

黑龙江省不同农业生态区大豆平衡施肥效果研究

李玉影¹,刘双全¹,姬景红¹,佟玉欣¹,郑雨²,刘颖¹

(1. 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; 2. 沈阳农业大学 土地与环境学院,辽宁 沈阳 110161)

摘要:在明确黑龙江省大豆主产区土壤养分限制因子和农民施肥信息的基础上,根据李比希最小养分率原理设计施肥最佳处理(optimal treatment,OPT),在OPT基础上设计减素处理,进行多年、多点田间小区试验。结果表明:大豆平衡施肥经济效益显著。与OPT相比,不施氮肥、磷肥和钾肥,大豆分别减产14.9%、14.7%和18.2%;不施硫肥、硼肥和锌肥分别减产6.7%、8.2%和6.5%。OPT处理大豆氮肥、磷肥和钾肥养分回收率分别平均为39.6%、24.6%和41.8%;农学效率分别平均为8.86、5.48和6.82 kg·kg⁻¹;氮、磷、钾的表现平衡系数分别平均为0.26、1.26、0.90。黑龙江省大豆养分高效管理运筹策略是东部三江平原农业生态区重点补充磷肥和硼肥,北部高寒农业生态区重点补充钾肥,中西部干旱、半干旱农业生态区重点补充硫肥、锌肥和硼肥。

关键词:黑龙江省;不同农业生态区;大豆;平衡施肥效应

中图分类号:S158.3;S154.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2015.06.1029

Study on the Effect of Balanced Fertilization of Soybean in Different Agricultural Ecological Regions of Heilongjiang Province

LI Yu-ying¹, LIU Shuang-quan¹, JI Jing-hong¹, TONG Yu-xin¹, ZHENG Yu², LIU Ying¹

(1. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. College of Land and Environment Sciences of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Based on the clear soil nutrient limiting factors and the information of farmers' fertilization in the major soybean production areas of Heilongjiang province, and according to Liebig's principle of minimum nutrient rate, the optimal treatment (OPT) and nutrient omission treatments were designed in the field experiments. The experimental results showed that the effect of balanced fertilization on economic benefits of soybean was significant. Without the application of nitrogen, phosphorus, potassium, sulfur, boron and zinc fertilizers, the soybean yield decreased by 14.9%, 14.7%, 18.2%, 6.7%, 8.2% and 6.5%, respectively, compared with OPT. For OPT, the fertilizer use efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium were 39.6%, 24.6% and 41.8% on average, respectively, the agronomic fertilizer use efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium were 8.86, 5.48 and 6.82 kg·kg⁻¹ on average, respectively. For OPT, the apparent equilibrium coefficient of nitrogen, phosphorus and potassium were 0.26, 1.26 and 0.90 on average, respectively. Efficient nutrient management strategy of soybean in eastern of Heilongjiang province, Sanjiang plain agricultural ecological sections, focuses on supplement phosphorus and boron fertilizer, emphasis on potash in northern, cold agricultural ecological sections, applying sulphur, zinc fertilizer and boron fertilizer in the arid and semiarid agriculture.

Keywords: Heilongjiang Province; Different agricultural ecological region; Soybean; Effect of balanced fertilization

黑龙江省现有耕地面积1 593.3万hm²,是我国重要的商品粮生产基地。大豆是黑龙江省重要的栽培作物之一。平均年播种面积275.1万hm²,2009年播种面积最大,为486.3万hm²。然而随着种植业产业结构的调整,加之大豆单产低及价格长期偏低,比较效益差,严重损伤农民种植大豆积极性。2009~2013年大豆种植面积由486.3万hm²下降到230.2万hm²,下降了52.7%。自1980~2013年以来,大豆总产为188.3~748.0万t,平均为444.8万t;单产为1 058~2 408 kg·hm⁻²,平均为1 653 kg·hm⁻²[1],呈现出单产不高、总产不稳的

趋势。

氮磷钾及中微量元素的缺乏是限制大豆产量提高的主要因素之一。氮素是构成植物体的重要组成部分,是限制作物产量和品质的重要因素。据报道,大豆根瘤固氮量占总氮吸收量的50%~60%^[2]。因此,仅靠根瘤固氮远远不能满足大豆对氮素的需要,必须适当施用氮肥^[3-4]。磷对大豆生长和结瘤固氮有促进作用,大豆缺磷会限制结瘤和固氮能力,导致作物减产^[5]。钾对大豆生长发育、产量和品质也具有较大影响,通过氮磷钾配合施用,能提高大豆产量、改善品质^[6-8]。

黑龙江省大豆生产中施肥存在的主要问题:一是氮磷钾大量元素施肥比例不尽合理;二是中微量元素缺乏;三是肥料用量不精确。本文通过多年试验研究,旨在明确黑龙江省大豆主产区土壤养分限制因子、肥料利用效率、农学效率和养分平衡系数,提出大豆高效施肥技术,为黑龙江省不同农业生态区大豆高产高效施肥提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012 ~ 2014 年在黑龙江省东部三江平原农业生态区富锦市和宝清县,北部高寒农业生态区的北安市、嫩江县和逊克县,中西部干旱半干旱农业生态区的庆安县、海伦市、克山县和依安县进行,供试土壤类型分别为白浆土、黑土和草甸土,共进行 3 年 9 点次试验。试验采用田间小区试验方法,设 7 个处理,根据土壤测试结果和农户施肥信息,应用李比希最小养分率原理设计施肥最佳处理确(OPT),在 OPT 基础上设计不同减素处理;小区面积 21 m²,3 次重复,随机区组排列。小区试验用机械开沟,人工施肥、摆籽,密度为 35 万株·hm⁻²。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用重过磷酸钙(含

P₂O₅ 46%),钾肥用氯化钾(含 K₂O 60%),锌肥用硫酸锌(含 Zn 20%),硫肥用石膏(含 S 23%),硼肥用硼砂(含 B 11%),所有肥料全部作种肥一次施入,采用适合当地的高产优质大豆品种。土壤基础肥力分析见表 1,试验处理见表 2。

1.2 测定项目与方法

于播种前和收获后分别采集耕层土壤样品,分析项目:土壤 pH、速效氮、速效磷、速效钾、有效硫、有效锌、有效硼含量;收获期采集植株和籽粒样品,分析植株和籽粒全氮、全磷、全钾含量,采用常规分析法测定^[9]。

1.3 数据分析

数据采用 Excel 2007 和 DPS 7.05 专业版数据处理系统进行统计分析。文中涉及计算公式如下:

肥料表观利用率(RE,%)=(施肥区植物吸收养分量-无肥区植物吸收养分量)×100/施肥量

肥料农学效率(AE,kg·kg⁻¹)=(施肥区经济产量-缺素区经济产量)/(施肥区施肥量-缺素区施肥量)

养分支出(kg·hm⁻²)=大豆植株地上部分养分携走量=[秸秆养分含量(%)×秸秆干重+籽粒养分含量(%)×籽粒干重]/100

表 1 土壤基础肥力
Table 1 Soil basic fertility

地区 Region	地点及土壤 Site and soil	pH	有机质 OM /g·kg ⁻¹	有效氮 N /mg·kg ⁻¹	有效磷 P ₂ O ₅ /mg·kg ⁻¹	有效钾 K ₂ O /mg·kg ⁻¹	有效硫 S /mg·kg ⁻¹	有效硼 B /mg·kg ⁻¹	有效锌 Zn /mg·kg ⁻¹
东部 East	富锦草甸 Meadow soil of Fujin	6.16	53.74	191.30	37.20	207.60	10.80	0.58	3.04
	宝清白浆土 Meadow soil of Baoqing	6.03	43.62	191.60	29.70	217.90	17.20	0.40	1.46
北部 North	北安黑土 Black soil of Beian	6.64	52.31	269.50	57.90	152.00	12.40	0.94	2.67
	嫩江黑土 Black soil of Nenjiang	6.17	47.19	176.80	43.60	182.70	18.40	0.83	2.16
	逊克黑土 Black soil of Xunke	5.64	62.53	291.60	20.80	183.10	16.50	0.65	2.76
中西部 Middle-west	庆安黑土 Black soil of Qing'an	6.34	41.83	183.40	23.90	168.20	27.40	0.68	1.87
	海伦黑土 Black soil of Hailun	6.10	50.53	223.80	37.40	176.90	13.90	1.40	1.64
	克山黑土 Black soil of Keshan	6.38	49.82	194.00	23.70	207.60	19.00	1.17	1.59
	依安黑土 Black soil of Yi'an	6.72	39.16	183.60	25.40	167.50	15.70	0.61	1.85

表 2 大豆平衡施肥试验处理

Table 2 The experimental treatments of balanced fertilization on soybean

地区 Region	地点 Site	处理 Treatment	N /kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O /kg·hm ⁻²	石膏 Gypsum /kg·hm ⁻²	硫酸锌 Zinc sulphate /kg·hm ⁻²	硼砂 Borax /kg·hm ⁻²	成本 Cost /yuan·hm ⁻²		
东部 East	富锦 Fujin	OPT	45	82.5	75	135	—	15	1326		
		O-N	0	82.5	75	135	—	15	1130		
		O-P	45	0	75	135	—	15	824		
		O-K	45	82.5	0	135	—	15	851		
		O-S	45	82.5	75	0	—	15	1183		
		O-B	45	82.5	75	135	—	0	1281		
	宝清 Baoqing	OPT	52.5	75	60	135	22.5	—	1403		
		O-N	0	75	60	135	22.5	—	1142		
		O-P	52.5	0	60	135	22.5	—	992		
		O-K	52.5	75	0	135	22.5	—	928		
		O-S	52.5	75	60	0	22.5	—	1295		
		O-Zn	52.5	75	60	135	0	—	1299		
		北部 North	北安 Bei'an	OPT	40	67.5	82.5	135	22.5	—	1319
			O-N	40	67.5	82.5	135	22.5	—	1145	
				O-P	40	67.5	82.5	135	22.5	—	908
O-K	40			67.5	82.5	135	22.5	—	797		
O-S	40	67.5		82.5	0	22.5	—	1211			
O-Zn	40	67.5		82.5	135	0	—	1216			
嫩江 Nenjiang	OPT	55	67.5	75	135	22.5	—	1337			
	O-N	0	67.5	75	135	22.5	—	1097			
	O-P	55	0	75	135	22.5	—	928			
	O-K	55	67.5	0	135	22.5	—	862			
	O-S	55	67.5	75	0	22.5	—	1229			
	O-Zn	55	67.5	75	135	0	—	1233			
	逊克 Xunke	OPT	40	82.5	75	135	—	15	1304		
		O-N	0	82.5	75	135	—	15	1130		
		O-P	40	0	75	135	—	15	802		
		O-K	40	82.5	0	135	—	15	829		
O-S		40	82.5	75	0	—	15	1196			
O-B	40	82.5	75	135	—	0	1259				

续表 2

地区 Region	地点 Site	处理 Treatment	N /kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O /kg·hm ⁻²	石膏 Gypsum /kg·hm ⁻²	硫酸锌 Zinc sulphate /kg·hm ⁻²	硼砂 Borax /kg·hm ⁻²	成本 Cost /yuan·hm ⁻²
中西部	庆安	OPT	60	90	75	—	22.5	15	1432
Middle-west	Qing'an	O-N	0	90	75	—	22.5	15	1169
		O-P	60	0	75	—	22.5	15	882
		O-K	60	90	0	—	22.5	15	955
		O-Zn	60	90	75	—	0	15	1326
		O-B	60	90	75	—	22.5	0	1385
		OPT	52.5	90	82.5	135	22.5	15	1545
	Hailun	O-N	0	90	82.5	135	22.5	15	1329
		O-P	52.5	0	82.5	135	22.5	15	1043
		O-K	52.5	90	0	135	22.5	15	976
		O-S	52.5	90	82.5	0	22.5	15	1438
		O-Zn	52.5	90	82.5	135	0	15	1442
		OPT	52.5	90	65	135	22.5	—	1399
	Keshan	O-N	52.5	90	65	135	22.5	—	1147
		O-P	52.5	90	65	135	22.5	—	851
		O-K	52.5	90	65	135	22.5	—	987
		O-S	52.5	90	65	0	22.5	—	1291
		O-Zn	52.5	90	65	135	0	—	1295
		OPT	55	82.5	75	135	22.5	15	1473
	Yian	O-N	0	82.5	75	135	22.5	15	1233
		O-P	55	0	75	135	22.5	15	971
		O-K	55	82.5	0	135	22.5	15	998
		O-S	55	82.5	75	0	22.5	15	1365
		O-Zn	55	82.5	75	135	0	15	1369
		O-B	55	82.5	75	135	22.5	0	1428

尿素1 900元·t⁻¹;重过磷酸钙2 800元·t⁻¹;氯化钾3 600元·t⁻¹;硫酸锌4 500元·t⁻¹;硼砂3 000元·t⁻¹。
Urea 1 900 yuan·t⁻¹; triple superphosphate 2 800 yuan·t⁻¹; muriate of potash 3 600 yuan·t⁻¹; zinc sulfate 4 500 yuan·t⁻¹; sodium borate 3 000 yuan·t⁻¹.

2 结果与分析

2.1 平衡施肥对大豆产量和经济效益的影响

田间试验结果表明,平衡施肥对大豆有显著增产作用(表3)。与最佳处理(OPT)相比,不施氮肥

平均减产 14.9%,不施磷肥平均减产 14.7%,不施钾肥减产 18.2%,不施硫肥减产 6.7%,不施硼肥减产 8.2%,不施锌肥减产 6.5%。各减素处理大豆产量均低于 OPT,说明最佳处理设计合理。不施钾肥对产量影响最大,其次是氮肥,再次是磷肥。不施

锌肥、硫肥和硼肥大豆减产 6.5% ~ 8.2% ,说明中微量元素对大豆有较好的增产作用。与 OPT 处理相比,不施氮肥平均少收入1 442 元·hm⁻²;不施磷肥平均少收入1 122 元·hm⁻²;不施钾肥平均少收入1 487 元·hm⁻²;不施硫肥、硼肥和锌肥平均少收入543,595 和 934 元·hm⁻²。可见,黑龙江省大豆主产区土壤养分限制因子主要是氮、磷、钾,潜在因子是硫、硼和锌,平衡施肥是提高大豆产量和效益的有效措施。

黑龙江省幅员辽阔,不同农业生态区大豆平衡施肥侧重点不同(表 4)。东部三江平原农业生态区,属于白浆土和草甸土大豆主产区。该区雨水充沛,土壤冷凉,白浆土具有障碍性白浆层,该土壤缺磷、缺硼比较突出;不施氮肥、磷肥和钾肥平均减产

15.9%、18.8% 和 13.6% ,不施硫肥和硼肥分别减产 4.4% 和 8.2% 。北部高寒农业生态区,属于黑土大豆主产区。该区雨水比较充沛,气候寒冷,有效积温低,土壤肥沃,土壤缺钾、缺硫比较突出;不施氮肥、磷肥和钾肥平均减产 12.9%、8.9% 和 20.4% ;不施硫肥和锌肥分别减产 5.9% 和 6.0% 。中西部干旱半干旱农业生态区,属于黑土和黑钙土大豆主产区。该区年降雨量较少,有效积温较高,土壤偏盐碱,土壤缺磷、缺锌突出;不施氮肥、磷肥和钾肥平均减产 14.9%、13.9% 和 20.0% ;不施硫肥、硼肥和锌肥分别减产 7.9%、8.0 和 7.4% 。根据不同农业生态区气候特点和土壤肥力特征有针对性地开展平衡施肥,以提高肥料利用率,最大限度地发挥土地的生产潜力和生态潜力。

表 3 不同施肥处理大豆产量及经济效益分析

Table 3 Different treatment of fertilization on the yield and benefits of soybean

地区 Region	地点 Site	处理 Treatment	产量 Yield /kg·hm ⁻²	增产 Increase /kg·hm ⁻²	增产 Increase /%	施肥成本 Cost /yuan·hm ⁻²	效益 Benefits /yuan·hm ⁻²
东部 East	富锦 Fujin	OPT	3080	—	—	1326	—
		O-N	2485	595	19.3	1130	2184
		O-P	2550	530	17.2	824	1618
		O-K	2784	296	9.6	851	709
		O-S	2987	93	3.0	1183	229
	宝清 Baoqing	O-B	2812	268	8.7	1281	1027
		OPT	3180	—	—	1403	—
		O-N	2783	397	12.5	1142	1327
		O-P	2530	650	20.4	992	2189
		O-K	2619	561	17.6	928	1769
		O-S	2994	186	5.8	1295	636
		O-Zn	2935	245	7.7	1299	876
		O-B	2831	349	11.0	1358	1351
	北安 Bei'an	OPT	2859	—	—	1319	—
		O-N	2477	382	13.4	1145	1354
		O-P	2598	261	9.1	908	633
		O-K	2318	541	18.9	797	1642
		O-S	2673	186	6.5	1211	636
北部 North	嫩江 Nenjiang	O-Zn	2715	144	5.0	1215	472
		OPT	2829	—	—	1337	—
		O-N	2491	338	11.9	1097	1112
		O-P	2623	205	8.2	926	409
		O-K	2310	519	19.8	862	1601
		O-S	2678	150	6.5	1229	492
		O-Zn	2644	185	6.9	1233	636

续表 3

地区 Region	地点 Site	处理 Treatment	产量 Yield /kg·hm ⁻²	增产 Increase /kg·hm ⁻²	增产 Increase /%	施肥成本 Cost /yuan·hm ⁻²	效益 Benefits /yuan·hm ⁻²
北部 North	逊克 Xunke	OPT	2791	—	—	1304	—
		O-N	2417	374	13.4	1130	1322
		O-P	2530	261	9.4	802	542
		O-K	2167	624	22.4	829	2021
		O-S	2659	132	4.7	1196	420
		O-B	2583	208	7.5	1259	787
中西部 Middle-west	庆安 Qing'an	OPT	3168	—	—	1432	—
		O-N	2652	516	11.9	1169	1801
		O-P	2501	667	8.2	882	2118
		O-K	2697	471	19.8	955	1407
		O-Zn	3019	149	6.9	1326	490
		O-B	2950	218	9.3	1385	825
	海伦 Hailun	OPT	3042	—	—	1545	—
		O-N	2641	401	11.8	1329	1388
		O-P	2752	290	9.5	1043	658
		O-K	2376	666	21.9	976	2095
		O-S	2827	215	7.1	1438	753
		O-Zn	2881	161	5.3	1442	541
	克山 Keshan	OPT	2398	—	—	1399	—
		O-N	1974	424	17.7	1171	1468
		O-P	1859	539	22.5	851	1608
		O-K	2094	304	15.9	987	804
		O-S	2173	225	9.4	1291	792
		O-B	2219	179	7.5	1295	612
	依安 Yi'an	OPT	2842	—	—	1473	—
		O-N	2328	514	18.1	1233	1816
		O-P	2407	435	15.3	971	1238
		O-K	2203	639	22.5	998	2081
		O-S	2615	227	8.0	1365	800
		O-Zn	2574	268	9.4	1369	968
2012 ~ 2014 全省平均 Average		O-B	2655	187	6.6	1428	703
		OPT	2910	—	—	1398	—
		O-N	2472	438	14.9	1172	1422
		O-P	2483	426	14.7	911	1122
		O-K	2396	513	18.2	909	1487
		O-S	2725	185	6.7	1276	543
		O-Zn	2720	190	6.5	1311	595
		O-B	2674	236	8.2	1369	934

大豆价格按 4.0 元·kg⁻¹ 计算。
Price of soybean was 4.0 yuan·kg⁻¹.

表 4 不同农业生态区平衡施肥对大豆产量及经济效益的影响

Table 4 Effect of balanced fertilization on the yield and benefits of soybean in different regions

地点 Region	处理 Treatment	产量 Yield /kg·ha ⁻²	增产 Increase /kg·hm ⁻²	增产 Increase /%	施肥成本 Cost /yuan·hm ⁻²	效益 Benefits /yuan·hm ⁻²
东部 East	OPT	3130	—	—	1365	—
	O-N	2634	496	15.9	1136	1756
	O-P	2540	590	18.8	908	1904
	O-K	2702	429	13.6	890	1239
	O-S	2991	140	4.4	1239	433
北部 North	O-B	2874	257	8.2	1290	952
	OPT	2826	—	—	1320	—
	O-N	2462	365	12.9	1124	1263
	O-P	2584	242	8.9	879	528
	O-K	2265	561	20.4	829	1755
中西部 Middle-west	O-S	2670	156	5.9	1212	516
	O-Zn	2680	165	6.0	1224	554
	OPT	2863	—	—	1462	—
	O-N	2399	464	14.9	1226	1618
	O-P	2380	483	13.9	937	1406
	O-K	2343	520	20.0	979	1597
	O-S	2659	204	7.9	1355	709
	O-B	2608	195	8.0	1369	713
	O-Zn	2728	215	7.4	1406	755

2.2 大豆平衡施肥对养分吸收与循环的影响

综合全省 3 个主要农业生态区试验结果(表 5),OPT 处理氮磷钾平均用量分别为 50,80 和 75 kg·hm⁻²。氮的平衡系数平均分别为 0.26,远远小于 1,即使大豆生物固氮能提供大约 50%的氮源^[10],50 kg·hm⁻²(N 含量)的氮肥用量仍然不能满足大豆高产和养分平衡的需求,生产上可适当提高氮肥用量。磷的平衡系数为 1.26,大于 1,说明 81 kg·hm⁻²(P₂O₅含量)的磷肥用量略有偏高,因此磷肥用量 65~75 kg·hm⁻²(P₂O₅含量)比较适宜。钾的平衡系数平均为 0.90,略小于 1,钾的平均用量为 75 kg·hm⁻²(K₂O 含量),从养分平衡角度来看还有一定的提高空间,但从经济效益和环境效益来看,钾 75 kg·hm⁻²(K₂O 含量)用量比较适宜。试验结果表明:减氮处理造成磷的相对过剩,减磷处理造成钾的相对过剩,减钾处理造成磷的相对过剩。可见氮磷钾营养元素之间的交互作用和平衡施肥的重要性。因此,应根据不同生态区土壤特点,开展平衡施肥。一是从营养元素配比上实现平衡施肥,二

是肥料用量上实现平衡施肥。

从不同农业生态区来看,东部三江平原农业生态区,OPT 处理氮磷钾的平均用量分别为 48.8,78.8 和 67.5 kg·hm⁻²。氮、磷和钾的平衡系数平均分别为 0.27,1.24 和 0.80,氮的平衡系数远远小于 1(没有考虑生物固氮),磷的平衡系数大于 1,钾的平衡系数小于 1,说明磷的用量略有偏高,氮和钾的用量不足。北部高寒农业生态区,OPT 处理氮磷钾的平均用量分别为 45,72.5 和 77.5 kg·hm⁻²。氮、磷和钾的平衡系数平均分别为 0.25,1.03 和 0.92,氮的平衡系数远远小于 1,磷的平衡系数等于 1,钾的平衡系数略小于 1,说明氮的用量不足。整体来说,在该生态区,大豆平衡施肥配方合理。中西部干旱半干旱农业生态区,OPT 处理氮磷钾的平均用量分别为 55,88.1 和 74.4 kg·hm⁻²。氮、磷和钾的平衡系数平均分别为 0.27,1.38 和 0.87,氮的平衡系数远远小于 1,磷的平衡系数大于 1,钾的平衡系数小于 1,说明氮的用量不足,磷的用量偏高,钾的用量略有偏低。

表 5 大豆养分收支平衡概算

Table 5 Soybean nutrient balance budget estimates

地区 Region	地点	处理 Treatment	养分投入			养分支出			平衡系数		
			Nutrient input/kg·hm ⁻²			Nutrient output/kg·hm ⁻²			Balance coefficient		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
东部 East	富锦 Fujin	OPT	45	82.5	75	220.4	59.8	101.0	0.27	1.48	0.83
		O-N	0	82.5	75	202.0	49.0	82.9	0	1.68	1.53
		O-P	45	0	75	192.5	43.0	82.5	0.23	0	1.74
		O-K	45	82.5	0	204.9	54.2	75.8	0.22	1.52	0
	宝清 Baoqing	OPT	52.5	75	60	201.2	75.5	97.1	0.26	0.99	0.77
		O-N	0	75	60	181.2	59.5	70.9	0	1.26	1.06
		O-P	52.5	0	60	175.7	52.7	78.3	0.30	0	0.96
		O-K	52.5	75	0	195.9	58.1	67.5	0.27	1.29	0
北部 North	北安 Bei'an	OPT	40	67.5	82.5	196.4	76.4	90.4	0.20	0.88	0.91
		O-N	0	67.5	82.5	179.6	62.7	67.7	0	1.08	1.22
	嫩江 Nenjiang	O-P	40	0	82.5	175.6	57.1	80.4	0.23	0	1.03
		O-K	40	67.5	0	163.7	52.0	59.8	0.24	1.30	0
		OPT	55	67.5	75	162.5	70.5	83.2	0.34	0.96	0.90
		O-N	0	67.5	75	137.2	60.9	64.8	0	1.11	1.16
		O-P	55	0	75	155.5	51.2	74.4	0.35	0	1.01
		O-K	55	67.5	0	143.0	60.6	53.8	0.38	1.11	0
	逊克 Xunke	OPT	40	82.5	75	193.1	63.5	78.4	0.20	1.24	0.96
		O-N	0	82.5	75	176.2	54.8	61.7	0	1.51	1.22
		O-P	40	0	75	179.2	47.1	70.4	0.22	0	1.07
		O-K	40	82.5	0	164.3	47.1	50.0	0.24	1.75	0
中西部 Middle-west	庆安 Qing'an	OPT	60	90	75	210.6	55.9	99.3	0.26	1.26	0.90
		O-N	0	90	75	191.6	39.2	75.3	0	2.30	1.00
		O-P	60	0	75	175.5	36.3	71.5	0.34	0	1.05
	海伦 Hailun	O-K	60	90	0	193.1	46.8	72.2	0.31	1.92	0
		OPT	52.5	90	82.5	192.9	74.1	93.5	0.27	1.21	0.88
		O-N	0	90	82.5	172.7	52.5	94.0	0	1.71	0.88
		O-P	52.5	0	82.5	182.1	54.0	81.9	0.29	0	1.01
	克山 Keshan	O-K	52.5	90	0	159.4	50.9	61.8	0.33	1.77	0
		OPT	52.5	90	65	180.0	56.8	74.4	0.28	1.58	0.87
		O-N	0	90	65	160.1	47.8	61.5	0	1.88	1.06
		O-P	52.5	0	65	132.3	35.6	50.5	0.40	0	1.29
	依安 Yian	O-K	52.5	90	0	156.3	43.1	47.4	0.34	2.09	0
		OPT	55	82.5	75	206.8	55.8	90.4	0.27	1.48	0.83
		O-N	0	82.5	75	185.4	41.8	68.2	0	1.97	1.10
		O-P	55	0	75	179.8	35.2	70.9	0.31	0	1.01
	全省平均 Average	O-K	55	82.5	0	177.0	39.1	56.2	0.31	2.11	0
		OPT	55	75	67.5	197.1	65.7	89.7	0.26	1.26	0.90
		O-N	0	75	67.5	176.2	52.0	71.9	0	1.61	1.14
		O-P	55	0	67.5	172.0	45.8	73.8	0.30	0	1.13
		O-K	55	75	0	175.2	51.1	62.1	0.29	1.65	0

表 6 不同农业生态区大豆养分收支平衡概算

Table 6 Soybean nutrient balance budget estimates in different regions

地区 Region	处理 Treatment	养分投入 Nutrient input/kg·hm ⁻²			养分支出 Nutrient output/kg·hm ⁻²			平衡系数 Balance coefficient		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
东部 East	OPT	48.8	78.8	67.5	210.8	67.7	99.1	0.27	1.24	0.80
	O-N	0	78.8	67.5	191.6	54.3	76.9	0	1.47	1.30
	O-P	48.8	0	67.5	184.1	47.9	80.4	0.27	0	1.35
	O-K	48.8	78.8	0	200.4	56.2	71.7	0.25	1.41	0
北部 North	OPT	45.0	72.5	77.5	184.0	70.1	84.0	0.25	1.03	0.92
	O-N	0	72.5	77.5	164.3	59.5	64.7	0	1.23	1.20
	O-P	45.0	0	77.5	170.1	51.8	75.1	0.27	0	1.04
	O-K	45.0	72.5	0	157.0	53.2	54.5	0.29	1.39	0
中西部 Middle-west	OPT	55.0	88.1	74.4	197.6	60.7	89.4	0.27	1.38	0.87
	O-N	0	88.1	74.4	177.5	45.3	74.8	0	1.97	1.01
	O-P	55.0	0	74.4	167.4	40.3	68.7	0.34	0	1.09
	O-K	55.0	88.1	0	171.5	45.0	59.4	0.32	1.97	0

2.3 大豆平衡施肥对肥料利用率的影响

从全省 3 个主要农业生态区试验结果综合来看(表 7),平衡施肥对提高肥料利用率有积极的促进作用,尤其是提高了氮肥和钾肥的利用率。黑龙江省北部高寒农业生态区和东部三江平原农业生态区大豆主产区主要土壤类型为黑土、草甸土和白浆土,土壤缺氮、缺磷、缺钾是普遍现象,但白浆土缺乏程度较为严重;中微量元素问题也比较突出,全省耕地土壤缺硫比较普遍,东部地区土壤缺硼严重,中西部干旱、半干旱农业生态区土壤缺锌严重。该研究结果表明:最佳处理(OPT)大豆氮肥利用率平均为 39.6%,磷肥利用率平均为 24.6%,钾肥利用率平均为 41.8%;大豆磷肥和钾肥利用率还有很大的提高空间,应该进一步加强研究,尽最大可能提高肥料利用率,降低肥料用量,节省肥料资源,减少环境污染。

肥料的农学效率是指单位养分用量增加的作物产量,是评价肥料增产效应较为准确的指标^[11]。本研究结果表明(表 8),OPT 处理大豆氮肥农学效率为 6.44 ~ 13.22 kg·kg⁻¹,平均为 8.68 kg·kg⁻¹;磷肥农学效率为 3.16 ~ 8.67 kg·kg⁻¹,平均 5.48 kg·kg⁻¹;钾肥农学效率为 3.38 ~ 9.35 kg·kg⁻¹,平均 6.82 kg·kg⁻¹。可见,氮肥和钾肥农学效率较高,磷肥相对较低,主要是磷肥本身有效性较低,加之黑龙江北部和东部大豆主产区长期种植大豆,磷肥在土壤中积累较多等原因。

表 7 大豆平衡施肥对肥料表观利用率的影响

Table 7 Effect of balanced fertilization on fertilizer recovery efficiency of soybean (%)

地区 Region	氮肥表观 利用率 N recovery efficiency	磷肥表观 利用率 P recovery efficiency	钾肥表观 利用率 K recovery efficiency
东部 East	38.6	24.0	43.1
北部 North	39.7	25.8	41.4
中西部 Middle-west	36.8	23.2	46.2
全省平均 Average	38.4	24.3	43.6

表 8 平衡施肥对农学效率的影响

Table 8 Effect of balanced fertilization on agronomic efficiency of fertilizer use (kg·kg⁻¹)

地区 Region	N	P ₂ O ₅	K
东部 East	9.12	7.55	6.65
北部 North	8.10	3.36	5.53
中西部 Middle-west	9.35	5.53	8.29
全省平均 Average	8.86	5.48	6.82

3 结论与讨论

研究表明,黑龙江省大豆产区土壤养分限制因子主要是 K、N 和 P,其次是 S、B 和 Zn,这与有关报道基本一致^[10]。测土配方施肥是农作物合理施肥的一项重要技术,与农民习惯施肥相比,测土配方施肥一般可增产 8% ~ 15%^[12-13]。综合全省 3 个不同农业生态区试验结果,平衡施肥对大豆增产

增收效果显著。在氮肥平均用量 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N 含量) 的条件下,氮的平衡系数平均为 0.26,尽管大豆有自身固氮作用^[14],但是该氮肥用量仍然不能满足大豆高产和养分平衡的需要,生产上可适当提高氮肥用量。在磷肥平均用量 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_2O_5 含量) 的条件下,磷的平衡系数 1.26,说明磷肥用量略有偏高,磷肥用量 $65 \sim 75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_2O_5 含量) 比较适宜。钾的平衡系数平均为 0.90,从经济效益和环境效益来看,钾的用量 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (K_2O 含量) 比较适宜。OPT 处理大豆氮肥平均利用率为 39.6%,磷肥平均利用率为 24.6%,钾肥平均利用率为 41.8%;氮肥农学效率平均为 $8.86 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;磷肥农学效率平均 $5.48 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,钾肥农学效率平均 $6.82 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。有研究表明,大豆对钾肥利用率较高,对氮磷利用率较低^[15],本研究也呈现这一趋势。

黑龙江省北部高寒农业生态区和东部三江平原大豆主产区土壤类型主要为黑土、草甸土和白浆土,土壤缺氮、缺磷、缺钾是普遍现象,但白浆土缺乏程度更为严重;全省耕地土壤缺硫比较普遍,东部地区土壤缺硼和缺磷现象严重,中西部干旱、半干旱地区土壤缺锌和缺磷现象突出。根据本研究结果,黑龙江省大豆养分高效管理运筹策略应适当增施氮肥和钾肥用量,降低磷肥用量,补充中微量元素,尤其是东部三江平原农业生态区重点补充磷肥和硼肥,北部高寒农业生态区重点补充钾肥,中西部干旱、半干旱农业生态区重点补充硫、锌和硼等中微量元素;根据不同农业生态区土壤养分丰缺状况、气候特点和栽培模式,有针对性地开展平衡施肥,实现大豆高产、高效和可持续生产。

参考文献

- [1] 黑龙江省统计局,国家统计局黑龙江调查队. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2014:269-275. (Heilongjiang Province Bureau of Statistics, The National Bureau of Statistics Survey Team in Heilongjiang Province. Heilongjiang statistical yearbook[M]. Beijing:China Statistics Press. 2014:269-275.)
- [2] 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: Agriculture Press, 2000: 101-109.)
- [3] 何建国,严华,贾金川,等. 不同氮肥管理对大豆生长及产量的影响[J]. 大豆通报,1999,5(1):11-13. (He J G, Yan H, Jia J C. Effect of different nitrogen consumption on soybean development and yield[J]. Soybean Bulletin, 1999, 5(1):11-13.)
- [4] 赵力汉,吴春胜,郭午. 施氮对大豆生长发育的影响[J]. 吉林农业大学学报,1993,15(1):12-16. (Zhao L H, Wu C S, Guo W. Effect of fertilizing nitrogen on the growth and development of soybean[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1993,15(1):12-16.)
- [5] 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,1998,26(5):67-70. (Ding H, Li S X. The relation of phosphorous nutrition to growth and symbiotic nitrogen fixation of soybean cultivars[J]. Journal of Northwestern Agricultural University, 1998,26(5):67-70.)
- [6] 王立刚,刘景辉,刘克礼,等. 大豆氮素积累分配与转移规律的研究[J]. 作物杂志,2004(5):20-22. (Wang L G, Liu J H, Liu K L, et al. Research on nitrogen accumulation, distribution and transformation of soybean[J]. Crops, 2004(5):20-22.)
- [7] 曲均峰,戴建军,徐明岗,等. 长期施肥对土壤磷素影响研究进展[J]. 热带农业科学,2009,29(3):75-78. (Qu J F, Dai J J, Xu M G, et al. Advances on effects of long-term fertilization on soil phosphorus[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2009,29(3):75-78.)
- [8] 王继安,徐杰,宁海龙,等. 施用大、中、微量元素对大豆品质及其它性状的影响[J]. 大豆科学,2003,22(4):273-277. (Wang J A, Xu J, Ning H L, et al. Effects on soybean protein & oil content and other characteristics by application of major middle and minorelement in soil[J]. Soybean Science, 2003,22(4):273-277.)
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000. (Bao S D. Soil agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.)
- [10] 闫晓艳,邱强,张伟,等. 中微量元素对优质大豆产量品质的影响[J]. 大豆科学,2010,29(3):461-465. (Yan X Y, Qiu Q, Zhang W. Effect and rational dosage of application medium trace element on quality and yield of high quality soybean[J]. Soybean Science, 2010, 29(3):461-465.)
- [11] 刘芬,同延安,王小英,等. 渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(3):552-558. (Liu F, Tong Y A, Wang X Y, et al. Effects of N, P and K fertilization on wheat yield and fertilizer use efficiency in WeiBei rainfed highland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 552-558.)
- [12] 周大龙,童海琴. 测土配方施肥的意义[J]. 现代农业科技,2009,37(23):279-282. (Zhou D L, Tong H Q. The significance of soil testing and formulated fertilization[J]. Science and Technology of Modern Agriculture, 2009, 37(23):279-282.)
- [13] 刘鹏,杨玉爱. 氮、磷、钾配施及其与钼、硼配施对大豆产量的影响[J]. 安徽农业大学学报,2003,30(2):117-122. (Liu P, Yang Y A. Effect of N, P, K combined application and N, P, K, B or Mo combined application on yield of soybean[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2003,30(2):117-122.)
- [14] 王政,高瑞凤,李文香. 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. (Wang Z, Gao R F, Li W X, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer combined application on dry matter accumulation of soybean[J]. Soybean Science, 2008,27(4):588-592.)
- [15] 赵延凤,王鹏,孙振宇. 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):221-214. (Zhao Y F, Wang P, Sun Z N, et al. Soil fertility status and optimum fertilization of soybean in Heilongjiang Reclamation area[J]. Soybean Science, 2014,33(2):221-214.)