

低磷红壤的玉米磷肥农学效应与农学阈值

苏丽珍, 张连娅, 王思睿, 曹卉敏, 肖靖秀, 郑毅, 汤利

引用本文:

苏丽珍, 张连娅, 王思睿, 曹卉敏, 肖靖秀, 郑毅, 汤利. 低磷红壤的玉米磷肥农学效应与农学阈值[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2004–2010.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0068>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型双季稻田施磷流失风险及阈值研究

朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 吴家梅, 刘昭兵, 彭华, 柳赛花, 官迪, 谢运河

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1425–1433 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0314>

柠檬酸对温室土壤磷有效性的影响

房福力, 姚志鹏, 林伟, 李玉中, 徐春英, 李巧珍

农业环境科学学报. 2015(6): 1166–1173 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.021>

太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究

朱文彬, 汪玉, 王慎强, 赵旭, 卢亚男, 程谊, 司友斌

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1129–1135 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.015>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

增施磷肥对重度盐碱地食葵生长及土壤微生物区系的影响

卢闯, 逢焕成, 张建丽, 燕守伟, 王婧, 李玉义

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 329–337 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1024>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

苏丽珍, 张连娅, 王思睿, 等. 低磷红壤的玉米磷肥农学效应与农学阈值[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2004–2010.

SU L Z, ZHANG L Y, WANG S R, et al. Agronomic effects and threshold of phosphorus fertilizer in low phosphorus red soil maize[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(9): 2004–2010.



开放科学 OSID

低磷红壤的玉米磷肥农学效应与农学阈值

苏丽珍¹, 张连娅¹, 王思睿¹, 曹卉敏¹, 肖靖秀¹, 郑毅^{1,2}, 汤利^{1*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南开放大学, 昆明 650599)

摘要:为促进红壤磷肥高效利用,实现磷肥减施增效,通过连续3 a田间定位试验,在低磷红壤和4个施磷(P_2O_5)水平(0、60、90、120 $kg \cdot hm^{-2}$,分别记为P0、P60、P90、P120)下,研究施磷量对玉米产量、磷肥利用效率的影响,以及磷肥农学阈值对不同施磷水平的响应。结果表明:在低磷红壤上,施用磷肥显著增加了玉米产量,提高了玉米产量可持续指数,且玉米产量随施磷量增加而增加,在P120处理下产量最高,平均比P0处理显著增加210.48%,但与P90处理差异不显著。玉米当季磷肥偏生产力、磷肥表观利用率均呈现随磷肥施用量增加而减少的趋势,其中以P60处理效果最佳。施磷显著增加土壤有效磷含量,其中以P120处理有效磷含量最高,平均比P0处理显著增加313.44%。土壤磷平衡时的磷肥施用量为19.89~23.00 $kg \cdot hm^{-2}$ 。低磷红壤玉米磷肥农学阈值为97.04 $kg \cdot hm^{-2}$ 。研究表明,在西南低磷酸性红壤中,合理施用磷肥可提高玉米产量和玉米当季磷肥农学利用率,在本试验磷的基础养分条件下,按P90处理施磷,可实现玉米减肥增效、促进农业绿色发展的目标。

关键词:低磷红壤;玉米施磷响应;磷肥利用效率;磷肥农学阈值

中图分类号:S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)09-2004-07 doi:10.11654/jaes.2022-0068

Agronomic effects and threshold of phosphorus fertilizer in low phosphorus red soil maize

SU Lizhen¹, ZHANG Lianya¹, WANG Sirui¹, CAO Huimin¹, XIAO Jingxiu¹, ZHENG Yi^{1,2}, TANG Li^{1*}

(1. College of Resources and Environment Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Open University, Kunming 650599, China)

Abstract: To promote the efficient use of phosphorus fertilizer in red soil, the application of phosphorus fertilizer must be reduced and efficiency increased, along with providing the theoretical basis for scientific application of phosphorus fertilizer in red soil. A 3-year field experiment was carried out under low phosphorus red soil and four phosphorus application (calculated by P_2O_5) levels (0, 60, 90 $kg \cdot hm^{-2}$ and 120 $kg \cdot hm^{-2}$, marked as P0, P60, P90, and P120, respectively). The effects of phosphorous (P) application rate on maize yield, its utilization efficiency and the response of agricultural threshold of P fertilizer to different application levels was studied. The results showed that application of P fertilizer significantly increased maize yield and sustainable index of maize yield in low P red soil. The maize yield increased with the increase of P application. The maize yield in P120 treatment was the highest, which was significantly increased by 210.48% compared with that in P0 treatment. However, there was no significant difference compared with that in P90 treatment. The partial productivity of P fertilizer and its apparent utilization decreased with the increase of P fertilizer application amount, where P60 was the best treatment. P application significantly increased soil available P content, and P120 treatment had the highest available P content, which was significantly increased by 313.44% compared with P0 treatment on average. The application amount of phosphorus fertilizer in soil phosphorus balance was 19.89~23.00 $kg \cdot hm^{-2}$. The agronomic threshold of P fertilizer was 97.04 $kg \cdot hm^{-2}$. In conclusion, rational

收稿日期:2022-01-18 录用日期:2022-03-25

作者简介:苏丽珍(1996—),女,广西北海人,硕士研究生,从事养分高效利用研究。E-mail:1035945993@qq.com

*通信作者:汤利 E-mail:ltang@ynau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31760615);国家重点研发专项课题(2017YFD0200207);云南省科技人才与平台计划项目(2019IC029)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31760615); The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0200207); Yunnan Science and Technology Talents and Platform Program (2019IC029)

application of phosphorus fertilizer in low phosphate red soil in southwest China can improve maize yield and agricultural utilization rate of phosphorus fertilizers in season. Under the condition of basic nutrient of phosphorus in this experiment, applying phosphorus according to P90 treatment can achieve the goal of reducing phosphorus and increasing efficiency of maize, while promoting the green development of agriculture.

Keywords: low-phosphorus red soil; response of maize to phosphorus application; utilization efficiency of phosphate fertilizer; agronomy threshold of phosphate fertilizer

磷是植物三大必需营养元素之一,是作物产量和农业生产力的保障^[1]。但磷肥在土壤中被固定,当季利用率只有5%~25%^[2]。红壤的低pH和高能量吸附表面如铝氧化物和氢氧化物,使其固磷能力远高于北方石灰性土壤^[3]。红壤磷肥利用率低,磷残留量高^[4-5],且磷肥施用量大,农户间差异大^[6],因而如何在保障作物产量的同时,减少红壤磷固定,实现磷肥减施增效,从而减少环境风险已成为旱地红壤的重要研究方向。

土壤磷肥农学阈值对合理施肥具有重要的指导意义。土壤表观预算是通过记录土壤中总的养分输入量和总的养分输出量来计算土壤养分的平衡量^[7]。农田土壤中磷的表观平衡,主要是由农田中施用磷肥与作物磷携出量的差别所导致的,通过有效的磷管理方式可减少土壤磷盈余量^[8]。利用磷肥农学阈值来控制田间磷肥投入量在平原地区的潮土水稻田、巢湖流域麦稻轮作系统中已有相关研究^[9-10],然而,有关南方旱地红壤上玉米的磷肥阈值研究还较鲜见。

玉米是世界上最主要的粮食、饲料和燃料作物之一,在粮食安全和国家社会经济发展中发挥着重要作用^[11]。西南地区玉米普遍存在磷肥施用量高、磷肥利用率低等问题^[12]。在旱地红壤上有关施磷对根际有效磷及磷吸收的影响^[13]、对玉米根系形态的影响^[14]已有研究报道,但是对低磷红壤农学效应的影响还缺少研究。因此,在土壤磷利用程度低和磷资源日趋减少的情况下,提高肥料磷和累积态磷的利用效率是实现作物增产、磷肥减施增效、环境友好的重要途径。本研究以玉米为研究对象,针对西南旱地红壤,研究不同磷肥施用量对玉米产量、生物量及磷肥农学效应的影响,并建立旱地红壤磷肥高效利用的农学阈值,为保护农田生态环境、促进磷肥减施增效提供理论依据和技术基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间定位试验分别于2017—2019年的5—10月

在云南省昆明市官渡区小哨村旱地红壤试验基地(102°41'~103°03'E、24°54'~25°13'N)进行。该地海拔2 098 m,年平均气温15℃,年均日照2 200 h左右,无霜期240 d以上,年降水量1 035 mm。试验地为典型山原红壤,2017年新垦为田间定位试验,供试土壤起始基本理化性状为pH 4.53、有机质含量4.49 g·kg⁻¹、碱解氮含量24.0 mg·kg⁻¹、速效磷含量4.02 mg·kg⁻¹、速效钾含量125.0 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试玉米为当地主栽品种“云瑞88”,试验用氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为普通过磷酸钙(含P₂O₅ 16%),钾肥为硫酸钾(含K₂O 52%)。

1.3 试验设计

小区试验采用随机区组设计,设置4个不同磷肥用量处理,分别施磷肥(以P₂O₅计)0、60、90 kg·hm⁻²和120 kg·hm⁻²(分别记作P0、P60、P90和P120),当地常规磷肥用量为P₂O₅ 120 kg·hm⁻²。每个处理3次重复,共12个小区。

小区面积为26 m²(6.5 m×4 m),行距均为50 cm,每小区12行,每行15株,玉米株距25 cm,距边25 cm。各处理氮、钾肥施用量均为当地常规施肥量,分别为氮肥(N)250 kg·hm⁻²、钾肥(K₂O)75 kg·hm⁻²。供试磷肥(普通过磷酸钙)、钾肥(硫酸钾)均作基肥一次施入,氮肥(尿素)分3次施用,即基肥40%、小喇叭口期25%、大喇叭口期35%。所有试验小区玉米生育期保持浇水、除草等措施一致。

1.4 样品采集与测定

样品采集:于玉米成熟期取样,每小区随机选取5株长势相同的植株,分别取植株茎、叶、籽粒3部分,采用抖土法收集玉米根际土。

生物量测定:植株于烘箱中105℃杀青30 min,80℃恒温烘干至质量恒定,分别测定干物质质量。

产量测定:在成熟期后,去除采样区,选取6行产区玉米对每个小区进行测产。

植株磷养分测定:将烘干后的植株粉碎,参照《土壤农化分析》^[15]采用钼黄比色法测定玉米茎、叶、籽粒

中的全磷含量。

土壤有效磷测定:参照《土壤农化分析》^[15],采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ -钼兰比色法测定。

1.5 参数计算

(1)产量可持续性指数^[16]

$$SYI = \frac{Y_{AVE} - SD}{Y_{max}}$$

式中: SYI 为产量可持续性指数; Y_{AVE} 为每个处理的平均产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; SD 表示每个处理产量的标准差, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; Y_{max} 表示所有处理中的最大产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(2)磷肥农学效率

$$AE = \frac{Y_f - Y_0}{F}$$

式中: AE 为磷肥农学效率, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Y_f 为施磷区作物经济产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; Y_0 为不施磷区作物经济产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; F 为磷肥投入量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(3)磷肥表观利用率

$$RE = \frac{U_1 - U_0}{F} \times 100\%$$

式中: RE 为磷肥表观利用率,%; U_1 、 U_0 分别为施磷区与不施磷区作物磷养分累积量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; F 为磷肥施用量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(4)磷肥偏生产力

$$PFP = \frac{Y}{F}$$

式中: PFP 为磷肥偏生产力, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Y 为施用磷肥作物的产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; F 为磷肥施用量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(5)土壤表观磷平衡

$$\Delta P = P_i - P_o$$

式中: ΔP 为土壤表观磷平衡量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; P_i 为施入土壤中的总磷量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; P_o 为被作物吸收携出的总磷量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(6)磷肥施用阈值

利用土壤磷肥施用量与作物产量,通过线性-平台模型模拟得出磷肥施用临界值:

$$Y = \begin{cases} a + bX & (X < C) \\ P & (X > C) \end{cases}$$

式中: Y 为平台预测产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; X 为土壤磷肥施用量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; C 为预测的磷肥施用临界值, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; P 为平台预测的相对最高产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.6 数据分析

采用Excel 2016软件对数据进行处理、绘图。采用Origin 2021绘图,SPSS 20.0软件对所得数据进行统计分析。

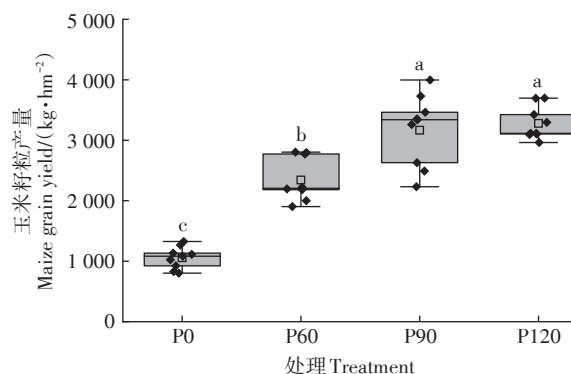
2 结果与分析

2.1 低磷红壤玉米产量效应

2.1.1 低磷红壤玉米经济产量效应

从连续3 a的玉米籽粒产量来看(图1),施磷使玉米显著增产,玉米籽粒产量随着施磷量的增加而显著增加。由图中箱型可知,3 a玉米籽粒产量在P0和P120处理下比较稳定,在P90处理下产量值差异较大。由均值可知,P120处理玉米籽粒产量最高,与P90差异不显著。对于不施磷的P0处理,P60、P90和P120处理分别显著增加玉米籽粒产量121.91%、199.91%和210.48%。

由表1可知,2017年红壤玉米产量可持续指数随着施磷量的增加呈上升趋势;2018、2019年产量可持续指数随着施磷量的增加先增加后下降,在P90处理下最高。3 a平均玉米产量可持续指数亦呈现随着施磷量增加而增加的趋势。相比于种植的第一年(2017年),种植3 a后(2019年)各施磷处理的玉米产量可持续指数均有所提高。



不同小写字母表示处理平均值间有显著差异($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences in the mean values of treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 不同施磷水平红壤玉米籽粒产量

Figure 1 Grain yield of maize in red soil with different P application levels

表1 不同施磷水平红壤玉米产量可持续指数

Table 1 Sustainable index of maize yield in red soil with different P application levels

处理 Treatment	2017 年	2018 年	2019 年	平均 Average
P0	0.22	0.26	0.32	0.27
P60	0.52	0.70	0.65	0.62
P90	0.62	0.88	0.98	0.82
P120	0.89	0.74	0.92	0.85

2.1.2 低磷红壤玉米生物量效应

由3 a的玉米秸秆生物量可以看出,施用磷肥显著增加了玉米秸秆生物量,且P60、P90和P120处理间玉米秸秆生物量无显著差异(图2)。相比于P0处理,P60、P90和P120处理玉米秸秆生物量分别显著增加145.77%、174.33%和139.03%。由图中均值点可以看出,在P90处理下玉米秸秆生物量最高。

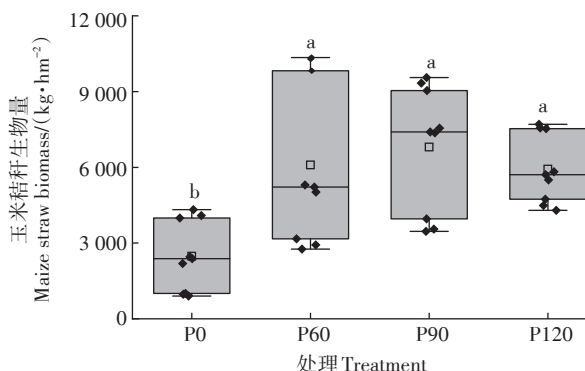


图2 不同施磷水平红壤玉米秸秆生物量

Figure 2 Biomass of maize straw in red soil with different P application levels

2.2 低磷红壤玉米磷肥利用效率

2.2.1 低磷红壤玉米磷肥农学效率

磷肥农学效率通常是指投入每千克 P_2O_5 所增加的经济产量,是施肥增产效应的综合体现。由表2可以看出,在P60、P90、P120处理下,玉米磷肥平均农学效率随着施磷量的增加呈现先增加后降低的趋势,且在3个施磷处理间无显著差异。2017年P120处理比P60、P90处理磷肥农学效率增加了10.87%和22.85%。2018年P90处理比P60、P1200处理磷肥农学效率增加了4.88%和63.21%。2019年P90处理比P60、P120处理磷肥农学效率增加了37.78%和47.99%。

2.2.2 低磷红壤玉米磷肥表观利用率

磷肥表观利用率表征施入土壤中的磷肥当季被作物吸收利用的程度。由表2可知,施磷量的增加降低了玉米磷肥表观利用率。2017、2018、2019年的数据均表明,在P60处理下,玉米磷肥表观利用率最高,磷肥的增加降低了玉米当季磷肥表观利用率。2018年玉米磷肥当季表观利用率在3个处理间无显著差异。

2.2.3 低磷红壤玉米磷肥偏生产力

磷肥偏生产力是反映当地土壤基础养分水平和磷肥施用量综合效益的重要指标。依表2可知,2017、2018年间,玉米磷肥偏生产力均在P60水平下

表2 不同施磷水平玉米磷肥利用效应

Table 2 Phosphorus utilization effect of maize with different phosphorus levels

年份 Year	处理 Treatment	农学效率 AE/(kg·kg ⁻¹)	表观利用率 RE/%	偏生产力 PFP/(kg·kg ⁻¹)
2017年	P60	19.69±1.19ab	19.71±1.12a	33.89±2.04a
	P90	17.77±1.36b	16.38±1.49b	27.24±1.83b
	P120	21.83±0.96a	11.55±0.50c	28.93±1.39b
2018年	P60	27.28±2.03a	19.6±0.90a	46.52±0.22a
	P90	28.61±1.10a	18.5±0.61a	41.44±2.42a
	P120	17.53±1.58b	15.51±2.26a	27.15±2.63b
2019年	P60	17.39±1.68b	26.22±0.96a	36.74±0.28a
	P90	23.96±1.14a	18.64±0.91b	36.87±0.45a
	P120	16.19±0.72b	3.93±1.28c	25.87±0.06b
平均 Average	P60	21.45±4.51a	21.84±3.25a	39.05±5.54a
	P90	23.45±4.58a	17.84±1.48a	35.18±6.18a
	P120	18.52±2.65a	10.33±5.04b	27.32±2.13b

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

最高。综合3 a结果来看,玉米磷肥偏生产力呈现随施磷量的增加而减少的趋势。

2.3 低磷红壤玉米有效磷含量

由图3可知,施磷量对低磷红壤玉米根际土壤有效磷含量影响显著,施用磷肥提高了玉米根际土壤有效磷含量,连续3 a施用磷肥的玉米,土壤有效磷平均值随着施磷水平的增加而显著增加。与P0处理相比,P60、P90和P120处理3 a平均分别显著提高玉米根际土壤有效磷含量163.00%、252.01%和313.44%。

2.4 低磷红壤玉米表观磷平衡

土壤表观磷平衡可衡量农田土壤磷素输入、输出状况,为合理施肥和农田土壤健康发展提供参考。随

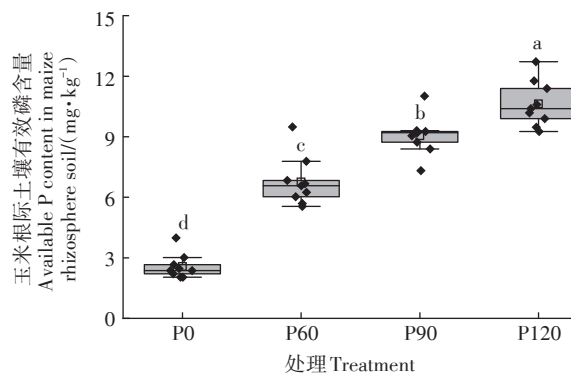


图3 不同施磷水平红壤玉米根际土壤有效磷含量

Figure 3 Available P content in maize rhizosphere soil of red soil with different P application levels

着施磷量的增加,土壤表观磷平衡量逐渐增加。利用土壤表观磷平衡量与土壤磷肥施用量建立一元一次方程,设施磷量为 x ,表观磷平衡量为 y ,得出的相关方程式见图4。

由线性方程得出,当土壤表观磷平衡量 $\Delta P=0$ 时,2017—2019年玉米磷肥施用量分别为23.00、19.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和20.58 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。故在土壤速效磷含量极低的旱地红壤上玉米磷素持平时的磷肥施用量为19.89~23.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.5 低磷红壤玉米磷肥农学阈值

利用土壤磷肥施用量与作物产量,通过线性-平台模型模拟得出非线性关系,拟合方程见图5。选择的数据为该试验地点2017、2018、2019年各处理的磷肥施用量与玉米籽粒产量。

通过拟合方程计算得出,该试验地点玉米磷肥施用量的临界值为97.04 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,此时能达到平台最大

产量3 278 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。当玉米磷肥施用量低于该阈值时,玉米籽粒产量随着施肥量的增加而显著增加,当磷肥施用量高于该磷肥阈值时,玉米增产效果不明显。

3 讨论

3 a定位试验结果显示,相较于不施磷处理,施磷60、90、120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 使玉米籽粒产量分别提高了121.91%、199.91%和210.48%(图1);使玉米秸秆生物量分别增加了145.77%、174.33%和139.03%(图2)。在土壤有效磷背景值极低的旱地酸性土壤上(速效磷含量4.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 4.53),长期不施磷肥处理的玉米籽粒产量及秸秆生物量均呈现下降趋势,而施用磷肥后玉米籽粒产量及玉米秸秆生物量逐年上升。吉庆凯等^[17]的研究表明,长期(7 a)定位施磷能显著提高作物产量。

施用磷肥可提高作物产量,但过量磷肥却不能被作物充分利用,从而造成磷素资源浪费及土壤磷素累积^[18]。本研究中,3 a定位试验下,低磷红壤玉米磷肥农学效率随着施磷量的增加先增加后下降,但3个处理的平均值间无显著差异;低磷红壤玉米磷肥表观利用率、磷肥偏生产力均随着施磷量的增加而降低,在P60处理下最高,P120处理显著低于P60和P90处理(表2)。一般情况下,磷肥当季利用率仅有10%~25%^[19]。颜晓军等^[20]的2 a玉米田间磷肥梯度定位试验结果表明,磷素生理效率、回收利用率、农学效率和偏生产力均随着磷肥施用量的增加而明显下降。张磊等^[21]通过2 a田间定位试验,研究不同磷肥用量对东北黑土区玉米籽粒产量、磷肥利用效率的影响,结果表明,施磷显著提高了东北黑土区玉米产量,玉米磷素吸收利用率和农学利用率随施磷量的增加先增加后降低,磷肥偏生产力随施磷量增加呈现降低的趋势。郝中明等^[22]的研究结果也表明春玉米磷肥利用率、磷肥偏生产力、磷肥农学效率、磷素吸收效率均随施磷量的增加而降低。

施入土壤中的磷肥可以增加土壤磷库,维持土壤磷素平衡及作物的营养需求^[23-24]。长期不施磷肥的土壤中磷素含量明显下降,施用磷肥或合理的耕作方式对土壤磷素含量下降有一定的延缓作用^[13]。研究表明,长期施用磷肥有利于土壤有效磷的累积^[6]。本研究结果表明,连续3 a不施磷肥,玉米土壤有效磷含量较种植前降低,施用磷肥显著增加玉米土壤有效磷含量。合理施用磷肥除了要考虑作物产出效应、经济效益和磷肥利用效应等指标之外,还应考虑环境效

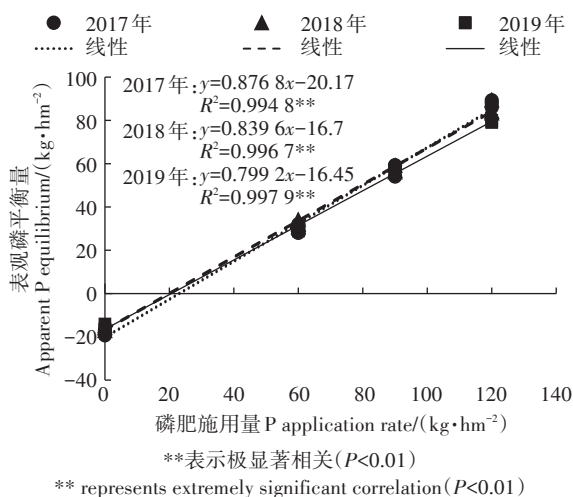


图4 红壤玉米表观磷平衡量与施磷量的关系

Figure 4 Relationship between apparent P equilibrium and P application rate of maize in red soil

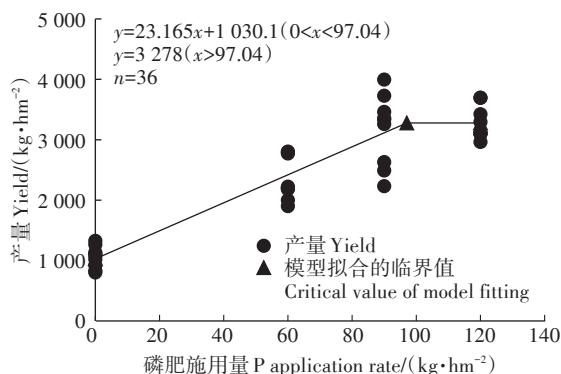


图5 玉米产量对磷肥施用量的响应

Figure 5 Response of maize yield to P fertilizer application rate

应,另外施肥后农田磷素平衡也应作为施肥量的参考指标。本研究结果显示,土壤处于磷素平衡状态时的施磷量为 $19.89\sim 23.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,当施磷量低于这个阈值时,土壤处于亏损状态,当施磷量超过这个阈值时,土壤处于盈余状态。在第一年种植中,土壤磷平衡的施磷量为 $23.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,经过3 a的定位施磷试验,土壤磷平衡的施磷量下降至 $20.58\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,这表明随着施磷年限的增加,磷素累积在土壤中的量逐渐增加,长期施磷将会对土壤造成负担,给环境带来影响。王淑英等^[25]的研究结果表明,黄土旱塬地区黑垆土磷肥年平均投入量达 $22.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤磷呈平衡状态。

玉米产量农学阈值研究结果显示,玉米施磷量临界值为 $97.04\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,此时能达到籽粒最大产量。当磷肥施用量增加到一定程度时,玉米增产效果不再明显。连彩云等^[26]的研究结果表明,干旱绿洲灌区大白菜在磷肥投入量为 $112.52\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达到最大产量。本研究中,相比于当地常规施磷量(P120),P90处理即能达到最优产量,此施磷量相比当地常规施磷量减少33.33%,但玉米生物量、产量与当地常规处理无显著差异。因此在南方低磷酸性旱地红壤上,在维持玉米产量情况下,研究磷肥农学效应及农学阈值,可以为优化西南酸性红壤区玉米磷肥管理措施,降低环境风险提供依据。

4 结论

(1)在西南酸性土壤地区,施磷可以满足作物生长需求,保证作物产量稳定,促进作物对磷肥的吸收利用,提高磷肥农学效应。长期过量的磷投入会降低土壤磷平衡阈值,造成环境危害。在原始磷含量极低的旱地红壤区,为满足作物产量,磷肥施用阈值为 $97.04\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(2)在本试验土壤背景下,施磷 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为减磷增效的绿色发展模式。但不同土壤类型、不同土壤磷素水平下磷素农学效应及农学阈值尚需进一步研究,以便更全面、更客观地研究红壤磷肥农学效应及农学阈值。

参考文献:

- [1] SHEN J B, YUAN L X, ZHANG J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156: 997-1005.
- [2] BALEMI T, NEGISHO K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: A review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12 (3): 547-562.
- [3] JIN Z W, CHEN C, CHEN X M, et al. Soil acidity, available phosphorus content, and optimal biochar and nitrogen fertilizer application rates: A five-year field trial in upland red soil, China[J]. *Field Crops Research*, 2019, 232: 77-87.
- [4] CHEN X H, YAN X J, WANG M K, et al. Long-term excessive phosphorus fertilization alters soil phosphorus fractions in the acidic soil of pomelo orchards[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 215: 105214.
- [5] MA J, MA Y L, WEI R F, et al. Phosphorus transport in different soil types and the contribution of control factors to phosphorus retardation [J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130012.
- [6] 颜晓军, 苏达, 郑朝元, 等. 长期施肥对酸性土壤磷形态及有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1139-1144. YAN X J, SU D, ZHENG Z Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus forms and availability in acid soils[J]. *Soil*, 2020, 52(6): 1139-1144.
- [7] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 1-8. JI H J, ZHANG H Z, ZHANG W L, et al. Research progress on cropland phosphorus balance in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1): 1-8.
- [8] 区惠平, 周柳强, 黄美福, 等. 不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 40-47. QU H P, ZHOU L Q, HUANG M F, et al. Phosphorus balance in paddy soils and its environmental effect under different phosphorus application rates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1): 40-47.
- [9] 周萍, 范先鹏, 何丙辉, 等. 江汉平原地区潮土水稻田面水磷素流失风险研究[J]. 水土保持学报, 2007(4): 47-50, 116. ZHOU P, FAN X P, HE B H, et al. Research on loss risk of phosphorus in surface water of paddy soil in Jiangnan Plain region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007(4): 47-50, 116.
- [10] 陈浩, 汪玉, 袁佳慧, 等. 太湖稻麦轮作区减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 741-746. CHEN H, WANG Y, YUAN J H, et al. The effect of phosphorus-reduction on soil phosphorus supply and wheat phosphorus uptake in a rice-wheat rotation system in the Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 741-746.
- [11] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959. LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [12] 张连娅, 王瑞雪, 郑毅, 等. 不同形态磷肥对红壤玉米磷素吸收利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 158-163. ZHANG L Y, WANG R X, ZHENG Y, et al. Effects of different forms of phosphate fertilizer on phosphorus uptake and utilization efficiency of maize in red soil[J]. *Journal of Maize Science*, 2019, 27(5): 158-163.
- [13] 张梦瑶, 肖靖秀, 汤利, 等. 不同磷水平下小麦蚕豆间作对根际有效磷及磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1157-1165. ZHANG M Y, XIAO J X, TANG L, et al. Effects of wheat and faba bean intercropping on the available phosphorus contents in rhizosphere soil and phosphorus uptake by crops under different phosphorus levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1157-1165.

- [14] 覃潇敏, 潘浩男, 肖靖秀, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作系统根系形态变化[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3223-3230. QIN X M, PAN H N, XIAO J X, et al. Root morphological changes in maize and soybean intercropping system under different phosphorus levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3223-3230.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] SINGHR P, DAS S K, RAO V, et al. Towards sustainable dryland agricultural practices[M]. Hyderabad, India: Central Research Institute for Dryland Agriculture, 1990: 106.
- [17] 吉庆凯, 王栋, 杨文宝, 等. 长期施磷对玉米-小麦轮作系统作物产量和磷素吸收及土壤磷积累的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2469-2476. JI Q K, WANG D, YANG W B, et al. Effects of long-term phosphorus application on crop yield, phosphorus absorption, and soil phosphorus accumulation in maize-wheat rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2469-2476.
- [18] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010(1): 12-14. CHENG M F, HE P, JIN J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. *Crops*, 2010(1): 12-14.
- [19] 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J]. 环境科学进展, 1999(2): 117-125. WANG Q R, LI J Y. Fertilizer proper use and sustainable development of soil environment in China[J]. *Progress in Environmental Science*, 1999(2): 117-125.
- [20] 颜晓军, 叶德练, 苏达, 等. 磷肥用量对甜玉米磷素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 169-176. YAN X J, YE D L, SU D, et al. Effects of phosphorus application on phosphorus uptake and utilization of sweet corn[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 169-176.
- [21] 张磊, 都钧, 孔丽丽, 等. 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[J]. 东北农业科学, 2020, 45(5): 38-42. ZHANG L, DU J, KONG L L, et al. Effects of phosphorus fertilizer application on yield, phosphorus absorption and utilization, soil phosphorus balance of spring maize in black soil region of northeast China[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(5): 38-42.
- [22] 郝中明, 李翠兰, 刘杭, 等. 施磷对春玉米磷肥利用及土壤磷素转化的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报: 1-9[2021-10-22]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.5761>. HAO Z M, LI C L, LIU H, et al. Effects of phosphorus application on phosphorus utilization of spring maize and soil phosphorus transformation[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*: 1-9[2021-10-22]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.5761>.
- [23] 袁芳, 马丹, 赵库, 等. 磷肥用量对新疆棉田磷素状况、籽棉产量和磷平衡的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(5): 1033-1041. YUAN F, MA D, ZHAO K, et al. Effects of phosphorus fertilization rate on cotton yield phosphorus condition, yield and phosphorus balance in Xinjiang[J]. *Southwest China Journal of Agriculture Sciences*, 2021, 34(5): 1033-1041.
- [24] 洪曦, 高菊生, 罗尊长, 等. 不同施肥措施对红壤稻田氮磷平衡及生态经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 158-166. HONG X, GAO J S, LUO Z Z, et al. Effects of different fertilization regimes on nitrogen and phosphorus balance and eco-economic benefits in red paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 158-166.
- [25] 王淑英, 樊廷录, 李利利, 等. 长期施肥下黄土旱塬黑垆土磷平衡及农学阈值[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 155-162. WANG S Y, FAN T L, LI L L, et al. Phosphorus balance and critical value in loessial soil of loess plateau under long-term fertilization[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(3): 155-162.
- [26] 连彩云, 马忠明. 干旱绿洲灌区大白菜施磷效应与磷肥投入阈值[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 592-598. LIAN C Y, MA Z M. Phosphorus application effects and input threshold of Chinese cabbage in the oasis irrigation region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2): 592-598.

(责任编辑: 李丹)