

施磷对东北黑土区春玉米产量、磷素吸收利用及土壤磷素平衡的影响

张磊¹, 都钧², 孔丽丽¹, 尹彩侠¹, 赵胤凯¹, 侯云鹏^{1*}, 李前¹, 李素琴^{1*}

(1. 农业农村部东北植物营养与农业环境重点实验室/吉林省农业科学院, 长春 130033; 2. 长春市农业科学院, 长春 130112)

摘要:为明确东北黑土区春玉米合理施用磷肥问题,通过两年(2017~2018)田间定位试验,研究了不同磷肥用量(0、30、60、90、120、150 kg/hm²)对籽粒产量、磷素吸收利用、土壤有效磷含量变化及磷素平衡的影响。结果表明,施磷显著提高了玉米产量,并在施磷量30~90 kg/hm²范围内随施磷量的增加显著增加,当施磷量增加至120 kg/hm²,玉米产量呈下降趋势。将玉米产量(y)与施磷量(x)拟合,计算出适宜施磷量分别为87 kg/hm²和83 kg/hm²。施磷显著提高了玉米各生育期磷积累量,其中灌浆期至成熟期磷积累量以P90处理最高。磷素吸收利用率和农学利用率随施磷量的增加先增后降,以P90处理最高;磷肥偏生产力随施磷量的增加呈下降趋势。与不施磷肥处理相比,随施磷量和施磷年限的增加,0~40 cm土壤有效磷含量均呈增加趋势。连续种植两季玉米后,P0、P30和P60处理土壤磷素表观平衡值为亏缺状态,亏缺量随磷肥用量的增加而下降,P90处理磷素输入量与输出量基本保持平衡,而P130和P160处理的土壤磷素表现为盈余。综上所述,在本试验条件下,综合产量、磷素吸收利用、土壤有效磷含量变化及磷素平衡等因素,在东北黑土区适宜施磷量应控制在83~90 kg/hm²之间。

关键词:春玉米;产量;土壤有效磷含量;磷素平衡;磷肥利用效率

中图分类号:S513

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2020)05-0038-05

Effects of Phosphorus Fertilizer Application on Yield, Phosphorus Absorption and Utilization, Soil Phosphorus Balance of Spring Maize in Black Soil Region of Northeast China

ZHANG Lei¹, DU Jun², KONG Lili¹, YIN Caixia¹, ZHAO Yinkai¹, HOU Yunpeng^{1*}, LI Qian¹, LI Suqin^{1*}

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R. China / Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 2. Changchun Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130112, China)

Abstract: In order to clarify the problems of rational phosphorus fertilizer application of spring maize in the black soil region of Northeast China, the field experiment was conducted to study the effects of different phosphorus fertilizer rates (P0, 30, 60, 90, 120, 150 kg/ha) on grain yield, phosphorus absorption and utilization, soil available phosphorus content change and phosphorus balance. The results indicated that phosphorus application increased the maize yield significantly. The results showed that in the range of 30~90 kg/ha, the yield increased significantly with the increase of the phosphorus application amount, and when the phosphorus application amount increased to 120 kg/ha, the yield of maize showed a downward trend. The phosphorus absorption and agronomic utilization rate first increased and then decreased with the increase of phosphorus application amount, and P90 treatment was the highest. The partial productivity of phosphorus fertilizer decreased with the increase of phosphorus application. In summary, the optimum phosphorus application amount in the northeast black soil region should be controlled between 83~90 kg/ha.

收稿日期:2019-05-03

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0300604);农业部东北植物营养与农业环境重点实验室开放基金(KLPN201801-02)

作者简介:张磊(1986-),男,助理研究员,主要从事植物营养与作物高效施肥方面研究。

通讯作者:侯云鹏,男,副研究员,E-mail: exceedfhvha@163.com

李素琴,女,副研究员,E-mail: 690832746@qq.com

Key words: Spring Maize; Yield; Soil available phosphorus content; Phosphorus balance; Phosphorus utilization efficiency

春玉米是东北平原主要粮食作物之一,种植面积为2 329.82万公顷,占粮食作物种植面积的56.2%^[1],对保证国家粮食安全具有举足轻重的作用。但在玉米生产中,超过58%的农户磷肥用量远高于当地推荐量^[2],磷肥过量施用,不利于玉米生长发育、影响产量,还造成土壤中的磷素大量积累^[3-4]。因此,如何通过合理施磷提高玉米产量和磷肥利用效率的同时,避免土壤磷素过量积累而造成的环境污染风险,已成为近年来农业和环境科学领域研究的热点问题。黄岩等^[5]研究表明,增加施磷量促进玉米养分吸收、显著提高玉米产量,并随施磷量的增加先增后降,其中以施磷量110 kg/hm²玉米产量最高;吴启华等^[6]指出,在土壤有效磷含量较高的黑土区,比传统施肥降低20%磷肥用量(60 kg/hm² P₂O₅),能获得与传统施磷相当的产量。以上研究多针对于施磷对玉米养分吸收、产量效应及磷肥利用效率等方面,而对土壤磷素的变化和盈亏考虑不足,关于施磷对作物产量、磷素吸收利用与土壤供磷能力等因素的综合研究相对较少。本研究在东北典型黑土区,通过连续两年田间试验,系统研究了不同磷肥用量对玉米产量、磷素吸收利用、土壤有效磷含量变化及磷素盈亏的综合影响,以期对东北玉米磷肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017~2018年在吉林省公主岭市刘房子镇刘房子村(124°54.034E, 43°43.073N)进行,该地位于吉林省中部,属中温带湿润大陆性季风气候。有效积温2 600~3 000℃·d,年均降水量594.8 mm,年平均气温5.6℃,无霜期平均144 d。供试土壤类型为黑土,质地为中壤。试验起始时0~20 cm耕层土壤基础养分状况为:pH 5.92,有机质19.81 g/kg,全氮1.61 g/kg,水解氮139.57 mg/kg,有效磷23.74 mg/kg,速效钾103.28 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置0、30、60、90、120、150 kg/hm² 6个磷肥用量处理,分别用P0、P30、P60、P90、P120、P150表示。不同施磷处理氮(N)、钾(K₂O)肥用量相同,分别为210 kg/hm²和100 kg/hm²。氮肥按基肥:拔节期:抽穗期=30%:50%:20%的比例施用,磷肥

与钾肥均在播种前一次性基施。试验用氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%),钾肥为氯化钾(K₂O 60%)。小区面积40 m²(10.26 m×3.90 m),重复3次,共计18小区,随机区组设计。两年供试玉米品种均为‘翔玉998’,种植密度65 000株/hm²。2017、2018年播种日期分别为4月29日和5月1日,收获日期分别为9月27日和9月30日。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 植株样品

分别于玉米苗期(V3)、拔节期(V6)、大口期(V12)、开花期(VT)、灌浆期(R3)和成熟期(R6)采集不同处理具有代表性玉米植株5株,灌浆期和成熟期植株样品分为茎秆和籽粒两部分,于105℃杀青40 min后,70℃烘干至恒重,称重计算地上部干物质质量后进行粉碎,采用H₂SO₄-H₂O₂消化,钼锑抗比色法测定植株磷含量。

1.3.2 土壤样品

玉米收获后采集土壤样品,每小区用五点采样法采集0~20 cm耕层土壤,混合均匀后,将样品中的根系、石块等挑出,按“四分法”取1 kg带回试验室于阴凉、通风处风干,并用木槌磨细过20目筛处理。样品经自然风干后过20目筛,紫外分光光度计测定有效磷(Olsen-P)含量。

1.4 计算公式及统计方法

磷素吸收利用率(%)=[(施磷区玉米磷素吸收总量-不施磷区玉米吸磷总量)/施磷量]×100;
磷素农学利用率(kg/kg)=(施磷区玉米产量-不施磷区玉米产量)/施磷量;磷素偏生产力(kg/kg)=施磷区玉米产量/施磷量。

采用Excel进行数据处理,SAS 9.0软件进行单因素方差分析,LSD法比较处理间的差异显著性,SigmaPlot 14.0软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同施磷处理玉米产量与产量性状

由表1可知,与不施磷肥处理(P0)相比,各施磷处理玉米产量的增产幅度分别为5.4%~17.3%(2017年)和6.6%~20.8%(2018年),差异显著($P<0.05$)。在不同施磷处理中,玉米产量在施磷量30~90 kg/hm²范围内随施磷量的增加而增加,当施磷量增加至120 kg/hm²后,玉米产量呈下降趋势,但下降幅度未达显著水平($P>0.05$)。产量

表 1 不同施磷处理玉米产量与产量性状

年份	处理	产量 (kg/hm ²)	实收穗数 (个/13.3 m ²)	穗长 (cm)	穗粗 (cm)	秃尖长 (cm)	单穗粒数	千粒重 (g)
2017	P0	10 279d	86a	16.2b	5.07a	1.06a	455.8c	301.9b
	P30	10 837c	86a	17.9a	5.13a	0.52b	476.1b	319.8a
	P60	11 434b	85a	17.9a	5.16a	0.38c	493.5b	320.1a
	P90	12 057a	86a	18.6a	5.18a	0.21d	522.2a	324.3a
	P120	11 988a	87a	18.4a	5.17a	0.21d	520.5a	321.4a
	P150	11 705ab	85a	18.2a	5.16a	0.22d	516.4ab	320.5a
2018	P0	9 731c	85a	15.9b	5.01a	1.13a	448.3c	296.5b
	P30	10 374b	87a	17.3a	5.06a	0.62b	463.5b	317.5a
	P60	11 036b	86a	17.4a	5.13a	0.53c	475.5b	318.2a
	P90	11 755a	88a	17.9a	5.18a	0.39d	498.9a	324.3a
	P120	11 674a	88a	17.7a	5.17a	0.40d	495.3a	322.2a
	P150	11 340ab	86a	17.7a	5.15a	0.43d	488.6a	319.4a

注：同一列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著，下同

性状调查显示，与不施磷肥处理相比，施磷后玉米的产量性状普遍改善，而施磷处理间主要在秃尖长、单穗粒数间有所差异，其中以 P90 处理的单穗粒数和千粒重最高，秃尖最低。

线性加平台模型模拟了施磷量与产量之间的

关系 ($R^2=0.8767^{**}$, 2017; $R^2=0.8128^{**}$, 2018) (图 1)。依据该方程求得 2017 年和 2018 年最高玉米产量所需要的施磷量分别为 87 kg/hm²和 83 kg/hm², 玉米产量分别为 11 916 kg/hm²和 11 456 kg/hm²。

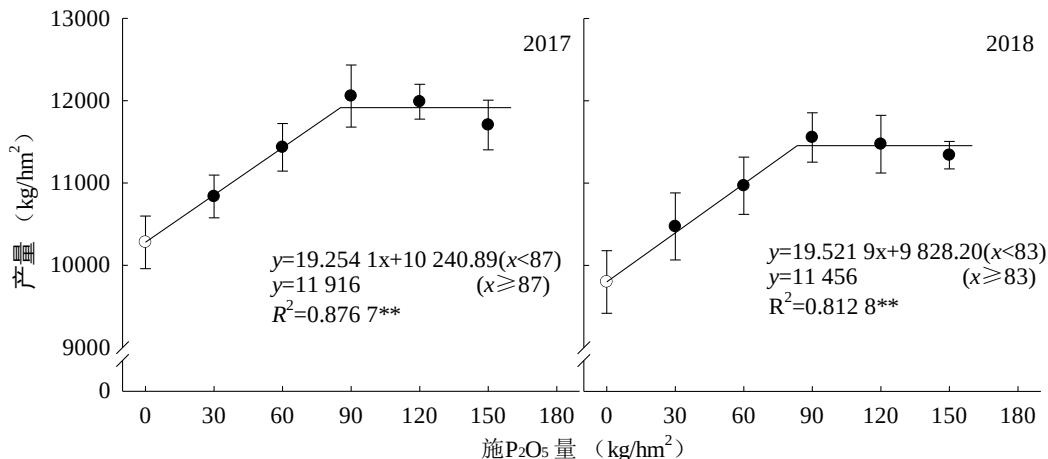


图 1 玉米产量对施磷量的反应

2.2 不同施磷处理玉米磷素积累特征

由图 2 可知，与不施磷肥相比，各施磷处理显著提高了玉米各生育期磷积累量 ($P < 0.05$)。不同施磷处理，苗期至开花期磷积累量随施磷量的增加而增加，以 P150 处理最高，灌浆期至成熟期随施磷的增加先增后降，以 P90 处理磷积累量最高。可见，适宜的磷肥用量可使玉米生育后期保持较高的磷素积累速率，在成熟期达到最高值。

2.3 不同施磷处理玉米磷素利用效率

由图 3 可知，磷素吸收利用率、磷素农学利用率在施磷量 30 ~ 90 kg/hm² 范围内随施磷量的增加而增加，当施磷量增加至 120 kg/hm² 后，磷素吸

收利用率和农学利用率呈下降趋势；而磷素偏生产力则表现为随施磷量的增加而下降。

2.4 不同施磷处理土壤有效磷含量变化

图 4 显示，在同一年份，0 ~ 20、20 ~ 40 cm 土壤有效磷含量均随施磷量的增加而增加；与试验起始时土壤有效磷含量相比 (0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土层有效磷分别为 23.74 mg/kg 和 18.53 mg/kg)，P0、P30 和 P60 处理土壤有效磷含量均有所下降，2018 年玉米收获后 P0、P30 和 P60 处理土壤有效磷含量较初始值下降幅度依次为 16.3%、10.3%、3.3% (0 ~ 20 cm) 和 8.0%、3.2%、2.6% (20 ~ 40 cm)，P90 处理土壤有效磷含量与初始值相近，当磷肥用量

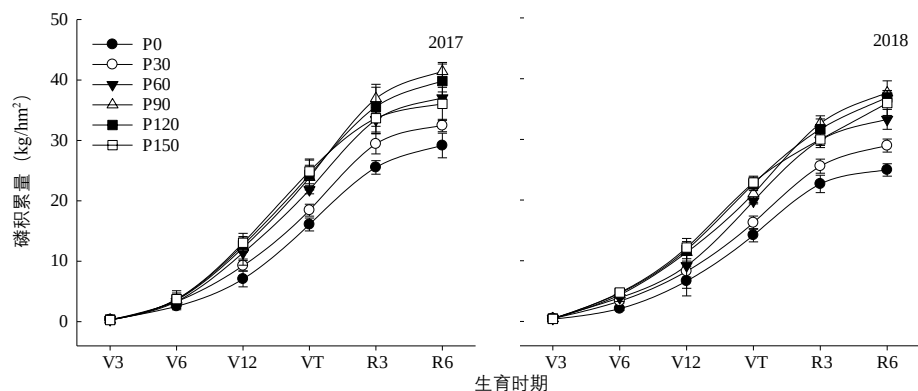


图2 不同施磷处理玉米地上部磷素积累动态

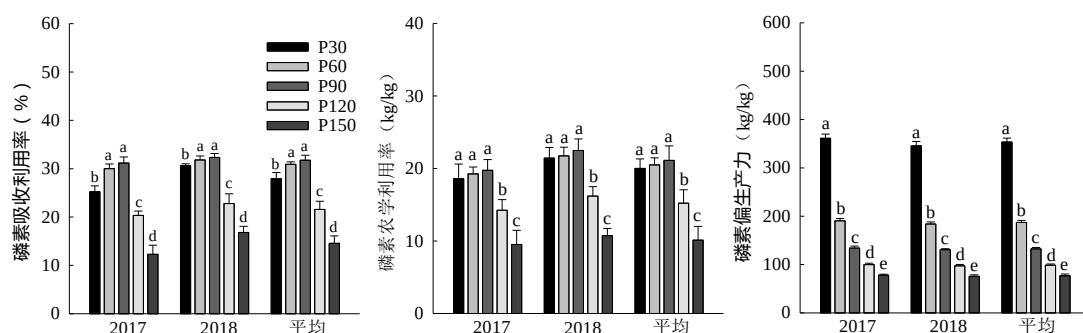


图3 不同施磷处理玉米磷素利用效率

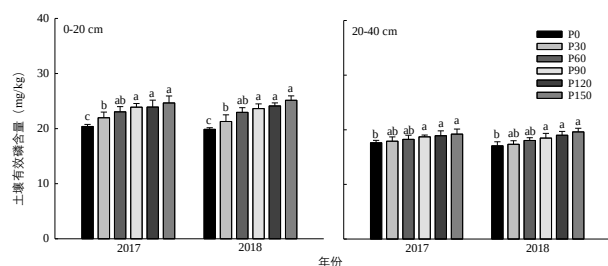


图4 不同施磷处理0~40 cm土壤有效磷含量

增加至 130 kg/hm^2 和 160 kg/hm^2 , 土壤有效磷含量较初始值有所提高, P130 和 P160 处理土壤有效磷含量提高幅度依次为 3.7%、5.9% (0~20 cm) 和 2.6%、7.0% (20~40 cm)。

2.5 不同施磷处理磷素表观平衡

图5可知, 在磷的输出项中, 随施磷量的增加, 施磷处理地上部磷吸收量先增后降, 两季吸磷总量为 $124.1 \sim 178.2 \text{ kg/hm}^2$ 。在不同施磷处理中, P0、P30和P60处理磷素表观收支平衡均表现为亏缺状态, 亏缺总量依次为 124.1 、 80.8 、 41.2 kg/hm^2 , P90处理磷素输入量与输出量基本保持平衡, 而P120和P150处理磷素表观收支平衡表现为盈余状态, 盈余总量分别为 64.2 kg/hm^2 和 132.2 kg/hm^2 。

3 讨论

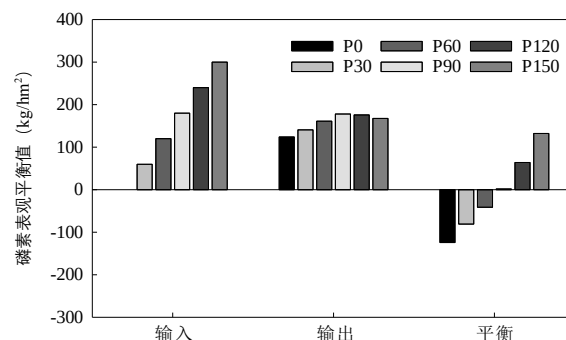


图5 不同施磷处理农田土壤磷素表观平衡 (2017~2018)

玉米是需磷较多的作物, 对磷较为敏感。施磷可提高光合产物积累, 增加玉米穗长、粒数和粒重, 但在过量施磷条件下, 产量不再增加, 甚至下降^[7-8]。本研究表明, 施磷降低果穗秃尖长度, 增加单穗粒数和粒重, 进而提高产量, 玉米产量随施磷量的增加呈先增后降趋势。其原因在于施磷可以降低叶片中MDA含量, 有效延缓植株花后衰老^[9-10], 进而提高籽粒灌浆强度, 增加穗粒数和粒重, 提高玉米产量, 当磷肥施用过量, 会使作物呼吸作用过于旺盛, 导致营养生长与生殖生长比例失调, 对产量形成产生不利影响。

作物生长发育和产量形成受养分吸收的影

响。施磷有利于养分的协调供应,提高植株的养分吸收量,但当磷肥过量供应时,磷积累量呈下降趋势^[11]。本研究中施磷显著提高了玉米磷积累量,在营养生长阶段(苗期-开花期)磷积累量随施磷量的增加而增加,当进入灌浆期后,磷积累量随施磷量的增加先增后降。以P90处理最高。这主要是由于养分供应过量会导致作物花前养分积累量过高,加重转运的负效应,导致作物生育后期养分积累量下降,最终影响产量^[12]。

肥料利用效率是衡量施肥技术是否合理的重要指标^[13],岳红丽等^[14]的研究表明,磷肥吸收利用率、农学利用率和偏生产力均随施磷量的增加显著下降。本试验中磷肥吸收利用率和农学利用率在施磷量90 kg/hm²时最高,而磷肥偏生产力在施磷量30 kg/hm²时最高。结合玉米高产高效的磷肥管理角度分析,在本试验条件下,施磷量90 kg/hm²时最佳。

土壤磷水平通常用全磷和有效磷来表征,前者是磷的容量指标,但不能反映当季利用潜力,后者是强度指标,可反映土壤中可被当季作物吸收的磷素水平及产量潜力^[15],投入磷肥低于作物吸收带走的土壤部分磷素会导致磷亏缺而引起土壤有效磷含量下降。对于农田磷素养分管理和合理施磷,在考虑产量、效益和肥料利用率等指标的同时,还应探究土壤有效磷含量和磷素盈亏的变化特征。本研究发现,由于P0、P30和P60处理玉米磷素携出量高于磷肥输入量,土壤磷素为亏缺状态,有效磷含量较试验起始时也有所下降;P90玉米磷素携出量与磷肥输入量相近,土壤有效磷含量可以维持与起试验起始时相近水平;而P120和P150处理由于玉米磷素携出量远高于磷肥输入量,土壤有效磷含量也较试验起始时大幅提高。可见,当施磷量不能满足作物所需时,会导致土壤中磷素逐渐耗竭,影响其生产力,而当施磷量超过作物高产时土壤磷素的农学阈值,势必会增加环境污染风险^[16]。

综合产量、磷素吸收利用、土壤有效磷含量变化及磷素表观平衡等因素,在本实验条件下,东北黑土区适宜施磷量应控制在83~90 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019:10.
- [2] 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.
- [3] 王秀娟,解占军,何志刚,等.秸秆还田条件下减量施磷对玉米产量、磷素利用率及土壤磷含量的影响[J].河南农业科学,2018,47(8):39-44.
- [4] 侯云鹏,王立春,李 前,等.覆膜滴灌条件下基于玉米产量和土壤磷素平衡的适用量研究[J].中国农业科学,2019,52(20):3573-3584.
- [5] 黄 岩,曹国军,耿玉辉,等.降水量与施磷量对黑土区玉米产量及磷素吸收利用的影响[J].玉米科学,2018,26(1):142-148.
- [6] 吴启华,刘晓斌,张淑香,等.施用常规磷水平的80%可实现玉米高产、磷素高效利用和土壤磷平衡[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1468-1476.
- [7] Masood T, Gul R, Munsif F, et al. Effect of different phosphorus levels on the yield and yield components of maize[J]. Sarhad J Agric, 2011, 27(2): 167-170.
- [8] 侯云鹏,杨 建,孔丽丽,等.不同施磷水平对春玉米产量、养分吸收及转运的影响[J].玉米科学,2017,25(3):123-130.
- [9] 蒋小忠.磷素对小麦生长发育特性、产量和品质的影响[D].扬州:扬州大学,2008.
- [10] 陈书强,许海涛,段翠平,等.施磷量对玉米生长发育、产量构成因子及品质的影响[J].河北农业科学,2011,15(2):62-64,95.
- [11] 赵 靓,侯振安,李水仙,等.磷肥用量对土壤速效磷及玉米产量和养分吸收的影响[J].玉米科学,2014,22(2):123-128.
- [12] 孙永健,孙园园,李旭毅,等.水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J].作物学报,2010,36(4):655-664.
- [13] 侯云鹏,孔丽丽,李 前,等.不同施肥模式对水稻养分吸收利用及土壤养分平衡的影响[J].东北农业科学,2018,43(1):1-8.
- [14] 岳红丽,张 胜,蒙美莲,等.施磷量对膜下滴灌马铃薯产质量及磷肥利用效率的影响[J].内蒙古农业大学学报,2013,34(3):40-45.
- [15] Poulton P R, Johnston A E, White R P. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam[J]. Soil Use & Management, 2013, 29(1): 4-11.
- [16] 侯云鹏,孔丽丽,李 前,等.不同施磷水平下水稻产量、养分吸收及土壤磷素平衡研究[J].东北农业科学,2016,41(6):61-66.

(责任编辑:王 昱)