

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19542

黑龙江大豆 – 玉米轮作体系氮磷调控的产量效应与养分平衡

张 阳, 张春宇, 张明聪, 金喜军, 王孟雪, 张玉先*

(黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘 要: 为探究适宜于黑龙江垦区大豆 – 玉米轮作体系下最优的施肥模式, 在黑龙江省九三管局鹤山农场科技园区进行田间定位试验, 以大豆 – 玉米轮作体系作为研究对象, 为保证一个轮作周期施肥总量不变, 于大豆茬口实施减氮增磷方案, 玉米茬口实施增氮减磷方案, 来研究不同氮磷调控处理对大豆 – 玉米轮作体系作物生长、养分累积量、土壤收支平衡及经济效益的影响。结果表明, 与常规施肥相比, 大豆茬口减施 1/2 氮肥、增施 1/2 玉米磷肥 (S2) 和玉米茬口增施 1/2 大豆氮肥、减施 1/2 磷肥 (M2) 能够促进生育后期大豆和玉米植株对养分的吸收, 提高干物质质量的积累, 增加大豆和玉米产量, 增产幅度分别达 5.9% 和 11.2%。大豆 – 玉米轮作体系各氮磷调控处理的土壤氮、磷、钾素收支平衡均为盈余, 且均以 S2-M2 调控处理最低, 分别为 3.44%、62.69%、0.21%。该调控模式土壤氮、钾素收支基本平衡, 磷素仍有盈余。大豆 – 玉米轮作周年经济效益也以 S2-M2 处理的利润最高, 达 25351 元/hm²。综合结果表明, 在轮作周期施肥总量不变的条件下, 大豆 – 玉米轮作体系下大豆茬口实施 S2 和玉米茬口实施 M2 的调控处理可促进大豆和玉米对养分的吸收, 增加干物质积累量, 降低养分残留的不利影响, 从而达到增产和增效的目的。

关键词: 大豆 – 玉米轮作; 氮磷调控; 作物生长; 养分平衡; 产量

黑龙江省是我国大豆和玉米的主要供应基地, 大豆和玉米种植面积分别为 274.5 万和 662 万 hm² 左右, 年均总产分别达 448.4 万和 2888 万 t^[1-2]。轮作是充分利用土地资源, 降低生产成本, 提高农民收入的重要途径, 特别是豆科作物与禾本科作物轮作^[3]。据研究报道^[4], 相比非轮作种植制度, 粮豆轮作可增加大豆和玉米单产且减少农药和化肥的施用量。郭耀东等^[5]研究表明, 豆科作物有提高土壤肥力和显著提高后作玉米产量等优点。大豆 – 玉米轮作是黑龙江省大豆主要轮作模式之一, 随着 2016 年中央一号文件“探索实行耕地轮作休耕制度试点”的发布以及轮作补贴的实施, 大豆 – 玉米轮作种植面积呈逐渐扩增的趋势。但由于农户种植生产中作物施肥方案仍按照传统单作大豆、玉米施肥模式, 未统筹考虑大豆 – 玉米轮作体系整体

的施肥需求, 造成肥料损失、环境污染等现象。对此, 本文从降低肥料损失, 改善土壤环境的角度出发, 制定一个轮作周期内总施肥量不变, 大豆茬口减氮增磷和玉米茬口增氮减磷的一体化施肥模式, 以期寻找一种最优的肥料运筹模式。本研究以黑龙江省九三管局鹤山农场大豆 – 玉米轮作体系下氮、磷分配特征为切入点, 根据该区域同期的农户肥料施用状况调查^[6-7]、大豆和玉米养分需求规律及适宜的肥料用量^[8-9]等研究结果, 结合氮、磷肥料的产量效应、作物吸收氮磷钾养分特征、氮磷调控下土壤养分实际平衡及经济效益, 探讨了大豆 – 玉米轮作制中氮、磷的合理分配问题, 为黑龙江垦区合理的养分管理提供理论指导和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017 ~ 2019 年在黑龙江省九三管局鹤山农场科技园区进行。该试验区属于寒温带大陆性气候, 年降水量 538.3 mm, 年平均气温 1.6℃, 年日照时数达 2429.3 h, 无霜期 119 d。试验田土壤类型为黑土, 弱酸性, 其 0 ~ 20 cm 土壤的基本理化性质: pH 6.3, 有机质含量 13.4 g/kg, 全氮含量 0.78 g/kg, 全磷含量 0.71 g/kg, 全钾含量 17.55

收稿日期: 2019-11-19; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (31801303); 黑龙江省农垦总局重点科研计划项目 (HKKY190206-01 和 HNK135-02-10-2); 黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金 (XYB2014-04); 黑龙江省自然科学基金面上项目 (C2016042); 中国博士后科学基金 (2016M591568); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-04-PS17)。

作者简介: 张阳 (1994-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事大豆高产生理生态研究。E-mail: zy1994611@163.com。

通讯作者: 张玉先, E-mail: zyx_lxy@126.com。

g/kg, 碱解氮含量 141.8 mg/kg, 有效磷含量 40.6 mg/kg, 速效钾含量 180 mg/kg。本研究作物生长期间气象数据由本试验点农场小型气象站测定获得, 具体气象数据如图 1 所示。

供试肥料: 尿素 (N 46%); 磷酸二铵 (N 18%, P₂O₅ 46%); 硫酸钾 (K₂O 50%); 供试大豆品种为当地主栽品种黑河“43”, 玉米品种为当地主栽品种德美亚一号。

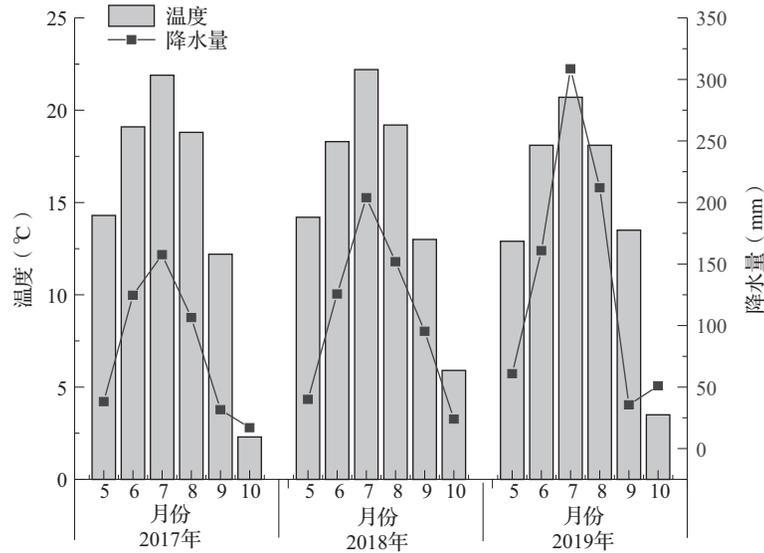


图 1 2017 ~ 2019 年试验地 5 ~ 10 月生育期间的气象数据

1.2 试验处理及设计

种植方式为大豆-玉米轮作。2017 年种植大豆, 2018 年种植玉米, 2019 年种植大豆。为保证一个轮作周期总施肥量不变, 每个作物分别设置 4 种氮磷调控处理, 各处理设置如下:

(1) 大豆季。SCK: 当地常规施肥; S1: 在常规施肥基础上, 减施 1/3 氮肥, 增施 1/3 玉米磷肥; S2: 在常规施肥基础上, 减施 1/2 氮肥, 增施 1/2 玉米磷肥; S3: 在常规施肥基础上, 减施 2/3 氮肥, 增施 2/3 玉米磷肥。

(2) 玉米季。MCK: 当地常规施肥; M1: 在常规施肥基础上, 增施 1/3 大豆氮肥, 减施 1/3 磷肥; M2: 在常规施肥基础上, 增施 1/2 大豆氮肥, 减施

1/2 磷肥; M3: 在常规施肥基础上, 增施 2/3 大豆氮肥, 减施 2/3 磷肥。

大豆-玉米轮作周年各处理表示为 SCK-MCK、S1-M1、S2-M2、S3-M3。

试验采取随机区组设计, 3 次重复。小区面积 78 m² (15 m 长, 0.65 m 垄宽, 8 垄)。大豆所有氮、磷、钾肥均做底肥施入土壤; 玉米 1/2 氮肥做底肥施入土壤、剩余 1/2 于最后一次中耕时施入, 磷和钾肥均做底肥施入。大豆保苗密度 40 万株/hm², 玉米保苗密度 10 万株/hm²。全生育期无灌水。其它田间管理同当地大田。

大豆和玉米具体施肥方案见表 1。

表 1 大豆-玉米轮作施肥量和施肥方案

大豆				玉米					轮作周年					
处理	施肥方案	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	处理	施肥方案	基肥 N	追肥 N	P ₂ O ₅	K ₂ O	处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
SCK	常规施肥	54	67.5	30	MCK	常规施肥	69	69	105.00	45	SCK-MCK	192	172.5	75
S1	减 1/3 氮 增 1/3 玉米磷	36	102.45	30	M1	增 1/3 大豆氮 减 1/3 磷	69	87	70.05	45	S1-M1	192	172.5	75
S2	减 1/2 氮 增 1/2 玉米磷	27	120.00	30	M2	增 1/2 大豆氮 减 1/2 磷	69	96	52.50	45	S2-M2	192	172.5	75
S3	减 2/3 氮 增 2/3 玉米磷	18	137.55	30	M3	增 2/3 大豆氮 减 2/3 磷	69	105	34.95	45	S3-M3	192	172.5	75

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质量的测定

大豆茬口鼓粒期、成熟期和玉米茬口大喇叭口期、灌浆期、完熟期随机采取具有代表性的植株5株,大豆按叶片、叶柄、荚皮、茎和籽粒5部分器官分样,玉米按叶片、茎秆、苞叶、穗轴和籽粒5部分器官分样,均在105℃下杀青30 min,80℃烘干至恒重,测定干物质量。后用粉样机将烘干植株样品粉碎,密封保存,以备植株氮磷钾养分含量测定。

1.3.2 氮磷钾养分含量测定

将粉碎好的植株样品用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法制备待测液,全氮含量用凯氏定氮法测定,全磷含量用钒钼黄比色法测定,全钾含量用火焰光度法测定。

1.3.3 测产

作物成熟后,大豆试验区每个处理选取 $1 m^2$ 的大豆进行考种测产,并测定单株粒数、单株荚数及百粒重等产量构成因素;玉米试验区每个处理选取 $2 m^2$ 的玉米进行考种测产,并测定穗行数、穗粒数及百粒重等产量构成因素(大豆试验区和玉米试验区均测定不施氮处理、不施磷处理及不施钾处理的产量,以计算土壤的供肥量)。

1.4 数据处理

1.4.1 养分利用率计算

植株氮(磷、钾)素总积累量(kg/hm^2) =

Σ 植株各器官干重 \times 氮(磷、钾)含量

表观平衡(%) = (输入量 - 输出量) / 输出量 $\times 100$;

盈(或亏)(%) = (输入量 + 土壤供给量 - 输出量) / 输出量 $\times 100$ 。输入量仅包括化肥投入量;输出量仅包括作物收获而带出的养分含量^[10]。

1.4.2 经济效益计算

利润($元/hm^2$) = 产值($元/hm^2$) - 投入($元/hm^2$)

产值($元/hm^2$) = 产量(kg/hm^2) \times 单价($元/kg$)

产投比 = 产值($元/hm^2$) / 投入($元/hm^2$)

肥料价格和作物单价均按当地市场价进行计算。由于本试验仅探讨施肥对轮作作物经济效益的影响,因此计算时未将种子成本和人工成本考虑在内。

采用Excel 2010对所有数据进行处理和计算,通过SPSS 17.0软件进行统计分析,用LSD法检测

处理间 $P < 0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮磷调控对大豆、玉米生长的影响

2.1.1 对大豆地上部干物质的影响

干物质质量积累量的增加是作物获得高产的基础^[11-12]。图2结果显示,鼓粒期,S2处理的营养器官干物质积累量显著高于SCK处理;荚果干物质积累量以S2处理最高;成熟期,地上部干物质积累量以S2处理最高,相比其它各处理增幅分别达29.0%、20.3%和48.2% ($P < 0.05$)。表明大豆季减施1/2氮肥,增施1/2玉米磷肥(S2)的调控处理有利于提高大豆地上部干物质的积累量,为高产提供物质基础。

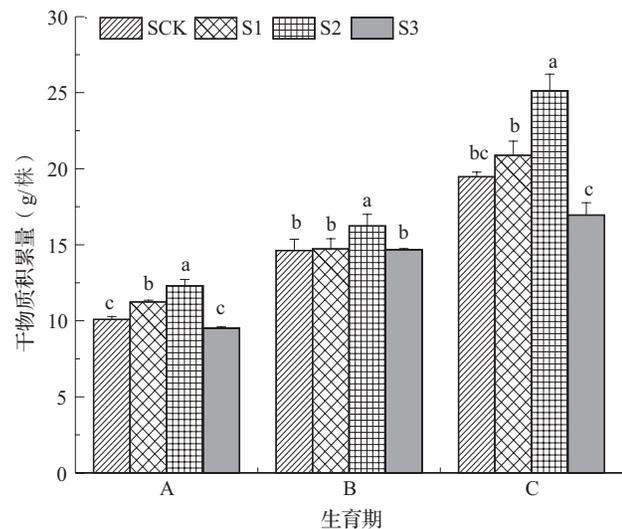


图2 不同处理对大豆地上部干物质的影响

注:A:鼓粒期营养器官;B:鼓粒期荚果;C:成熟期地上部植株。大豆数据均为两年平均数据。同一生育期不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

2.1.2 对玉米地上部干物质的影响

图3结果显示,不同氮磷调控处理对玉米喇叭口期后的干物质积累量有影响。灌浆期和完熟期各处理的干物质积累量均以M2处理最高,与MCK处理相比,增幅分别达8.8%和15.0%。表明玉米茬口增施1/2大豆氮肥、减施1/2磷肥(M2)的调控处理可促进生育后期玉米对土壤养分的吸收,提高生育后期干物质的积累。

2.1.3 对大豆产量构成因素的影响

表2结果显示,不同氮磷调控处理的无效荚、单株荚数和百粒重在处理间无显著差异。各处理的株高、单株粒数和产量均以S2处理最高,与SCK

处理相比,增幅分别达13.9%、7.5%和5.9%。说明,大豆茬口减施1/2氮肥、增施1/2玉米磷肥(S2)的调控处理更有利于提高大豆产量因子,从而获得较高产量。

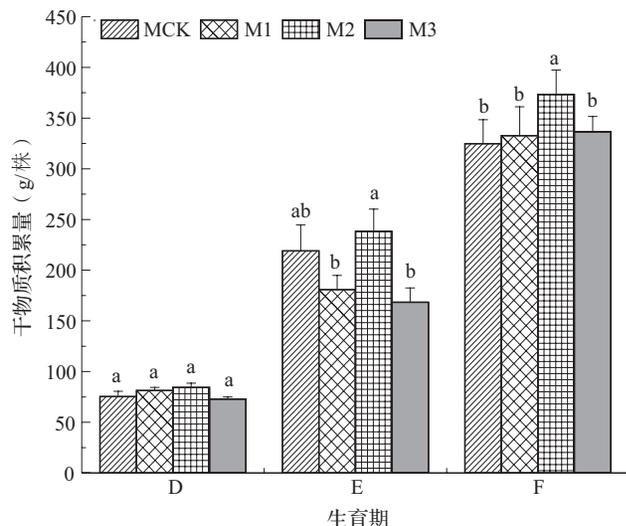


图3 不同处理对玉米地上部干物质的影响

注: D: 大喇叭口期地上部植株; E: 灌浆期地上部植株; F: 成熟期地上部植株。

表2 大豆产量构成因素

处理	株高 (cm)	无效荚 (个/株)	单株粒数 (粒/株)	单株荚数 (荚/株)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
SCK	49.23b	0.55a	34.04b	14.25a	21.14a	2262.38ab
S1	53.41ab	0.56a	34.74ab	14.69a	20.44a	2209.90ab
S2	56.07a	0.84a	36.58a	15.62a	20.86a	2395.37a
S3	50.72b	0.90a	33.33b	14.99a	20.80a	2176.75b

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

2.1.4 对玉米产量构成因素的影响

表3结果显示,前茬大豆实施减氮增磷方案对后茬玉米的穗行数、秃尖长和百粒重无显著影响。玉米行粒数除M3处理外,其余氮磷调控处理均显著高于MCK处理。玉米产量以M2处理最

表3 玉米产量构成因素

处理	行粒数 (粒/行)	穗行数 (行/株)	秃尖长 (cm)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
MCK	29.97b	15.77a	1.77a	31.14a	11036.0b
M1	33.43a	15.71a	1.14a	31.78a	11483.5ab
M2	33.96a	16.04a	1.02a	33.71a	12275.5a
M3	31.31ab	15.61a	1.25a	30.77a	10971.0b

高,显著高于MCK处理,增幅达11.2%。表明玉米茬口增施1/2大豆氮肥、减施1/2磷肥(M2)的调控处理有利于提高玉米行粒数,从而提高产量。

2.2 氮磷调控对大豆、玉米植株养分吸收的影响

2.2.1 对大豆植株养分吸收的影响

表4结果显示,大豆不同生育时期各处理的氮素累积量、磷素累积量和钾素累积量均以S3处理最低。鼓粒期,与SCK相比,S2处理的氮素累积量显著增加,增幅达18.2%,磷素累积量和钾素累积量均无显著差异;成熟期,与SCK相比,S2处理的氮素累积量和钾素累积量显著增加,增幅分别达35.0%和42.6%。说明,大豆茬口减施1/2氮肥、增施1/2玉米磷肥(S2)的调控处理更有利于大豆对氮素和钾素的吸收。

表4 不同处理对大豆植株氮、磷、钾素累积量的影响 (kg/hm²)

时期	处理	氮素 (TN) 累积量	磷素 (TP) 累积量	钾素 (TK) 累积量
鼓粒期	SCK	293.70b	45.62a	191.80a
	S1	313.08ab	44.81a	188.37a
	S2	347.27a	47.09a	208.60a
	S3	280.88b	37.76b	164.81b
成熟期	SCK	193.53b	29.33ab	121.38c
	S1	195.83b	26.98b	141.26b
	S2	261.19a	35.51a	173.13a
	S3	154.42c	23.57b	103.42d

2.2.2 对玉米植株养分吸收的影响

表5结果显示,玉米植株氮素累积量、磷素累积量和钾素累积量随生育期的推进呈逐渐增加的趋势,其中M2处理表现较强优势。在大喇叭口期,与MCK相比,M2处理的氮素累积量和磷素累积量显著增加,增幅分别达39.8%、38.1%;灌浆期,与MCK相比,M2处理的氮素累积量和钾素累积量显著增加,增幅分别达42.0%、20.4%;成熟期,与MCK相比,M2处理的氮素累积量和钾素累积量显著增加,增幅分别达12.2%、11.6%。说明,玉米茬口增施1/2氮肥、减施1/2玉米磷肥(M2)的调控处理有利于促进玉米生育后期对氮素和钾素的吸收,使植株对于氮、钾元素的吸收达到最大化。

表 5 不同处理对玉米植株氮、磷、钾素累积量的影响 (kg/hm²)

时期	处理	钾素累积量的影响 (kg/hm ²)		
		氮素 (TN) 累积量	磷素 (TP) 累积量	钾素 (TK) 累积量
大喇叭口期	MCK	83.32b	13.58b	150.3ab
	M1	116.12a	16.50ab	169.92a
	M2	116.47a	18.73a	161.90ab
	M3	105.56a	13.58b	146.24b
灌浆期	MCK	113.68b	37.43a	202.29b
	M1	123.23b	38.36a	201.98b
	M2	161.37a	40.63a	243.47a
	M3	120.01b	32.31a	221.88ab
成熟期	MCK	210.52bc	76.27a	231.14b
	M1	197.16c	64.10b	214.57b
	M2	236.24a	77.72a	258.00a
	M3	219.74ab	69.54ab	233.01ab

2.3 氮磷调控对大豆-玉米轮作体系土壤养分收支平衡的影响

土壤养分收支平衡是衡量土壤养分残留及作物吸收利用的重要指标。表 6 结果显示, 在大豆茎秆还田, 玉米茎秆不还田的情况下, 氮、磷、钾素表观平衡中, 各处理的表观平衡均为负值, 盈余率均为正值; 其中 S2-M2 处理的氮 (N) 施入量为 192 kg/hm², 作物输出氮 464.70 kg/hm², 氮素亏缺 58.68%, 如考虑土壤供氮量 (288.68 kg/hm²), 氮素盈余 3.44%; 磷 (P) 施入量为 75.32 kg/hm² (相当于 P₂O₅ 172.5 kg/hm²), 作物输出磷 107.92 kg/hm², 磷素亏缺 30.21%, 如考虑土壤供磷量, 磷素盈余 62.69%; 钾 (K) 施入量为 62.23 kg/hm² (相当于 K₂O 75 kg/hm²), 作物输出钾 364.66 kg/hm², 钾素亏缺 82.93%, 如考虑土壤供钾量, 钾素盈余 0.21%。除 S1-M1 处理的钾素盈余率外, 其余氮磷调控处理的氮、磷和钾素盈余率均比 SCK-MCK 处理高。说明 3 种氮磷调控模式中 S2-M2 处理的调控模式有利于作物对土壤营养元素的吸收, 从而改善肥料残留对土壤环境的不利影响。

表 6 不同处理对大豆-玉米轮作土壤氮、磷、钾素表观平衡的影响

处理	氮表观平衡				磷表观平衡				钾表观平衡			
	输入 (kg/hm ²)	输出 (kg/hm ²)	表观平衡 (%)	盈余 (%)	输入 (kg/hm ²)	输出 (kg/hm ²)	表观平衡 (%)	盈余 (%)	输入 (kg/hm ²)	输出 (kg/hm ²)	表观平衡 (%)	盈余 (%)
SCK-MCK	192	379.77	-49.44	26.57	75.32	101.54	-25.82	72.91	62.23	308.68	-79.84	18.38
S1-M1	192	367.45	-47.75	30.81	75.32	87.86	-14.27	99.85	62.23	317.71	-80.41	15.02
S2-M2	192	464.70	-58.68	3.44	75.32	107.92	-30.21	62.69	62.23	364.66	-82.93	0.21
S3-M3	192	342.13	-43.89	40.50	75.32	89.84	-16.16	95.43	62.23	301.32	-79.35	21.28

2.4 相关性分析

2.4.1 大豆干物质质量、养分含量、养分平衡值与产量的相关性分析

由表 7 相关性分析可知, 大豆产量与土壤氮素表观平衡值和钾素表观平衡值分别呈极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) 负相关关系, 与植株干物质积累量和氮、磷、钾素累积量呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤磷素表观平衡值呈中等相关。说明, 大豆茬口合理的氮磷调控可促进植株对养分的吸收, 从而积累较多的干物质质量, 为产量的提高提供物质基础。

2.4.2 玉米干物质质量、养分含量、养分平衡值与产量的相关性分析

表 8 结果显示, 玉米产量与土壤养分表观平衡值各指标均呈负相关, 与其余各项指标均呈正相关, 其中植株氮素累积量与产量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。说明玉米植株氮素含量的累积是影响玉米产量的一个重要因素。

2.5 氮磷调控对大豆、玉米经济效益的影响

表 9 结果显示, 与 SCK 处理相比, 大豆茬口 S2 处理的产值相对较高, 利润和产投比相对较低; 与 MCK 处理相比, 玉米茬口 M2 处理的产值、利

表 7 不同处理大豆植株干物质积累、养分累积量、养分平衡值与产量的相关性

	DW	TN	TP	TK	BN	BP	BK	Y
DW	1							
TN	0.96**	1						
TP	0.87**	0.88**	1					
TK	0.98**	0.97**	0.85**	1				
BN	-0.91**	-0.93**	-0.80**	-0.92**	1			
BP	-0.38	-0.43	-0.53	-0.35	0.07	1		
BK	-0.84**	-0.81**	-0.70**	-0.91**	0.76**	0.34	1	
Y	0.89**	0.89**	0.83**	0.82**	-0.82**	-0.38	-0.59*	1

注: **表示极显著相关 ($P < 0.01$), *表示显著相关 ($P < 0.05$)。DW 为干物质, TN 为植株氮素累积量, TP 为植株磷素累积量, TK 为植株钾素累积量, BN 为氮表观平衡值, BP 为磷表观平衡值, BK 为钾表观平衡值, Y 为产量。下同。

表 8 不同处理玉米植株干物质质量、养分累积量、养分平衡值与产量的相关性

	DW	TN	TP	TK	BN	BP	BK	Y
DW	1							
TN	0.51	1						
TP	0.42	0.41	1					
TK	0.57	0.91**	0.42	1				
BN	-0.27	-0.70*	-0.52	-0.59*	1			
BP	-0.45	-0.43	-0.36	-0.49	-0.24	1		
BK	-0.57	-0.91**	-0.42	-1.00**	0.59*	0.49	1	
Y	0.14	0.59*	0.06	0.34	-0.33	-0.23	-0.34	1

表 9 不同处理的大豆、玉米经济效益

处理	大豆				玉米				周年			
	产值 (元/hm ²)	投入 (元/hm ²)	利润 (元/hm ²)	产投比	产值 (元/hm ²)	投入 (元/hm ²)	利润 (元/hm ²)	产投比	产值 (元/hm ²)	投入 (元/hm ²)	利润 (元/hm ²)	产投比
SCK-MCK	6787	803	5984	8.5	18761	1409	17352	13.3	25548	2212	23336	11.5
S1-M1	6630	1051	5579	6.3	19521	1312	18209	14.9	26151	2363	23788	11.1
S2-M2	7186	1440	5746	5.0	20868	1263	19605	16.5	28054	2703	25351	10.4
S3-M3	6530	1879	4651	3.5	18651	1214	17437	15.4	25181	3093	22088	8.1

注: 2017 和 2019 年大豆价格均为 3 元/kg, 2018 年玉米价格为 1.7 元/kg; 2017 ~ 2019 年肥料价格分别为尿素 2.0、1.9、2.0 元/kg; 二铵 3.1、3、3.1 元/kg; 重钙均为 3.1 元/kg; 硫酸钾 3.8、3.6、3.8 元/kg。

润和产投比均较高, 且利润高达 19605 元/hm²。从轮作周年经济效益来看, S2-M2 处理的产值和利润均达最高, 与常规施肥相比, 增幅分别为 9.8% 和

8.6%, 产投比虽与常规施肥处理相比较低, 但差异不大。由此可见, S2-M2 的调控处理模式能获得相对较高的经济效益。

3 讨论

轮作有利于产量的增加和氮素等养分的吸收,尤其是豆科作物与禾本科作物轮作。有研究报道,豆科与禾本科作物轮作体系中,禾本科作物氮吸收量的5%~34%来自于前茬豆科作物根际沉积氮^[13-15]。但轮作过程中不合理的施肥会造成作物减产,肥料利用率降低等现象。对此,本文根据作物的需肥特征,提出了大豆茬口减氮增磷和玉米茬口增氮减磷的一体化施肥模式,期望通过大豆茬口以磷促氮,充分挖掘大豆的根瘤固氮功能,以提高大豆-玉米轮作系统的产量和养分利用效率,实现系统高产、高效。本研究中,大豆茬口S2处理不仅能增加大豆的干物质积累量,而且提高大豆株高和单株粒数,使大豆增产5.9%;玉米茬口M2处理不仅能增加玉米干物质积累量,而且提高玉米行粒数,显著增加玉米产量,使玉米增产11.2%,明显优于常规施肥处理。同时,大豆茬口和玉米茬口生育后期的氮、磷、钾累积量均以S2和M2处理最高,说明该调控模式下,氮、磷、钾养分分配较为合理,可促进作物对养分的吸收,为增产创造条件^[16-18]。但大豆季S3处理的氮、磷、钾累积量均比其它处理相对低,可能是由于氮磷施用比例失调,对植株的养分吸收产生负面的影响^[19]。

土壤养分收支平衡反映了农田土壤养分需求和平衡状况,对后期养分资源管理和肥料的科学分配与施用起到重要作用^[20]。当前我国主要农作物的施肥量并非完全依赖于测土配方施肥,可根据作物相应产量的养分消耗量来定。本研究中,按照农田土壤养分表观平衡(%)=(输入-输出)/输出×100来计算养分投入量^[21-22],各处理的氮、磷、钾素表观平衡率均为负值。考虑到该试验区位于黑土区,土壤中养分含量较高,若利用此表观平衡率来反映土壤养分盈余量误差相对较大,不能完全符合实际需要。因此,本研究根据刘建玲等^[23]所提出的土壤养分盈余(亏缺)(%)=(输入养分-输出养分+土壤供养分)/输出养分×100来反映土壤养分的实际“盈或亏”程度,并为科学施肥提供理论参数。本研究中,考虑土壤养分贡献后,大豆-玉米轮作体系下氮、磷、钾素盈余率均为正值,且S2-M2调控处理的氮、磷、钾素盈余率均比SCK-MCK处理较低,分别为3.44%、

62.69%、0.21%。王火焰等^[24]研究提出,在轮作制条件下,由于轮作作物对养分的需求存在差异,养分分配应向需求较高的作物倾斜,周年总养分补给与消耗大致平衡即可。这样既不会导致土壤养分库消耗太多,也不会导致土壤养分库积累过高。鲁如坤等^[25-26]研究提出,若农田氮素盈余率超过20%时,可能引起氮素对环境的潜在威胁;若磷肥增产率为10%~25%时,磷素盈余率应保持在20%以下;若农田缺钾显著的情况下,钾素平衡盈余30%~50%尚可接受。由此分析本研究中,S2-M2调控处理的氮、钾素盈余率均正常,磷素盈余率结果偏高,说明大豆-玉米轮作体系下S2-M2调控处理的氮、钾素收支基本平衡,磷素仍有盈余,需进一步完善施肥模式,特别是对磷肥的调控。实际上,作物生物量、养分含量、土壤表观平衡值与产量并不是孤立存在的,它们之间构成了一个有机整体,因此本研究对上述3方面进行相关分析,以期为进一步解释作物高产的深层机制提供参考。结果表明,大豆产量与氮素累积量呈显著正相关,玉米产量与氮素累积量呈显著正相关,说明植株氮素累积量的增加是作物获得高产的重要途径,这与魏琛琛等^[27]的研究结果相似。

豆科作物轮作下合理的施肥是保证作物高产,增加农民收益的有效措施。本研究中,与常规施肥相比,大豆茬口S2处理虽提高了大豆产量,增加了经济收益,但因肥料成本增加,经济利润相对较低;玉米茬口M2处理不仅增加了经济收益,且肥料成本相对较低,经济利润显著增加。从轮作周年经济效益来看,S1-M1和S2-M2处理的经济利润均比常规施肥较高,其中S2-M2处理的利润最高,高达25351元/hm²。

4 结论

2017~2019年实施大豆-玉米轮作调控施肥,大豆茬口S2处理可促进大豆植株对养分的吸收利用,提高干物质质量积累,增加大豆产量,增产幅度达5.9%,玉米茬口M2处理可促进玉米植株对养分的吸收利用,提高干物质质量的积累,显著增加玉米产量,增产幅度达11.2%。

大豆-玉米轮作体系下各处理的氮、磷、钾素表观平衡率均为负值,考虑土壤养分贡献后,各处理的氮、磷、钾盈余率均为正值。其中S2-M2

处理的调控模式较其它处理可降低土壤养分盈余,氮、磷、钾盈余率分别为 3.44%、62.69%、0.21%。通过相关性分析可知,植株对氮素的吸收累积是作物获得高产的重要途径。

本试验条件下, S2-M2 的调控处理虽降低了大豆的利润,但提高了玉米的利润,轮作周年利润也相对较高,达 25351 元/hm²。

综上所述,在保证轮作周年施肥总量不变的条件下,大豆-玉米轮作体系下大豆茬口减施 1/2 氮肥,增施 1/2 玉米磷肥(S2)和玉米茬口增施 1/2 大豆氮肥,减施 1/2 磷肥(M2)的调控处理在保证作物增产的同时,降低了土壤养分的盈余,对于缓解化肥浪费和环境污染起到积极的作用。该调控模式可作为黑龙江垦区大豆-玉米高效施肥的优选模式。

参考文献:

- [1] 闫平. 黑龙江省玉米种植变化原因及利弊分析 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [2] 薛庆喜. 中国及东北三省 30 年大豆种植面积、总产、单产变化分析 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (35): 102-106.
- [3] 曾昭海. 豆科作物与禾本科作物轮作研究进展及前景 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (1): 57-61.
- [4] 陈海江, 司伟, 魏丹, 等. 粮豆轮作技术的“减肥增效”效应研究——基于东北地区轮作定位试验和农户调研分析 [J]. 大豆科学, 2018, 37 (4): 545-550.
- [5] 郭耀东, 程曼, 赵秀峰, 等. 轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (6): 856-864.
- [6] 黄忠文, 高占民, 祝宝林. 黑龙江垦区大豆化肥适宜用量的研究 [J]. 现代化农业, 1991 (1): 10-12.
- [7] 邓良佐, 李艳杰, 史纪明, 等. 黑龙江省玉米测土配方平衡施肥技术研究 [J]. 现代化农业, 1997 (6): 15-16.
- [8] 刘颖, 张明怡, 李玉影, 等. 黑龙江省玉米平衡施肥及养分循环试验研究 [J]. 黑龙江农业科学, 2009 (5): 50-52.
- [9] 赵延风, 王鹏, 孙振宁. 黑龙江垦区土壤肥力现状与大豆优化施肥研究 [J]. 大豆科学, 2014, 33 (2): 211-214.
- [10] 刘艳妮, 马臣, 于昕阳, 等. 基于不同降水年型渭北旱塬小麦-土壤系统氮素表现平衡的氮肥用量研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (3): 569-578.
- [11] 黄振喜, 王永军, 王空军, 等. 产量 15000 kg·ha⁻¹ 以上夏玉米灌浆期间的的光合特性 [J]. 中国农业科学, 2007, 40 (9): 1898-1906.
- [12] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究 [J]. 玉米科学, 2007 (3): 95-98.
- [13] Laberge G, Haussmann B I G, Ambus P, et al. Cowpea N rhizodeposition and its below-ground transfer to a co-existing and to a subsequent millet crop on a sandy soil of the Sudano-Sahelian eco-zone [J]. Plant and Soil, 2011, 340 (1-2): 369-382.
- [14] Vesterager J M, Nielsen N E, Hoslash H. Nitrogen budgets in crop sequences with or without phosphorus-fertilised cowpea in the maize-based cropping systems of semi-arid eastern Africa [J]. African Journal of Agricultural Research, 2007, 2 (6): 261-268.
- [15] Peoples M B, Herridge D F. Nitrogen fixation by legumes in tropical and subtropical agriculture [J]. Advances in Agronomy, 1990, 44: 155-223.
- [16] 武庆慧, 汪洋, 赵亚南, 等. 氮磷钾配比对潮土区高产夏播花生产量、养分吸收和经济效益的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (2): 98-104.
- [17] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28 (11): 3581-3588.
- [18] 曾瑾汐, 文熙宸, Muhammad A R, 等. 氮磷配施对玉米-大豆套作模式下种间作用、玉米产量及干物质积累与转运的影响 [J]. 草业学报, 2017, 26 (7): 166-176.
- [19] 杜红霞, 吴普特, 王百群, 等. 施磷对夏玉米土壤硝态氮、吸氮特性及产量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (8): 121-127.
- [20] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡 [J]. 中国农业科学, 2011, 44 (20): 4207-4229.
- [21] 刘瑞, 戴相林, 郑险峰, 等. 半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表现平衡状况研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (4): 934-941.
- [22] 袁维翰, 常志军, 刘建玲, 等. 花生-春玉米轮作中氮磷钾的产量效应与养分平衡 [J]. 中国土壤与肥料, 2014 (2): 35-39.
- [23] 刘建玲, 李仁岗, 廖文华, 等. 河北粮田和菜地土壤大、中、微量元素肥力研究 [J]. 土壤学报, 2009, 46 (4): 652-661.
- [24] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (2): 216-225.
- [25] 鲁如坤, 时正元. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究 [J]. 中国农业科学, 2000, 33 (2): 63-67.
- [26] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 III. 全国和典型地区养分循环和平衡现状 [J]. 土壤通报, 1996 (5): 193-196.
- [27] 魏琛琛, 廖人宽, 王瑜, 等. 保水剂与氮磷肥配施对玉米生长及养分吸收的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32 (6): 236-242.

The yield response to N and P regulation and nutrient balance under soybean-maize rotation system

ZHANG Yang, ZHANG Chun-yu, ZHANG Ming-cong, JIN Xi-jun, WANG Meng-xue, ZHANG Yu-xian* (College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing Heilongjiang 163319)

Abstract: In order to explore optimal fertilizer management mode under soybean-maize rotation in Heilongjiang reclamation region, field positioning experiment was carried out in Heshan farm science and technological park of Jiusan administration bureau of Heilongjiang province, soybean-maize rotation was taken as the object and the total amount of nitrogen and phosphorus fertilizer was ensured the same during rotation period. The field experience was conducted to reduce nitrogen and increase phosphorus in soybean season, increase nitrogen and reduce phosphorus in maize season, and the effects of different nitrogen and phosphorus control treatments on plant growth, nutrient accumulation, soil balance and economic benefit of soybean-maize rotation were studied. The results showed that compared with conventional fertilization, the application of reducing 1/2 nitrogen of soybean and increasing 1/2 phosphorus of maize in soybean season (S2) and the application of increasing 1/2 nitrogen of soybean and reducing 1/2 phosphorus of maize in maize season (M2) promoted the nutrient uptake of soybean and maize plants in latter period and the dry matter accumulation. The yields of soybean and maize increased by 5.9% and 11.2%, respectively. In soybean-maize rotation, the balance of N, P and K of all nitrogen and phosphorus regulation treatments were surplus, and the lowest treatment of S2-M2 were 3.44%, 62.69%, 0.21%, respectively. Soil nitrogen and potassium balance of S2-M2 treatment were basically balanced, but phosphorus still had surplus. The maximum annual economic benefit of soybean-maize rotation was also obtained by S2-M2 treatment, which was 25351 yuan/hm². The above results showed that the application of S2 and the application of M2 can promote the absorption of nutrients by soybean and maize plants, increase dry matter accumulation, decrease the adverse effects of nutrient residues, thereby achieving the purpose of increasing yield and increasing efficiency.

Key words: soybean-maize rotation; nitrogen and phosphorus regulation; plant growth; nutrient balance; yield