

长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征

郝小雨^{1,2}, 周宝库^{1*}, 马星竹¹, 高中超¹

(1. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 哈尔滨 150086;
2. 黑龙江省农业科学院博士后科研工作站, 哈尔滨 150086)

摘要: 为了明确长期不同施肥措施下黑土作物产量及养分平衡特征, 利用开始于 1979 年的哈尔滨黑土肥力长期定位试验, 以小麦-大豆-玉米轮作 (3a) 为一个周期, 选取对照 (不施肥, 记作 CK)、常量氮磷钾化肥配施 (小麦施 N、P₂O₅ 量分别为 150、75 kg/hm², 大豆施 N、P₂O₅ 量分别为 75、150 kg/hm², 玉米施 N、P₂O₅ 量分别为 150、75 kg/hm², K₂O 共施 75 kg/hm², 记作 NPK)、常量有机肥 (施肥 18 600 kg/hm², 记作 M)、常量化肥有机肥配施 (化肥施量同 NPK, 有机肥施量同 M, 记作 MNPK) 和二倍量氮磷化肥有机肥配施 (小麦施 N、P₂O₅ 量分别为 300、150 kg/hm², 大豆施 N、P₂O₅ 量分别为 150、300 kg/hm²、玉米施 N、P₂O₅ 量分别为 300、150 kg/hm², 有机肥共 37 200 kg/hm², 记作 M₂N₂P₂) 5 个处理, 研究了不同作物的平均产量、产量年际变化和土壤养分平衡。结果表明: 1) 较 CK, 长期平衡施用化肥或化肥配施有机肥提高了作物产量, 多年平均增产率分别在 82.5%~91.6% (小麦) 和 35.6%~40.9% (玉米) 之间。长期不同施肥措施增产效果表现为 M₂N₂P₂>MNPK>NPK>M, 有机无机肥配施与单施化肥处理间作物产量差异不显著。2) 长期不施肥处理小麦和玉米产量随试验年限推移呈下降趋势, 降幅分别为 13.93 和 42.61 kg/(hm²·a), 大豆则以 7.409 kg/(hm²·a) 的速率增加。施肥处理小麦、大豆和玉米产量随试验年限的增加呈总体上升的趋势。3) 在该试验条件下, 长期施用常量化肥处理 (NPK) 和常量化肥有机肥配施处理 (MNPK) 土壤氮亏缺量分别为 29.7 和 17.5 kg/hm², 磷盈余量分别为 33.4 和 61.2 kg/hm²。各处理土壤中钾素均表现为亏缺, 亏缺量在 30.4~73.0 kg/hm² 之间。MNPK 处理氮、钾供应状况有所改善, 较 NPK 处理分别增加 12.2 和 27.6 kg/hm²。4) 作物产量与土壤有机质、碱解氮、有效磷、降雨量、生育期日平均气温呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。5) 在黑土小麦-大豆-玉米典型轮作制度下, 基于土壤养分平衡特征提出“稳氮、减磷和增钾”的施肥策略。该研究为评价和建立长期施肥模式、促进粮食持续生产提供依据。

关键词: 土壤; 肥料; 作物; 长期施肥; 作物产量; 养分平衡; 有机无机肥配施; 黑土

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.024

中图分类号: S158

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0178-08

郝小雨, 周宝库, 马星竹, 高中超. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 178—185. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.024 <http://www.tcsae.org>

Hao Xiaoyu, Zhou Baoku, Ma Xingzhu, Gao Zhongchao. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 178—185. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.024 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业的发展历程证明, 肥料尤其是化肥合理使用是作物持续增产的关键因素^[1], 在提高粮食产量、保障粮食安全上起到了不可替代的支撑作用^[2]。研究表明, 化肥对作物产量的贡献率 35%~66%之间^[3]。适量施肥, 可以促进作物的生长发育并增加产量^[4]。但是, 随着施肥量的逐渐增加, 在施肥水平相对较高的农区已呈现报酬递减的现象^[5-6]。长期和过量施用化肥, 会对土壤物理、化学和

生物多样性产生不利影响, 导致农田养分不平衡和土壤退化^[7], 甚至会降低作物产量^[8]。聂军等^[9]研究了长期施肥对红壤性水稻土物理性质的影响, 指出长期施用化肥会增加土壤容重和土粒密度, 降低土壤孔隙度。孟红旗等^[10]分析了中国 6 个长期施用酰胺态氮肥 (尿素) 长期试验的土壤, 发现年施 N 量为 120~300 kg/hm² 时, 施 N 和 NPK 处理的耕层 pH 值较不施肥处理均有较大程度的降低, 最大降低幅度 0.64~1.51。长期施用化肥, 氮用量的增加使土壤有机碳含量降低, 磷、钾用量的增加使土壤全氮含量下降明显, 导致 C/N 上升^[11]。此外, 化肥的使用可能导致快生细菌或者富营养细菌代谢能力下降^[12]。增施有机肥是培肥土壤, 提升土壤质量的一项重要措施^[13]。有机肥中含有丰富的有机质和各种养分, 它不仅是作物养分的直接供应库, 又可活化土壤中潜在养分和增强生物学活性, 因而更有利于土壤理化特性的改善和养分的持续供应^[14]。国内外长期试验研究表明, 化肥有机肥合理施用可促进作物干物质累积和养分吸收、增加农作物

收稿日期: 2015-04-29 修订日期: 2015-06-30

基金项目: 国家科技支撑计划 (2013BAD07B01, 2013BAD11B03); 农业部公益性行业专项 (201203030, 201303126)

作者简介: 郝小雨, 男, 河北张家口人, 博士, 助理研究员, 主要从事农田养分循环研究。哈尔滨 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 150086。Email: xiaoyuhao1981@sina.com

*通信作者: 周宝库, 男, 黑龙江省延寿县, 研究员, 主要从事土壤肥料研究。哈尔滨 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 150086。Email: zhoubaoku@aliyun.com

产量，是维持和提高地力、培肥土壤的重要途径^[15-17]。从养分的输入-输出的角度分析农田养分的丰缺和平衡状况，对指导肥料生产、分配和施用具有一定的指导作用^[2,18]。研究化肥有机肥配施条件下作物产量变化和养分平衡特征，对于指导养分资源合理配置、高效施肥和减少肥料损失等具有重要的理论和现实意义。

黑土主要分布于松嫩平原、三江平原、大兴安岭山前平原、辽河平原，具有质地疏松、肥力高、供肥能力强的特点，是中国重要的商品粮基地^[19]。随着黑土开垦年限的增加以及不合理的管理方式，土壤肥力水平迅速降低，黑土层厚度变薄，甚至在少数地区出现了黄土母质裸露的现象，黑土呈现退化趋势，严重影响了黑土的生产能力^[14]。为遏制黑土退化，探索提高土壤肥力、保证作物高产稳产的方法，是实现黑土区农业可持续发展关键所在。本研究借助 1979 年开始的黑土长期定位试验，分析长期不同施肥条件下的作物产量演变特征，探讨土壤养分供应-作物养分吸收-作物产量之间的相互关系，探索实现黑土区耕地质量

稳定提升、作物持续稳产高产的有效施肥模式，为促进区域粮食可持续生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于黑龙江省哈尔滨市黑龙江省农业科学院试验基地（126°35'E，45°40'N），海拔 151 m，属松花江二级阶地，地处中温带，一年一熟制，冬季寒冷干燥，夏季高温多雨，≥10℃ 平均有效积温 2 700℃，年均日照时数 2 600~2 800 h，无霜期约 135 d。试验地为旱地黑土，成土母质为洪积黄土状粘土。长期试验于 1979 年设置，1980 年开始按小麦—大豆—玉米顺序轮作。初始耕层（1979，0~20 cm）土壤基本性质为：有机碳 15.5 g/kg，全氮 1.47 g/kg，全磷（P₂O₅）1.07 g/kg，全钾 25.16 g/kg，碱解氮 151 mg/kg，有效磷 51 mg/kg，速效钾 200 mg/kg，pH 值 7.2。1979—2014 年试验地作物生育期（5—9 月）日平均气温（17.8~21.0℃）和累计降雨量（287.0~770.7 mm）见图 1。

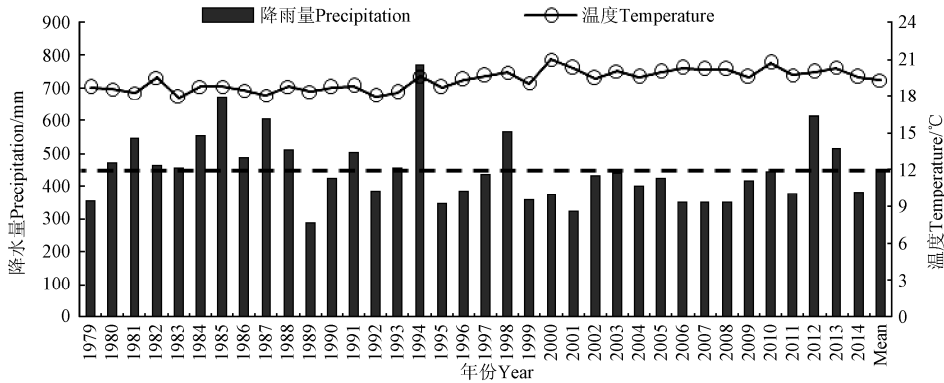


图 1 试验地 1979—2014 年作物生育期日平均气温和累计降雨量

Fig.1 Mean daily temperature and accumulated precipitation of growth period from 1979 to 2014 at long-term experiment site

由于城市化进程的加快，黑龙江省农业科学院试验地已经处于城市中心，与自然生产条件产生了差异，院试验地进行了置换。在充分调研论证基础上，2010 年 12 月黑土长期定位试验在冻土条件下进行了搬迁（搬迁深度 1.1 m），整体原位搬迁到距原址 40 km 的哈尔滨市民主镇（126°51'E，45°50'N），新址气候、土壤等自然条

件与原址基本一致。

1.2 试验设计

长期定位试验共设 24 个处理，基于试验处理的代表性，如农民习惯施肥（单施化肥）、培肥地力（施有机肥、有机无机肥配施）和 2 倍量施肥等，本研究选取其中的 5 个处理，试验设计和各处理施肥量详见表 1。

表 1 长期定位试验处理及施肥量
Table 1 Treatment and fertilizer application rates of long-term experiment

处理 Treatment	施氮量 N			施磷量 P ₂ O ₅			施钾量 K ₂ O	有机肥 Horse manure
	小麦 Wheat	大豆 Soybean	玉米 Maize	小麦 Wheat	大豆 Soybean	玉米 Maize		
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
NPK	150	75	150	75	150	75	75	0
M	0	0	0	0	0	0	0	18 600
MNPK	150	75	150	75	150	75	75	18 600
M ₂ N ₂ P ₂	300	150	300	150	300	150	0	37 200

注：CK 表示不施肥；N、P、K、M（常量）分别表示施氮肥、磷肥、钾肥、有机肥；N₂、P₂、M₂ 分别表示施肥量为常量的 2 倍。CK、NPK、M、MNPK 和 M₂N₂P₂ 为不同的施肥处理，下同。
Note: CK means no fertilizer, N、P、K and M mean nitrogen, phosphorus, potassium and manure fertilizer of convention, N₂、P₂ and M₂ mean 200% fertilizer application rates of convention. CK, NPK, M, MNPK and M₂N₂P₂ mean different fertilizer application treatments, the same as below.

搬迁前小区面积 168 m², 无重复。搬迁后每个处理 3 次重复, 试验小区面积为 36 m² (4 m×9 m), 随机排列, 小区间用水泥板分割 (深度 1.1 m)。采用小麦-大豆-玉米轮作制, 每年一季。有机肥为纯马粪 (养分含量和含水率在施肥前测定), 每轮作周期施一次, 于玉米收获后秋施, 按纯氮量 75 kg/hm² (约马粪 18 600 kg/hm²), 养分含量为多年测定平均值, N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 0.58%、0.65% 和 0.90%。氮、磷、钾肥均为秋季施肥 (玉米季氮肥 50% 秋施, 50% 于大喇叭口期追施)。氮肥为尿素 (N46%), 磷肥为重过磷酸钙 (P₂O₅ 46%)、磷酸二铵 (N18%, P₂O₅ 46%), 钾肥为硫酸钾 (K₂O 50%)。具体施肥情况见表 1。

1.3 样品采集和测定

土壤样品于每年秋季收获后采集, 每个小区采集耕层土样 (0~20 cm), 按“S”形取 5 个点, 每 5 个点组成一个混合样品。作物产量于收获期将小区划分 10 m² 样区, 作物全部收获, 人工脱粒, 晒干后称取风干质量, 并测定其含水率, 计算作物产量。采用常规分析方法测定有机质、碱解氮、有效磷和速效钾^[20]。

1.4 计算与分析方法

土壤养分表观平衡 (kg/hm²) = 有机和化学肥料施入总量 - 作物养分吸收量 (1)

本研究中, 化学肥料每年施 1 次, 有机肥只在每个轮作周期 (小麦-大豆-玉米) 施 1 次, 故计算养分平衡时以轮作周期 (每 3 a) 为单位, 即计算小麦-大豆-玉米这 3 a 内的养分输入总量和养分输出总量, 差减法得出养分平衡值, 而后再将各个轮作周期的养分平衡特征值进行平均。此外, 本研究只测定了部分年份 (1980—1982 年、1989—1991 年、1995—1997 年、2002—2004 年和 2011—2013 年) 的植株养分含量, 因此小麦、大豆和玉米植株养分含量取这些年份测定的平均值。植株养分吸收量依据作物籽粒和秸秆历年的产量计算, 而后分别计算 3 种作物不同年份养分吸收量的平均值。本研究不考虑通过种子、作物根茬、降水、生物固氮和干湿沉降等途径进入土壤的养分量, 也不考虑通过氨挥发、N₂O 排放和淋失等途径损失的养分量。

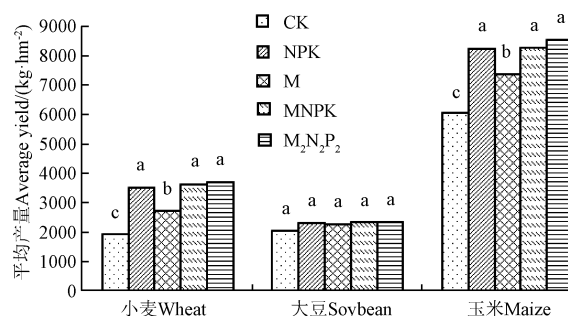
选择距试验地最近气象站 (哈尔滨) 的监测资料作为本研究的气象数据, 数据来源于中国气象科学数据共享服务网。利用 Excel 2007 软件对试验数据进行处理, 应用 SPSS 13.0 软件进行方差分析、多重比较 (LSD 法) 和相关性分析 (Pearson correlation coefficients)。无重复试验的多重比较方法参见文献[21]。

2 结果与分析

2.1 长期施肥条件下作物平均产量

从作物平均产量来看 (图 2), 长期施肥能提高作物产量, 即施肥各处理较不施肥 (CK) 显著提高小麦和玉米的产量, 但不同施肥措施的增产效应不同, 表现为 M₂N₂P₂ (二倍量氮磷化肥有机肥配施) > MNPK (常量化肥有机肥配施) > NPK (常量氮磷钾化肥配施) > M (常量有机肥), 其中 M₂N₂P₂、MNPK 和 NPK 处理的增产率分别在 82.5%~91.6% (小麦) 和 35.6%~40.9% (玉米)

之间; 单施有机肥处理 (M) 作物增产效果最低。小麦季和玉米季 M 处理与 M₂N₂P₂、MNPK 和 NPK 处理差异达显著水平 ($P < 0.05$), 说明在养分供应量较低时不足以保证作物产量。施化肥 (NPK) 及增施有机肥的 3 个处理小麦和玉米产量均表现为 M₂N₂P₂ > MNPK > NPK, 但处理间作物产量差异不显著 ($P > 0.05$)。可见, 黑土过量施用有机肥和化肥并未表现出明显的增产作用。在施化肥 (NPK) 的基础上添加有机肥 (MNPK), 小麦和玉米产量分别增加 2.8% 和 0.8%, 未达到显著的增产效果。



注: 2001 年小麦季严重干旱, 2008 年大豆大面积倒伏, 产量结果没有代表性, 未进行统计。不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平上呈显著差异。Note: Because of serious drought in wheat season in 2001 and large area lodging in soybean season in 2008, their yield statistics were not available. The lowercase letters in the table indicate the data in different treatments are significantly different on the level $P < 0.05$.

图 2 长期施肥条件下作物平均产量
Fig.2 Average grain yields under long-term fertilization

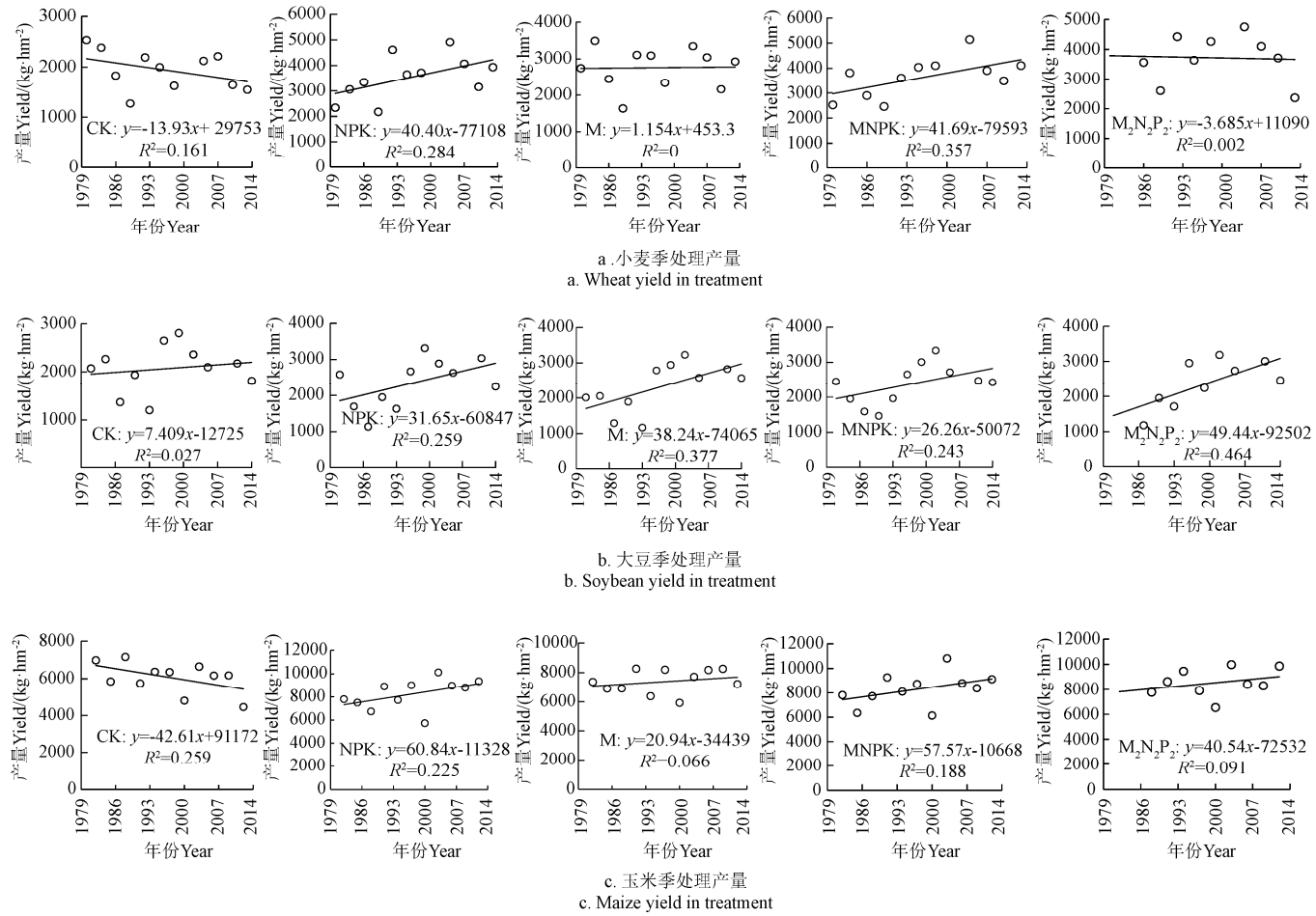
肥料在不同作物上的增产效应也不同, 其中小麦和玉米肥料增产效果明显, 4 个施肥处理小麦和玉米产量均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$); 施肥在大豆上的增产效果不明显, 4 个施肥处理大豆产量虽高于 CK 处理, 但未达到统计学的差异显著水平 ($P > 0.05$), 且各个施肥处理间也无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2 长期施肥条件下作物产量年际变化

图 3 为小麦、大豆和玉米产量的年际变化情况。各处理不同年份间的作物产量变化较大, 这可能受当年气候条件、田间管理、品种更换等因素的影响。利用产量年际波动曲线拟合各处理的产量趋势线 ($y=kx+b$), 斜率 k 表示产量的变化值 kg/hm², 用以量化产量随时间变化的情况^[22]。长期不施肥处理 (CK) 产量的变化实质上反映出长期不施肥条件下土壤基础地力的变化。长期不施肥 (CK) 大豆产量表现为增加趋势 (k 为正值), 增幅为 7.409 kg/(hm²·a), 主要是大豆根瘤菌能够固定空气中的游离氮素, 且遗留的残根落叶能增加土壤中的养分和有机质, 起到培肥地力的作用^[14]; 此外, 试验期间先后更换过 10 个大豆品种, 品种的不同也会影响大豆的固氮效应。长期不施肥 (CK) 小麦和玉米产量表现出下降趋势 (k 为负值), 降幅分别为 13.93 和 42.61 kg/(hm²·a), 这与土壤养分不断被耗竭, 供应能力降低有关, 小麦茬和玉米茬养分携出量远高于大豆茬固定的量。

长期施肥处理的小麦、大豆和玉米产量总体上呈增加趋势 (k 为正值), 其中小麦茬和玉米茬 NPK 和 MNPK 处理 k 值较高, 说明均衡施肥及增施有机肥是维持黑土小

麦和玉米持续高产的有效途径。小麦季 $M_2N_2P_2$ 处理为下降趋势，可能原因是氮素供应过量而不施用钾肥时，一旦生育后期土壤水分含量过大，易引起贪青徒长和倒伏而影响产量。



注：CK、NPK、M、MNPK 和 $M_2N_2P_2$ 为不同的施肥处理，具体施肥量见表 1，下同。
Note: CK, NPK, M, MNPK and $M_2N_2P_2$ mean different fertilizer application treatments, fertilizing amount see table 1, the same as below.

图 3 长期施肥条件下黑土作物产量变化趋势

Fig.3 Variation trends of wheat yield, soybean yield and maize yield under long-term fertilization in black soil

2.3 长期施肥条件下土壤养分表观平衡

从各处理轮作周期养分收支情况可以看出（表 2），施肥和作物吸收的差异导致土壤中氮磷钾素收支不同。长期不施肥（CK）土壤氮磷钾均表现出亏缺，氮素、磷素和钾素年亏缺量分别为 87.5、33.2 和 73.0 kg /hm²。单施有机肥（M）不能满足作物养分需求，同样表现出养分亏缺，氮素、磷素和钾素年亏缺量分别为 89.7、17.7 和 55.6 kg /hm²。单施化肥（NPK）处理，土壤氮、钾均表现出亏缺，年亏缺量分别为 29.7 和 58.0 kg /hm²，但磷素呈现盈余，年盈余量为 33.4 kg/hm²。有机无机肥配施

（MNPK）土壤氮、钾供应状况有所改善，氮、钾年供应量较 NPK 处理分别增加 12.2 和 27.6 kg /hm²，但仍然表现为亏缺，分别亏缺 17.5 和 30.4 kg /hm²，而磷素盈余趋势增大，较 NPK 处理增加 83.6%。过量施肥（ $M_2N_2P_2$ ）时，土壤氮素、磷素出现大量盈余，年盈余量分别达到 133.0 和 175.6 kg/hm²，养分供应充足的同时环境污染风险也大大增强，加倍施有机肥钾素依旧表现出亏缺，年亏缺量为 69.6 kg/hm²。从上述结果可以看出，无论施钾与否，各处理土壤钾素均表现明显的亏缺，但与不施肥处理比较，钾肥和有机肥的施用减缓了土壤中钾素的消耗。

表 2 长期施肥条件下土壤氮、磷、钾素表观平衡

Table 2 Apparent balance of soil N, P₂O₅ and K₂O under long-term fertilization

处理 Treatment	投入量 Input			吸收量 Output			收支 Budget			年盈亏量 Annual profit or loss		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0	262.6	99.7	218.9	-262.6	-99.7	-218.9	-87.5	-33.2	-73.0
NPK	375	300	225	464.2	199.9	399.0	-89.2	100.1	-174.0	-29.7	33.4	-58.0
M	75	85	117	344.1	138.0	283.9	-269.1	-53.0	-166.9	-89.7	-17.7	-55.6
MNPK	450	385	342	502.5	201.3	433.2	-52.5	183.7	-91.2	-17.5	61.2	-30.4
$M_2N_2P_2$	900	770	234	501.1	240.5	442.8	398.9	529.5	-208.8	133.0	176.5	-69.6

注：养分表观平衡计算（投入量、养分吸收量和收支）以轮作周期（每 3 年）为单位，年盈亏量以年为单位。
Note: The units of nutrients apparent balance (input, output and budget) were rotation period (3 a), while the unit of annual profit or loss was year.

3 讨 论

3.1 长期施肥对作物产量的影响及综合评价

施肥有利于养分的快速供应,是调控农作物生产力的重要手段。李忠芳等^[23]统计了中国 21 个长期定位试验的产量数据,发现施化肥或化肥配施有机肥小麦、玉米产量较不施肥分别提高 193%、219%和 78%、93%。本研究的结果也表明,施肥处理较 CK 处理均能提高小麦和玉米的产量。本研究中,在单施化肥(NPK)的基础上添加有机肥,产量虽略有提升,但未达到显著的增产效果,这也与前人研究结果一致^[23-25]。然而,从可持续生产的角度,不能只注重产量,而忽视土壤环境的变化。本定位试验前期的研究表明,单施化肥(NPK)处理的土壤 pH 值从 1979 年的 7.22 下降到 2006 年的 6.35,下降近 1 个单位,而化肥配施有机肥土壤 pH 值仅下降了 0.32 (pH 值 6.90),说明施用有机肥可以减缓土壤酸化的速度,避免土壤酸化现象的加重^[26]。随着施肥年限的增加,单施化肥(NPK)处理土壤 pH 值进一步下降,到 2010 年下降到 6.0,长此以往,土壤酸化趋势加剧至土壤失去缓冲性能时,必然会影响作物产量。此外,化肥配施有机肥有利于黑土有机碳、全氮的累积,能够促进土壤有机碳、全氮在粗砂粒以及黏粒中的富集,对于土壤有机碳的固定具有非常重要的意义^[27]。因此,生产中应当重视有机肥的投入。

3.2 作物产量与土壤养分、气候因子的关系

作物的产量变化很大程度上受人为活动,特别是施肥的影响,反映到农田生态系统中即为土壤养分的变化。为了进一步探讨长期不同施肥处理对作物产量的影响,将小麦、大豆和玉米产量(yield, Y)与土壤有机质(organic

matter, OM)、碱解氮(alkali-hydrolyzable N, AN)、有效磷(available P, AP)和速效钾(available K, AK)等主要养分指标做相关性分析(表 3)。长期施肥条件下,作物产量与土壤 OM、AN、AP 呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为 0.243 ($n=169$)、0.361 ($n=79$)和 0.269 ($n=75$),作物产量与土壤速效钾(AK)未达显著水平($P>0.05$)。从相关系数大小来看,碱解氮>有效磷>有机质,说明氮素是影响黑土作物生产力的首要肥力因子。

在养分充足的情况下,气象条件可能成为产量年际间波动的关键因子^[28]。本研究分析发现,作物产量与作物生育期降雨量(accumulated precipitation, PR)呈显著正相关($P<0.05$,表 3),相关系数分别为 0.307 ($n=169$)。进一步统计表明,作物生育期(5—9 月)累计降雨量年际间差异明显,超过平均值(449.4 mm)的达到 15 个年份,低于平均值的为 21 个年份,其中生育期最大降雨量达到 770.7 mm (1994 年),最小仅为 287.0 mm (1989 年),相差近 2.7 倍,因此,降雨量年际间的差异很可能会造成作物产量波动^[29]。此外,降雨季节分布不均和瞬时强降雨也会影响作物产量,本试验在 2001 年小麦生育期严重干旱,2008 年强降雨导致大豆大面积倒伏,导致当季作物严重减产。李辉等^[30]指出东北地区玉米产量对气温变化较为敏感。在黑土区进行的玉米分期播种试验结果证明,平均气温每升高 1℃产量增加 8%,而气温下降 1℃将会减产 10%以上^[31]。本研究分析表明,作物产量与作物生育期日平均温度(mean daily temperature, TE)呈显著正相关($P<0.05$,表 3),相关系数为 0.191 ($n=169$),表明温度对黑土区作物产量有显著影响。不同气象因子对于作物产量的影响程度还需结合历年的气象数据进行深入分析。

表 3 作物产量与主要影响因素的相关性分析

Table 3 Correlation coefficients of grain yield with meteorological factors and soil properties

因素 Factors	Y	OM	AN	AP	AK	PR	TE
Y	1.000	0.243*	0.361**	0.269*	-0.139	0.307**	0.191*
OM		1.000	0.322**	0.411**	-0.161	-0.218*	0.190
AN			1.000	0.193	0.038	0.348**	-0.515**
AP				1.000	0.159	0.003	0.224
AK					1.000	0.312**	-0.304**
PR						1.000	-0.144
TE							1.000

注: *表示在 5%水平相关性显著; **表示在 1%水平相关性显著。Y、OM、AN、AP、PR、TE 分别表示作物产量、土壤有机质、碱解氮、有效磷、生育期累计降雨量、生育期日平均气温。

Note: Significant correlations are marked with one ($P<0.05$) and two ($P<0.01$) asterisks. Y, OM, AN, AP, PR and TE are yield, organic matter, alkali-hydrolyzable N, available P, accumulated precipitation and mean daily temperature, respectively.

3.3 长期施肥条件下黑土农田养分平衡特征探究

农田养分平衡的本质就是养分被作物消耗和施肥投入之间的平衡^[32]。在本研究中,单施化肥(NPK)时,土壤氮表现出亏缺,年亏缺量为 29.7 kg/hm²。有机无机肥配施(MNPK)土壤氮供应状况有所改善,氮素年供应量较 NPK 处理增加 12.2 kg/hm²,但依然表现为亏缺,仍需每年补充约 20 kg/hm²。然而,考虑到大豆的生物固氮作用,实际中可能不需补充氮素就能维持土壤氮素平衡。当然,黑土大豆季的固氮量及其对后茬作物的影响程度

还需进一步研究。

本试验中,单施化肥(NPK)土壤磷素呈现盈余,年盈余量为 33.4 kg/hm²,在单施化肥的基础上增施有机肥(MNPK),磷素盈余趋势增大,达 61.2 kg/hm²,较 NPK 处理增加 83.6%,长此以往必然会导致土壤磷素的积累,也会引起磷对水源污染的威胁^[33]。解决农田磷的不平衡问题,关键在于对磷素合理有效的利用^[34]。由于轮作周期只施 1 次有机肥,因此统筹轮作周期磷肥施用时间和用量,根据有机肥(马粪)有效磷释放速度较快

的特点^[35], 可以在小麦季增施有机肥 (上一季玉米收获后秋施)、减施大量化学磷肥, 大豆季和玉米季减施少量化学磷肥。然而, 减施磷肥的量还需依据本地区有机肥的实际矿化特征来计算, 另外还需观察减施肥料情况下作物的产量效应, 以便进一步调整肥料统筹过程。

长期以来, 黑土区施肥结构不合理, 氮肥和磷肥用量偏高, 忽视钾肥投入, 造成土壤钾素亏缺严重^[36]。本试验中, 单施化肥 (NPK) 土壤钾素表现出亏缺, 年亏缺量为 58.0 kg/hm^2 。有机无机肥配施 (MNPK) 土壤钾供应状况有所改善, 钾素年供应量较 NPK 处理增加 27.6 kg/hm^2 , 但仍然表现为亏缺, 每年还需投入钾素约 30 kg/hm^2 , 才能保持土壤钾素平衡。从降低成本的角度, 由于化学钾肥成本较高, 生产中应充分利用有机肥和秸秆等替代资源来提升土壤钾素水平。

综上, 基于轮作周期和大豆固氮作用, 在黑土区提出“稳氮、减磷和增钾”的施肥策略, 通过增加有机肥或秸秆施用量、减少化学磷肥的施入来实现培肥地力和土壤养分平衡。

4 结 论

利用开始于 1979 年的哈尔滨黑土肥力长期定位试验, 以小麦-大豆-玉米轮作 (3a) 为一个周期, 选取对照 (不施肥, 记作 CK)、常量氮磷钾化肥配施 (小麦施 N、 P_2O_5 量分别为 150 、 75 kg/hm^2 , 大豆施 N、 P_2O_5 量分别为 75 、 150 kg/hm^2 、玉米施 N、 P_2O_5 量分别为 150 、 75 kg/hm^2 , K_2O 共施 75 kg/hm^2 , 记作 NPK)、常量有机肥 (施肥 $18\ 600 \text{ kg/hm}^2$, 记作 M)、常量化肥有机肥配施 (化肥施量同 NPK, 有机肥施量同 M, 记作 MNPK) 和二倍量氮磷钾化肥有机肥配施 (小麦施 N、 P_2O_5 量分别为 300 、 150 kg/hm^2 , 大豆施 N、 P_2O_5 量分别为 150 、 300 kg/hm^2 、玉米施 N、 P_2O_5 量分别为 300 、 150 kg/hm^2 , 有机肥共 $37\ 200 \text{ kg/hm}^2$, 记作 $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$) 5 个处理, 研究了不同作物的平均产量、产量年际变化和土壤养分表观平衡。主要得到以下结论:

1) 从 1980—2014 年的作物平均产量来看, 长期不同施肥措施对黑土作物产量具有显著影响, 长期施用化肥或化肥配施有机肥有利于作物产量的提高, 增产率分别在 $82.5\%\sim 91.6\%$ (小麦) 和 $35.6\%\sim 40.9\%$ (玉米) 之间。不同施肥措施的增产效果表现为 $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2 > \text{MNPK} > \text{NPK} > \text{M}$, 但有机无机肥配施与单施化肥处理间作物产量差异不显著。过量施肥增产效果不明显。肥料在小麦和玉米增产效果明显, 在大豆上的增产效果不明显。

2) 不同施肥措施的作物产量变化趋势有所差异, 长期不施肥处理小麦和玉米产量随试验年限推移呈下降趋势, 降幅分别为 13.93 和 $42.61 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$; 而大豆则相反, 以 $7.409 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ 的速率增加。长期施肥处理的小麦、大豆和玉米产量总体上呈增加趋势。

3) 长期施用常量化肥 (NPK) 和常量有机无机肥配施 (MNPK) 土壤氮表现为亏缺, 磷为盈余。过量施肥 ($\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$) 时, 土壤氮素、磷素出现大量盈余, 年盈余量

分别达到 133.0 和 175.6 kg/hm^2 。各处理土壤中钾素均表现为亏缺。在常量化肥基础上增施有机肥 (MNPK) 氮、钾供应状况有所改善。

4) 作物产量与土壤有机质 (organic matter, OM)、碱解氮 (alkali-hydrolyzable N, AN)、有效磷 (available P, AP)、生育期累计降雨量 (accumulated precipitation, PR)、生育期日平均气温 (mean daily temperature, TE) 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 氮素是影响黑土作物生产力的首要肥力因子。

5) 在黑土小麦-大豆-玉米典型轮作制度下, 基于土壤养分平衡特征提出“稳氮、减磷和增钾”的施肥策略。

[参 考 文 献]

- [1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259—273.
Zhu Zhao Liang, Jin Ji Yun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259—273. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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.
Li Shutian, Jin Jiyun. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207—4229. (in Chinese with English abstract)
- [3] 奚振邦. 关于化肥对作物产量贡献的评估问题[J]. 磷肥与复肥, 2004, 19(3): 68—71.
Xi Zhenbang. Evaluation on the contribution of fertilizer to the yield of crop[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2004, 19(3): 68—71. (in Chinese with English abstract)
- [4] Yang Z C, Zhao N, Huang F, et al. Long-term effects of different organic and inorganic fertilizer treatments on soil organic carbon sequestration and crop yields on the North China Plain[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 146: 47—52.
- [5] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 129—138.
Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 129—138. (in Chinese with English abstract)
- [6] Cui Zhenling, Chen Xiping, Li Junliang, et al. Effect of N fertilization on grain yield of winter wheat and apparent N losses[J]. Pedosphere, 2006, 16(6): 806—812.
- [7] 周杨明, 于秀波, 鄢帮有. 1949—2005 年江西省农田养分平衡动态的宏观分析[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(5): 919—926.
Zhou Yangming, Yu Xiubo, Yan Bangyou. Balance and change trend of cropland soil nutrients in Jiangxi province during 1949 to 2005[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(5): 919—926. (in Chinese with English abstract)
- [8] Yaduvanshi N P S. Effect of five years of rice-wheat cropping and NPK fertilizer use with and without organic and green manures on soil properties and crop yields in a reclaimed sodic soil[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science. 2001, 49: 714—719.
- [9] 聂军, 郑圣先, 杨曾平, 等. 长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(7): 1404—1413.
Nie Jun, Zheng Shengxian, Yang Zengping, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizer, pig manure and

- rice straw on physical properties of a reddish paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(7): 1404—1413. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1109—1116. Meng Hongqi, Liu Jing, Xu Minggang, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1109—1116. (in Chinese with English abstract)
- [11] 乔云发, 韩晓增, 韩秉进, 等. 长期施用化肥对农田黑土有机碳和氮消长规律的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(4): 30—33. Qiao Yunfa, Han Xiaozeng, Han Bingjin, et al. Soil organic carbon and nitrogen of black farmland growth and decline under a long-term experiment chemical fertilizer applications[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(4): 30—33. (in Chinese with English abstract)
- [12] Wei Dan, Yang Qian, Zhang Junzheng, et al. Bacterial community structure and diversity in a black soil as affected by long-term fertilization[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(5): 582—592.
- [13] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 91—99. Wen Yanchen, Li Yanqing, Yuan Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(7): 91—99. (in Chinese with English abstract)
- [14] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 66—71. Han Xiaozeng, Wang Feng-xian, Wang Feng-ju, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 66—71. (in Chinese with English abstract)
- [15] Bedada W, Karltona E, Lemenih M, et al. Long-term addition of compost and NP fertilizer increases crop yield and improves soil quality in experiments on smallholder farms[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 195: 193—201.
- [16] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 314—324. Gao Jusheng, Huang Jing, Dong Chunhua, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314—324. (in Chinese with English abstract)
- [17] Zhao Shicheng, He Ping, Qiu Shaojun, et al. Long-term effects of potassium fertilization and straw return on soil potassium levels and crop yields in north-central China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 116—122.
- [18] Wang Xuelei, Feng Aiping, Wang Qiao, et al. Spatial variability of the nutrient balance and related NPSP risk analysis for agro-ecosystems in China in 2010[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 193: 42—52.
- [19] Zha Yan, Wu Xueping, He Xinhua, et al. Basic soil productivity of spring maize in black soil under long-term fertilization based on dssat model[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3): 577—587.
- [20] 鲍士旦. *土壤农业化学分析*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [21] Zhang Huimin, Yang Xueyun, He Xinhua, et al. Effect of Long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 154—163.
- [22] Chauhan S K, Chauhan C P S, Minhas S. Effect of cyclic use and blending of alkali and good quality waters on soil properties, yield and quality of potato, sunflower and Sesbania[J]. *Irrigation Science*, 2007, 26(1): 81—89.
- [23] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥下中国主要粮食作物产量的变化[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2407—2414. Li Zhongfang, Xu Minggang, Zhang Huimin, et al. Grain yield trends of different food crops under long-term fertilization in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7): 2407—2414. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈欢, 曹承富, 孔令聪, 等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(13): 2580—2590. Chen Huan, Cao Chengfu, Kong Lingcong, et al. Study on wheat yield stability in huaiBei lime concretion black soil area based on long-term fertilization experiment [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(13): 2580—2590. (in Chinese with English abstract)
- [25] 罗龙皂, 李渝, 张文安, 等. 长期施肥下黄壤旱地玉米产量及肥料利用率的变化特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2793—2798. Luo Longzao, Li Yu, Zhang Wenan, et al. Variation characteristics of maize yield and fertilizer utilization rate on an upland yellow soil under long term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 2793—2798. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张喜林, 周宝库, 孙磊, 等. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(3): 321—325. Zhang Xilin, Zhou Baoku, Sun Lei, et al. Black soil acidity as affected by applying fertilizer and manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 321—325. (in Chinese with English abstract)
- [27] 骆坤. 黑土碳氮及其组分对长期施肥的响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 1—83. Luo Kun. Black Soil Carbon Nitrogen and Its Fraction in Response to Long-Term Fertilization[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 1—83. (in Chinese with English abstract)
- [28] Campiglia E, Mancinelli R, De Stefanis E, et al. The long-term effects of conventional and organic cropping systems, tillage managements and weather conditions on yield and grain quality of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in the Mediterranean environment of Central Italy[J]. *Field Crops Research*, 2015, 176: 34—44.
- [29] 赵京考, 卢静, 谷思玉, 等. 降雨量和氮素对黑土区春玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 74—78. Zhao Jingkao, Lu Jing, Gu Siyu, et al. Effects of precipitation and nitrogen on spring corn yield in black soil regions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(12): 74—78. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李辉, 姚凤梅, 张佳华, 等. 东北地区玉米气候产量变化及其对气候变化的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(4): 423—428. Li Hui, Yao Fengmei, Zhang Jiahua, et al. Analysis on climatic maize yield and its sensitivity to climate change in northeast China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(4): 423—428. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王琪, 马树庆, 郭建平, 等. 温度对玉米生长和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(2): 255—260. Wang Qi, Ma Shuqing, Guo Jianping, et al. Effects of air

- temperature on maize growth and its yield[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 255—260. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘芬, 王小英, 赵业婷, 等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡现状分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110—119.
- Liu Feng, Wang Xiaoying, Zhao Yeting, et al. Spatial and temporal variation of soil nutrient and nutrient balance status in Weibei rainfed highland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 110—119. (in Chinese with English abstract)
- [33] Hendricksa G S, Shuklaa S, Obreza T A, et al. Measurement and modeling of phosphorous transport in shallow groundwater environments[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2014, 164: 125—137.
- [34] Macdonald G K, Bennetta E M, Potter P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(7): 3086—3091.
- [35] 刘新民, 陈海燕, 峥嵘, 等. 内蒙古典型草原马粪分解特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2465—2471.
- Liu Xinmin, Chen Haiyan, Zheng Rong, et al. Decomposition characteristics of horse dung in Inner Mongolia typical steppe[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2465—2471. (in Chinese with English abstract)
- [36] 周米平, 刘金华, 杨靖民, 等. 吉林省不同区域黑土供钾能力研究[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(5): 712—715, 752.
- Zhou Mi ping, Liu Jinhua, Yang Jing-min, et al. Study on the capability of releasing potassium in several phaeozem in Jilin province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(5): 712—715, 752. (in Chinese with English abstract)

Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil

Hao Xiaoyu^{1,2}, Zhou Baoku^{1*}, Ma Xingzhu¹, Gao Zhongchao¹

(1. Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China;

2. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences Postdoctoral Programme, Harbin 150086, China)

Abstract: With a cropping area of 7.0 million hm^2 , the black soil (*Typic hapludoll*) region of Northeast China plays a crucial role in food security to the regional and whole country. In fact, the application of chemical fertilizer is an effective and fast way to increase crop production in a relatively short time. Recently, organic manure application has almost disappeared because its application in cropping system is both labor-demanding and uneconomical. However, there is limited information on crop yields under long-term fertilization of organic and inorganic fertilizers in this rotation system. Nutrient input/output and balance in farmland is critical for nutrient management, scientific distribution and application of fertilizer resources, and improving nutrient use efficiency, etc. The study was conducted to reveal the difference of grain yield and nutrient balance based on the average crop yields, the variation trends of crop yields and apparent balance of soil nutrients under different long-term fertilization conditions in black soil, and to provide scientific references for establishing effective long-term fertilization mode and promoting the sustainable development of crop production. A long-term experiment with various fertilizations was carried out during 1979-2014 in a rotation system with wheat (*Triticum Aestivium* L.)-soybean (*Glycine max* Merr.)-maize (*Zea mays* L.) in black soil area of Northeast China. The experiment consisted of 5 treatments: non-fertilization (CK), conventional chemical fertilizer (wheat: N 150 kg/hm^2 , P_2O_5 75 kg/hm^2 , soybean: N 75 kg/hm^2 , P_2O_5 150 kg/hm^2 , corn: N 150 kg/hm^2 , P_2O_5 75 kg/hm^2 , K_2O 75 kg/hm^2 , NPK), conventional horse manure (18 600 kg/hm^2 , M), conventional horse manure plus chemical fertilizer (the amount of chemical fertilizer was same as NPK, and the amount of horse manure was same as M), and 200% of the MNP (horse manure and chemical fertilizer, the amount was 2 times that of MNP, $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$). The results showed that: 1) Compared with the treatment CK, long-term application of chemical fertilizers (NPK) or long-term application of chemical fertilizers combined with horse manure (MNPK, $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$) increased average crop yield (from 1980 to 2014) by 82.5%-91.6% (wheat) and 35.6%-40.9% (maize), respectively. In respect of average crop yield of 35 years, the treatments displayed an order of $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2 > \text{MNPK} > \text{NPK} > \text{M}$, but no significant differences were observed between $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$, MNPK and NPK. 2) The yields of wheat and maize in CK decreased by 13.93 and 42.61 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ respectively, while the yield of soybean in CK increased by 7.409 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ with the experiment going. It showed the yield trend of wheat, soybean and maize in the treatment with fertilization overall increased with the experiment going. 3) Under the conditions of our experiment, surplus of nitrogen and phosphorus appeared in soil in the treatments of NPK and MNPK, and the increasing amounts were 29.7 and 17.5 kg/hm^2 for nitrogen, and 33.4 and 61.2 kg/hm^2 for phosphorus, respectively. Potassium deficit of 30.4-73.0 kg/hm^2 was observed in all treatments. Compared with NPK, the supplement of nitrogen and potassium could be improved by the combined application of organic manure and inorganic fertilizer (MNPK) by 12.2 and 27.6 kg/hm^2 , respectively. 4) Crop yield was significantly positively correlated with the contents of organic matter, available nitrogen, available phosphorus, accumulated precipitation and daily mean temperature in the growth period ($P < 0.05$). 5) Based on the characteristics of nutrient balance, we proposed the method of fertilizer application, i.e. keeping application amount of nitrogen stable, reducing phosphorus amount and increasing potassium amount under rotation system of wheat, soybean and corn in black soil area.

Key words: soils; fertilizers; crops; long-term fertilization; crop yield; nutrient balance; combined application of organic manure and inorganic fertilizer; black soil