

# 减量化施肥对大豆和玉米产量及效益影响

陆欣春<sup>1</sup>, 韩晓增<sup>1</sup>, 邹文秀<sup>1</sup>, 臧静淑<sup>2</sup>, 王丽娟<sup>3</sup>, 杨勇<sup>4</sup>, 王艳冰<sup>5</sup>, 倪凤君<sup>6</sup>

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 黑河逊克农业技术推广中心土肥站, 黑龙江 黑河 164400; 3. 黑河市爱辉区农业技术推广中心土肥站, 黑龙江 黑河 164300; 4. 北安农业技术推广中心土肥站, 黑龙江 北安 164000; 5. 海伦市农业技术推广中心土肥站, 黑龙江 海伦 152300; 6. 巴彦县农业技术推广中心土肥站, 黑龙江 巴彦 151800)

**摘要:** 为明确黑土耕地生产力、施肥情况及肥料利用率状况, 本研究在逊克、爱辉、北安、海伦和巴彦进行大豆、玉米减量化施肥试验, 结果表明, 不施肥大豆产量为  $1\ 370\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2} \sim 3\ 586\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 变异系数达 35%, 2014 年施肥大豆增产 2%~45%, 仅爱辉达到显著增产, 大豆氮磷钾肥利用率偏低, 分别为 13.7%~20.9%、5.1%~10.5%、8.0%~20.4%, 2015 年爱辉、逊克、北安施肥处理 (NPK、 $\text{N}_2\text{PK}$  和  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$ ) 均比对照显著增加了大豆产量, 然而除爱辉外, 与 NPK 相比增施肥料处理 ( $\text{N}_2\text{PK}$  和  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$ ) 对大豆产量及经济效益增加不显著, 单一肥料经济效益氮肥高于钾肥和磷肥, 其中磷肥为负效益, 大豆  $\text{N}_2\text{PK}$  ( $\text{N}\ 61.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\ 69\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}\ 46\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 处理获得经济效益最高。施肥后玉米增产幅度更高, 可达 32%~148%, 但不同施肥处理间玉米产量差异不显著, 增施肥料未能继续增加玉米产量, 玉米施磷肥经济效益高于氮肥和钾肥。总之黑土区北部大豆施肥量可减少 25%, 主要降低磷肥和钾肥施用量, 建议为  $\text{N}\ 60\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\ 70\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}\ 40\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 玉米施肥可减少 30%, 主要降低氮肥和钾肥施用量, 建议为  $\text{N}\ 150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\ 60\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}\ 40\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。表 9, 参 24。

**关键词:** 减量化施肥; 产量; 经济效益; 肥料利用率

中图分类号: S143

文献标识码: A

## Effects of Reduced Fertilization on Yield and Economic Benefit in Soybean and Maize

LU Xinchun<sup>1</sup>, HAN Xiaozeng<sup>1</sup>, ZOU Wenxiu<sup>1</sup>, ZANG Jingshu<sup>2</sup>, WANG Lijuan<sup>3</sup>, YANG Yong<sup>4</sup>,  
WANG Yanbing<sup>5</sup>, NI Fengjun<sup>6</sup>

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin 150081*; 2. *Xunke Agricultural Technology Extension Center, Heihe 164400, China*; 3. *Aihui Agricultural Technology Extension Center, Heihe 164300, China*; 4. *Beian Agricultural Technology Extension Center, Beian 164000, China*; 5. *Hailun Agricultural Technology Extension Center, Hailun 152300, China*; 6. *Bayan Agricultural Technology Extension Center, Bayan 151800, China*)

**Abstract:** Reduced fertilization experiments of maize and soybean were conducted in Xunke, Aihui, beian, Hailun and Bayan in Heilongjiang Province in order to determine the productivity of arable black soil, fertilization status and fertilizer use efficiency. The result showed that soybean yield with no fertilizer treatments (CK) changed from  $1\ 370\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2} \sim 3\ 586\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  with the coefficient of variation of 35% in all experimental sites with exception of Bayan in 2014 and 2015. Soybean yield in 2014 was increased by 2~45% in fertilizer application treatments compared with CK, significant increase in soybean yield was only observed in Aihui. In 2015, soybean yield in fertilization treatments (NPK,  $\text{N}_2\text{PK}$  and  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$ ) was significantly increased in Aihui, Xunke and Beian compared with CK, but additional N and P fertilizer application ( $\text{N}_2\text{PK}$  and  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$ ) also increased soybean yield and economic benefit compared with NPK ( $p > 0.05$ ). Fertilizer use efficiencies of soybean were a little bit low with 13.7%~20.9%, 5.1%~10.5% and 8.0%~20.4% for N, P and K fertilizer use efficiency, respectively. Economic benefit of N fertilizer was more than that of P and K fertilizers, the highest economic benefit of soybean was found in  $\text{N}_2\text{PK}$  treatment ( $\text{N}\ 61.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\ 69\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}\ 46\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ). Maize yield in fertilization treatments was increased by 32%~148% compared with CK, there was no significant difference among different fertilization treatments, additional N and P fertilizer application treatments ( $\text{N}_2\text{PK}$  and  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$ ) had no effects in increasing maize yield compared with NPK. The economic benefit of P fertilizer was more than that in N and K fertilizers for maize. Therefore, a-

收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2016-07-15.

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503120, 201303126); 国家重点研发计划 (2016YFD0200309-6).

第一作者简介: 陆欣春 (1982-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤肥力与作物营养方面研究.

通讯作者: 韩晓增 (1957-), 男, 辽宁瓦房店人, 研究员, 主要从事农田生态研究.

mount of fertilizer application of soybean and maize could be decreased by 25% and 30% , respectively , with reduction in P and K fertilizer for soybean , N and K fertilizer for maize. The recommended fertilizer application rate in the northern part of Mollisols region was N 60 kg·hm<sup>-2</sup> , P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 70 kg·hm<sup>-2</sup> , K<sub>2</sub>O 40 kg·hm<sup>-2</sup> for soybean , N 150 kg·hm<sup>-2</sup> , P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg·hm<sup>-2</sup> , K<sub>2</sub>O 40 kg·hm<sup>-2</sup> for maize.

**Key words:** reduced fertilization; yield; economic benefit; fertilizer use efficiency

## 0 引言

2015年4月14日农业部副部长张桃林在国务院新闻办举行的新闻发布会上表示,目前我国农业资源环境受到外源性污染和内源性污染双重压力,已日益成为影响农业可持续发展的瓶颈。在农业生产内部,由于化肥、农药等农业投入品长期不合理过量使用,以及畜禽粪污、农作物秸秆和农田残膜等农业废弃物不合理处置等,使得农业面源污染问题日益严重。这些都加剧了土壤和水体污染,增加了农产品质量安全风险,为此要有针对性地推进“一控两减三基本”,即控制农业用水总量和农业水环境污染,减少化肥、农药使用,畜禽粪污、农膜和农作物秸秆基本得到资源化、综合循环再利用和无害化处理。

我国东北黑土是世界上比较肥沃的土壤之一,但生产上仍需每年向土壤中投入一定量的肥料来保证作物高产。关于施肥与作物产量间关系的研究较多,研究者提出了测土配方施肥、专家系统与施肥模型、营养诊断等施肥方法指导生产<sup>[1-7]</sup>。也有利用二次方程进行拟合计算出最佳经济施肥量<sup>[8-10]</sup>。根据调查,东北地区春玉米平均施肥量为 207 kgN·hm<sup>-2</sup>、100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>、65 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup><sup>[11]</sup>。据资料报道全国大豆施肥量 296 kg·hm<sup>-2</sup> (189 kgN·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 44 kg·hm<sup>-2</sup>) ,东北地区大豆施肥量 156 kg·hm<sup>-2</sup> (110 kgN·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 24 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 22 kg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[12]</sup>,相对低于全国施肥水平。大豆能共生固氮,土壤氮肥施用量达到一定程度时便开始影响大豆共生固氮。大豆施钾肥能够显著缓解大豆连作对大豆产量的限制<sup>[13]</sup>。大豆-玉米轮作试验结果表明,施肥对大豆没有增产效果<sup>[14-15]</sup>,在2013年南非国际大豆会议上,与会专家认为恰当的栽培措施和合理的肥料施用是稳定和提高大豆产量与品质的重要因素,研究者不仅关注大豆施肥技术研究,在大豆参与下的轮作对土壤环境、大豆产量、玉米产量和经济效益的影响也得到了广泛关注<sup>[16]</sup>,而良好的耕作措施是减量化施肥的关键。

黑土质地粘重,在长期不合理的耕作中,特别是小功率拖拉机耕地浅,多次进地碾压土壤,形成犁底层使作物根系生长受阻<sup>[17]</sup>,是大豆产量提高的主要限制因子,采用一般施肥措施或增加施肥量不能改善其限制,为此韩晓增等提出了肥沃耕层构建技术<sup>[18-19]</sup>,通过向20 cm~35 cm土层施用秸秆和有机肥,降低土壤容重增加总孔隙度和饱和导水率,改善土壤的通气透水性,提高大气降水的入渗能力,从而提高土壤肥力,增加大豆产量,该技术在保证大豆产量的同时可降低施肥量。为明确典型黑土区主要作物可能的减肥量和种类,我们在巴彦、海伦、北安、黑河爱辉和黑河逊克进行减量化施肥试验,以了解这些地区土壤地力及大豆、玉米对施肥反应情况,旨在为实现化肥用量零增长或负增长,提高化肥利用率提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

2014年-2015年两年在海伦、北安、黑河爱辉和黑河逊克进行大豆减量化施肥试验,2015年在巴彦和黑河逊克(设车陆和高滩两个试验点)进行玉米减量化施肥试验。试验依托当地农业技术推广中心土肥站,在各个试验点选择有一定代表性耕地进行试验。试验共设5个处理,2015年对试验处理进行了调整,各处理施肥量见表1。大豆施肥方式:氮磷钾肥均为基肥一次性施入。玉米施肥方式为:尿素1/2作追肥,其余氮肥和磷钾肥一起作基肥一次性施入。试验每个处理小区面积不低于150 m<sup>2</sup>(每个处理播种8垄,垄长不少于30 m),大豆、玉米品种选择当地主栽品种,采用机播,田间管理按当地常规管理进行。

表1 大豆、玉米试验处理施肥量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Tab. 1 The fertilizer rates of soybean and maize in 2014 and 2015

处理 Treatments	2014			处理 Treatments	2015					
	大豆施肥量				大豆施肥量			玉米施肥量		
	Fertilizer rates of soybean				Fertilizer rates of soybean			Fertilizer rates of maize		
N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O		
CK	0	0	0	CK	0	0	0	0	0	0
NP	27	69	0	NP	27	69	0	137.4	69	0
NPK	27	69	38	NPK	27	69	46	137.4	69	76.5
NK	27.6	0	38	N <sub>2</sub> PK	61.5	69	46	192.6	69	76.5
PK	0	69	38	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K	61.2	103.5	46	206.1	103.5	61.2

至大豆、玉米成熟期进行收获, 采植株样品测产。2014年植株样品测定 N、P、K 含量, 大豆在 9 月 11 日叶片开始脱落时每个处理采集 2 株, 将其分为根、茎、叶、叶柄和荚计算植株各部分所占重量比例, 大豆成熟后, 采集 2 株大豆, 分为粒、荚皮和茎计算各部分所占重量比例, 综合两次采用计算大豆植株根、茎、叶、叶柄、荚皮和粒重量比例。分别测定各部位 N、P、K 含量, 测定方法采用  $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$  法<sup>[20]</sup>, 计算大豆 N、P、K 肥利用率。

## 1.2 统计分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 软件进行处理, 用 SPSS 20.0 软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分含量

各试验点供试土壤偏酸, pH 值为 5.75 ~ 6.09; 土壤有效磷含量按我国土壤有效磷分级标准, 仅黑河逊克试验点属于 3 级 (20 ~ 10), 其余试验点属于 1 级 (>40), 综合来看各试验点土壤有效磷含量均较高; 对于速效钾评判, 根据我国农业部在第二次土壤普查时划分标准, 各试验点土壤速效钾含量亦达到中等及高水平; 对于土壤有机质和全 N 含量, 以我国土壤分级标准评判, 各试验点含量均处于高水平, 各试验点土壤碱解 N 含量均高于  $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 见表 2。综上由土壤各项指标评定, 各试验点土壤肥力均较高。

表2 各试验点基础土壤养分状况

Tab. 2 Soil fertility status before sowing at experimental sites

试验地 Sites	pH	有机质	全 N	全 P	全 K	碱解 N	速效磷	速效钾
		( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Organic matter	( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Total nitrogen	( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Total phosphorus	( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Total potassium	( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Available nitrogen	( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Available phosphorus	( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Available potassium
海伦 Hailun	5.75	52.6	2.21	0.95	20.1	161.6	49.9	187.0
北安 Beian	5.89	40.3	1.90	0.87	19.9	134.5	45.9	193.0
爱辉 Aihui	5.91	41.0	2.22	0.90	20.3	126.7	41.6	86.5
逊克 Xunke	6.09	36.5	1.84	0.85	19.4	138.0	17.6	95.5

### 2.2 不同施肥对大豆、玉米产量的影响

2014 年大豆产量结果表明, 与不施肥相比, 施肥对大豆有一定增产效果, 增产幅度为 2% ~ 45%, 尽管施肥对大豆增产, 仅在黑河爱辉区试验点和海伦的施氮钾肥处理增产 20%, 达显著水平, 其余各点中

增产均未达到显著水平, 见表3。就单一肥料而言, 在均施磷钾肥条件下, 施氮肥 (NPK) 比不施氮肥 (PK) 影响大豆增产的幅度为 2.7% ~ 6.2%; 均施氮钾肥条件下, 各试验点中仅黑河爱辉施磷肥 (NPK) 比不施磷肥 (NK) 增加了大豆产量, 增产幅度达 4.24%, 其余各试验点施磷肥反而出现减产; 在均施氮磷肥条件下, 黑河爱辉和逊克试验点施钾肥有一定增产效果, 但增产幅度仅为 2.85% ~ 4.57%, 在北安和海伦施钾肥反而减产。

表3 不同施肥对大豆产量影响 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Tab. 3 The impact of fertilization on soybean yield in 2014 and 2015

	2014				2015				
	北安 Beian	爱辉 Aihui	逊克 Xunke	海伦 Hailun	北安 Beian	爱辉 Aihui	逊克 Xunke	海伦 Hailun	
CK	2 127 a	1 440 b	3 586 a	3 200 b	CK	1 370 d	1 688 cd	2 754 c	2 654 a
NP	2 606 a	2 033 a	3 748 a	3 482 ab	NP	1 857 cd	1 515 d	3 972 a	2 551 a
NPK	2 558 a	2 091 a	3 920 a	3 382 ab	NPK	2 335 bc	1 781 c	3 469 b	2 751 a
NK	2 662 a	2 006 a	3 974 a	3 838 a	N <sub>2</sub> PK	2 810 ab	2 121 b	4 167 a	2 862 a
PK	2 408 a	2 036 a	3 807 a	3 272 ab	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K	3 207 a	2 290 a	3 767 ab	2 571 a

注: 不同小写字母表示在同一组内 5% 水平上显著差异, 下同。

Note: Different letters mean significant differences at 5% level in the same group. The same as below.

2015 年大豆产量结果显示, 在北安和黑河逊克试验地, 施肥均显著增加了大豆产量, 增产幅度分别达到了 36% ~ 134%、26% ~ 51%, 在海伦施肥对大豆产量影响较小, 在黑河爱辉, NP、NPK 处理均未达到增产效果, 施高量的氮肥 (N<sub>2</sub>PK) 和磷肥 (N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K) 处理可显著增加大豆产量。不同施肥处理间比较, 在爱辉区, 增施氮、磷、钾肥均显著增加了大豆产量; 在其他地区增施氮、磷、钾肥对大豆产量增加不显著。

2015 年玉米试验结果表明, 施化肥均比不施肥对照显著增加了玉米产量, 增产幅度可达 32% ~ 148%, 而不同施肥处理间玉米产量有一定差异, 但未达显著水平, 即在几个试验点施肥均可显著增加玉米产量, 但施高量氮磷钾肥不能继续显著提高玉米产量, 见表4。

表4 不同施肥对玉米产量的影响

Tab. 4 The impact of fertilization on maize yield

	巴彦 Bayan		逊克车陆 Xunkechelu		逊克高滩 Xunkegaotan	
	产量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) Yield	比无肥 (%) Compared to no fertilizer	产量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) Yield	比无肥 (%) Compared to no fertilizer	产量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) Yield	比无肥 (%) Compared to no fertilizer
CK	7 800 b	0	4 362 b	0	6 419 b	0
NP	10 800 a	38	9 867 a	126	9 337 a	45
NPK	10 300 a	32	8 996 a	106	11 095 a	73
N <sub>2</sub> PK	11 200 a	44	10 030 a	130	9 669 a	51
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K	11 900 a	52	10 813 a	148	10 550 a	64

## 2.2 不同施肥处理增加大豆、玉米经济效益分析

与对照相比, 施肥增收经济效益分析, 在北安和逊克试验点两年施肥处理大豆均为正效益, 北安施肥处理比不施肥可增收 655 元· $\text{hm}^{-2}$  ~ 5 692 元· $\text{hm}^{-2}$ ; 逊克可增收 78 元· $\text{hm}^{-2}$  ~ 4 130 元· $\text{hm}^{-2}$ ; 而海伦两年施肥处理均出现负效益, 仅 2014 年 NP 和 NPK 处理获得 528 元· $\text{hm}^{-2}$  和 1 982 元· $\text{hm}^{-2}$ , 见表5。在爱辉试验点, 2014 年, 施肥可获得收益 1 609 元· $\text{hm}^{-2}$  ~ 1 850 元· $\text{hm}^{-2}$ , 2015 年 NP、NPK 处理均为负效益,

$N_2PK$ 、 $N_2P_2K$  可获得  $568 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $999 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而对于玉米，所有施肥均获得正经济效益，比不施肥对照可增收  $2\ 086 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2} \sim 7\ 631 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。几个试验点平均比较，玉米经济效益高于大豆，而大豆  $N_2PK$  处理经济效益最高。

表 5 不同施肥对大豆、玉米经济效益影响 ( $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Tab. 5 The impact of fertilization on economic benefit of soybean and maize

处理 Treatment	大豆 2014 Soybean					处理 Treatment	大豆 2015 Soybean					玉米 2015 Maize			
	北安 Beian	爱辉 Aihui	逊克 Xunke	海伦 Hailun	平均 Mean		北安 Beian	爱辉 Aihui	逊克 Xunke	海伦 Hailun	平均 Mean	巴彦 Beian	车陆 Chelu	高滩 Gaotan	平均 Mean
NP	1 281	1 711	78	528	900	NP	1 309	-1 200	4 089	-934	816	3 480	7 238	3 358	4 692
NPK	777	1 609	406	-173	655	NPK	2 740	-575	1 789	-559	849	2 086	5 285	5 350	4 240
NK	1 591	1 706	1 035	1 982	1 578	$N_2PK$	4 395	568	4 293	-288	2 242	3 196	6 597	2 970	4 254
PK	655	1 850	428	-139	698	$N_2P_2K$	5 692	999	2 561	-1 604	1 912	4 103	7 631	4 151	5 295

注：肥料价格：尿素  $2.0 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；二铵  $3.6 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；过磷酸钙  $0.6 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；硫酸钾  $4.3 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；大豆价格  $3.8 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；玉米  $1.5 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

Note: Fertilizer prices: Urea,  $2.0 \text{ RMB Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Diamine,  $3.6 \text{ RMB Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Superphosphate,  $0.6 \text{ RMB Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Potassium sulfate,  $4.3 \text{ RMB Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Soybean,  $3.8 \text{ RMB Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Maize,  $1.5 \text{ RMB Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

2.2.1 大豆施氮肥利用率及其经济效益分析。大豆氮肥利用率为  $13.7\% \sim 20.9\%$ ，均较低，计算大豆施氮肥经济效益，在施磷钾肥条件下，每多施  $1 \text{ kg}$  氮肥可增收  $2.0 \text{ kg} \sim 20.2 \text{ kg}$  大豆，可增收  $7.6 \text{ 元} \sim 76.8 \text{ 元}$ ，而在 2014 年 NPK 处理比 PK 处理增收为负值，主要是因为 PK 处理中投入的过磷酸钙肥料价格比二铵便宜，2015 年，增施一定量氮肥，平均每公顷仍可获得  $1\ 250 \text{ 元}$  收益，见表 6。

表 6 大豆施氮肥肥料利用率及经济效益分析

Tab. 6 N fertilizer use efficiency and economic benefit of soybean in 2014 and 2015

	2014					2015			
	增产 (a) ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	肥料利用 率 (%)	增收 (b) ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (c) ( $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (d) ( $\text{元}\cdot\text{hm}^{-1}$ )	增产 (a) ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	增收 (b) ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (c) ( $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (d) ( $\text{元}\cdot\text{hm}^{-1}$ )
	Increased yield	Fertilizer use efficiency	Increased yield	Increased benefit	Increased benefit	Increased yield	Increased yield	Increased benefit	Increased benefit
北安 Beian	150.4	20.9	5.6	21.3	122	474.8	13.8	52.4	1 654
爱辉 Aihui	55.0	13.7	2.0	7.6	-241	340.3	9.9	37.6	1 143
逊克 Xunke	112.7	17.2	4.2	16.0	-22	698.7	20.2	76.8	2 504
海伦 Hailun	109.4	15.5	4.0	15.2	-34	110.8	3.2	12.2	271
平均 Mean	106.9	16.8	4.0	15.0	-44	368.4	10.7	40.6	1 250

注：(a) 2014 年为 NPK 与 PK 处理比增产产量，2015 年为  $N_2PK$  与 NPK 处理比增产产量；(b) 每增加  $1 \text{ kg}$  纯量化肥所增加的产量；(c) 按照大豆市场综合商品价格计算，每增加  $1 \text{ kg}$  纯量化肥所增加的收入；(d) 每  $\text{hm}^2$  增加的收入。

Note: (a) Increased yield of NPK compared with PK in 2014, and increased yield of  $N_2PK$  compared with NPK in 2015; (b) Yield increases with pure fertilizer increased by per kg; (c) Income increases with pure fertilizer increased by per  $1 \text{ kg}$  based on market soybean price; (d) Income increases with planting area increased by per  $\text{hm}^2$ .

2.2.2 大豆施磷肥利用率及其经济效益分析。大豆磷肥利用率为  $5.1\% \sim 10.5\%$ ，与施氮钾化肥（2014 年）或氮钾加低量磷肥（2015 年）条件下，两年各试验点施磷肥总体对产量和经济效益影响较低，增产、增收幅度较低，仅爱辉两年施磷肥获得正效益，而逊克和海伦施磷肥两年均为负效益，4 个试验点平均每施  $1 \text{ kg}$  磷肥反而损失  $7.3 \text{ 元} \sim 10.6 \text{ 元}$ ，见表 7。

表7 大豆施磷肥经济效益分析

Tab. 7 The P fertilizer's economic benefit of soybean

	2014					2015			
	增产 (a) (kg·hm <sup>-2</sup> ) Increased yield	肥料利用 率 (%) Fertilizer use efficiency	增收 (b) (kg·kg <sup>-1</sup> ) Increased yield	增收 (c) (元·kg <sup>-1</sup> ) Increased benefit	增收 (d) (元·hm <sup>-1</sup> ) Increased benefit	增产 (a) (kg·hm <sup>-2</sup> ) Increased yield	增收 (b) (kg·kg <sup>-1</sup> ) Increased yield	增收 (c) (元·kg <sup>-1</sup> ) Increased benefit	增收 (d) (元·hm <sup>-1</sup> ) Increased benefit
北安 Beian	-103.8	5.1	-1.5	-5.7	-814	396.5	5.3	20.1	1 297
爱辉 Aihui	85.0	8.6	1.2	4.6	-97	168.6	2.2	8.4	431
逊克 Xunke	-54.8	10.5	-0.8	-3.0	-628	-400.8	-11.6	-44.1	-1 732
海伦 Hailun	-456.6	-	-6.6	-25.1	-2 155	-291.1	-8.4	-31.9	-1 316
平均 Mean	-132.5	8.1	-1.9	-7.3	-924	-19.2	-2.8	-10.6	-283

注: 2014 年为 NPK 处理与 NK 处理比, 2015 年为 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K 与 N<sub>2</sub>PK 处理比。

Note: NPK compared with NK in 2014, and N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K compared with N<sub>2</sub>PK in 2015.

2.2.3 大豆施钾肥利用率及其经济效益分析。大豆钾肥利用率为 8.0% ~ 20.4%, 在施氮磷肥条件下, 大豆施钾肥增产、增效幅度也较低, 爱辉两年施钾肥获得正效益, 而北安、逊克、海伦两年结果不一致, 北安 2015 年施钾肥获得效益最高, 每 kg 钾肥可以获得 39.5 元, 4 个试验点平均, 每施 1 kg 钾肥两年分别获得 2.0 和 11.6 元效益, 见表 8。

表8 大豆施钾肥经济效益分析

Tab. 8 The K fertilizer's economic benefit of soybean

	2014					2015			
	增产 (a) (kg·hm <sup>-2</sup> ) Increased yield	肥料利用 率 (%) Fertilizer use efficiency	增收 (b) (kg·kg <sup>-1</sup> ) Increased yield	增收 (c) (元·kg <sup>-1</sup> ) Increased benefit	增收 (d) (元·hm <sup>-1</sup> ) Increased benefit	增产 (a) (kg·hm <sup>-2</sup> ) Increased yield	增收 (b) (kg·kg <sup>-1</sup> ) Increased yield	增收 (c) (元·kg <sup>-1</sup> ) Increased benefit	增收 (d) (元·hm <sup>-1</sup> ) Increased benefit
北安 Beian	-47.9	11.3	-1.3	-4.9	-504.5	478.7	10.4	39.5	1 432.1
爱辉 Aihui	57.9	15.0	1.5	5.7	-102.5	266.5	5.8	22.0	625.7
逊克 Xunke	171.4	20.4	4.5	17.1	328.8	-503.5	-8.3	-31.5	-1 831.7
海伦 Hailun	-99.6	8.0	-2.6	-9.9	-701.0	200.5	4.4	16.6	374.7
平均 Mean	20.4	13.7	0.5	2.0	-244.8	141.4	3.1	11.6	150.2

注: 两年均为 NPK 与 NP 处理。

Note: Only NPK and NP in two years.

2.2.4 玉米施肥经济效益分析。分析玉米施氮磷钾肥经济效益结果显示, 在 3 个试验点施磷肥经济效益均为正, 平均增施 1 kg 磷肥可获得 34.2 元; 在巴彦和车陆, 施氮肥获得正效益, 每千克氮肥可获得 26.2 元, 而施钾肥为负收益; 而在高滩施氮肥为负效益, 施钾肥可获得 34.5 元·kg<sup>-1</sup>, 见表 9。

### 3 讨论

恰当的栽培措施和肥料施用是稳定和提高大豆产量与品质的重要因素, 而关于大豆推荐施肥量, 不同研究者在不同试验点得出的结论差异也较大, 刘双全<sup>[21]</sup>推荐大豆配方施肥施用量为 N 52.5 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 60 kg·hm<sup>-2</sup>; 杨丽君<sup>[22]</sup>在黑龙江省北部进行试验, 大豆高产高效最佳施肥量 225 kg·hm<sup>-2</sup> ~ 262.5 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为: 岗坡 1.0:1.2:(0.8~1.0), 平地 1.0:(1.4~1.5):1.0, 王囡囡等<sup>[23]</sup>试验结果推荐施肥量为尿素 60 kg·hm<sup>-2</sup>, 磷酸二铵 135.5 kg·hm<sup>-2</sup>, 氯化钾 54 kg·hm<sup>-2</sup>; 宋

春等<sup>[10]</sup>试验得出北部黑土区大豆最佳施肥量为  $N 60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$   $P_2O_5$ ,  $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 48 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 总体上推荐施肥量均在  $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  以上, 据我们调查, 当地农户播种大豆施肥量甚至高于此量。文中所设实验处理施肥量均低于  $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 在 4 个试验点, 施肥对大豆均有一定增产, 2014 年仅爱辉区增产幅度较高, 其他试验点增产幅度较低, 所获得经济效益也不高, 最高收益为  $1 981.9 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 氮磷钾肥的利用率均较低, 氮肥利用率为  $13.7\% \sim 20.9\%$ , 磷肥利用率为  $5.13\% \sim 10.5\%$ , 钾肥利用率为  $8.0\% \sim 20.4\%$ 。2015 年由于不施肥处理产量降低, 可能是由于第二年重茬大豆, 引起了减产, 施肥获得了更高的经济效益。但不同施肥处理间比较, 增加施肥量不能继续增加大豆产量, 单独分析氮磷钾经济效益, 氮肥经济效益, 两年分别为  $15.0 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $40.6 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 磷肥两年经济效益均为负值, 钾肥两年经济效益分别为  $2.0 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $11.6 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。综合在黑土区施氮磷钾肥对大豆有一定增产, 但肥料利用率较低, 并且单一肥料经济效益较低, 尤其是磷钾肥大部分表现为负经济效益, 从而说明在黑土区减量化施肥大豆经济效益降低不大, 综合几个处理大豆以  $N_2PK$  处理获得经济效益最高, 这与王凤仙等<sup>[14]</sup>在海伦试验结果一致。从而我们推荐黑土区大豆施肥量为  $N 60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $P_2O_5 70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 考虑施磷钾肥表现为负经济效益, 从而还可适当降低磷钾肥施用量。我们前期在海伦进行的肥沃耕层构建技术实施中, 大豆施肥量为  $N 60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $P_2O_5 60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 取得良好增产效果<sup>[18]</sup>, 也证明适量降低磷钾肥用量对大豆产量及经济效益影响不大。这与北部黑土区大豆一般施肥量相比总量降低了近 25%, 其中磷肥降低了 20%, 钾肥降低了 37.5%。施肥在玉米生产中的地位越来越重要, 随着玉米产量的不断提高, 肥料的投入也在增大, 吉林省化肥施用量从 1980 年的 19.3 万 t 到 2005 年的 159.1 万 t, 增加了 7.2 倍<sup>[11]</sup>, 但随着施肥量的增加会出现报酬递减、肥料利用率降低的情况。本研究中, 与不施肥处理相比, 施肥可显著增加玉米产量, 且获得一定收益, 但不同施肥处理间, 玉米产量差异不大, 所获得的收益差异也较小, 即增施肥料对玉米产量及收益增加不大, 为此可减少 30% 玉米施肥量, 主要氮肥可减少 25%, 钾肥可减少 40%。建议玉米施肥量为  $N 150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $P_2O_5 60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

王凤仙等<sup>[14]</sup>前期在海伦进行的试验结果表明, 大豆施肥获得经济效益高于玉米, 近年来由于玉米品种的引进, 玉米生育期缩短, 产量不断增高, 本文中施肥可显著增加玉米产量, 但不同施肥量玉米产量差异不大, 总体玉米施肥获得效益高于大豆, 再加上玉米实现了机械化收割, 导致我国黑土区玉米种植面积增加, 大豆种植面积不断减小, 但长期玉米连作会有一定减产<sup>[24]</sup>。因此, 合理的大豆-玉米轮作模式, 配合精准施肥方式, 减少肥料施用量而不减产, 对降低农业资源环境污染, 农业可持续发展具有重要意义。

表 9 玉米施氮磷钾肥经济效益  
Tab. 9 The N, P and K fertilizers' economic benefit of maize

	N				$P_2O_5$				$K_2O$		
	增产 (a) ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	增收 (b) ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (c) ( $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (d) ( $\text{元}\cdot\text{hm}^{-1}$ )	增产 (a) ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	增收 (b) ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (c) ( $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (d) ( $\text{元}\cdot\text{hm}^{-1}$ )	增产 (a) ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	增收 (b) ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	增收 (c) ( $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
	Increased yield	Increased yield	Increased benefit	Increased benefit	Increased yield	Increased yield	Increased benefit	Increased benefit	Increased yield	Increased yield	Increased benefit
巴彦 Bayan	900	16.3	24.4	1 110	699	20.3	30.4	1 036	-500	-6.5	-9.8
车陆 Chelu	1 034	18.7	28.0	1 312	783	22.7	34.0	1 163	-872	-11.4	-17.1
高滩 Gaotan	-1 426	-25.8	-38.7	-2 380	881	25.5	38.2	1 310	1 758	23.0	34.5
平均 Mean	169.3	3.1	4.6	14	788	22.8	34.2	1 170	129	1.7	2.5

## 4 结 论

东北北部黑土区与不施肥对照相比, 施肥对大豆有一定增产效果, 不同试验点增产幅度不一致, 可获得一定经济效益, 综合比较施肥处理  $N 61.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $P_2O_5 69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  经济效益最高。施肥可显著增加玉米产量, 不同施肥处理间玉米产量差异不显著, 施肥比不施肥玉米可获得较高经济效益。就氮磷钾单一肥料而言, 大豆氮磷钾利用率均较低, 大豆施氮肥经济效益高于钾肥和磷肥, 玉米施磷肥经济效益高于氮肥和钾肥。总之, 在黑土区北部大豆、玉米施肥量过高, 增施肥未能获得更高经济效益, 为此, 大豆磷肥施用量可减少 20%, 钾肥施用量可减少 37.5%, 推荐施用量  $N 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $P_2O_5 70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。玉米施肥氮肥可减少 25%, 钾肥可减少 40%, 推荐量为  $N 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $P_2O_5 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

### 参考文献:

- [1] Woodson W R, Boodley J W. Petiole nitrate concentration as an indicator of Geranium nitrogen status [J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1983, 14 (5): 363-371.
- [2] Colwell J D, Morton R. Development and evaluation of general or transfer models of relationships between wheat yields and fertilizer rates in southern Australia [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1984, 22 (2): 191-205.
- [3] Cerrato M E, Blackmer A M. Comparison of models for describing Gore yield response to nitrogen fertilizer [J]. *Agronomy Journal*, 1990, 82 (1): 138-143.
- [4] Lukina E V, Freeman K W, Wynn K J, et al. Nitrogen fertilization optimization algorithm on in-season estimated of yield and plant nitrogen uptake [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24 (6): 885-898.
- [5] 韩秉进. 松嫩平原黑土区玉米生产氮磷配合肥效优化模型的研究 [J]. *土壤学报*, 1998, 35 (3): 392-397.
- [6] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 等. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择-经济和环境效益分析 [J]. *土壤学报*, 2000, 37 (3): 346-354.
- [7] 张福锁. 测土配方施肥技术要览 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- [8] 吴魁斌, 戴建军, 赵久明, 等. 不同施氮水平对大豆产量及氮肥利用率的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 1999, 30 (4): 339-341.
- [9] 张忠学, 魏永霞, 王贵作, 等. 氮磷钾配施对黑龙江西部半干旱地区大豆产量及效益的影响研究 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 2005, 21 (2): 146-148, 153.
- [10] 宋春, 韩晓增, 李海波, 等. 北部黑土区旱年大豆适宜施肥量的研究 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 2009, 25 (3): 375-379.
- [11] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26 (14): 229-231.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王凤仙, 韩晓增, 王凤菊. 黑土区玉米-大豆轮作条件下施肥效应的研究 [J]. *土壤通报*, 2010, 41 (6): 1404-1411.
- [15] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春. 美国、巴西施肥-轮作-耕作方式对大豆产量影响最新研究进展 [J]. *大豆科技*, 2015 (3): 14-15.
- [16] 邹文秀, 严君, 苑亚茹, 等. 南非国际大豆会议有关大豆轮作与施肥研究的综述 [J]. *大豆科学*, 2013, 32 (6): 852-853, 861.
- [17] 张兴义, 隋跃宇, 孟凯. 农田黑土机械压实及其对作物产量的影响 [J]. *农机化研究*, 2002 (4): 64-67.
- [18] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 黑土肥沃耕层构建效应 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (12): 2996-3002.
- [19] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 构建黑土肥沃耕层对大豆产量影响的研究 [J]. *大豆科技*, 2009 (3): 8-9.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] 刘双全. 克山县大豆施肥技术研究 [J]. *大豆科技*, 2009 (5): 38-39.
- [22] 杨丽君. 东北大豆高产施肥技术 [J]. *吉林农业*, 2015 (15): 45.
- [23] 王囡囡, 张春峰, 贾会彬, 等. 三江平原测土配方施肥 TRPF 系统的研制与初步应用 [J]. *大豆科学*, 2014, 33 (2): 296-298.
- [24] 肖占文, 王多成, 闫吉治, 等. 不同连作年限对玉米制种产量及其农艺经济性状的影响 [J]. *作物杂志*, 2010 (2): 107-109.