高的影响逐渐明显,尤其低肥力心土上随施肥量增加株高增高。大豆叶绿素含量,结荚期>开花期>苗期;不同心土肥力水平大豆叶绿素含量,依次为高肥力>中肥力>低肥力,差异显著;叶绿素含量随施肥量增加而增加,差异显著,与前人研究规律一致^[14]。

韩晓增等^[15-17]研究表明,土壤的有效磷度决定大豆植株体内干物质积累量的多少。本试验中,心土层肥力的不同和施用磷肥量的不同导致盛花期大豆干物质积累量差异明显。在不同处理下,大豆干物质积累量高肥力水平心土施用120 kg·hm⁻²磷肥最高,中肥力水平心土施用180 kg·hm⁻²磷肥次之,低肥力水平心土施用240 kg·hm⁻²磷肥最低,并不是施肥量越高越有利于干物质积累,而是与土壤心土肥力有一定关系,施肥量的多少要根据土壤条件来制定,过量施肥并不能达到效果,反而造成肥料的固定或损失。低、中、高肥力处理鼓粒期黄叶数分别为23,18,17片·盆⁻¹,表明不同的施磷量对

大豆黄叶数有一定的影响,要根据土壤条件来制定施肥量调节黄叶数。

本研究表明心土肥力对大豆根系发育、根瘤生长有重要影响;心土培肥的最佳施肥量与大豆根系发育关系为,高肥力心土的施肥量为120 kg·hm⁻²,中肥力为180 kg·hm⁻²,低肥力为240 kg·hm⁻²,差异性显著,与前人研究规律一致^[18-20]。表明心土层肥力水平直接影响大豆根系发育及分布形态,土层深度及深层土壤的养分状况是促进根系向下伸展的重要因素。因此,心土层土壤条件及肥力水平对作物根系生长、养分吸收至关重要,直接决定产量的形成。从产量上看,高肥力心土大豆产量最高,中肥力次之,低肥力最低;高肥力心土施肥量为120 kg·hm⁻²时可获得最高的大豆产量,中肥力和低肥力则分别施肥180,240 kg·hm⁻²时获得最高大豆产量,表明适宜的施肥量才会获得高产;从心土培肥增产效果看,在低肥力水平土壤上心土培肥增产效果最佳,因此,心土培肥优先在黑土层薄、心土肥力低的土壤上才能发挥好的改土增产效果。

参考文献

[1] 赵德林,刘峰. 心土混层耕改良白浆土效果的研究[J]. 中国

农业科学,1994,27(4):37-44. (Zhao D L,Liu F. Study on improvement of subsoil layer mixing Albicbleached soil effect [J]. Scientia Agricultura Sinica,1994,27(4):37-44.)

[2] 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.)。

[3] 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.)

[4] 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.)

[5] 孟凯,张兴义. 松嫩平原黑土退化的机理及其生态复原[J]. 土壤通报,1998(3):100-102. (Meng K,Zhang X Y. The mechanism and ecological restoration of degraded soil in Songnen Plain [J]. Chinese Journal of Soil Science,1998(3):100-102.)

[6] 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 Geographica Sinica,2013(3):361-365.)

[7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999. (Lu R K. Analysis technique of soil agricultural chemistry [M]. Beijing:China Agriculture Science and Technology Press,1999.)

[8] 梁泉,廖红,严小龙. 植物根构型的定量分析[J]. 地理科学,2007,24(6):695-701. (Liang Q,Liao H,Yan X L. Quantitative analysis of plant root architecture [J]. Chinese Bulletin of Botany,2007,24(6):695-701.)

[9] 韩晓增,苗淑杰. 连作对大豆根瘤形成和固氮功能影响的研究展望[J]. 大豆通报,2007(1):43-45. (Han X Z,Miao S J. Prospects of the research on how continuous cropping affected nodulation and nitrogen fixation in soybean [J]. Soybean Bulletin,2007(1):43-45.)

[10] 刘忠堂,于龙生. 重迎茬对大豆产量及品质的影响研究[J]. 大豆科学,2000,19(3):229-237. (Liu Z T,Yu L S. Study on the influence of successive alternative cropping on soybean yield and quality [J]. Soybean Science,2000,19(3):229-237.)

[11] 杜长玉,胡亚祥,胡兴国,等. 不同肥料对大豆连作效果的研究[J]. 内蒙古农业科技,2006(3):20-21. (Du C Y,Hu Y X,Hu X G,et al. Study on the influence of different fertilizer on continuous soybeans [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology,2006(3):20-21.)

[12] 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]. 植物营养与肥科学报,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.)

[13] 谷思玉,王宁娟,陈渊,等. 不同开垦年限农田黑土磷素形态及数量变化[J]. 土壤,2014,46(4):662-668. (Gu S Y,Wang N J,Chen Y,et al. Changes of phosphorus form and quantity of black soil in farmland with different reclamation years [J]. Soil,2014,46(4):662-668.)

[14] 匡恩俊,刘峰,高中超. 黑土层厚度及心土培肥对大豆产量的影响[J]. 大豆科学,2012,31(2):266-269. (Kuang E J,Liu F,Gao Z C. Effects of black soil depth and subsoil fertilizing on soybean yield [J]. Soybean Science,2012,31(2):266-269.)

[15] 韩晓增,王凤仙,王凤菊,等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(1):66-71. (Han X Z,Wang F X,Wang F J,et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2010,28(1):66-70.)

[16] 周宝库,张喜林. 黑土长期施肥对农作物产量的影响[J]. 农业系统科学与综合研究,2005,21(1):31-39. (Zhou B K,Zhang X L. Effect of long-term fertilization on crop yield in black soil [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture,2005,21(1):31-39.)

[17] 温延臣,李燕青,袁亮,等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价力法[J]. 农业工程学报,2015,31(7):91-99. (Wen Y C,Li Y Q,Yuan L,et al. The comprehensive evaluation method of soil fertility characteristics of long term different fertilization systems [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(7):91-99.)

[18] 姚琳,徐克章,张治安,等. 吉林省不同年代育成大豆品种根瘤数量、鲜重和体积的变化[J]. 中国油料作物学报,2009,31(2):196-201. (Yao L,Xu K Z,Zhang Z A,et al. Nodule number fresh weight and volume of soybean cultivars over the years in Jilin province [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2009,31(2):196-201.)

[19] 乔云发,韩晓增. 长期定量施肥对大豆根系形态和根瘤性状的影响[J]. 大豆科学,2011,30(1):119-122. (Qiao Y F,Han X Z. Effects of long-term fertilization on root phenotype and nodulation of soybean [J]. Soybean Science,2011,30(1):119-122.)

[20] 梁泉,廖红,严小龙. 植物根构型的定量分析[J]. 植物学通报,2007,24(6):695-702. (Liang Q,Liao H,Yan X L. Quantitative analysis of plant root architecture [J]. Chinese Bulletin of Botany,2007,24(6):695-702.)