

# 黑龙江省南部黑土玉米 NPK 适宜用量的研究

李海波<sup>1,2</sup>, 韩晓增<sup>1</sup>, 宋 春<sup>1,2</sup>, 李良皓<sup>1,2</sup>

(1. 海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 试验设在玉米主产区双城市, 采用 N、P、K 三因素多水平的不完全设计, 目的是在 12 个不同 N、P、K 配施中筛选出适合当地的最适宜施肥量。不同 N、P、K 化肥用量玉米产量最高为处理 10, 依次分别为处理 13、8、5, 比当地通用施肥量分别高 15.9%、13.1%、12.3% 和 11.2%。因此认为处理 N3P3K2、N3P3K3、N2P3K2 和 N4P2K2 即处理 10、13、8 和 5 为较好的处理组合。通过对 N、P、K 单施肥料效应进行一元二次方程模型优化, 建议最适宜的施肥量分别为 N 200~230 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120~130 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 60~80 kg·hm<sup>-2</sup>。经济效益最好的前三个组合分别是 10、13、8, 增收分别为 1 464、1 245 和 1 007 元·hm<sup>-2</sup>。  
**关键词:** 产量; NPK 肥; 模型优化; 经济效益  
**中图分类号:** S513.062      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1002-2767(2008)02-0054-04

## Research on Optimal Combined Application of NPK Fertilizers in the South of Heilongjiang

LI Hai-bo<sup>1,2</sup>, HAN Xiao-zeng<sup>1</sup>, SONG Chun<sup>1,2</sup>, LI Liang-hao<sup>1,2</sup>

(1. National Field Research Station of Agro-ecosystem in Hailun, Northeast Institute of Geography and Agro-ecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081; 2. Graduated College of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** An incompletely designed experiment with 3 factors was conducted in a continuous cornfield, aiming to screen the optimal combinations of N, P, K fertilizers within 12 treatments. The maize yield of the four highest decreased in an order of treatment (10) > (13) > (8) > (5), and increased by 15.9%, 13.1%, 12.3% and 11.2%, respectively, as compared to the locally used fertilizer dosage. It is suggested that the optimal fertilizer dosages were 230~250 kg·hm<sup>-2</sup> for nitrogen, 120~130 kg·hm<sup>-2</sup> for phosphorus and 60~80 kg·hm<sup>-2</sup> for potassium by optimizing models. The optimal economic benefits were 1 464, 1 245 and 1 007 RMB yuan·hm<sup>-2</sup> for the three combinations of (10), (13) and (8), respectively.  
**Key words:** yield; NPK fertilizer; model optimization; economic benefits

东北黑土是比较肥沃的几个土类之一, 但土壤肥力仍不能满足三大作物的生长需求, 施肥仍是提高作物产量的主要手段。在有限的耕地面积上, 要进一步增加粮食总产量, 满足人口不断增长的需要, 只能依靠单产的提高。但要提高单位面积的产量, 必须增加物质的投入, 其中增施化肥是不可缺少的措施<sup>[1]</sup>。N、P、K 肥是最大的产量限制因子, 平衡施用 N、P、K 肥不仅可以提高作物产量及经济效益,

而且可以减缓因 N、P 肥的不合理施用所引起的“富营养化”等环境问题<sup>[2-4]</sup>。近十几年来, 农田主栽作物品种与土壤肥力发生了很大的变化, 肥料配比、施肥量以及肥料效应会随土壤养分的变化而变化, 而农田养分性状也会随时间而自然变化, 同时又会受人为的生产活动而改变<sup>[5]</sup>。20 世纪 80 年代初全国第二次土壤普查资料的统计表明, 长期单一施用氮肥加速了土壤中磷、钾和其它养分的支出, 致使大面积农田土壤先是缺磷后是缺钾。进入 90 年代, 我国农业中磷、钾肥的用量已达到相当大的规模, 化肥中主要养分的含量比例也趋于合理<sup>[6-7]</sup>, 配方施肥技术已越来越得到大面积推广。利用现代计算机及信息技术, 许多配方施肥优化模型及其相关参数被相继

收稿日期: 2007-11-23  
基金项目: 黑龙江省攻关项目 (GB06B107-2、GA06B101-1-4); 国家重点基础研究发展计划项目 (2005CB121106)  
第一作者简介: 李海波 (1967-), 男, 黑龙江人, 在读博士, 主要从事土壤和肥料管理技术研究。E-mail: harbourlee@126.com。  
通讯作者: 韩晓增。E-mail: xzhan@mail.neigaehtb.ac.cn。

提出<sup>[8-11]</sup>,但是,对于某一具有独特气象条件、土壤性质、作物种植方式以及地理地质条件的特定区域,还没有针对性的施肥方式。因此,本试验的目的是初步确定既定区域和周边地区主产作物获得最佳产量的 N、P、K 化肥的最适宜用量及其优化模型,为提高肥料利用率和养分优化管理提供理论依据和实用技术。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验处理

试验为 6 个 N 水平、5 个 P 水平、4 个 K 水平的不完全处理,共 13 个处理(见表 1),每个处理设 4 次重复,共 52 个小区。垄宽 67 cm,5 垄区,区长 9 m,试验小区面积 30.2 m<sup>2</sup>,总占地面积 0.3 hm<sup>2</sup>。本试验设计将在 12 个不同 N、P、K 用量的肥料配方中选出适合当地的适宜肥料用量。

表 1 试验处理及施肥量

处理编号	施肥量/kg·hm <sup>-2</sup>		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1 N0P0K0	0	0	0
2 N1P2K2	100	90	40
3 N2P2K2	150	90	40
4 N3P2K2	200	90	40
5 N4P2K2	250	90	40
6 N5P2K2	300	90	40
7 N2P1K2	150	60	40
8 N2P3K2	150	120	40
9 N2P4K2d	150	150	40
10 N3P3K2	200	120	40
11 N2P2K1	150	90	20
12 N2P2K3	150	90	60
13 N3P3K3	200	120	60

### 1.2 试验地点与试验方法

试验设在黑龙江省双城市东官镇东兴村,经 GPS 定位,试验田地处北纬 45°26′,东经 126°30′,海拔 190.0 m。年平均温度 3.5~4.5℃,≥10℃有效积温为 2 600~2 700℃,年均降雨量 400~600 mm,60%~70%集中在 6~8 月,2007 年 4~9 月降雨量 344 mm,属于旱年份。无霜期为 135~145 d。供试土壤为薄层黑土,播种前采集 0~20 cm 耕层土壤,采用碳氮氢元素分析仪法(VarioEL elementar, Germany)测定土壤有机质和全氮, pH 采用 DELTA 320 pH 计法测定,其它基本理化性质测定方法见《土壤农业化学分析方法》<sup>[12]</sup>。土壤有机质含量为 28.9 g·kg<sup>-1</sup>,土壤全氮含量为 1.33 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量 0.45 g·kg<sup>-1</sup>,全钾含量 22.5 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 132.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 22.9 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 118.7 mg·kg<sup>-1</sup>, pH 6.03。种植作物为玉米,为当

地主栽品种鑫鑫 808。2007 年 4 月 26 日播种,播种量为 30 kg·hm<sup>-2</sup>,采用机播方式播种。5 月 10 日出苗。保苗 5.5 万株·hm<sup>-2</sup>。使用肥料为尿素(大庆产,含 N≥46%)、磷酸二铵(云南产,含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥46%,N≥18%)和硫酸钾(天津产,含 K<sub>2</sub>O≥50%)。磷酸二铵和硫酸钾作底肥一次性施入,尿素 1/3 作底肥,2/3 作追肥。

### 1.3 统计分析

文中数据用 SASV9 软件进行单因素方差分析和回归分析,用 Duncan(SSR)方法分析处理间平均数在 P< 0.05 和 P< 0.01 水平的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量结果

表 2 显示,不同 N、P、K 化肥用量玉米产量比无肥处理分别高 26.5%~78.5%,多数处理间差异不显著。产量最高为处理 10,依次分别为处理 13,处理 8,处理 5,比无肥处理分别高 78.5%、74.1%、72.9%和 71.2%,上述处理分别比当地通用施肥量处理 3 高 15.9%、13.1%、12.3%和 11.2%。因此认为处理 10、13、8 和 5 为较好的处理组合。高 N 肥处理(300 kg·hm<sup>-2</sup>)和高 P 肥处理(150 kg·hm<sup>-2</sup>)没有达到最高产量,高 P 肥处理比当地通用施肥处理高 6.3%,而高 N 肥处理产量则降低 0.5%。

表 2 不同 N、P、K 用量的玉米产量及差异显著性

处理编号	产量/ kg·hm <sup>-2</sup>	比无肥/%	比当地/%	差异显著性 P< 0.05
10 N3P3K2	9011.6	78.5	15.9	A
13 N3P3K3	8791.8	74.1	13.1	AB
8 N2P3K2	8729.9	72.9	12.3	AB
5 N4P2K2	8645.7	71.2	11.2	AB
4 N3P2K2	8388.5	66.1	7.9	AB
9 N2P4K2	8263.5	63.6	6.3	ABC
12 N2P2K3	8259.5	63.6	6.3	ABC
3 N2P2K2	7772.6	53.9	0	ABC
6 N5P2K2	7735.2	53.2	-0.5	ABC
7 N2P1K2	7533.0	49.2	-3.1	BCD
2 N1P2K2	6988.8	38.4	-10.1	CD
11 N2P2K1	6387.2	26.5	-17.8	D
1 N0P0K0	5049.7	0	-35.0	E

### 2.2 单施 N、P、K 化肥玉米产量回归分析

2.2.1 单施 N 肥玉米产量回归分析 参照韩秉进<sup>[8]</sup>和 D' Haene 等<sup>[3]</sup>的方法,拟合一元二次多项式方程。P、K 肥相同,不同 N 肥处理最高产量为处理 5。单施 N 肥效应符合单自变量多项式方程(见图 1)。玉米产量随着 N 肥施用量的增加而增加,直至达到一个峰值,然后呈现下降趋势。过量 N 肥会使

营养生长期延长, 营养体增大, 不利于养分向生殖器官运输, 造成籽粒干物质积累减少; 而且易招致病虫害和造成倒伏。对所拟合的方程进行求导, 得出的最佳施肥量 N 肥为  $231.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 玉米最高产量为  $8\,304.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此, 根据 2.1 的分析, 建议玉米最佳施 N 量为  $200\sim230\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

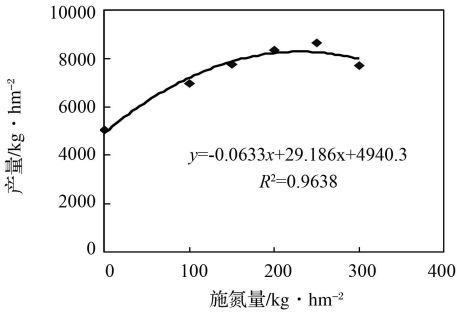


图 1 单施 N 肥与玉米产量的关系

2.2.2 单施 P 肥玉米产量回归分析 N、K 肥相同, 不同 P 肥处理最高产量为处理 8 比当地通用施肥处理产量高 12.3%。单施 P 肥效应符合单自变量多项式方程(见图 2)。玉米产量随着 P 肥施用量的增加而增加, 直至达到一个峰值, 然后下降。P 素过多使作物呼吸作用旺盛, 消耗大量碳水化合物; 繁殖器官过早发育, 引起植株早衰, 空秕粒增加; 磷肥过多还会导致支柱缺锌、缺铁、缺镁等。对所拟合的方程进行求导, 得出的最佳施肥量 P 肥为  $130.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 玉米最高产量为  $8\,409.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。建议玉米最佳施 P 量为  $120\sim130\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

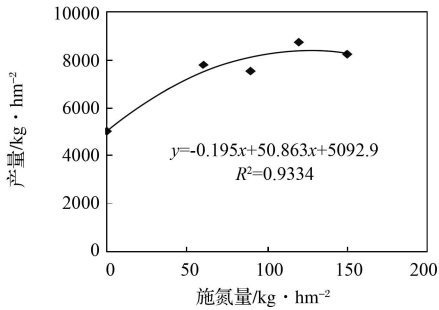


图 2 单施 P 肥与玉米产量的关系

2.2.3 单施 K 肥玉米产量回归分析 N、P 肥相同, 不同 K 肥处理最高产量为处理 12, 比当地通用施肥量高 6.3%。对单施 K 肥的肥料效应进行单自变量多项式方程拟合(见图 3)。玉米产量随着 K 肥施用量的增加而增加, 本试验设置的最高施 K 量的玉米产量没有达到峰值。钾是生理活性物质, 对植物的生长发育具有调节作用。对所拟合的方程进行求导, 得出的最佳 K 肥施肥量应为  $81.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 玉米最高产量为  $8\,559.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。建议玉米最佳施 K 量为  $60\sim80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

仅从 N、P、K 化肥单独效应来看, 玉米产量比

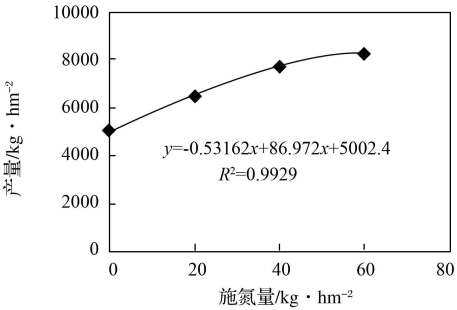


图 3 单施 K 肥与玉米产量的关系

当地通用施肥量分别高 6.8%、8.2%和 10.1%, 当地 K 肥施用量略显不足。

2.3 N、P、K 单施肥料利用率及经济效益分析

P、K 肥施用量相同的情况下, 处理 3~6 产量差异不显著, 但与处理 2 和处理 1 相比则差异显著(见表 2)。单施 N 肥与空白相比, 分别增产 1 939.1~2 685.5  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (见表 3)。根据韩秉进<sup>[8]</sup>的方法计算, N 肥利用率变化范围为 48.5%~22.4%, 扣除 PK 肥及其交互作用对玉米的增产作用, 肥料利用率分别为 35.1%、32.3%、24.2%、19.4%和 16.2%(见表 3), 随着施肥量的增加而递减, 表明增施 N 肥伴随增产效应减弱, 肥料利用率显著下降。但配施 PK 肥后, 则相应地提高了 N 肥利用率, 这有利于减少 N 素损失及其对环境的负面影响。与当地通用施肥量相比, 每增施 1  $\text{kg}$  纯量 N 肥, 处理 4 和 5 产量都有所增加, 但处理 6 则小幅度减少。经济效益以处理 5 最好, 增收 907  $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 高 N 量处理 6( $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )收益则严重减少。通过无肥区与产量最高的处理 5 比较, 玉米产量对土壤的依存率为 58.4%。

表 3 单施 N 肥肥料利用率及经济效益分析

处理编号	增产 <sup>(a)</sup> / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	肥料利 用率/%	增产 <sup>(b)</sup> / $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	增收 <sup>(c)</sup> / $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$	增收 <sup>(d)</sup> / $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$
1 N0P0K0					
2 N1P2K2	1939.1	48.5	19	29	2501
3 N2P2K2	2722.9	45.4	18	27	3472
4 N3P2K2	3338.8	41.7	17	25	4192
5 N4P2K2	3596.0	36.0	14	22	4374
6 N5P2K2	2685.5	22.4	9	13	2804

注: (a) 与无肥处理比较; (b) 每增加 1  $\text{kg}$  纯量化肥所增加的产量; (c) 按照当时玉米市场综合商品价格 1.50  $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$  计算, 与无肥处理比较每增加 1  $\text{kg}$  纯量化肥所增加的收入; (d) 与无肥处理比较 每  $\text{hm}^2$  增加的收入。下同。

N、K 肥施用量相同的情况下, 处理 3, 7~9 产量差异不显著(见表 2)。单施 P 肥与空白相比, 分别增产 2 483.3~3 680.2  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (见表 4)。P 肥利用率变化范围为 41.4%~21.4%, 扣除 N、K 肥

及其交互作用对玉米的增产作用, 肥料利用率分别为 35.6%、27.6%、20.7%和 16.6%(见表 4), 随着施肥量的增加而递减, 表明过量施用 P 肥肥料利用率显著下降。与当地通用施肥量相比, 每增施 1 kg 纯量 P 肥, 处理 8 和 9 产量分别增加 19.1 kg 和 9.8 kg。经济效益以处理 8 最好, 增收 1 245 元·hm<sup>-2</sup>, 高 P 量处理 9(150 kg·hm<sup>-2</sup>)收益也比较明显。通过无肥区与产量最高的处理 8 比较, 玉米产量依存率为 57.8%。

表 4 单施 P 肥肥料利用率及经济效益分析

处理编号	增产 / kg·hm <sup>-2</sup>	肥料利用 率/ %	增产 / kg·kg <sup>-1</sup>	增收 / 元·kg <sup>-1</sup>	增收 / 元·hm <sup>-2</sup>
1 N0P0K0					
7 N2P1K2	2483.3	41.4	41	62	3440
3 N2P2K2	2722.9	30.3	30	45	3657
8 N2P3K2	3680.2	30.7	31	46	4950
9 N2P4K2	3213.8	21.4	21	32	4108

N、P 肥施用量相同的情况下, 4 个处理产量有显著差异(见表 2)。单施 K 肥与空白相比, 分别增产 1 337.5~3 209.8 kg·hm<sup>-2</sup>(见表 5)。K 肥利用率变化范围为 66.9%~53.5%, 扣除 NP 肥及其交互作用对玉米的增产作用, 肥料利用率分别为 34.0%、33.4%和 22.3%(见表 5), 随着施肥量的增加而增加, 高量 K 肥处理 3(60 kg·hm<sup>-2</sup>)并没有取得最佳产量(见图 3)。与当地通用施肥量相比, 每增施 1 kg 纯量 K 肥, 处理 3 增加产量 9.7 kg, 收益 602 元·hm<sup>-2</sup>。通过无肥区与产量最高的处理 12 比较, 玉米产量依存率为 61.1%。

N、P、K 配合施用, 其肥料利用率比单施某一种肥料时有显著提高。本试验以处理 10 和处理 13 产量最高, 比当地通用施肥处理(处理 3)分别增加 1 239.0 和 1 019.2 kg·hm<sup>-2</sup>, 增加收益分别为 1 464 和 1 007 元·hm<sup>-2</sup>。通过无肥区与其产量比较, 玉米产量依存率分别为 56.0%和 57.4%, 低于韩秉进等人的研究结果(68.9%), 表明不施肥玉米产量对土壤的依存率会下降<sup>[1,3]</sup>。

表 5 单施 K 肥肥料利用率及经济效益分析

处理编号	增产 / kg·hm <sup>-2</sup>	肥料利 用率/ %	增产 / kg·kg <sup>-1</sup>	增收 / 元·kg <sup>-1</sup>	增收 / 元·hm <sup>-2</sup>
1 N0P0K0					
11 N2P2K1	1337.5	66.9	67	100	1878
3 N2P2K2	2722.9	68.1	68	102	3828
12 N2P2K3	3209.8	53.5	54	80	4431

3 小结与讨论

3.1 N、P、K 肥单施效果: 通过建立模型并优化, 认

为最佳施肥量分别为 N 231.6 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 130.4 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 80.8 kg·hm<sup>-2</sup>, 所获得的最大产量分别为 8 304.5、8 409.6 和 8 559.5 kg·hm<sup>-2</sup>。肥料利用率则随着施肥量的增加而减少, 玉米产量对土壤依存率逐渐降低。

3.2 经过调查, 本试验地的气象条件、土壤肥力和种植作物可代表双城 60%的耕地面积, 当地的施肥模式接近本试验处理 3 的水平。试验结果表明 N、P、K 配合施肥对玉米产量的提高具有显著效果。处理 10、8 和 13 不仅具有较高的产量而且具有较高的经济效益, 可作为当地最佳组配施肥量。建议最佳施肥量分别为 N 200~230 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120~130 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 60~80 kg·hm<sup>-2</sup>。

参考文献:

[ 1 ] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全[ J ]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601-609.

[ 2 ] Bućiene A, vedas A, Antanaitis. Balances of the major nutrients N, P and K at the farm and field level and some possibilities to improve comparisons between actual and estimated crop yields[ J ]. European Journal of Agronomy, 2003, 20: 53-62.

[ 3 ] D' Haene K, Magyar M, De Neve S, et al. Nitrogen and phosphorus balances of Hungarian fams[ J ]. European Journal of Agronomy, 2007, 26: 224-234.

[ 4 ] Wesström I, Messing I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[ J ]. Agricultural Water Management, 2007, 87: 229-240.

[ 5 ] 韩秉进, 韩晓增, 王德建. 大豆-玉米轮作区适宜 NPK 用量试验研究[ J ]. 土壤通报, 2006, 37(2): 303-308.

[ 6 ] 沈善敏. 中国土壤肥力[ M ]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.

[ 7 ] Sheldrick W F, Syers J K, Lingard J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/ input relationships[ J ]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 94: 341-354.

[ 8 ] 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.

[ 9 ] Li Y, White R, Chen D, et al. A spatially referenced water and nitrogen management model (WNMM) for (irrigated) intensive cropping systems in the North China Plain[ J ]. Ecological Modelling, 2007, 203: 395-423.

[ 10 ] Malone R W, Ma L, Karlen D L, et al. Empirical analysis and prediction of nitrate loading and crop yield for corn soybean rotations[ J ]. Geoderma, 2007, 140: 223-234.

[ 11 ] 危常州, 候振安, 雷咏雯, 等. 不同地理尺度下综合施肥模型的建模与验证[ J ]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 13-20.

[ 12 ] 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, 2000.