



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

黑龙江省春玉米近二十年产量及肥料利用率变化

姬景红, 刘双全, 郑雨, 刘颖, 张明怡, 马星竹, 郝小雨, 陈雪丽

引用本文:

姬景红, 刘双全, 郑雨, 刘颖, 张明怡, 马星竹, 郝小雨, 陈雪丽. 黑龙江省春玉米近二十年产量及肥料利用率变化[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1099–1105.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0684>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性及产量的影响

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 张倩, 盛开, 王宜伦

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 107–117 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0677>

氮肥施用对四川紫色土矿质态氮淋失特征及春玉米产量的影响

刘明鹏, 徐开未, 肖华, 陈晓辉, 彭丹丹, 卢俊宇, 陈远学

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 88–98 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0655>

东北三省农田化肥氮地下淋溶污染等级评估

孙铖, 周华真, 陈磊, 沈珍瑶, 王洪媛, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 405–411 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0318>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 118–128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姬景红, 刘双全, 郑雨, 等. 黑龙江省春玉米近二十年产量及肥料利用率变化[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1099–1105.

Ji J H, Liu S Q, Zheng Y, et al. Changes in yield and fertilizer use efficiency of spring maize in Heilongjiang Province over a twenty year period[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1099–1105.



开放科学 OSID

黑龙江省春玉米近二十年产量及肥料利用率变化

姬景红, 刘双全, 郑雨, 刘颖, 张明怡, 马星竹, 郝小雨, 陈雪丽

(黑龙江省黑土保护利用研究院, 黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 黑龙江省肥料工程技术研究中心, 哈尔滨 150086)

摘要:为明确近年来黑龙江省春玉米产量及肥料利用率变化,采用多年多点田间小区试验方法,结合黑龙江省统计年鉴数据,分析了2000—2019年174个春玉米田间试验中的522个玉米产量数据及近2 000个成熟期养分吸收量数据,探讨玉米产量和氮磷钾肥利用率变化及其原因。结果表明,2000—2009年玉米平均产量为7 347 kg·hm⁻²,2010—2019年平均产量为8 859 kg·hm⁻²,2010—2019年较2000—2009年玉米平均增产1 512 kg·hm⁻²,增产率达20.6%;黑龙江省玉米平均收获指数2000—2009年为0.45,2010—2019年为0.50。玉米产量与植株氮磷钾吸收量均呈显著的对数函数关系,玉米产量与氮素吸收量相关性最高,其次为钾素,与磷素相关性最低。根据化肥施用及肥料利用率可将研究时期进一步划分为三个阶段,即2000—2010年、2011—2015年、2016—2019年,氮磷钾肥利用率表现为先降低后增加的趋势。氮肥利用率在这三个阶段的平均值分别为38.5%、34.4%、39.4%,磷肥(P₂O₅)利用率分别为18.8%、15.8%、20.7%,钾肥(K₂O)利用率分别为47.9%、46.4%、49.9%。研究表明,2000—2019年黑龙江省玉米单产整体呈上升趋势,氮磷钾肥料利用率则呈先降低后增加的趋势。收获指数及肥料用量的增加是玉米产量提高的主要原因,肥料用量的增加是导致肥料利用率降低的主要原因。

关键词:黑龙江;春玉米;产量;肥料利用率;氮;磷;钾

中图分类号:S147.5;S147.22 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2022)06-1099-07 doi: 10.13254/j.jare.2021.0684

Changes in yield and fertilizer use efficiency of spring maize in Heilongjiang Province over a twenty year period

Ji Jinghong, Liu Shuangquan, Zheng Yu, Liu Ying, Zhang Mingyi, Ma Xingzhu, Hao Xiaoyu, Chen Xueli

(Institute of Black Soil Conservation and Utilization Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, The Key Lab of Soil Environment and Plant Nutrition, Research Center of Fertilizer Engineering and Technology of Heilongjiang Province, Harbin 150086, China)

Abstract: This study examined the changes in the yield and fertilizer utilization rates of spring maize in Heilongjiang Province, China. Based on an analysis of 522 maize yields and approximately 2 000 nutrient uptake data that were obtained from 174 field fertilization experiments, the yields and fertilizer usage efficiency of spring maize were determined from 2000 to 2019. The yield and N, P, and K fertilizer use efficiency of maize in Heilongjiang Province were studied, and the reasons for the changes were explored using the multi-year field plot experiments method, combined with data from the Heilongjiang Statistical Yearbook. The results of the field experiment showed that the average yield of maize was 7 347 kg·hm⁻² from 2000 to 2009 and 8 859 kg·hm⁻² from 2010 to 2019, an increase of 1 512 kg·hm⁻² (20.6%). The average maize harvest index in Heilongjiang Province was 0.45 from 2000 to 2009, and 0.50 from 2010 to 2019. There was a significant logarithmic relationship between the maize yield and N, P, and K uptake; the correlation between maize yield and N uptake was the strongest, followed by the correlation with K uptake and then P uptake. According to the application of chemical fertilizer and the utilization rate of fertilizer, there were three stages: from 2000 to 2010, from 2011 to 2015, and from 2016 to 2019. The average rates of N use efficiency were 38.5%, 34.4%, and 39.4%; for P use efficiency (P₂O₅) they were 18.8%, 15.8%, and 20.7%; and for K use efficiency

收稿日期:2021-10-09 录用日期:2021-12-08

作者简介:姬景红(1979—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,主要从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail:jinghong_98@163.com

基金项目:黑龙江省农业科学院农业科技创新跨越工程专项(HNK2019CX20);黑龙江省人社厅土壤肥科学项目(RST2019)

Project supported: Scientific and Technological Innovation Project in Heilongjiang Academy of Agricultural Science (HNK2019CX20); Soil and Fertilizer Science Project of Human Resources and Social Security Department of Heilongjiang Province (RST2019)

(K₂O) they were 47.9%, 46.4%, and 49.9%, respectively. The results showed that the yield per unit area of maize increased in Heilongjiang Province over the past 20 years, while the utilization ratio of N, P, and K fertilizers decreased at first and then increased. The increase in the maize yield was predominantly caused by the increase in the harvest index and fertilizer application, and the increase in fertilizer application was the main reason for the decrease in fertilizer use efficiency.

Keywords: Heilongjiang Province; spring maize; yield; fertilizer use efficiency; nitrogen; phosphorus; potassium

玉米是黑龙江省主要粮食作物之一,2019年种植面积达587.5万hm²,产量达3 939.8万t^[1],其种植面积和产量对于保障黑龙江省乃至全国粮食安全具有重要意义。众所周知,化肥是粮食的“粮食”,在玉米增产中发挥着不可替代的作用。然而黑龙江省玉米生产中仍然存在着化肥用量高、粮食产量增长缓慢、肥料利用率低的现象,长此以往,不但会造成肥料资源的浪费,而且易产生潜在的环境风险。黑龙江省玉米平均单产为6 706 kg·hm⁻²(来源于2020年黑龙江省统计年鉴),氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥用量范围为150~230、60~120、60~120 kg·hm⁻²^[2-4],虽然春玉米平均单位面积施肥量低于其他省份,但对于其肥沃的土壤及不断增加的积温而言,玉米单产仍有较大的提升潜力^[5],且肥料用量也有一定的减少空间。以往关于黑龙江省玉米肥料利用率的研究多集中在一年几点^[6-8]或几年几点的试验上^[4],缺少较长时间跨度上利用率变化情况的研究。作为全国玉米生产大省,黑龙江省玉米产量及肥料利用率是如何变化的?产生这种变化的主要原因是什么?这些均有待于深入研究和探讨。因此,本研究通过对2000—2019年近20年黑龙江省玉米主产区大量田间试验数据的总结分析,探讨黑龙江省玉米产量及肥料利用率,为黑龙江省肥料合理施用及玉米产量的提高提供基础支撑数据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验时间为2000—2019年(共20年),试验地区包括黑龙江省双城、宾县、哈尔滨、安达、肇东、肇源、桦川、海伦、庆安、依安、赵光农场等主要的玉米产区,供试土壤主要为黑土。采用田间小区试验方法,设5个施肥处理,分别为:①氮磷钾化肥(NPK);②磷钾化肥(PK);③氮钾化肥(NK);④氮磷化肥(NP);⑤不施肥(CK)。小区面积30 m²,3次重复,随机区组排列。玉米品种为当年当地主栽品种。氮肥30%~50%作基肥,50%~70%作追肥于拔节期施入。氮肥用尿素、磷肥用重过磷酸钙、钾肥用氯化钾。玉米种植密度为4.5万~7.0万株·hm⁻²。播种时间为4月下旬至5月上

旬,收获时间为9月下旬至10月上旬。各试验地点根据区域特点进行正常田间管理。本研究收集了黑龙江省各地区174个田间施肥试验中的522个玉米产量(玉米籽粒含水量15.5%)数据和近2 000个成熟期养分吸收量数据。

1.2 测定指标及方法

玉米成熟期,在各小区中间位置随机取10株均匀一致、有代表性的玉米,将其分成籽粒和秸秆两部分。放入105℃烘箱中杀青0.5 h。之后,籽粒在70℃的烘箱中烘干至含水量为15.5%后测产,再将籽粒和秸秆置于70℃的烘箱中烘干,分别测定秸秆、籽粒质量,采用实验室常规方法^[9]测定秸秆和籽粒中氮、磷、钾含量。

1.3 统计分析及计算公式

1.3.1 统计分析

采用Excel 2010和SPSS 16.0软件进行数据的统计分析。

1.3.2 计算方法

收获指数(HI)=籽粒产量/地上部植株生物量 (1)

氮肥利用率(REN,%)=(施氮区吸氮量-不施氮区吸氮量)/施氮量×100 (2)

磷肥利用率(REP,%)=(施磷区吸磷量-不施磷区吸磷量)/施磷量×100 (3)

钾肥利用率(REK,%)=(施钾区吸钾量-不施钾区吸钾量)/施钾量×100 (4)

2 结果与分析

2.1 玉米产量变化及主要原因

由2000—2019年玉米田间试验结果和黑龙江省统计年鉴可以看出,20年来黑龙江省玉米单产发生了较大变化(图1)。随着时间推移,试验田玉米单产和黑龙江省玉米平均单产变化趋势一致。2000—2019年玉米单产整体呈上升趋势(图1),其中2000—2009年玉米产量呈波动缓慢上升趋势,至2010年以后玉米单产各年份间也有波动,但较2010年前的各年份产量明显上升。因此,将玉米产量分为2000—2009年和2010—2019年两个阶段。田间试验结果表

明,2000—2009年玉米平均产量为 $7\,347\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($n=126$),2010—2019年玉米平均产量为 $8\,859\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($n=396$),2010—2019年较2000—2009年玉米平均产量增加 $1\,512\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增产率达20.6%(黑龙江省统计年鉴数据显示,2010—2019年较2000—2009年玉米增产率为31.7%)。

由图2可以看出,近20年黑龙江省玉米收获指数的变化趋势与玉米产量变化趋势一致。2000—2009

年玉米平均收获指数为0.45($n=126$),2010—2019年为0.50($n=396$),2010—2019年较2000—2009年玉米收获指数平均增加0.05。

2.2 玉米施肥量变化

2000—2019年黑龙江省氮磷钾肥料用量整体呈先增后降的趋势,2000—2015年氮磷钾肥用量增加,2016年开始逐渐降低(图3)。玉米田间试验中,氮磷钾肥单位面积用量与黑龙江省氮磷钾肥料用量的变

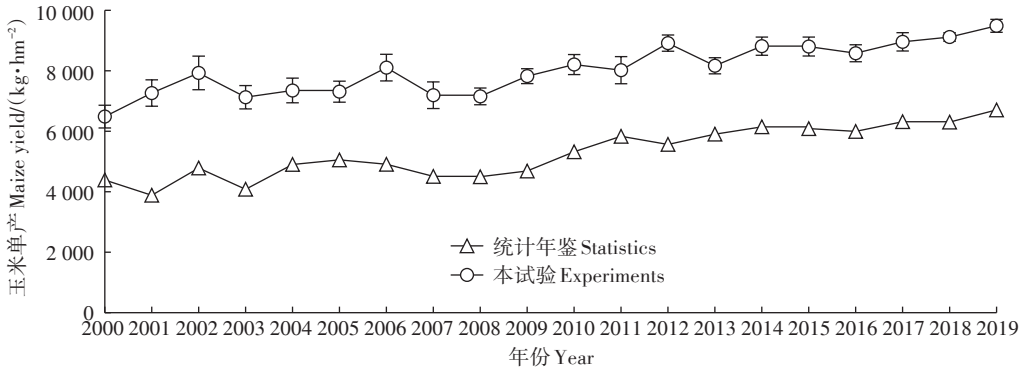


图1 不同年份玉米产量平均值变化

Figure 1 Variation of average yield of maize in different years

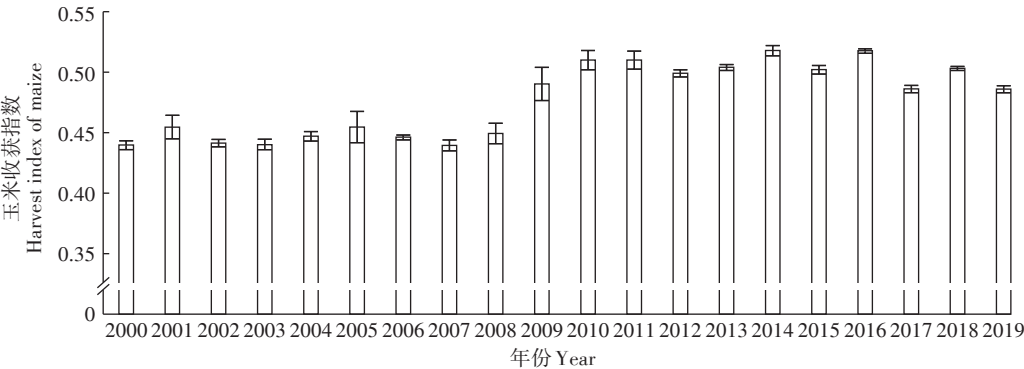


图2 不同年份玉米收获指数平均值变化

Figure 2 Variation of harvest index of maize in different years

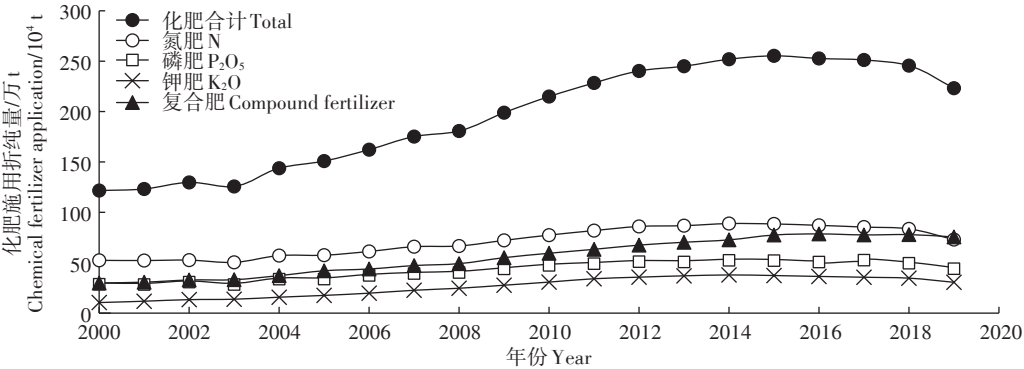


图3 黑龙江省肥料施用量(黑龙江省统计年鉴)

Figure 3 Amount of fertilizer applied in Heilongjiang Province(Heilongjiang Statistical Yearbook)

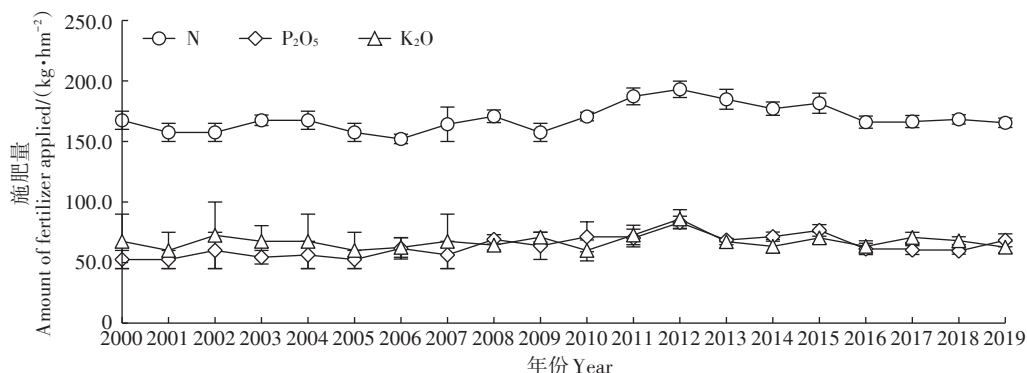


图4 2000—2019年玉米施肥量

Figure 4 Amount of fertilizer applied in maize from 2000 to 2019

化趋势基本一致,表现为2000—2015年波动上升,2016年开始有所下降(图4)。玉米氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥在2000—2010年平均施用量分别为165.2、63.1、64.7 $kg \cdot hm^{-2}$ ($n=46$),2011—2015年分别为184.2、73.5、71.1 $kg \cdot hm^{-2}$ ($n=50$);2016—2019年分别为167.0、61.8、66.6 $kg \cdot hm^{-2}$ ($n=78$)。

2.3 玉米产量与植株养分吸收量之间的关系

图5、图6和图7是玉米产量与植株养分吸收量(籽粒与秸秆养分吸收量之和)之间的关系。由图可知,玉米产量与植株氮、磷、钾吸收量均呈极显著的对数函数关系。随着植株氮、磷、钾吸收量的增加,玉米产量增加。玉米产量与氮素吸收量相关性最高,其次为钾素,与磷素相关性最低。

2.4 玉米氮磷钾肥料利用率变化

黑龙江省近20年(2000—2019年)玉米肥料利用率统计结果(表1)表明,氮、磷、钾肥利用率范围分别为22.3%~50.7%、5.1%~37.6%和26.3%~76.4%,平均值为36.9%、18.0%和47.8% ($n=119$)。根据化肥施用

及肥料利用率可将研究时期进一步划分为三个阶段:2000—2010年、2011—2015年、2016—2019年。氮肥利用率在这三个阶段的平均值分别为38.5% ($n=34$)、34.4% ($n=53$)和39.4% ($n=32$);磷肥(P_2O_5)利用率为18.8%、15.8%、20.7%;钾肥(K_2O)利用率为47.9%、46.4%和49.9%;氮、磷、钾肥利用率均表现出先降低

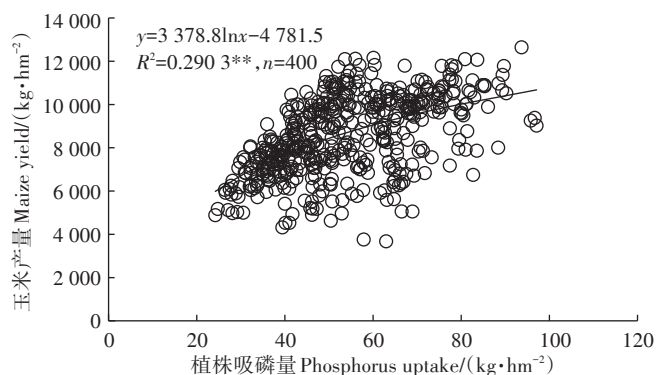


图6 玉米产量与植株吸磷量之间的关系

Figure 6 Relationship between yield and plant phosphorus uptake of maize

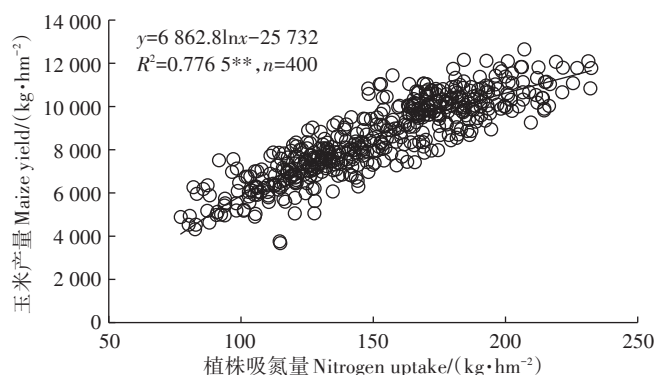


图5 玉米产量与植株吸氮量之间的关系

Figure 5 Relationship between yield and plant nitrogen uptake of maize

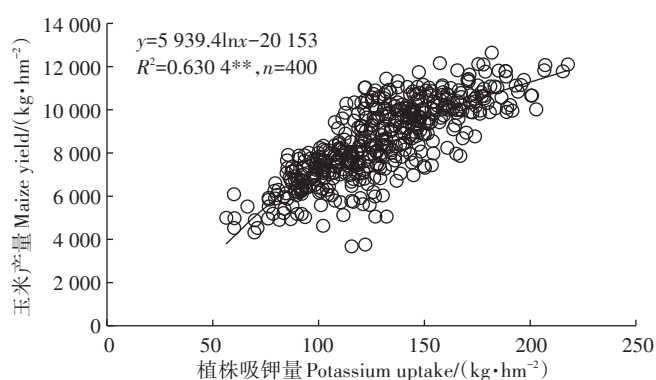


图7 玉米产量与植株吸钾量之间的关系

Figure 7 Relationship between yield and plant potassium uptake of maize

表1 黑龙江玉米氮磷钾肥料利用率变化

Table 1 Changes in nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer use efficiency of maize in Heilongjiang Province

项目 Item	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency				磷肥利用率 Phosphorus use efficiency				钾肥利用率 Potassium use efficiency			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
平均值 Mean/%	38.5	34.4	39.4	36.9	18.8	15.8	20.7	18.0	47.9	46.4	49.9	47.8
标准误 SE/%	1.19	0.77	0.80	0.56	1.11	0.68	0.99	0.54	2.19	1.40	0.95	0.92
标准差 SD/%	6.92	5.61	4.50	6.15	6.45	4.97	5.59	5.93	12.75	10.22	5.39	10.06
方差 Variance	47.9	31.4	20.3	37.8	41.6	24.7	31.2	35.2	162.6	104.6	29.1	101.3
最小值 Min value/%	22.3	23.9	31.2	22.3	5.1	6.8	12.1	5.1	28.3	26.3	37.7	26.3
最大值 Max value/%	49.1	46.0	50.7	50.7	31.3	25.6	37.6	37.6	76.4	71.4	63.6	76.4
观测数 Number	34	53	32	119	34	53	32	119	34	53	32	119

注:表中1、2、3、4分别代表2000—2010年、2011—2015年、2016—2019年、2000—2019年。

Notes: The number of 1, 2, 3 and 4 represent year from 2000 to 2010, 2011 to 2015, 2016 to 2019 and 2000 to 2019, respectively.

后增加的趋势。这可能主要是由于2011—2015年肥料用量(尤其是氮肥用量)明显增加,导致肥料利用率下降;2016—2019年用量下降到2000—2010年的水平,且玉米产量明显增加,所以肥料利用率呈明显上升趋势。

3 讨论

3.1 黑龙江省玉米产量变化的主要影响因素

影响玉米产量的主要因素有品种、积温、降水等气候条件,土壤性质,施肥状况,耕作、栽培等农艺措施。在每年相似的农业管理措施下,本试验研究结果表明,近20年黑龙江省玉米单产及玉米收获指数均呈上升的趋势。按数据的整体趋势,可将玉米产量及收获指数划分为两个阶段,即2000—2009年和2010—2019年。第二阶段的玉米单产和收获指数均较前一阶段有明显提高。玉米收获指数的高低与品种密切相关,不同品种的养分在植株和籽粒中的分配各不相同,进而影响收获指数的大小,造成产量差异^[10-13]。本研究20年中玉米品种的选择与品种的演替基本同步,即每年都按当地积温等气候条件选择适宜的品种。钱春荣等^[14]的研究结果表明,黑龙江省在1970—2000年玉米品种更替过程中,籽粒产量和氮肥利用率均明显提高。由本研究试验数据可以看出第二阶段玉米施肥量高于第一阶段,尤其是氮磷肥用量的增加使得玉米产量增加。另外,玉米产量的增加可能与温度的变化有关,近年来黑龙江省积温不断增加^[5],使得高产晚熟品种种植面积扩大。本研究结果进一步表明,肥料用量的增加、玉米品种及种植密度的改变、收获指数及有效积温的增加,均是近20年来玉米产量增加的主要原因。

3.2 黑龙江省玉米主产区肥料利用率的变化

肥料利用率是作物生产中投入的肥料被作物吸收利用状况的一个表征。朱兆良^[15]1998年指出,当时我国主要粮食作物的氮、磷、钾肥利用率分别为30%~35%、15%~20%、35%~50%。张福锁等^[16]于2008年也总结了1333个田间试验,提出我国主要粮食作物氮、磷、钾肥利用率均呈逐渐下降趋势,氮、磷、钾肥利用率范围分别为10.8%~40.5%、7.3%~20.1%、21.2%~35.9%,平均为27.5%、11.6%、31.3%;同时,根据5年349个玉米田间试验结果,得出河北、天津、山东、山西、陕西5个地区玉米平均氮、磷、钾肥利用率为26.1%、11.0%、31.9%。本研究对2000—2019年119个玉米田间肥料试验的统计结果表明,氮、磷、钾肥利用率范围分别为22.3%~50.7%、5.1%~37.6%、26.3%~76.4%,平均为36.9%、18.0%、47.8%。由以上数据可知,黑龙江省玉米主产区的氮、磷、钾肥料利用率均较高。这一方面可能与黑龙江省黑土区土壤基础肥力相对较高、肥料用量较少有关^[17],另一方面可能由于黑龙江省地处北部寒区,氮肥的气态损失较少^[18]。本研究根据化肥施用及肥料利用率将研究时期进一步划分为三个阶段:2000—2010年、2011—2015年、2016—2019年。氮肥利用率在这三个阶段的平均值分别为38.5%、34.4%、39.4%;磷肥(P_2O_5)利用率为18.8%、15.8%、20.7%;钾肥(K_2O)利用率为47.9%、46.4%、49.9%;氮磷钾肥利用率表现出先降低后增加的趋势。这可能主要是由于2011—2015年肥料用量(尤其是氮肥用量)明显增加,导致肥料利用率下降;2016—2019年用量下降到2000—2010年的水平,且玉米产量明显增加,所以肥料利用率呈明显上升趋势。史常亮等^[19]的研究表明,与2004年相比,2013年

我国小麦、水稻、玉米的化肥施用强度明显增加,玉米化肥效率下降了3.29%^[19]。李红莉等^[20]研究发现,与2000年相比,2007年我国玉米施肥总量增加了64.8%,化肥效率平均减少17%,全国玉米化肥效率的大幅下降是由于玉米单产整体增幅小于化肥投入的增幅。本研究及以上研究结果进一步说明,肥料用量的增加是肥料利用率降低的主要原因。近几年来,“减肥”特别是“减氮”的行动在我国广泛开展,2015年,农业部制订了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》。从本研究田间试验和黑龙江省统计年鉴中氮磷钾肥料用量也可以看出,自2016年以来肥料用量减少,氮磷钾肥料利用率呈现出增加趋势。2017年和2018年针对黑龙江省大部分地区农户进行的玉米施肥现状调查结果显示,黑龙江省主要存在氮肥施用过量 and 钾肥施用不足的问题,玉米生产中氮磷肥施用量有一定的降低空间^[21-22]。可见,随着肥料施用逐渐合理化,肥料利用率将有一定的提升空间。

4 结论

(1)2000—2019年黑龙江省玉米单产整体呈上升趋势,氮磷钾肥用量先增加后降低,氮磷钾肥利用率则呈现出先降低后增加的趋势。

(2)2000—2019年黑龙江省玉米氮、磷、钾肥利用率范围分别为22.3%~50.7%、5.1%~37.6%、26.3%~76.4%,平均值分别为36.9%、18.0%、47.8%。

(3)玉米收获指数及肥料用量的增加是2000—2019年黑龙江省玉米产量增加的主要原因,肥料用量的增加是导致肥料利用率降低的主要原因。从玉米产量及肥料利用率等方面综合来看,近年来黑龙江省肥料施用量渐趋合理化。

参考文献:

- [1] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 2020: 253, 258. Heilongjiang Provincial Bureau of Statistics. Heilongjiang statistical yearbook[M]. China Statistics Press, 2020:253, 258.
- [2] 王宇先, 刘玉涛, 连永利, 等. 黑龙江省西部地区不同施肥量对春玉米水分利用率的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2008(6): 56-57. WANG Y X, LIU Y T, LIAN Y L, et al. Effect of diversity fertilizing amount on the water use efficiency of spring maize in the western district of Heilongjiang Province[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2008(6):56-57.
- [3] 李海波, 韩晓增, 宋春, 等. 黑龙江省南部黑土玉米NPK适宜用量的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2008(2): 54-57. LI H B, HAN X Z, SONG C, et al. Research on optimal combined application of NPK fertilizers in the south of Heilongjiang[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2008(2):54-57.
- [4] 刘双全, 姬景红. 黑龙江省玉米高效施肥技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 40-60. LIU S Q, JI J H. High-efficiency fertilization technology of maize in Heilongjiang Province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017:40-60.
- [5] 王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1914-1925. WANG J, YANG X G, LÜ S, et al. Spatial-temporal characteristics of potential yields and yield gaps of spring maize in Heilongjiang Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(10): 1914-1925.
- [6] 李玉影, 刘双全, 姬景红, 等. 玉米平衡施肥对产量、养分平衡系数及肥料利用率的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 120-124, 130. LI Y Y, LIU S Q, JI J H, et al. Effect of balanced fertilization on yield, nutrient balance coefficient and fertilizer use efficiency of corn[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(3): 120-124, 130.
- [7] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 黑龙江省春玉米的优化施肥研究[J]. 中国土壤与肥料, 2014(5): 53-58. JI J H, LI Y Y, LIU S Q, et al. Optimized fertilization of spring maize in Heilongjiang Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(5): 53-58.
- [8] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 黑龙江省典型黑土区玉米优化施肥效果——以双城为例[J]. 土壤与作物, 2015, 4(2): 64-70. JI J H, LI Y Y, LIU S Q, et al. Optimized fertilization of maize in black soil region in Heilongjiang Province: Example as Shuangcheng City[J]. *Soil and Crop*, 2015, 4(2): 64-70.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. BAO S D. Soil agricultural-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [10] 佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 等. 黑龙江春玉米籽粒产量与氮素吸收变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1094-1102. TONG Y X, LI Y Y, LIU S Q, et al. Variations of the grain yields and N absorption of spring maize in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1094-1102.
- [11] CHUN L, CHEN F J, ZHANG F S, et al. Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 615-619.
- [12] KANARA A Y, MENKIR A, AJALA S O, et al. Performance of diverse maize genotypes under nitrogen deficiency in the northern Guinea savanna of Nigeria[J]. *Experiential Agriculture*, 2005, 41: 199-212.
- [13] WANG K J, ZHANG J W, GUO Y Q, et al. Individual grain yield potential and nitrogen utilization efficiency of *Zea mays* cultivars widely planted in north China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 879-894.
- [14] 钱春荣, 于洋, 宫秀杰, 等. 黑龙江省不同年代玉米杂交种氮肥利用效率对种植密度和施氮水平的响应[J]. 作物学报, 2012, 38(11): 2069-2077. QIAN C R, YU Y, GONG X J, et al. Response of nitrogen use efficiency to plant density and nitrogen application rate for maize hybrids from different eras in Heilongjiang Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(11): 2069-2077.
- [15] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策[C]//李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998: 1-5. ZHU Z L. Present situation, problems and counter-

- measures of nitrogen fertilizer application in China[M]//LI Q K, ZHU Z L, YU T R. The fertilizer problem in the sustainable development of agriculture in China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998: 1-5.
- [16] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [17] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-817. WU L Q, WU L, CUI Z L, et al. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 802-817.
- [18] 乔云发, 韩晓增, 赵兰坡, 等. 黑土氮肥氨挥发损失特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 198-201. QIAO Y F, HAN X Z, ZHAO L P, et al. Researches on ammonia volatilization loss characters of nitrogen fertilizer from black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 198-201.
- [19] 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 671-679. SHI C L, GUO Y, ZHU J F. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. *Journal of Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(4): 671-679.
- [20] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136-1143. LI H L, ZHANG W F, ZHANG F S, et al. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1136-1143.
- [21] 王玉娜, 米国华. 北方春玉米施肥现状及节肥潜力[J]. 玉米科学, 2021, 9(3): 151-158. WANG Y N, MI G H. Fertilizer application in maize production in northern China: Current status and fertilization optimal potential[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(3): 151-158.
- [22] 李威, 许芳维, 陈庚, 等. 黑龙江省玉米施肥现状调查分析[J]. 玉米科学, 2021, 29(3): 123-127. LI W, XU F W, CHEN G, et al. Current status of fertilizer application in maize in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(3): 123-127.