



不同氮磷钾水平对夏大豆产量与品质的影响

蒋龙刚^{1,2}, 史建硕^{1,2}, 郭 丽^{1,2}, 任燕利^{1,2}, 潘丽佳^{1,3}, 王丽英^{1,2}

(1. 河北省农林科学院 农业资源环境研究所, 河北 石家庄 050051; 2. 河北省肥料技术创新中心, 河北 石家庄 050051; 3. 河北农业大学 经济管理学院, 河北 保定 071000)

摘 要:为明确河北地区不同氮磷钾水平对夏大豆产量与品质的影响,以大豆品种冀豆 17 为供试材料,在河北省农林科学院大河试验站设置不同的氮磷钾用量水平田间试验,分析不同氮磷钾水平对夏大豆收获期土壤养分含量、产量及其构成要素和品质的影响。结果表明:收获期 0~20 cm 土层速效氮、磷、钾含量分别为 7.55~9.62 mg·kg⁻¹、14.0~27.2 mg·kg⁻¹、139~218 mg·kg⁻¹;与缺素处理相比,施氮、磷、钾使 0~20 cm 土层硝态氮、速效磷、速效钾分别增加 16.8%~25.2%、34.3%~93.6%、18.7%~62.6%。土壤速效氮含量较低时,施氮使大豆单株有效荚数、单株粒数和产量显著增加,增幅分别为 15.6%~43.8%、13.7%~42.8%和 12.2%~29.4%,且大豆产量与施氮量(0~195 kg·hm⁻²)显著正相关;施氮使大豆籽粒蛋白质含量增加 1.31%~3.39%、脂肪含量降低 2.55%~3.40%,大豆籽粒蛋白质含量随着施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势。土壤速效磷、钾含量处于中等及以上水平时,施磷和钾使大豆单株有效荚数、单株粒数、产量分别增加 7.57%~10.3%、2.70%~6.31%、1.56%~4.34%和 1.06%~1.69%、1.83%~7.34%、6.03%~6.81%,大豆产量随着施磷量的增加呈现先增加后降低的趋势;施磷、钾对大豆籽粒蛋白质和脂肪含量无显著影响。

关键词:大豆;氮磷钾水平;土壤养分;产量构成要素;产量;品质

Effects of Different N,P,K Levels on Yield and Quality of Summer Soybean

JIANG Long-gang^{1,2}, SHI Jian-shuo^{1,2}, GUO Li^{1,2}, REN Yan-li^{1,2}, PAN Li-jia^{1,3}, WANG Li-ying^{1,2}

(1. Institute of Agriculture Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 2. Hebei Fertilizer Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050051, China; 3. College of Economics and Management, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: With soybean variety Jidou 17 as the experimental material, the field experiment was conducted at Dahe Experimental Station of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences to analyze the effects of different N,P,K levels on soil nutrient content, yield, components of soybean yield and quality during summer soybean harvest, so as to determine the effects of different N,P,K levels on the yield and quality of summer soybean in Hebei. The results showed that: During the harvest period, the contents of available N, P and K in 0–20 cm soil layer were 7.55–9.62 mg·kg⁻¹, 14.0–27.2 mg·kg⁻¹ and 139–218 mg·kg⁻¹ respectively. Compared with no fertilization treatment, N, P and K application increased nitrate–N, available P and available K in 0–20 cm soil layers by 16.8%–25.2%, 34.3%–93.6% and 18.7%–62.6% respectively. When the soil available N content was low, N application significantly increased the effective pods number per plant, seeds number per plant and soybean yield by 15.6%–43.8%, 13.7%–42.8% and 12.2%–29.4% respectively, and soybean yield was significantly positively correlated with N application (0–195 kg·hm⁻²). N application increased the protein content of soybean seeds by 1.31%–3.39%, and decreased the fat content by 2.55%–3.40%. With the increase of N application rate, the protein content of soybean seeds increased firstly and then decreased. When the content of available P and K in soil was at medium or above level, the number of effective pods number per plant, seeds number per plant and yield of soybean increased by 7.57%–10.3%, 2.70%–6.31%, 1.56%–4.34% and 1.06%–1.69%, 1.83%–7.34%, 6.03%–6.81% respectively with P and K application. The soybean yield increased firstly and then decreased with the increase of P application, P and K application had no significant effect on protein and fat content of soybean seeds.

Keywords: soybean; N,P,K levels; soil nutrient; components of yield; yield; quality

大豆是重要的油料经济作物,是人类植物蛋白质和脂肪的重要来源,在人们的日常饮食中占有非常重要的位置。我国人口众多,对大豆的需求量巨大,然而我国的大豆总产和单产均较低,无法满足人们对大豆的需求,2021 年大豆进口量占需求量的

85.4%^[1]。为满足我国对大豆规划布局要求,河北省加快发展推广夏大豆种植,但大豆单产较低,2020 年平均产量 2 493 kg·hm⁻²^[2],经济效益明显低于玉米等夏季作物,农户种植大豆的积极性并不高^[3]。因此,为了提高我国大豆产能,提高河北省

收稿日期:2022-10-09

基金项目:河北省现代农业产业体系项目(HBCT2019190205);河北省自然科学基金创新群体研究项目(C2020301020)。

第一作者:蒋龙刚(1991—),男,硕士,助理研究员,主要从事作物养分管理研究。E-mail:1490768260@qq.com。

通讯作者:王丽英(1977—),女,博士,研究员,主要从事植物营养与新型肥料研究。E-mail:wangliying5@163.com。

大豆的产量与品质显得尤为重要。氮磷钾是大豆生长和高产必需的大量营养元素^[4-5],养分供应不足和不平衡是限制我国大豆高产的重要因素,常规认为大豆根瘤菌具有固氮能力,实际生产中对氮素的投入很少,甚至不施氮肥^[6]。同时,基于农户施肥调研发现,河北区域大豆生产过程中仅施用 300 kg·hm⁻²平衡复合肥(15-15-15)或大豆专用复合肥(16-18-11),氮磷钾肥的投入较少。高籽粒蛋白含量导致大豆有较高的氮需求,大豆根瘤固氮量占总氮吸收量的 50%~60%,仅靠根瘤固氮远远不能满足大豆对氮素的需要,必须施以足够的氮肥^[7-8];磷素不仅可以有效改善大豆植株生理特性、提高矿质元素的吸收利用^[9],还能促进大豆根瘤菌结瘤固氮,缺磷会限制结瘤和固氮能力,导致作物减产^[10-11];钾素不仅能促进大豆硝酸还原酶的活性,提高氮的代谢速率^[12],还能提高光合速率和增强茎秆的强度^[13-14]。因此合理平衡施用氮磷钾可有效提高大豆产量和品质^[6,15-16]。大豆籽粒的产量和品质还受遗传(品种)与环境(气候、温度、水分、地域)因子协同作用的影响,氮磷钾肥对大豆籽粒产量和品质影响的研究很多,因不同地区种植不同品种大豆导致试验结论并不一致^[5,17]。目前河北区域不同氮磷钾水平对大豆产量与品质的影响还不明确。因此,本研究以大豆品种冀豆 17 为材料,通过设置不同氮磷钾水平,研究其对大豆籽粒产量和品质的影响,为进一步明确河北地区适宜大豆施肥量,从而为实现大豆高产高效提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北省石家庄市鹿泉区河北省农林科学院大河试验站,该地区位于华北平原山前平原(114°23'00''E,38°07'32''N),属暖温带大陆性季风气候,常年大豆生育期间降雨量 350~550 mm,土壤类型为黏壤质洪冲积石灰性褐土,耕层土壤有机质为 11.8 g·kg⁻¹、硝态氮为 16.2 mg·kg⁻¹、有效磷为 18.6 mg·kg⁻¹、速效钾为 150 mg·kg⁻¹、pH7.93。

1.2 材料

供试大豆品种为冀豆 17,中熟品种,株高 100 cm 左右,亚有限结荚习性,抗病毒能力强,为河北地区主推品种之一。供试肥料为尿素(河北阳煤正元化工集团有限公司,N 46%)、磷酸二铵(云南三环中化化肥有限公司,N 18%、P₂O₅46%)、过磷酸钙(河北省矾山磷矿有限公司,P₂O₅18%)、氯化钾(乌拉

尔钾肥股份公司,K₂O 62%),磷、钾肥全部基施,60%氮肥基施,40%氮肥在结荚期追施。施肥方式为基肥深施、追肥撒施。

1.3 试验设计

试验于 2021 年进行,共设计 11 个处理。设置 5 个氮(N)水平:0,52.5,105,150,195 kg·hm⁻²;设置 4 个磷(P₂O₅)水平:0,50,100,150 kg·hm⁻²;设置 4 个钾(K₂O)水平:0,75,150,225 kg·hm⁻²。试验处理及施肥量详见表 1。试验采取随机区组排列,3 次重复,小区面积 72 m²,18 行区,行长为 8 m。种植制度为冬小麦—夏大豆轮作,大豆播种量为 150 kg·hm⁻²,行距为 0.5 m,株距为 10 cm,密度约为 18 万株·hm⁻²左右,田间管理与当地农户一致,小麦季处理间施肥量相同。

表 1 试验处理及施肥量			
Table 1 Treatments and fertilization amount			
处理 Treatment	施氮量 N / (kg·hm ⁻²)	施磷量 P/ (kg·hm ⁻²)	施钾量 K/ (kg·hm ⁻²)
N0P2K2	0	100	150
N1P2K2	52.5	100	150
N2P0K2	105	0	150
N2P1K2	105	50	150
N2P2K0	105	100	0
N2P2K1	105	100	75
N2P2K2	105	100	150
N2P2K3	105	100	225
N2P3K2	105	150	150
N3P2K2	150	100	150
N4P2K2	195	100	150

1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤样品 试验收获时采集 0~40 cm 的土层,每 20 cm 为一层,每个土样按照“S”形取 5 个点并混合均匀。其中一部分新鲜土样用于测定土壤水分、硝态氮含量,另外一部分土样风干并研磨,过 1 mm 筛,保存待测。使用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提土壤硝态氮,使用紫外分光光度法测定含量;使用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提土壤速效磷,采用钼锑抗比色法测定含量;使用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提土壤速效钾,使用火焰光度计测定含量^[18]。

1.4.2 植物样品 在大豆成熟时,在每个小区避开边界随机选取两个 4 行 1 m 长的样方,作为计产样品,风干脱粒后进行称重,65 ℃烘干至恒重,测定含水量,计算大豆籽粒产量(以含水量 13% 计产)。同

时,在每个小区随机采集 20 株大豆植株进行考种。采用 Perten-DA7200 近红外分析仪测定籽粒蛋白质和脂肪含量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 处理数据,使用 SAS(v8.2,SAS Institute Inc.)进行显著性分析(LSD 法, $P\leq0.05$)。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾水平对大豆收获期土壤养分含量影响

2.1.1 土壤硝态氮 大豆收获期 0~40 cm 土层硝态氮测定结果如表 2 所示,与不施氮相比,施氮量 105,150 和 195 kg·hm⁻² 处理均可显著增加 0~20 cm 土层硝态氮含量,其增幅分别为 25.2%、21.9% 和 24.5%,在 20~40 cm 土层中,仅施氮量 195 kg·hm⁻² 处理硝态氮含量较不施氮处理显著增加 79.7%。不同施磷量和施钾量处理中,仅施磷量 50 kg·hm⁻² 处理 0~20 cm 土层硝态氮含量较不施磷处理显著增加 19.4%,其它施磷或钾处理 0~40 cm 土层硝态氮含量较不施磷或钾处理均未增加。同时所有处理 0~40 cm 土层硝态氮含量均较低,0~20 cm 土层硝态氮含量为 7.55~9.62 mg·kg⁻¹,20~40 cm 土层硝态氮含量为 2.36~4.24 mg·kg⁻¹,主要由于大豆生育期间降雨频繁且雨量过大(降雨量

高达 907 mm),导致硝态氮淋溶至深层。
2.1.2 土壤速效磷 大豆收获期 0~40 cm 土层速效磷结果如表 2 所示,与不施磷相比,施磷量 100 和 150 kg·hm⁻² 处理 0~20 cm 土层速效磷分别显著增加 87.9% 和 93.6%,在 20~40 cm 土层中,施磷未使速效磷含量显著增加。与不施氮或钾相比,施氮或钾处理未使 0~40 cm 土层速效磷含量显著增加。不施磷处理土壤速效磷含量较试验前(18.6 mg·kg⁻¹)降低了 24.7%。同时,0~20 cm 土层速效磷含量范围为 14.0~27.2 mg·kg⁻¹,速效磷含量总体处于中等及以上水平。
2.1.3 土壤速效钾 如表 2 所示,施钾可显著影响大豆收获期 0~20 cm 土层速效钾含量。与不施钾相比,施钾量 75,150 和 225 kg·hm⁻² 处理均使 0~20 cm 土层速效钾含量显著增加,其增幅分别为 18.7%、56.8% 和 62.6%;在 20~40 cm 土层中,施钾处理速效钾含量未显著增加。与不施氮或磷处理相比,施氮或磷处理 0~40 cm 土层速效钾含量未显著增加。不施钾处理土壤速效钾含量较试验前(150 mg·kg⁻¹)降低了 7.33%。0~40 cm 土层速效钾含量较丰富,0~20 cm 土层速效钾含量为 139~218 mg·kg⁻¹,20~40 cm 土层速效钾含量为 93~109 mg·kg⁻¹。

表 2 不同氮磷钾水平下大豆收获期 0~40 cm 土层养分含量

Table 2 Nutrient content in 0-40 cm soil layer of soybean at harvest time under different N,P,K levels							
处理 Treatment		硝态氮		速效磷		速效钾	
		Nitrate-N/(mg·kg ⁻¹)		Available P/(mg·kg ⁻¹)		Available K/(mg·kg ⁻¹)	
		0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
N	N0P2K2	7.55 ± 0.14 b	2.36 ± 0.06 b	26.8 ± 5.97 a	4.95 ± 1.13 a	205 ± 18.4 a	109 ± 0.69 a
	N1P2K2	8.82 ± 0.57 ab	3.45 ± 0.29 ab	27.2 ± 1.73 a	4.83 ± 0.27 a	214 ± 13.0 a	104 ± 6.35 a
	N2P2K2	9.46 ± 0.69 a	2.96 ± 0.22 ab	26.3 ± 5.33 a	4.43 ± 0.77 a	218 ± 21.9 a	101 ± 7.99 a
	N3P2K2	9.20 ± 0.21 a	3.32 ± 0.35 ab	27.1 ± 3.58 a	4.73 ± 0.51 a	206 ± 14.5 a	105 ± 5.11 a
	N4P2K2	9.40 ± 0.22 a	4.24 ± 0.27 a	22.3 ± 1.99 a	4.75 ± 0.61 a	211 ± 10.1 a	101 ± 3.20 a
P	N2P0K2	8.06 ± 0.38 b	2.99 ± 0.08 a	14.0 ± 0.57 b	4.30 ± 0.12 a	200 ± 26.3 a	100 ± 6.04 a
	N2P1K2	9.62 ± 0.29 a	2.44 ± 0.07 a	18.8 ± 0.12 ab	4.03 ± 0.47 a	207 ± 18.1 a	93 ± 6.66 a
	N2P2K2	9.46 ± 0.69 ab	2.96 ± 0.12 a	26.3 ± 3.33 a	4.43 ± 0.77 a	218 ± 21.9 a	101 ± 7.99 a
	N2P3K2	9.20 ± 1.45 ab	3.01 ± 0.14 a	27.1 ± 0.98 a	4.28 ± 0.26 a	198 ± 5.00 a	102 ± 5.60 a
K	N2P2K0	8.23 ± 0.39 a	2.86 ± 0.34 a	26.4 ± 1.45 a	4.48 ± 0.11 a	139 ± 15.6 c	97 ± 4.16 a
	N2P2K1	8.94 ± 0.36 a	2.65 ± 0.29 a	26.4 ± 0.58 a	4.58 ± 0.71 a	165 ± 16.4 b	106 ± 2.23 a
	N2P2K2	9.46 ± 0.69 a	2.96 ± 0.22 a	26.3 ± 2.33 a	4.43 ± 0.77 a	218 ± 21.9 a	101 ± 7.99 a
	N2P2K3	9.29 ± 1.18 a	3.18 ± 0.24 a	26.9 ± 1.40 a	4.85 ± 0.32 a	226 ± 16.5 a	100 ± 5.29 a

注:同列同组数据后的不同字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。
Note: Different lowercase after the values in the same column show significant difference among treatments at $P<0.05$. The same below.

2.2 氮磷钾水平对大豆产量构成要素的影响

2.2.1 不同氮素水平 如表 3 所示,施氮对大豆单株有效荚数和单株粒数有显著影响,而对百粒重无显著性影响。与不施氮相比,施氮量 52.5,105,150,195 kg·hm⁻²处理均显著增加大豆单株有效荚数和单株粒数,其增幅分别为 15.6%、25.2%、33.0%、43.8% 和 13.7%、22.5%、36.9%、42.8%。施氮处理间施氮量 195 kg·hm⁻²的单株有效荚数显著高于施氮量 52.5 kg·hm⁻²,其增幅为 24.3%,而与其他处理无显著差异。施氮处理间施氮量 150 和 195 kg·hm⁻²的单株粒数显著高于施氮量 52.5 kg·hm⁻²,其增幅分别为 20.6% 和 25.2%,而与施氮量 105 kg·hm⁻²无显著差异。可见,在土壤速效氮含量较低的情况下,增施氮肥可有效增加大豆单株有效荚数和单株粒数。

表 3 不同氮磷钾水平下大豆产量构成要素

Table 3 Components of soybean yield under different N,P,K levels

处理		单株有效荚数	单株粒数	百粒重
Treatment		Effective pods number per plant	Seeds number per plant	100-seed weight/g
N	N0P2K2	38.4 ± 1.60 c	94 ± 1.79 c	19.3 ± 0.29 a
	N1P2K2	44.4 ± 5.55 b	107 ± 8.03 b	19.3 ± 0.53 a
	N2P2K2	48.1 ± 1.91 ab	115 ± 3.85 ab	19.5 ± 1.05 a
	N3P2K2	51.1 ± 3.97 ab	129 ± 5.43 a	19.6 ± 0.35 a
	N4P2K2	55.2 ± 5.03 a	134 ± 3.50 a	19.2 ± 0.56 a
P	N2P0K2	43.6 ± 3.35 b	111 ± 7.19 a	19.0 ± 0.93 ab
	N2P1K2	47.7 ± 3.91 a	114 ± 8.93 a	19.4 ± 0.44 a
	N2P2K2	48.1 ± 1.10 a	115 ± 3.85 a	19.5 ± 1.05 a
	N2P3K2	46.9 ± 3.61 ab	118 ± 8.20 a	18.4 ± 0.67 b
K	N2P2K0	47.3 ± 1.77 a	109 ± 3.79 a	18.9 ± 0.60 a
	N2P2K1	47.8 ± 3.51 a	111 ± 8.66 a	18.8 ± 0.59 a
	N2P2K2	48.1 ± 1.10 a	115 ± 3.85 a	19.5 ± 1.05 a
	N2P2K3	48.0 ± 2.08 a	117 ± 6.81 a	19.0 ± 0.35 a

2.2.2 不同磷素水平 如表 3 所示,与不施磷相比,施磷量 50,100,150 kg·hm⁻²处理的大豆单株有效荚数和单株粒数分别增加 9.40%、10.3%、7.57% 和 2.70%、3.60%、6.31%,除施磷量 50,100 kg·hm⁻²处理的大豆单株有效荚数差异显著外,其余均差异不显著。施磷处理的百粒重与不施磷没有显著差异,但施磷处理间施磷量 50 和 100 kg·hm⁻²的百粒重较施磷量 150 kg·hm⁻²显著增加,其增幅分别为

5.43% 和 5.98%。可见,在土壤速效磷含量不缺乏的情况下,施用适宜用量的磷肥可有效增加大豆单株有效荚数,而施高量磷肥反而会减少大豆百粒重。

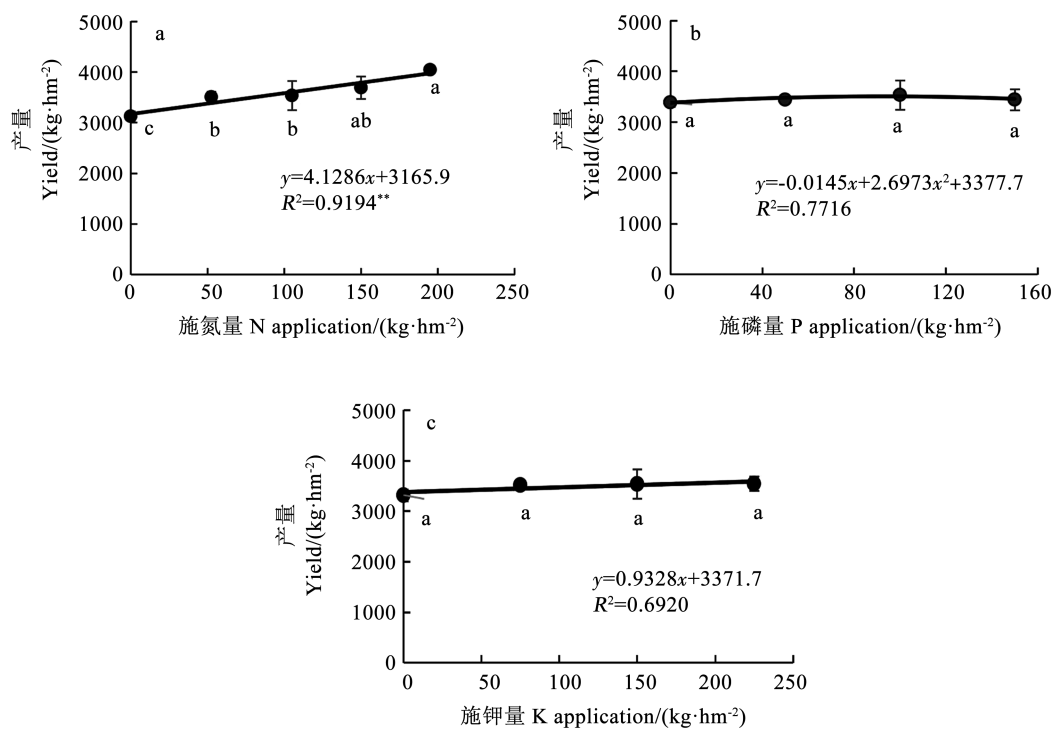
2.2.3 不同钾素水平 如表 3 所示,施钾处理的大豆单株有效荚数、单株粒数较不施钾处理分别增加 1.06%~1.69%、1.83%~7.34%,但差异不显著,这或许与土壤速效钾含量较丰富有关。可见,在土壤速效钾含量较丰富的情况下,施钾并不能有效增加大豆单株有效荚数和单株粒数。

2.3 氮磷钾水平对大豆产量的影响

2.3.1 不同氮素水平 如图 1a 所示,施用氮肥对大豆产量有显著影响,与不施氮相比,施氮显著提高了大豆产量。施氮量为 52.5,105,150 和 195 kg·hm⁻²处理的大豆产量分别为 3 508,3 536,3 691 和 4 044 kg·hm⁻²,较不施氮(3 126 kg·hm⁻²)处理分别显著增加 12.2%、13.1%、18.1% 和 29.4%。施氮量 195 kg·hm⁻²处理产量显著高于施氮 52.5,105 和 150 kg·hm⁻²,其增幅分别为 15.3%、14.4% 和 9.6%,而施氮 52.5,105 和 150 kg·hm⁻²处理间无显著性差异。回归分析表明,大豆产量与施氮量显著正相关。可见,在土壤速效氮含量较低的情况下,增施氮肥可有效提高大豆的产量。

2.3.2 不同磷素水平 如图 1b 所示,施磷对大豆产量没有显著影响。施磷量 0,50,100 和 150 kg·hm⁻²处理的大豆产量分别为 3 389,3 442,3 536 和 3 444 kg·hm⁻²,处理间无显著差异。这或许是因为土壤速效磷含量并不低,大豆生育期间对磷素并不缺乏,致使产量没有出现显著差异。回归分析表明,大豆产量随着施磷量的增加呈现先增加后降低的趋势,在施磷量为 92 kg·hm⁻²时,大豆产量可达到最高值。可见,在土壤速效磷含量中等水平下,施用适量的磷肥可促进大豆高产。

2.3.3 不同钾素水平 如图 1c 所示,施钾对大豆产量没有显著影响。施钾量 0,75,150 和 225 kg·hm⁻²处理的大豆产量分别为 3 315,3 515,3 536 和 3 541 kg·hm⁻²,处理间无显著差异。这可能是因为土壤速效钾含量较丰富,导致施钾并没有显著提高大豆产量。回归分析表明,大豆产量随着施钾量的增加而增加,但并没有呈现显著正相关。可见,在土壤速效钾含量丰富且前季小麦秸秆还田的情况下,施钾不会显著提升大豆产量,且施用高量的钾肥也不会使大豆减产。



注: ** 表示显著相关。
Note: ** means significant relation.

图1 不同氮磷钾水平下大豆产量
Fig.1 Soybean yield under different N,P and K levels

2.4 氮磷钾水平对大豆籽粒品质的影响

2.4.1 蛋白质含量 如表4所示,施氮可显著影响大豆籽粒蛋白质含量,而施磷、钾对大豆籽粒蛋白质含量没有显著影响。与不施氮相比,施氮量 52.5, 105,150 和 195 kg·hm⁻²处理的大豆籽粒蛋白质含量分别增加 1.31%、3.13%、3.39% 和 1.57%,施氮量 105,150 kg·hm⁻²处理的大豆籽粒蛋白质含量差异显著,其余施氮处理差异不显著。同时随着施氮量的增加,大豆籽粒蛋白质含量呈现出先增加后降低的趋势,施用适宜用量的氮肥可提高大豆籽粒蛋白质含量,过高或过低的氮素施入不利于蛋白质含量的增加。

2.4.2 脂肪含量 如表4所示,施氮可显著影响大豆籽粒脂肪含量,而施磷、钾对大豆籽粒脂肪含量没有显著影响。施氮量 52.5,105,150 和 195 kg·hm⁻²处理的大豆籽粒脂肪含量较不施氮处理(23.5%)分别减少 2.55%、3.40%、2.98% 和 2.55%,仅施氮量105 kg·hm⁻²处理大豆籽粒脂肪含量差异显著,其余施氮处理均差异不显著。可见,施氮肥并不利于大豆籽粒脂肪含量的增加。

表4 不同氮磷钾水平下大豆籽粒品质

Table 4 Seeds quality of soybean under different N,P and K levels

处理		蛋白质含量	脂肪含量
Treatment		Protein content/%	Oil content/%
N	N0P2K2	38.3 ± 0.72 c	23.5 ± 0.95 a
	N1P2K2	38.8 ± 0.40 bc	22.9 ± 0.30 ab
	N2P2K2	39.5 ± 0.25 ab	22.7 ± 0.06 b
	N3P2K2	39.6 ± 0.78 a	22.8 ± 0.21 ab
P	N4P2K2	38.9 ± 0.30 bc	22.9 ± 0.35 ab
	N2P0K2	39.6 ± 0.84 a	22.8 ± 0.31 a
	N2P1K2	39.4 ± 0.57 a	22.7 ± 0.35 a
	N2P2K2	39.5 ± 0.25 a	22.7 ± 0.06 a
K	N2P3K2	39.7 ± 0.95 a	22.7 ± 0.56 a
	N2P2K0	39.5 ± 0.81 a	22.8 ± 0.46 a
	N2P2K1	39.4 ± 0.46 a	22.9 ± 0.25 a
	N2P2K2	39.5 ± 0.25 a	22.7 ± 0.06 a
	N2P2K3	39.3 ± 0.31 a	22.7 ± 0.20 a

3 讨论

3.1 不同氮磷钾水平与大豆产量的关系

合理平衡施用氮磷钾肥可显著提高大豆产量水平^[6,15-16],研究不同氮、磷、钾肥水平对大豆产量的影响是合理平衡施肥的基础和手段^[5]。氮肥对

大豆籽粒产量形成的效应要大于磷、钾肥效应^[19-21]。本研究结果表明,在土壤速效氮含量较低的情况下(7.55 ~ 9.62 mg·kg⁻¹),施用氮肥可显著提高大豆的产量(增幅为 12.2% ~ 29.4%),且大豆产量与施氮量呈显著正相关。而大量研究表明,在施用相同磷钾肥的基础上,大豆产量随着施氮量逐渐增加而呈现出先增加后降低的趋势^[16,21-23]。施氮量过多导致大豆产量降低的原因或许是施氮量过多不仅使大豆生育前期植株过快生长,还会对大豆根瘤菌固氮作用产生抑制作用^[24-26],当大豆进入生殖关键期时又需要吸收大量养分来维持生长,而根瘤菌固氮能力不足以满足其需求,导致生育后期养分供应不足,致使籽粒产量下降^[27]。而本研究中大豆产量随着施氮量的增加并没有降低,可能是因为 60% 氮肥基施、40% 氮肥在结荚期追施,整个大豆生育期间降雨频繁且雨量较大,致使硝态氮淋溶至深层,大豆生育前期植株和根瘤菌均正常生长发育,而在结荚期追施氮肥保证充足氮素供应,促进籽粒的形成^[19,28],导致大豆产量并未下降。因此鉴于夏大豆生育期间降雨量较多,导致土壤硝态氮淋溶损失且大豆生育后期根瘤菌固氮能力下降,无法有效促进大豆籽粒形成^[28-29],可考虑施用缓、控释氮肥或商品有机肥与化肥配施。

磷素是大豆生长发育必需的营养矿质元素,本研究结果表明,在土壤速效磷含量中等水平下(18.6 mg·kg⁻¹),大豆产量随着施磷量的增加呈现先增加后降低的趋势(增幅为 1.56% ~ 4.34%),这与前人研究结果相似^[30-32],在施磷量为 92 kg·hm⁻²时,大豆产量可达到最高值,但施磷与不施磷处理间并未呈现显著性差异。缺磷或施磷过高均会抑制大豆叶面积的生长发育,导致光合能力下降^[31],同时过高的供磷水平可能过度地增强植株呼吸强度使养分消耗更多^[32],影响大豆正常生长代谢,致使产量降低。可见,在土壤速效磷含量中等水平下,施用适宜用量的磷肥可有效促进大豆生长发育、提高光合效率,进而提高大豆产量。

钾肥对大豆籽粒产量形成的效应是氮、磷、钾肥中最小的^[20-21]。本研究结果表明,在土壤速效钾含量丰富的情况下(150 mg·kg⁻¹),施钾提高了大豆产量(增幅 6.03% ~ 6.81%),施用高量的钾肥也未使大豆减产,这与韩晓增等^[33]和宋秋来等^[34]研究结果相似,但施钾与不施钾处理间未呈现显著性差异。而陈怀珠等^[17]和曾玲玲等^[35]研究则表明大豆产量也随着施钾量的增加呈现先增加后降低的趋势。过高的钾不利于大豆植株干物质的积累与分配,产生钾毒害作用,致使产量有所下降^[36-37]。

可见,在土壤速效钾含量丰富的情况下,施用适量的钾肥有利于提高大豆产量、维持土壤速效钾含量。

3.2 不同氮磷钾水平与大豆品质的关系

氮、磷素是大豆细胞质、细胞核和各种酶的组成成分,钾素在各种重要代谢过程中(如蛋白质、脂肪、碳水化合物的合成过程)都起促进作用,因此,氮、磷、钾素会影响大豆的品质^[5,38]。Haq 等^[39]通过 8 年 112 个试验地点的研究表明,施氮磷钾肥对大豆蛋白质和脂肪含量的影响并不一致,同时大豆品质还受品种、水分、温度、气候、地域等因素的制约^[5,17],导致众多施肥对大豆品质研究的结论并不一致。宁海龙等^[38,40]研究认为氮肥能够增加大豆籽粒蛋白质含量,降低脂肪含量;丁洪等^[41]研究则表明施氮可增加大豆籽粒脂肪含量,降低蛋白质含量。蔡柏岩等^[30]研究表明适宜施磷量有利于提高大豆籽粒蛋白质和脂肪含量;阚冲等^[42]通过研究施磷对 14 个品种大豆品质的影响发现施磷降低了大部分大豆品种籽粒的蛋白质和脂肪含量。宁海龙等^[38,40]和张学斌等^[43]研究发现钾肥能够增加大豆蛋白质含量,降低脂肪含量;闫春娟等^[37]、李春杰等^[44]和牟忠生等^[45]则认为钾肥存在提高大豆脂肪、降低蛋白质含量的作用趋势。本研究结果表明,施用适宜用量的氮肥可提高大豆籽粒蛋白质含量,过高或过低的氮素施入不利于蛋白质含量的增加,施氮降低大豆籽粒脂肪含量;施磷、钾肥均对大豆籽粒蛋白质、脂肪含量无显著性影响,这或许与试验地土壤速效磷、钾含量处于中等及以上水平有关。

4 结论

土壤速效氮含量较低时,施用氮肥可显著提高大豆的产量,且大豆产量与施氮量(0 ~ 195 kg·hm⁻²)呈显著正相关;施用适量的氮肥(105 ~ 150 kg·hm⁻²)可显著提高大豆籽粒蛋白质含量,过高或过低的氮素施入不利于蛋白质含量的增加,施氮降低大豆籽粒脂肪含量。土壤速效磷、钾含量处于中等及以上水平时,施用适量磷、钾肥有利于提高大豆产量;施磷、钾肥均对大豆籽粒蛋白质、脂肪含量无显著性影响。可考虑施用缓、控释氮肥或采用商品有机肥与化肥配施的方式解决大豆生育后期氮素供应不足的问题。

参考文献

[1] 李奕聪,王新刚,司伟. 2022 年大豆产业发展趋势与政策建议[J]. 大豆科技, 2022(1): 6-8. (LI Y C, WANG X G, SI W. Development trend and policy suggestions of soybean industry in

- 2022[J]. Soybean Science & Technology, 2022(1): 6-8.)
- [2] 河北省人民政府办公厅. 河北农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 259-260. (General Office of the People's Government of Hebei Province. Hebei rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021: 259-260.)
- [3] 任廷虎, 李宗尧, 杜斌, 等. 有机肥施用及合理密植提高黄淮海地区夏大豆光系统性能与籽粒产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1361-1375. (REN T H, LI Z Y, DU B, et al. Improving photosynthetic performance and yield of summer soybean by organic fertilizer application and increasing plant density[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(8): 1361-1375.)
- [4] 王秋菊, 米刚, 张劲松, 等. 不同磷物料培肥心土对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(6): 981-985. (WANG Q J, MI G, ZHANG J S, et al. Different phosphorus fertilizer material subsoil effect on yield and quality of soybean [J]. Soybean Science, 2016, 35(6): 981-985.)
- [5] 魏丹, 李艳, 李玉梅, 等. 氮磷钾元素对黑龙江不同地区大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1): 87-91. (WEI D, LI Y, LI Y M, et al. Effect of N, P, K fertilization on yield and quality of soybean in Heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2017, 36(1): 87-91.)
- [6] 吕继龙, 何萍, 魏丹, 等. 大豆养分专家系统在我国大豆主产区的应用与评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 243-252. (LYU J L, HE P, WEI D, et al. Application and assessment of Nutrient Expert (NE) system in main soybean production areas of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(2): 243-252.)
- [7] 陈昌斌, 戴小密, 俞冠翹, 等. 组成型 *nifA* 对大豆根瘤菌 (*Rhizobium fredii*) HN01lux 结瘤固氮效率的促进作用[J]. 科学通报, 1999(5): 529-533. (CHEN C B, DAI X M, YU G Q, et al. Promoting effect of constitutive *nifA* on nodulation and nitrogen fixation efficiency of soybean *Rhizobium fredii* HN01lux [J]. Chinese Science Bulletin, 1999(5): 529-533.)
- [8] 董钻. 大豆产量生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 101-109. (DONG Z. Soybean yield physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 101-109.)
- [9] 张小明, 曾宪楠, 孙羽. 土壤有效磷含量对大豆植株磷素含量和土壤有效 N、P、K 含量的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(4): 691-695. (ZHANG X M, ZENG X N, SUN Y. Effect of soil Olsen-P on P content in soybean plant and soil N, P, K content [J]. Soybean Science, 2016, 35(4): 691-695.)
- [10] HARTWIG U A, DREVON J J. Phosphorus deficiency increases the argon induced decline of nodule nitrogenase activity in soybean and alfalfa[J]. Planta, 1997, 201: 463-469.
- [11] 丁洪, 李生秀. 磷素营养与大豆生长和共生固氮的关系[J]. 西北农业大学学报, 1998(5): 70-73. (DING H, LI S X. The relation of phosphorous nutrition to growth and symbiotic nitrogen fixation of soybean cultivars[J]. Journal of Northwest Agricultural University, 1998(5): 70-73.)
- [12] 李玉影. 大豆需钾特性及钾肥效应[J]. 植物营养与肥料学报, 1998(4): 414-418. (LI Y Y. Characteristics of potassium requirement by soybean and the effect of potash fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1998(4): 414-418.)
- [13] 杜明, 李彦生, 张秋英, 等. 钾肥对菜用大豆生殖生长期叶片叶绿素含量的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(6): 941-946. (DU M, LI Y S, ZHANG Q Y, et al. Effects of potassium fertilizer on chlorophyll content of vegetable soybean in reproductive stages[J]. Soybean Science, 2012, 31(6): 941-946.)
- [14] KRUEGER K, GOGGI A S, MALLARINO A P, et al. Phosphorus and potassium fertilization effects on soybean seed quality and composition[J]. Crop Science, 2013, 53: 602-610.
- [15] VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development [J]. Science, 2009, 324: 1519-1520.
- [16] 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): 588-592, 598. (WANG Z, GAO R F, LI W X, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer combined application on dry matter accumulation and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2008, 27(4): 588-592, 598.)
- [17] 陈怀珠, 杨守臻, 唐向民, 等. 华南春大豆氮磷钾肥配施效应及用量研究[J]. 大豆科学, 2018, 37(1): 117-125. (CHEN H Z, YANG S Z, TANG X M, et al. Study on the effects and amounts of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers for spring soybean in southern China [J]. Soybean Science, 2018, 37(1): 117-125.)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 29-150. (BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis. 3rd ed [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 29-150.)
- [19] 田艺心, 高凤菊, 曹鹏鹏. 饱和 D-最优设计在高蛋白大豆施肥优化中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 343-350. (TIAN Y X, GAO F J, CAO P P. Application of saturated D-optimal design for optimum fertilization in the production of high protein soybean[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(2): 343-350.)
- [20] 刘颖, 李玉影, 刘凤阁, 等. 氮磷钾营养对高油大豆含氮化合物积累及产量的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(4): 645-647, 653. (LIU Y, LI Y Y, LIU F G, et al. Balanced fertilization of nitrogen, phosphorus and potassium enhanced accumulation of nitrogen compound and yield of high-oil soybean [J]. Soybean Science, 2008, 27(4): 645-647, 653.)
- [21] 孙振宇, 李晶, 段兴武, 等. 氮磷钾施肥水平对大豆产量及性状的影响[J]. 作物杂志, 2012(5): 135-139. (SUN Z N, LI J, DUAN X W, et al. Effects of combined fertilization of N, P and K on soybean yield and yield traits [J]. Crops, 2012(5): 135-139.)
- [22] 钱朗, 陈振武, 刘柏林, 等. 氮肥对黑豆产量及氮磷钾积累分配的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(1): 85-89. (QIAN L, CHEN Z W, LIU B L, et al. Effect of nitrogen fertilizer on yield and nitrogen, phosphorous, potassium accumulation and distribution of black soybean [J]. Soybean Science, 2009, 28(1): 85-89.)
- [23] 刘煜祥, 尹凤祥, 梁杰, 等. 氮肥对绿豆氮磷钾积累分配及产量构成因子的影响[J]. 作物杂志, 2011(3): 96-100. (LIU Y X, YIN F X, LIANG J, et al. Effect of nitrogen application on N, P and K distribution and yield component of mung bean [J]. Crops, 2011(3): 96-100.)
- [24] SAITO A, TANABATA S, TANABATA T, et al. Effect of nitrate on nodule and root growth of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.)

[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 15(3): 4464-4480.

[25] FUJIKAKE H, YASHIMA H, SATO T, et al. Rapid and reversible nitrate inhibition of nodule growth and N₂ fixation activity in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2002, 48(2): 211-217.

[26] 邸伟, 金喜军, 马春梅, 等. 施氮水平对大豆氮素积累与产量影响的研究[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 612-617. (DI W, JIN X J, MA C M, et al. Effects of nitrogen application on yield and nitrogen accumulation in soybean [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(3): 612-617.)

[27] 侯慧云, 高峰, 高同国, 等. 施氮对大豆结瘤、固氮及产量影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(8): 42-48. (HOU H Y, GAO F, GAO T G, et al. Research progress on the effects of nitrogen application on nodulation, nitrogen fixation and yield of soybean [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 42-48.)

[28] 李灿东, 郭泰, 王志新, 等. 叶面施氮对不同类型大豆品种氮素积累与分配的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(3): 674-680. (LI C D, GUO T, WANG Z X, et al. Effects of nitrogen accumulation and distribution under leaf nitrogen application in different kinds of soybean varieties [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(3): 674-680.)

[29] 方海燕, 寸植贤, 陈建斌, 等. 大豆生长发育与根瘤形成的关系[J]. 农学学报, 2014, 4(6): 1-4, 23. (FANG H Y, CUN Z X, CHEN J B, et al. Relationship between plant development and root nodule formation of soybean [J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(6): 1-4, 23.)

[30] 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]. 植物营养与肥科学报, 2008(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]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008(1): 65-70.)

[31] 杜孝敬, 符小文, 黄红梅, 等. 磷肥对滴灌复播大豆生长发育、产量及经济效益的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(8): 1622-1629. (DU X J, FU X W, HUANG H M, et al. Effect of phosphorus fertilizer on growth and development, yield and economic benefit of summer-sowing soybean under drip irrigation [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(8): 1622-1629.)

[32] 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]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(3): 670-677.)

[33] 韩晓增, 胡国华, 邹文秀. 东北地区不同轮作方式下大豆产量对施钾的响应[J]. 土壤与作物, 2014, 3(4): 157-161. (HAN X Z, HU G H, ZOU W X. The response of soybean grain yield to potassium fertilization under different crop rotations in black soil region of northeast China [J]. Soil and Crop, 2014, 3(4): 157-161.)

[34] 宋秋来, 郭昕, 龚振平, 等. 土壤速效钾水平对大豆钾素积累及产量影响的研究[J]. 作物杂志, 2014(2): 106-109. (SONG Q L, GUO X, GONG Z P, et al. Study on the effect of soil available potassium level on potassium accumulation and yield in soybean [J]. Crops, 2014(2): 106-109.)

[35] 曾玲玲, 张兴梅, 朱洪德, 等. 钾肥对大豆产量和土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1381-1384. (ZENG L L, ZHANG X M, ZHU H D, et al. Effects of applying potassium on soybean yield and soil nutrient [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(6): 1381-1384.)

[36] 陈喜凤, 李岩, 王楠, 等. 钾对大豆光合速率和产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2010(5): 43-46. (CHEN X F, LI Y, WANG N, et al. Effects of potassium on photosynthesis rate and yield in soybean [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2010(5): 43-46.)

[37] 闫春娟, 韩晓增, 王树起, 等. 钾对大豆干物质积累、产量及品质的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(1): 113-117. (YAN C J, HAN X Z, WANG S Q, et al. Effect of potassium fertilizer on dry matter accumulation, yield and quality of soybean [J]. Soybean Science, 2008, 27(1): 113-117.)

[38] 宁海龙, 胡国华, 李文滨, 等. 氮磷钾底肥对大豆蛋白质含量的效应[J]. 大豆科学, 2006, 25(3): 288-293. (NING H L, HU G H, LI W B, et al. The effects of based NPK fertilizer on protein content in soybean [J]. Soybean Science, 2006, 25(3): 288-293.)

[39] HAQ M U, MALLARINO A P. Response of soybean grain oil and protein concentrations to foliar and soil fertilization [J]. Agronomy Journal, 2005, 97(3): 910-918.

[40] 宁海龙, 宋秀吉, 王雪依, 等. 氮磷钾肥对大豆脂肪含量的效应[J]. 中国油料作物学报, 2007(3): 302-307. (NING H L, SONG X J, WANG X Y, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on oil content in soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007(3): 302-307.)

[41] 丁洪, 郭庆元. 氮肥对不同品种大豆氮积累和产量品质的影响[J]. 土壤通报, 1995(1): 18-21. (DING H, GUO Q Y. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, yield and quality of different soybean varieties [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995(1): 18-21.)

[42] 阙冲, 刘鸿雁, 石贵阳, 等. 施磷对不同大豆品种产量和品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(11): 13-18. (KAN C, LIU H Y, SHI G Y, et al. Effect of phosphorus application on yield and quality of different soybean varieties [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(11): 13-18.)

[43] 张学斌, 孙克刚, 汪立刚, 等. 河南省夏大豆施用钾肥的效果研究[J]. 土壤肥料, 2002(1): 23-25. (ZHANG X B, SUN K G, WANG L G, et al. The research on effect of potassium fertilizer application to summer-soybean in Henan province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2002(1): 23-25.)

[44] 李春杰, 王建国, 许艳丽, 等. 钾对大豆产量及品质的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005(2): 154-155, 160. (LI C J, WANG J G, XU Y L, et al. Effect of potassium on the yield and quality of soybean [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2005(2): 154-155, 160.)

[45] 牟忠生, 吴春胜, 李楠. 钾肥对大豆生理特性及其产量和品质的影响[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(3): 30-33. (MOU Z S, WU C S, LI N. Effects of potassium rate on physiological characteristics, yield and quality of soybean [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2011, 36(3): 30-33.)