

玉米种植体系土壤磷素有效性对有机肥长期施用响应的Meta分析

吕春玲, 陈延华, 何文天, 张思宇, 姜娜, 樊代佳, 杨华薇, 杨殿林, 邹国元

引用本文:

吕春玲, 陈延华, 何文天, 张思宇, 姜娜, 樊代佳, 杨华薇, 杨殿林, 邹国元. 玉米种植体系土壤磷素有效性对有机肥长期施用响应的Meta分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2011–2022.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响

刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1494–1502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0012>

洱海流域不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响

万辰, 马瑛骏, 张克强, 王风, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2494–2502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1026>

应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响

肖豪, 黄柏豪, 孙凯, 徐敏, 伍钧

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1966–1974 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1501>

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响

李可, 孙彤, 孙涛, 徐应明, 孙约兵

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2316–2324 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0036>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吕春玲, 陈延华, 何文天, 等. 玉米种植体系土壤磷素有效性对有机肥长期施用响应的 Meta 分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2011–2022.

LÜ C L, CHEN Y H, HE W T, et al. Response of soil phosphorus availability to long-term application of organic fertilizer under maize cropping system: A meta-analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 2011–2022.



开放科学 OSID

玉米种植体系土壤磷素有效性对 有机肥长期施用响应的 Meta 分析

吕春玲^{1,2}, 陈延华², 何文天², 张思宇¹, 姜娜¹, 樊代佳², 杨华薇³, 杨殿林^{1*}, 邹国元^{2*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所, 北京 100097; 3. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要:长期施用有机肥能够提高土壤有效磷含量,但不同的研究间差异较大,通过基于有机肥种类、施用量、有机肥替代化肥比例和土壤因素等大量试验数据的整合分析,研究不同因素下土壤磷素有效性对有机肥长期施用的响应,对指导有机肥的科学施用具有重要意义。本研究收集了公开发表的文献 147 篇,建立了 305 组包含单施化肥(CF)和化肥配施有机肥(CFM)处理的土壤有效磷含量数据库。采用 Meta 分析研究全国多个长期定位试验点的 CF 和 CFM 处理下土壤有效磷含量差异及其影响因素。结果表明,CFM 处理能显著提高土壤有效磷含量,每投入 100 kg·hm⁻² 的磷,土壤有效磷增加量约为 CF 处理的 2.6 倍。高施磷量(>300 kg·hm⁻²)对土壤有效磷含量的提升幅度,约是低施磷量(<75 kg·hm⁻²)和中等施磷量(75~150 kg·hm⁻² 和 150~300 kg·hm⁻²)的 3.5 倍和 2.3~2.6 倍。不同有机肥对土壤有效磷含量的影响表现为畜禽粪便类>商品有机肥类>秸秆类>城市垃圾类有机肥。其中,畜禽粪便类中,猪粪、鸡粪和牛粪对土壤有效磷含量的影响较为显著,增幅分别为 210.4%、209.3% 和 156.7%。在不同有机肥替代化肥比例下,施用有机肥对土壤有效磷含量的提升效果,随有机肥替代化肥比例的增加而升高,且差异显著,有机肥替代化肥比例为 75% 和 100% 时,增幅可达 211.7% 和 239.7%。土壤类型、有机质含量、pH 等土壤因素是影响施用有机肥对土壤有效磷含量提升效果的重要因素。其中,不同土壤类型下土壤有效磷增幅在 12.7%~212.1% 之间,表现为红壤>潮土>褐土>黑土>棕壤;在土壤有机质含量为 0.6%~1% 时,土壤有效磷增幅可达 248.5%,分别是土壤有机质含量<0.6%、1%~2% 和 2%~3% 时的 2.1、2.0 倍和 10.9 倍;当 pH 为酸性(5~6.5)或者 pH 为中性(6.5~7.5)时,施用有机肥对土壤有效磷的提升效果显著高于 pH 为碱性(7.5~9)时。此外,土壤有效磷增幅随年均降雨量和年均温度的升高而增加,其中年均降雨量>800 mm 或年均温度>16 °C 时增幅最大。长期施用不同种类有机肥、施用量、有机肥替代化肥比例均显著影响土壤有效磷含量,并且在不同的土壤环境、轮作方式和气候因子条件下,施用有机肥对土壤有效磷的效应存在显著差异。因此,在农业生产过程中,科学施用有机肥不仅要充分考虑有机肥种类、施用量、有机肥替代化肥比例,而且要综合考虑不同环境因素的影响,从而保障有机废弃物资源的科学利用,避免资源浪费和环境污染,推动农业绿色高质量和可持续发展。

关键词:土壤有效磷;磷投入量;有机肥;土壤因素;Meta 分析

中图分类号:S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)09-2011-12 doi:10.11654/jaes.2022-0015

收稿日期:2022-01-06 录用日期:2022-03-29

作者简介:吕春玲(1988—),女,河北张家口人,硕士研究生,从事生物多样性与生态农业研究。E-mail:lvlvchunling@163.com

*通信作者:杨殿林 E-mail:yangdianlin@caas.cn; 邹国元 E-mail:gyzou@163.com

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务项目(CAAS-XTCX2016015);财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目;北京市农林科学院改革与发展计划项目(YZS201905, YZS202103)

Project supported: The Funds for Science and Technology Innovation Project from the Chinese Academy of Agricultural Sciences(CAAS-XTCX2016015); The China Agriculture Research System of the Ministry of Finance and the Ministry of Agriculture and Rural Affairs; The Reform and Development Plan of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences(YZS201905, YZS202103)

Response of soil phosphorus availability to long-term application of organic fertilizer under maize cropping system: A meta-analysis

LÜ Chunling^{1,2}, CHEN Yanhua², HE Wentian², ZHANG Siyu¹, JIANG Na¹, FAN Daijia², YANG Huawei³, YANG Dianlin^{1*}, ZOU Guoyuan^{2*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The long-term application of organic fertilizers can improve soil available phosphorus (P) content, but there exist large differences between studies. Through the integration analysis of a large amount of experimental data based on the types of organic fertilizer, application amount, organic fertilizer replacement ratio, and soil factors, the response of soil P availability under different factors to the long-term application of organic fertilizer has important significance for guiding the scientific fertilization of organic fertilizer. In this study, 147 published papers, which contained 305 datasets of soil available P content, were used to establish a database for the application of chemical fertilizer (CF) and the combined application of chemical and organic fertilizers (CFM). The differences in soil available P content under CF and CFM treatments from numerous long-term field experimental sites around China and the driving factors were analyzed based on a meta-analysis. The results showed that the CFM treatment significantly increased the content of soil available P and the increased soil available P content per 100 kg·hm⁻². P input was approximately 2.6 times that of the CF treatment. The increased rate of soil available P at high P application rate (> 300 kg·hm⁻²) was approximately 3.5 times and 2.3~2.6 times higher than that at low P application rate (< 75 kg·hm⁻²) and medium P application rate (75~150 kg·hm⁻² and 150~300 kg·hm⁻²). The order of the impact of different organic fertilizers on soil available P content was animal manure > commercial organic fertilizer > straw > municipal waste. Among animal manure, pig, cow, and chicken manure exerted a significant effect on the soil available P content, increasing by 210.4%, 209.3%, and 156.7%, respectively. The elevation in the available soil P increased with increasing organic fertilizer, peaking at 239.7% and 211.7% when the proportion of organic fertilizer reached 100% and 75%, respectively. Soil properties (soil type, organic matter content, and pH) were the main factors affecting the soil available P content when applying organic fertilizer. Under different soil types, the increase in available P ranged from 12.7% to 212.1%, displaying the following pattern: red soil > fluvo-aquic soil > cinnamon soil > black soil > brown soil. When soil organic matter content ranged from 0.6% to 1%, the increase in soil available P content increased and peaked at 248.5%, which was 2.1, 2.0, and 10.9 times of that when the soil organic matter content was less than 0.6%, 1%~2%, and 2%~3%, respectively. When the pH was acidic (5~6.5) or neutral (6.5~7.5), the effect of organic fertilizer on soil available P was significantly higher than that pH was alkaline (7.5~9.0). In addition, the increase in soil available P content increased with high annual mean precipitation and temperature and reached the highest level when either the annual mean precipitation was >800 mm or the annual mean temperature >16 °C. Under long-term fertilization conditions, factors such as types of organic fertilizer, application amount, and organic fertilizer replacement ratio exerted significant effects on soil available P content. In addition, the effect of organic fertilizer application on soil available P was significantly different under different soil environments, rotation systems, and climatic factors. Therefore, in the process of agricultural production, the scientific application of organic fertilizer should not only fully consider the types of organic fertilizer, application amount, and organic fertilizer replacement ratio, but also comprehensively consider the impact of environmental factors. This study has great significance for the scientific use of organic waste resources to avoid resource waste and environmental pollution and to promote the green, high-quality, and sustainable development of agriculture.

Keywords: soil available phosphorus; phosphorus application rate; organic fertilizer; soil factor; meta-analysis

玉米是我国三大粮食作物之一,玉米轮作体系也是我国重要的农作物种植体系之一,对我国粮食安全起着至关重要的作用^[1]。但在该种植体系下,为了提高作物产量,过量施磷现象非常普遍^[2]。由于在玉米种植体系中作物对磷肥的当季利用率较低,约有75%以上的磷素以难利用态累积在土壤中^[3]。有效磷作为土壤磷库中对作物最为有效的部分,可直接被作物吸收利用,是表征土壤供磷能力的重要指标^[4]。长期

施肥的农田中虽然土壤磷素盈余,但是可被作物利用的有效磷亏缺,已成为作物生长的一个重要限制因子^[5]。大量研究表明,长期施用有机肥能提高土壤磷素有效性,其提升效果受有机肥投入、土壤性质和气候条件的综合影响^[6-9]。因此,明确不同影响因素下施用有机肥对土壤有效磷含量的差异变化,对于合理施用有机肥、保障粮食安全和实现废弃物资源化利用具有重要意义。

有机肥的施用是影响土壤有效磷含量的重要因素之一^[10-11]。大量长期试验表明,单施有机肥或化肥配施有机肥处理的土壤有效磷增加量显著高于单施化学磷肥^[12-14]。同时,肥料投入,如投入量、有机肥种类、有机肥配施比例以及施用年限,均对土壤有效磷具有不同程度的影响。如张田等^[15]在河北潮土上连续7 a的试验表明,不同种类有机肥对土壤有效磷的贡献,表现为猪粪>鸡粪>污泥。此外,如英国洛桑试验站170多年的长期定位试验研究表明化肥和有机肥的合理配施可以显著提高土壤有效磷含量^[16-17],不同有机肥替代比例对土壤有效磷含量影响显著,随有机肥替代比例的增加,有效磷含量增加。杨振兴等^[18]对褐土进行21 a定位施肥试验后发现,有机肥替代比例为40%时,土壤有效磷变化量为 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;替代比例为50%时,变化量为 $3.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;替代比例为100%时,变化量为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,有效磷含量年上升率是单施化学磷肥的1.6~5.4倍。NOBILÉ等^[19]发现连续施用有机肥,随着施肥时间的延长,土壤有效磷的含量增加。另外,不同轮作方式对土壤磷素状况影响差异较大^[20-21]。

土壤因素(如土壤类型、有机质和pH)对土壤有效磷含量有显著影响。对于褐土而言^[22],长期化肥配施有机肥处理20 a后,土壤有效磷含量由 $4.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提升至 $79.57 \sim 117.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,年增加量为 $3.73 \sim 5.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是单施化肥处理的3~5倍;而红壤上长期化肥配施有机肥16 a后^[23],有效磷年增加量约 $9.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (由 $12.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $169.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);长期施肥16 a的黑土^[24],在单施化肥处理下土壤有效磷含量低于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而化肥配施有机肥处理土壤有效磷含量能达到 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷的年增加量约 $3.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外,研究表明,土壤有效磷状况与土壤有机质含量密切相关^[25];在农业实践中土壤有机质含量的提高可以增加固相磷的解吸量,提高磷活性,增加有效磷含量^[26-27]。SEILSEPOUR等^[28]研究发现,土壤有机质含量与有效磷含量显著相关。另外,pH值是影响土壤中磷酸盐形态和转化的重要因素。研究表明,pH在3~7时, H_2PO_4^- 是土壤中活性最高的磷酸根离子,易被作物吸收^[29-30];pH从9降至3时,土壤磷的解吸量增加^[31-32]。除了受到施肥和土壤性质的影响,土壤有效磷含量还受到气候因素的影响^[33],如年均温度和年均降雨量,其直接影响土壤的温度和水分状况,进而影响土壤有效磷含量。

目前,我国关于施用有机肥对土壤有效磷影响的

研究,主要围绕单一或少数特定试验点展开,且由于受不同有机肥投入、土壤因素和气候条件的影响,其研究结果并不一致^[34-42]。本研究通过对已发表的有关有机肥对土壤有效磷含量影响的相关文献进行试验数据搜集,采用整合分析(Meta-analysis)的方法,评价施用有机肥对土壤有效磷含量的影响及其驱动因子,以期合理施用有机肥、提高土壤有效磷含量和建立合理的磷肥管理策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究通过检索中国知网、“读秀”学术、万方数据库、Springer link 和 Web of Science 数据库,英文文献检索以 TS=“organic fertilizer” AND TS=“available phosphorus”为检索式,中文文献以主题=“有机肥” AND 主题=“长期定位” AND 关键词=“有效磷” OR 关键词=“玉米”为检索式,检索时间范围为1990—2020年。整理建立包括试验点经纬度、有机肥类型、施用年限、有机肥替代化肥比例、土壤类型、磷投入量、有效磷含量、有机质含量、pH等参数的数据库。文献筛选标准如下:(1)种植方式为玉米种植体系(小麦-玉米轮作、小麦-大豆-玉米轮作、大豆-玉米轮作、玉米连作)的我国境内大田试验;(2)试验处理包含单施化肥(CF)和化肥配施有机肥(CFM)处理,每个处理的重复数不少于3次,CF和CFM处理磷投入量相等,且研究结果有土壤有效磷(Olsen-P)含量的数据;(3)0~20 cm 土层试验前的基本理化指标;(4)包含≥5 a的长期定位试验的土壤类型和有机肥类型。此外,还包括每个试验不同的有机肥替代化肥比例(有机肥磷投入量占总磷投入量的比例),以及经过CF和CFM处理后有效磷的数据。经筛选后,符合条件的文献共147篇,包含305组试验数据。具体的试验点位分布情况及文献数量为东北地区(29篇)、华北地区(41篇)、华东地区(26篇)、西北地区(26篇)和南方地区(25篇)。

基于整理建立的数据库与本研究内容,查阅文献并对数据进行分组:(1)有机肥投入,如有机肥种类、磷投入量、有机肥替代化肥比例和施用年限,其中关于有机肥种类的划分主要参考张艳洁等^[43]的研究进行分类;(2)土壤因素,包括土壤类型、有机质含量和pH值,主要是依据我国第二次土壤普查的分级标准^[44]进行划分,如有机质含量分为<0.6%、0.6%~1%、1%~2%和2%~3%;(3)气候因素,包括年均降雨量与

年均温度^[45]。

1.2 数据分析方法

本研究对文献数据的获取,主要采用的是 Getdata Graph Digitizer 软件,对于文献中已给出的数据标准误(SE),通过公式(1)进行转换。

$$SD = SE \sqrt{n} \quad (1)$$

式中:SD为标准差;n为重复数。

采用 Meta Win 2.1 软件进行 Meta 分析,利用统计学对数据进行处理,以响应比(response ratio,RR)为评价指标,并通过处理分析得到其相应的95%的置信区间(95% CI),在分析过程中,施用有机肥对土壤有效磷的影响程度采用自然对数响应比(lnRR)来反映,计算公式为:

$$RR = X_{CFM}/X_{CF} \quad (2)$$

$$\ln RR = \ln X_{CFM} - \ln X_{CF} \quad (3)$$

式中: X_{CFM} 和 X_{CF} 分别表示CFM处理和CF处理有效磷含量的平均值。对每个独立研究的响应比进行加权得到加权平均响应比(RR_{++})^[46]。

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \quad (4)$$

$$S(RR_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}}} \quad (5)$$

$$95\% \text{ CI} = RR_{++} \pm 1.96S(RR_{++}) \quad (6)$$

$$V = \frac{SD_{CFM}^2}{n_{CFM} X_{CFM}^2} + \frac{SD_{CF}^2}{n_{CF} X_{CF}^2} \quad (7)$$

$$W = \frac{1}{V} \quad (8)$$

式中: $S(RR_{++})$ 为 RR_{++} 的标准差; W 为权重系数; V 为平均值变异系数;95% CI是95%的置信区间; n_{CFM} 和 n_{CF} 分别是CFM处理和CF处理重复数。

Meta分析前需要对各试验结果及处理间进行异质性检验,确定分析所采用的模型(固定效应模型, $P>0.1$;反之随机效应模型),然后对所有数据资料的响应比进行合并,得到加权平均响应^[47]。最后,运用 GraphPad Prism 8 软件绘制各因素对土壤有效磷增幅的森林图,本研究中土壤有效磷增幅是指CFM相比CF处理土壤有效磷含量增加的百分比,通过 $(RR_{++}-1) \times 100\%$ 计算得到。在森林图中,若土壤有效磷增幅的95%的置信区间横跨坐标零点,则可以判断施用有机肥对土壤有效磷的影响与单施化肥相比不显著,反之则显著^[48-49]。

2 结果与分析

2.1 农田土壤磷素有效性随施磷量的变化差异

对不同的磷源分析发现(图1a),每投入100 kg·hm⁻²的磷,土壤有效磷的增加量为CFM>CF,CFM处理土壤有效磷含量提高约2.88 mg·kg⁻¹,约是CF处理的2.6倍,即有机肥对提高土壤有效磷含量的影响显著。整合分析表明(图1b),与CF处理相比,在不同磷投入量条件下CFM处理均能显著提高土壤有效磷含量,提高幅度存在较大差异。低施磷量(<75 kg·hm⁻²)时,CFM处理下有效磷提升幅度为87.4%;中等施磷量(75~150 kg·hm⁻²和150~300 kg·hm⁻²)时,提升幅度为115.9%和129.6%;高施磷量(>300 kg·hm⁻²)

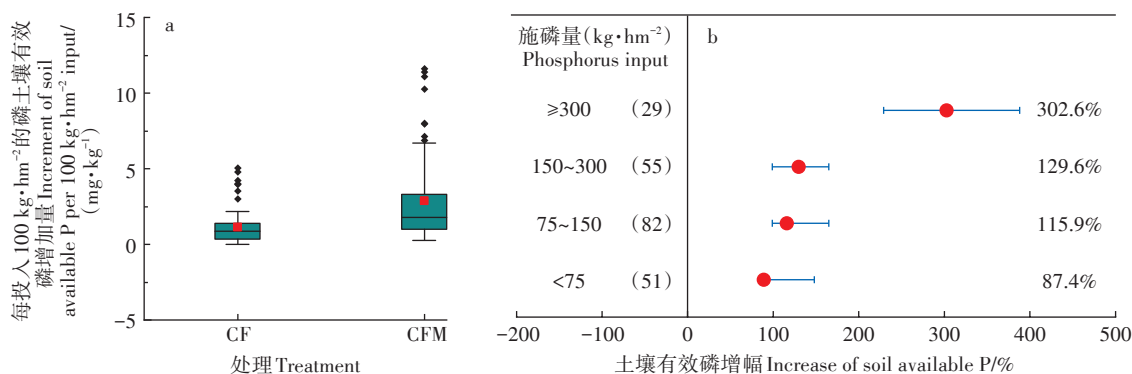


图1a,箱体上的实心点代表平均数,上下边分别为75%和25%的百分位数,中间实线为中位数,箱体外上下误差线分别为样本的最大值和最小值,超出上下限的值为异常值。图1b,括号里的数字代表样本数量,点代表CFM比CF土壤有效磷含量增加的百分数,误差线为95%置信区间。下同
In fig. 1a, the square points on the box represent the average, and the top and bottom are the percentiles of 75% and 25%, respectively. The solid line in the middle indicates the median value. The upper and lower error lines outside the box represent the maximum and minimum values of the sample, respectively. A value that exceeds the upper and lower limits is considered an outlier. In fig. 1b, the numbers in parentheses represent the sample size, points represent the percentage increase in soil available P content of CFM over CF, and the error line represents the confidence interval of 95%. The same below

图1 磷投入量对土壤有效磷的影响

Figure 1 Effects of phosphorus inputs on soil available phosphorus

时,提升幅度为302.6%。其中,高施磷量对土壤有效磷的提升效果显著优于低施磷量和中等施磷量。

2.2 有机肥种类对土壤磷素有效性的影响

如图2a所示,施用有机肥,每投入100 kg·hm⁻²的磷土壤有效磷的增加量,表现为畜禽粪便类>商品有机肥类>秸秆类>城市垃圾类有机肥。整合分析后发现,城市垃圾类有机肥对土壤有效磷增幅的影响不显著;畜禽粪便类、商品有机肥类和秸秆类有机肥均显著提高土壤有效磷含量,且提高幅度差异较大;畜禽粪便类和商品有机肥类对土壤有效磷含量的提升效果强于秸秆类有机肥,且差异显著(图2b)。对畜禽粪便类有机肥进一步分析表明,猪粪、鸡粪和牛粪最容易引起有效磷含量的增加,增幅分别为210.4%、209.3%和156.7%(图2c)。每投入100 kg·hm⁻²的磷,土壤有效磷的变化量也是猪粪、鸡粪和牛粪最高(图2d)。

2.3 不同比例有机肥替代化肥对土壤磷素有效性的影响

如图3a所示,每投入100 kg·hm⁻²的磷,土壤有效磷的变化量为0.5~7.4 mg·kg⁻¹,随有机肥替代化肥比例的增加呈增加趋势。进一步整合分析结果表明(图3b),在不同的有机肥替代化肥比例下,除替代比例为

40%外,施用有机肥对土壤有效磷含量的提升效果随有机肥替代化肥比例的增加而升高,且差异显著。当有机肥替代化肥比例为30%时,土壤有效磷增幅仅为5.8%;当有机肥替代化肥比例为50%时,土壤有效磷增幅为54.6%;当有机肥替代化肥比例为70%、75%和100%时,土壤有效磷增幅可达155.3%、211.7%和239.7%。

2.4 有机肥施用年限对土壤磷素有效性的影响

通过整合分析(图4)发现,与CF处理相比,CFM处理在不同的施用年限均显著提高了土壤有效磷含量,随着施肥年限的增加,土壤有效磷提升幅度呈增加趋势,其范围为118.3%~217.2%,但有机肥对土壤有效磷含量的提升效果在不同施用年限未达到显著差异。

2.5 轮作方式对施用有机肥提升土壤有效磷含量的影响

不同轮作方式也影响土壤有效磷含量,整合分析表明(图5),与CF处理相比,在不同轮作方式下CFM处理均能显著提高土壤有效磷含量,提高幅度存在较大差异。具体表现:玉米连作>小麦-玉米轮作>大豆-玉米轮作>小麦-大豆-玉米轮作。其中,小麦-大豆-玉米轮作方式下土壤有效磷的提升幅度为81.0%,显著低于玉米连作的159.6%、小麦-玉米轮作

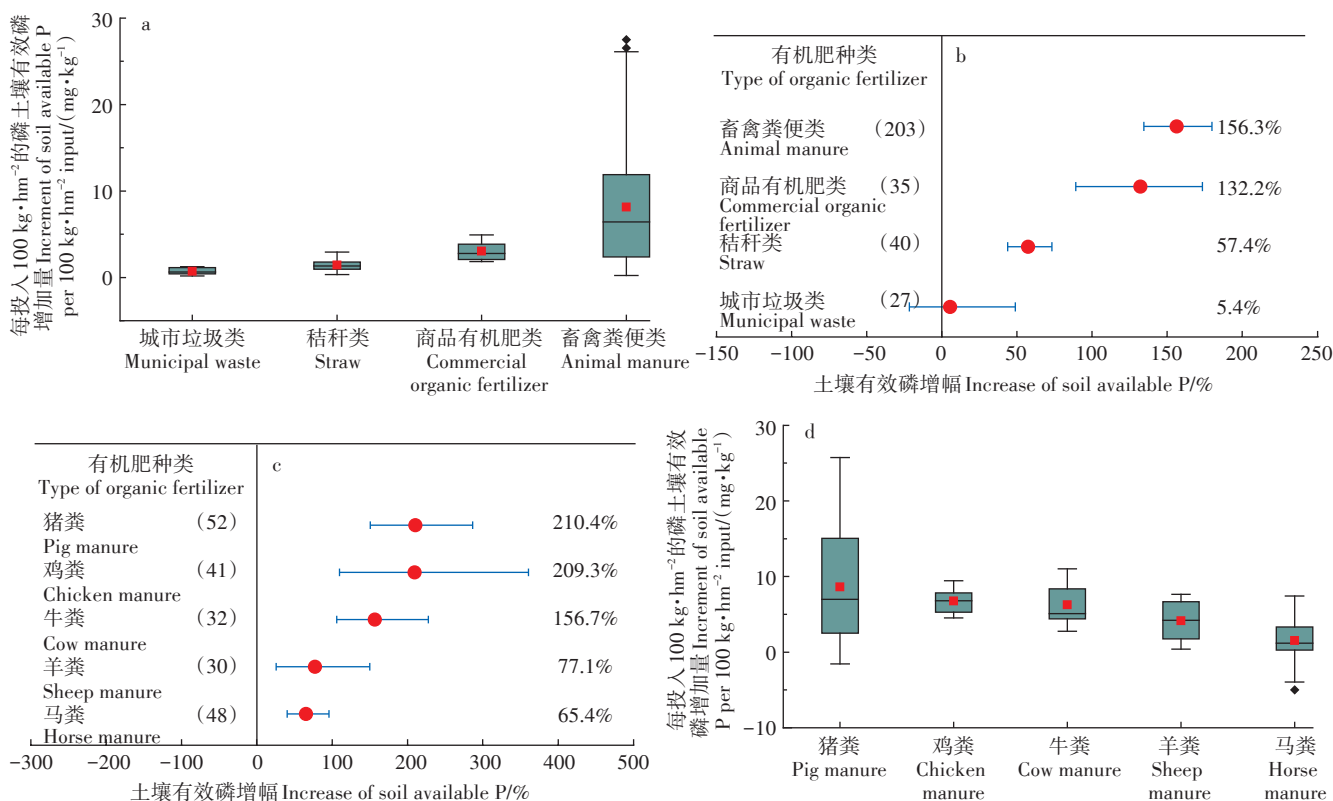


图2 有机肥种类对土壤有效磷的影响

Figure 2 Effects of different types of organic fertilizers on soil available phosphorus

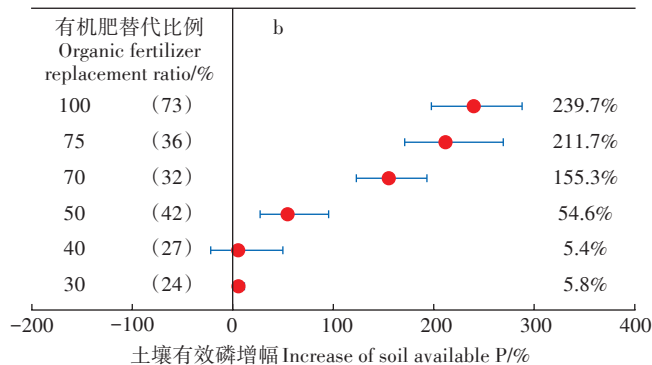
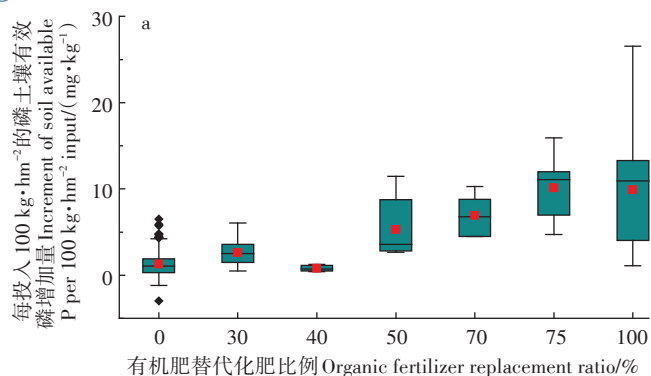


图3 有机肥替代化肥比例对土壤有效磷的影响

Figure 3 Effects of organic fertilizer replacement ratio on soil available phosphorus

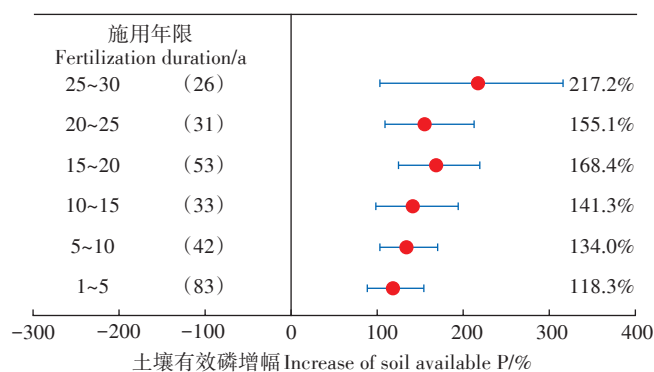


图4 有机肥施用年限对土壤有效磷的影响

Figure 4 Effects of organic fertilizer application duration on the increase of soil available phosphorus

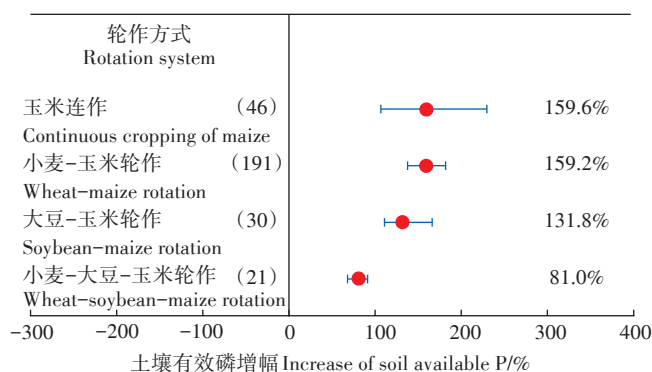


图5 轮作方式对土壤有效磷的影响

Figure 5 Effects of rotation system on the increase of soil available phosphorus

的159.2%和大豆-玉米轮作的131.8%,但玉米连作、小麦-玉米轮作和大豆-玉米轮作对土壤有效磷含量的提升效果无显著差异。

2.6 土壤类型对施用有机肥提升土壤有效磷含量的影响

土壤类型是限制有机肥施用对土壤有效磷含量提升效果的重要因素,CFM处理与CF处理均显著提高土壤有效磷含量(图6),但增幅因土壤类型而异,具体表现:红壤>潮土>褐土>黑土>棕壤,在红壤上土壤有效磷增幅达212.1%,显著高于在黑土(77.2%)和棕壤(12.7%)上的增幅。有效磷增幅在红壤、潮土和褐土间无显著差异。

2.7 土壤pH和有机质对施用有机肥提升土壤有效磷含量的影响

与CF处理相比,在不同土壤pH和有机质含量下,CFM处理均能显著提高土壤有效磷含量,但其提高幅度存在差异(图7)。土壤有机质含量是影响有机肥对土壤有效磷含量提升效果的关键因素,在土壤有机质含量为0.6%~1%时,土壤有效磷增幅可达

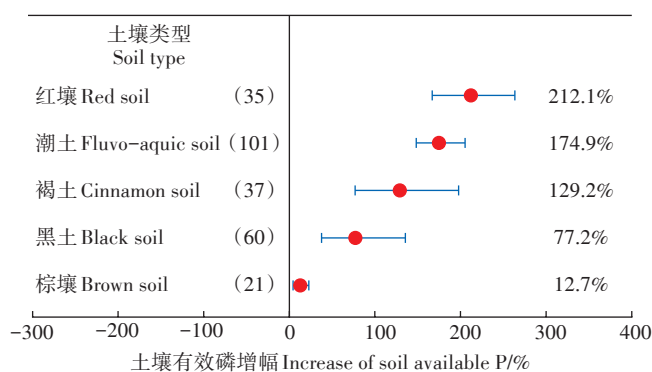


图6 不同土壤类型对施用有机肥提升土壤有效磷含量的影响

Figure 6 Effects of soil types on increasing soil available phosphorus

248.5%,分别是土壤有机质含量<0.6%、1%~2%和2%~3%时的2.1、2.0倍和10.9倍。对于不同的土壤pH,土壤有效磷含量的提升幅度相对大小表现:pH5~6.5(168.8%)>pH6.5~7.5(136.7%)>pH7.5~9(101.7%),当pH为碱性(7.5~9)时,施用有机肥对土壤有效磷的

提升效果,显著低于pH为酸性(5~6.5)和pH为中性(6.5~7.5)时,但pH为酸性(5~6.5)和pH为中性(6.5~7.5)时,两者无显著差异。

2.8 气候因素对施用有机肥提升土壤有效磷含量的影响

由图8可见,土壤有效磷增幅随年均降雨量和年均温度的增加均呈增加趋势。在年均降雨量>800 mm时,土壤有效磷增幅最大,达到188.0%,分别是年均降雨量400~800 mm和200~400 mm的1.7倍和2.4倍。土壤有效磷增幅在年均温度>16 °C的地区最大,达到212.1%,而在年均温度≤12 °C的地区为85.0%。

3 讨论

3.1 有机肥投入对土壤磷素有效性的影响

磷投入是引起土壤有效磷变化最为直接的因素,在不同磷投入量条件下,施用有机肥均能显著提高土壤有效磷含量,且高施磷量(>300 kg·hm⁻²)对土壤有效磷的提升效果,显著优于低施磷量(<75 kg·hm⁻²)和

中等施磷量(75~150 kg·hm⁻²和150~300 kg·hm⁻²)。这主要是因为磷投入直接增加了有效磷的含量,且有机肥的施用可以提高土壤的供肥容量,改善土壤的养分状况,使土壤有效磷含量提升效果显著优于单施化肥^[50-51],但当磷投入量>300 kg·hm⁻²时,作物增产不显著(作物产量有效磷阈值为10.9~21.4 mg·kg⁻¹)^[52],肥料利用率明显降低,使得磷素在土壤中大量累积^[53],配施有机肥能够活化土壤中难利用态磷素,从而使土壤有效磷含量急剧上升,提升效果达到最佳。因此对于低磷土壤,可考虑通过高量施磷(配施有机肥),快速提升土壤有效磷含量;对于中高磷土壤,应充分考虑环境磷阈值,避免农田土壤面源污染的风险^[54]。

有机肥种类也是影响土壤有效磷含量的重要因素^[55-56]。本研究表明不同种类有机肥对土壤有效磷含量的提升效果,表现为畜禽粪便类>商品有机肥类>秸秆类>城市垃圾类有机肥,其中又以猪粪、鸡粪和牛粪对土壤有效磷含量的提升幅度最大。这主要是因为不同种类有机肥本身的磷含量不同,且各形态磷占比差异较大^[57]。有研究表明,无机磷、活性和中等活性有机磷与土壤有效磷显著正相关^[58]。畜禽粪便类有机肥中无机磷含量较高,有机磷以活性和中等活性有机磷为主^[59],另外,又因牛粪中中等活性磷含量高,猪粪和鸡粪易被矿化分解释放大量的活性磷,三者均具有较高的磷素有效性^[60],长期施用后,本身的磷素输入量更大,因此,对土壤有效磷含量的提升效果更为显著。但是,畜禽粪便类有机肥中重金属含量远高于其他有机肥种类的含量,长期施用会增加环境污染和人体重金属超标的风险^[61-62],因此,畜禽粪便类有机肥的无害化处理技术迫切需要得到关注,以实现其广泛的资源化利用。

有机肥替代化肥比例较高(75%和100%)时,土壤有效磷含量的提升效果更佳,一方面可能是有机肥的施用能够增加土壤有机质的含量,土壤有机质含量与土壤有效磷含量呈显著正相关^[63],因此,随有机肥替代化肥比例的提高,土壤有机质含量增加,土壤养分的活化速度加快,土壤有效磷含量大幅度提升^[64];另一方面可能是有机肥能为土壤微生物提供碳源、氮源和能量,促进土壤的生物活性,增加磷素在土壤中的有效转化^[65]。本研究收集的有机肥替代化肥比例为40%的数据,主要集中在两个长期定位试验点,可能误差较大,有待进一步研究。在实际生产中,综合作物产量和质量、经济成本及环境因素,推荐有机肥替代化肥比例为50%、25%和20%^[10,33,42,51],研究结论

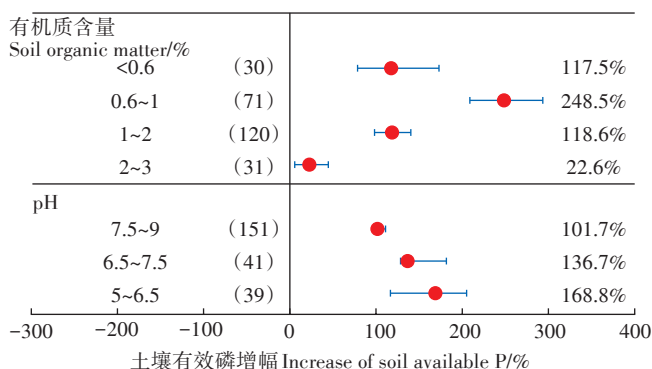


图7 不同土壤pH和有机质对施用有机肥提升土壤有效磷含量的影响

Figure 7 Effects of pH and soil organic matter on increasing soil available phosphorus

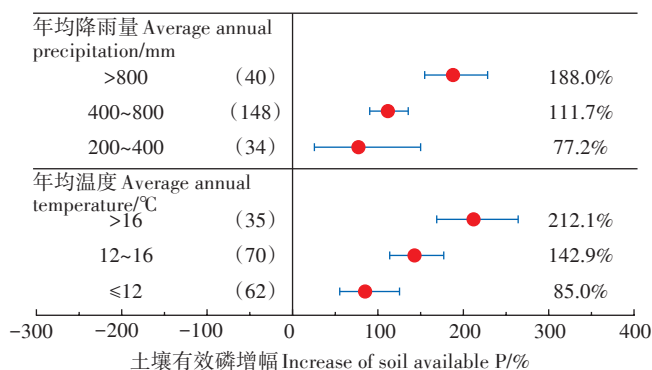


图8 气候因素对土壤有效磷的影响

Figure 8 Effects of climatic factors on the increase of soil available phosphorus

不尽一致,因此,对于最佳的有机无机肥配施比例值得进一步研究与探讨。

另外,有机肥对土壤有效磷含量的提升效果在不同施用年限未达到显著差异,这可能是本研究统计的施用年限(<30 a)有局限性,且有机肥潜力较大,肥效持久,但有机肥养分释放缓慢^[66],通过增加施用时间,有机肥对土壤速效养分的提升作用才能被充分地发挥出来,因此对施用年限的研究有待进一步的统计。但随着有机肥施用年限的延长,土壤有效磷增幅呈增加趋势。主要是因为有机肥施用年限对土壤不同形态磷含量的影响^[22,60],有机肥施用时间越长,土壤中有效性较高的无机磷含量越高,活性和中等活性有机磷越易被矿化,对土壤有效磷含量的提升效果显著^[18,67];其次,随着有机肥施用年限的增加,有机质水平不断提升,而pH值逐渐降低,促进了难溶性磷向有效磷的转化^[68-69]。因此有机肥的长期施用应重点关注其用量及替代比例。

3.2 不同轮作方式下施用有机肥对土壤磷素有效性的影响

不同轮作方式影响着土壤磷素循环及其有效性^[12]。本研究中不同轮作方式下施用有机肥对土壤有效磷含量的提升效果具体表现:玉米连作>小麦-玉米轮作>大豆-玉米轮作>小麦-大豆-玉米轮作。这主要是因为不同轮作方式下不同的作物对磷素表现出的需求各不相同,且其根系对土壤磷素的利用能力差异较大^[20],如VETSCH等^[70]的研究表明,相对于玉米和小麦,大豆是需磷量较大的作物;李洋等^[71]的研究也表明,豆科作物根系附着的根瘤菌能够以氮固磷,提高豆科作物根系对磷素的吸收与利用。因此,大豆-玉米轮作与小麦-大豆-玉米轮作方式下,作物对磷素的吸收利用大于玉米连作及小麦-玉米轮作。也有研究表明,相较于连作,轮作体系能够提高作物对磷的吸收效率^[72],且玉米的外生菌根具有提高土壤磷素有效性的作用^[21]。这就会出现玉米连作方式下,长期施用有机肥土壤有效磷含量的提升幅度高于玉米与其他作物轮作方式下土壤有效磷含量的提升幅度。在农业生产中,玉米与其他作物轮作不仅能改善土壤养分状况,也能提高作物对磷素的吸收率,减少磷素的浪费^[21,73-74]。

3.3 不同环境因素下施用有机肥对土壤磷素有效性的影响

不同土壤因素下,长期施用有机肥对土壤有效磷含量的提高幅度有显著差异(图6和图7)。对于不同

土壤类型,土壤有效磷增幅表现为红壤>潮土>褐土>黑土>棕壤,其中,以红壤有效磷增幅最大,为212.09%,棕壤有效磷含量增幅较小。这主要是因为不同土壤类型,有机质含量和pH差异较大。pH直接影响磷的存在形态,进而影响到土壤中有效磷的含量^[52,57-58],当土壤pH为酸性(5~6.5)时,有利于难溶磷酸盐的溶解,从而提高有效磷的含量;随着土壤pH增加,磷酸会与钙或铁铝形成磷酸盐沉淀,降低磷的有效性;土壤有机质含量则是土壤肥力的重要指标,有机质含量较低(0.6%~1%)的低肥力土壤,施用有机肥对土壤有效磷的提升效果显著优于高肥力土壤(有机质含量为1%~2%和2%~3%)^[27,32,73]。有机质含量过低(<0.6%)时,土壤有机质与土壤有效磷之间无显著相关性,土壤黏粒对磷酸盐的束缚作用强于有机质中有机酸对磷酸根离子的交换作用,致使磷酸根离子很难被释放出来^[12]。因此,低pH(5~6.5)和低有机质含量(0.6%~1%)的红壤地区有效磷的提升效果优于其他高pH和高有机质含量的土壤。这与本研究中pH和有机质含量对土壤有效磷增幅的影响一致。另外,也有可能各类土壤的矿物组成差异有关,土壤矿物组成(黏粒矿物)影响着土壤对磷的吸附固定能力^[74],如红壤地区矿物组成以高岭石为主,而潮土、褐土、黑土和棕壤的矿物组成则以水云母和蒙脱石为主^[75],高岭石对磷的吸附固定能力显著大于蒙脱石和水云母,降低了土壤磷素活性^[12,37],施用有机肥能够解吸大量被吸附固定的磷,使其进入土壤溶液,提高土壤有效磷含量。

另外,对于不同的气候因素而言,年均降雨量和年均温度是表征气候类型的主要指标,在高温(>16℃)、多雨(>800 mm)的气候条件下,CFM处理对土壤有效磷含量的提升效果显著优于低温(≤12℃)、干旱(200~400 mm)的提升效果。这可能是因为年均降雨量和年均温度通过各种直接和间接的过程影响着土壤有效磷含量^[43],一方面,高温会促进磷的吸附固定^[76],多雨则直接驱动着磷淋失^[77],二者均不利于有效磷含量的提升;而另一方面,施用有机肥增加了土壤有机质含量,加速了无机磷的解吸、有机磷的矿化及土壤微生物对磷的转移和转化,对土壤有效磷的累积影响显著^[53,78-79]。综合气候和施肥两方面因素对土壤有效磷的影响,其总效应表现为正向促进,因此,在高温(>16℃)、多雨(>800 mm)地区施用有机肥,利于土壤有效磷的提升,但在实际生产中,也要慎重考虑其磷淋失的风险。

4 结论

本研究通过整合分析探讨农田土壤磷素有效性对有机肥长期施用的响应。总体而言,在我国农田有机肥替代化肥可提高土壤磷素有效性,有效磷含量提高幅度约为单施化肥处理的2.6倍,且随着磷投入量的增加,单施化肥与有机无机配施处理间土壤有效磷含量提高幅度差异加大。但在不同环境因素下,施用有机肥对土壤有效磷的提升效果存在差异。在低肥力(有机质含量为<1%)、酸性(pH 5~6.5)或中性(pH 6.5~7.5)土壤中,建议长期配施畜禽粪便类有机肥,并特别注意有机肥替代化肥比例,以期更有效地发挥有机肥的效应,改善土壤有效磷状况并提高土壤的生产能力;在高肥力、高温(>16℃)或多雨(>800 mm)土壤中,应充分考虑环境磷阈值,特别关注磷投入量(<300 kg·hm⁻²)及有机肥替代化肥比例,避免造成农田土壤面源污染的风险。

参考文献:

- [1] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 22-32. LÜ F L, HOU M M, ZHANG H T, et al. Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat-summer maize rotation system in Lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 22-32.
- [2] SHI L L, SHEN M X, LU C Y, et al. Soil phosphorus dynamic, balance and critical P values in long-term fertilization experiment in Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2446-2455.
- [3] 张淑香, 徐明岗. 土壤磷素演变与高效利用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3828-3829. ZHANG S X, XU M G. Change of soil phosphorus and its efficient utilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3828-3829.
- [4] WU Q H, ZHANG S X, REN Y, et al. Soil phosphorus management based on the agronomic critical value of Olsen P[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2018, 49(8): 934-944.
- [5] ZHANG C, TIAN H, LIU J, et al. Pools and distributions of soil phosphorus in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): 35-44.
- [6] KANG J, AMOOZEGAR A, HESTERBERG D. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3/4): 194-201.
- [7] 冯媛媛, 申艳, 徐明岗, 等. 施磷量与小麦产量的关系及其对土壤、气候因素的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 683-691. FENG Y Y, SHEN Y, XU M G, et al. Relationship between phosphorus application amount and grain yield of wheat and its response to soil and climate factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 683-691.
- [8] 张珂珂, 黄绍敏, 郭斗斗, 等. 长期定位施肥对潮土磷素下移及有效磷生态阈值的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 64-69. ZHANG K K, HUANG S M, GUO D D, et al. Study on the downward migration of phosphorus and the ecological threshold of available phosphorus in aquic soil by long-term fertilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(5): 64-69.
- [9] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011, 11(6): 76-82. JIA X Y, LI J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, 11(6): 76-82.
- [10] 于跃跃, 郭宁, 闫实, 等. 有机肥替代化肥对土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 148-154. YU Y Y, GUO N, YAN S, et al. Effects of substitution of chemical fertilizers by organic fertilizer on soil fertility and maize yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3): 148-154.
- [11] 黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 93-98. HUANG S M, GUO D D, ZHANG S Q. Effects of long-term application of organic fertilizer and superphosphate on accumulation and leaching of soil available phosphorus in fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 93-98.
- [12] SHEN P, XU M G, ZHANG H M, et al. Long-term response of soil Olsen P and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers[J]. *Catena*, 2014, 118: 20-27.
- [13] 李娜, 杨劲峰, 刘侯俊, 等. 长期轮作施肥棕壤磷素对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1697-1703. LI N, YANG J F, LIU H J, et al. Response of soil phosphorus to P balance under long-term rotation and fertilization in brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1697-1703.
- [14] NIKITISHEN V I, LICHKO V I. Optimizing the phosphate level of soils in agroecosystems of opolie regions of central Russia[J]. *Russian Agricultural Sciences*, 2008, 34(6): 393-397.
- [15] 张田, 许浩, 茹淑华, 等. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5247-5255. ZHANG T, XU H, RU S H, et al. Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5247-5255.
- [16] AULAKH M S, GARG A K, KABBA B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics[J]. *Soil Use Manage*, 2007, 23: 417-427.
- [17] VU D T, TANG C, ARMSTRONG R D. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a mediterranean climate[J]. *Plant and Soil*, 2008, 304(1/2): 21-33.
- [18] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1529-1535. YANG Z X, ZHOU H P, XIE W Y, et al. Response of soil available phosphorus to P balance in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1529-1535.
- [19] NOBILE C M, BRAVIN M N, BECQUER T, et al. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifica-

- tions in soil as compared to phosphorus accumulation[J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124709.
- [20] 姜桂英, 黄绍敏, 郭斗斗. 不同耕作和轮作方式下作物生育期内土壤酶活性的动态变化特征[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(3): 335-342. JIANG G Y, HUANG S M, GUO D D. Dynamic changes of soil enzyme activities during growth of crops under different tillage types and rotation[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, 43(3): 335-342.
- [21] 张为政. 轮作方式对土壤磷素状况的影响[J]. 土壤肥料, 1990(6): 7-10. ZHANG W Z. Effects of crop rotation on soil phosphorus status[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1990(6): 7-10.
- [22] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土不同磷组分对磷素盈余的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 924-933. YANG Z X, ZHOU H P, XIE W Y, et al. Response of phosphorus components to phosphate surplus in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(5): 924-933.
- [23] 王伯仁, 李冬初, 黄晶. 红壤长期肥料定位试验中土壤磷素肥力的演变[J]. 水土保持学报, 2008(5): 96-101, 141. WANG B R, LI D C, HUANG J. Development of P-fertility in long-term fertilizer experiment on red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008(5): 96-101, 141.
- [24] ZHAN X Y, ZHANG L, ZHOU B K, et al. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in black soils under different long-term fertilization patterns[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(7): e0131713.
- [25] SHEN P, HE X H, XU M G, et al. Soil organic carbon accumulation increases percentage of soil available phosphorus to total P at two 15-year mono-cropping systems in Northern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13: 597-603.
- [26] YUSRAN F H. The relationship between phosphate adsorption and soil organic carbon from organic matter addition[J]. *Journal of Tropical Soils*, 2010, 15: 1-10.
- [27] FEI C, ZHANG S, FENG X H, et al. Organic material with balanced C-nutrient stoichiometry and P addition could improve soil P availability with low C cost[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2021, 184(5): 360-366.
- [28] SEILSEPOUR M, RASHIDI M, KHABBAZ B G. Prediction of soil available phosphorus based on soil organic carbon[J]. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*, 2008, 4: 189-193.
- [29] 李学恒. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. LI X H. Soil chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [30] CHAD J P, JAMES J C. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants[J]. *Agriculture*, 2019, 9(6): 175-181.
- [31] 展晓莹. 长期不同施肥模式黑土有效磷与磷盈亏响应关系差异的机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 1-9. ZHAN X Y. Relationship between available phosphorus and phosphorus balance and its mechanism under different long-term fertilizations in black soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 1-9.
- [32] OBIHARA C H, RUSSELL E W. Specific adsorption of silicate and phosphate by soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1972, 23: 105-117.
- [33] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 175-181.
- [34] 王柏寒, 黄绍敏, 郭斗斗, 等. 长期定位施肥下潮土磷素盈亏及对无机磷的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3842-3851. WANG B H, HUANG S M, GUO D D, et al. Phosphorus profit and loss and its effect on inorganic phosphorus in fluvo-aquic soil under long-term located fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3842-3851.
- [35] 孙翠平, 张英鹏, 罗加法, 等. 长期施肥对山东潮土磷盈亏及农学阈值的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 185-191. SUN C P, ZHANG Y P, LUO J F, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus(P) balance and critical value of soil phosphorus in fluvo-aquic soil of Shandong Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(5): 185-191.
- [36] 温延臣, 李海燕, 袁亮, 等. 长期定位施肥对潮土剖面养分分布的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4460-4469. WEN Y C, LI H Y, YUAN L, et al. Effect of long-term fertilization on nutrient distribution of fluvo-aquic soil profile[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4460-4469.
- [37] 张微微, 周怀平, 黄绍敏, 等. 长期不同施肥模式下碱性土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 263-274. ZHANG W W, ZHOU H P, HUANG S M, et al. Response of alkaline soil available phosphorus to phosphorous budget under different long-term fertilization treatments[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 263-274.
- [38] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4781-4789. WANG D Z, HUA K K, GUO Z B. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4781-4789.
- [39] 黄兴成, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥下黄壤综合肥力演变及作物产量响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1484-1491. HUANG X C, LI Y, BAI Y J, et al. Evolution of yellow soil fertility under long-term fertilization and response of crop yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1484-1491.
- [40] 信秀丽, 钦绳武, 张佳宝, 等. 长期不同施肥下潮土磷素的演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1514-1520. XIN X L, QIN S W, ZHANG J B, et al. Dynamics of phosphorus in fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1514-1520.
- [41] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 长期施肥条件下黄潮土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 华北农学报, 2015, 30(6): 226-232. WEI M, ZHANG A J, LI H M, et al. Response of available phosphorus to P balance in yellow fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(6): 226-232.

- [42] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3):98-104. XING P F, GAO S C, MA M C, et al. Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the north China plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(3):98-104.
- [43] 张艳洁, 耿文. 有机肥的种类及作用特点[J]. 农技服务, 2010, 27(1):65, 85. ZHANG Y J, GENG W. The type and action characteristic of organic fertilizer[J]. *Agricultural Technology Service*, 2010, 27(1):65, 85.
- [44] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998:356. National Soil Census Office. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998:356.
- [45] HOU W Q, CHEN C R, LUO Y Q, et al. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24:3344-3356.
- [46] CURTIS P S, WANG X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology[J]. *Oecologia*, 1998, 113(3):299-313.
- [47] 张乃于, 闫双堆, 李娟, 等. 低分子量有机酸对土壤磷组分影响的Meta分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12):2076-2083. ZHANG N Y, YAN S D, LI J, et al. Meta-analysis on the effects of low molecular weight organic acids on increasing availability of soil phosphorus[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(12):2076-2083.
- [48] 占亚楠, 王智, 孟亚利. 生物炭提高土壤磷素有效性的整合分析[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4):1185-1193. ZHAN Y N, WANG Z, MENG Y L. Biochar addition improves soil phosphorus availability: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4):1185-1193.
- [49] 任科宇, 段英华, 徐明岗, 等. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(17):2983-2996. REN K Y, DUAN Y H, XU M G, et al. Effect of manure application on nitrogen use efficiency of crops in China: A meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(17):2983-2996.
- [50] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(5):789-794. LIU E K, ZHAO B Q, HU C H, et al. Effects of long-term nitrogen phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007(5):789-794.
- [51] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11):1827-1834. TANG J W, XU J K, WEN Y C, et al. Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11):1827-1834.
- [52] BAI Z H, LI H G, YANG X Y, et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(1/2):32-35.
- [53] 杨军, 高伟, 任顺荣. 长期施肥条件下潮土土壤磷素对磷盈亏的响应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4738-4747. YANG J, GAO W, REN S R. Response of soil phosphorus to P balance under long-term fertilization in fluvo-aquic soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4738-4747.
- [54] 仲子文, 孙翠平, 张英鹏, 等. 长期定位施肥对山东潮土有效磷及磷库演变规律的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(12):59-67. ZHONG Z W, SUN C P, ZHANG Y P, et al. Effects of long-term located fertilization on evolution of available phosphorus and phosphorus pool in Shandong fluvo-aquic soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(12):59-67.
- [55] 朱晓晖, 杜晓玉, 张维理. 有机肥种类对土壤有效磷累积量的影响及其流失风险[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5):14-18. ZHU X H, DU X Y, ZHANG W L. Effects of manure on available-P accumulation in soil and its loss risk[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(5):14-18.
- [56] 宋佳明, 蔡红光, 张秀芝, 等. 施用不同种类有机肥对黑土磷素含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(6):707-712. SONG J M, CAI H G, ZHANG X Z, et al. Effects of different organic manures application on phosphorus content in black soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(6):707-712.
- [57] 马睿. 有机无机肥连续配施对土壤磷组分影响研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2018:13-28. MA R. Effects of continuous combined application of organic and inorganic fertilizers on soil phosphorus fractions[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018:13-28.
- [58] 张海涛, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(2):284-290. ZHANG H T, LIU J L, LIAO W H, et al. Effects of phosphorus fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008(2):284-290.
- [59] 严正娟, 陈硕, 王敏锋, 等. 不同动物粪肥的磷素形态特征及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1):31-39. YAN Z J, CHEN S, WANG M F, et al. Characteristics and availability of different forms of phosphorus in animal manures[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(1):31-39.
- [60] 吴璐璐, 张水清, 黄绍敏, 等. 长期定位施肥对潮土磷素形态和有效性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2):379-386. WU L L, ZHANG S Q, HUANG S M, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus fraction and availability in fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2):379-386.
- [61] 茹淑华, 张国印, 杨军芳, 等. 鸡粪和猪粪对小麦生长及土壤重金属累积的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(增刊1):494-499. RU S H, ZHANG G Y, YANG J F, et al. Effects of application of chicken manure and pig manure on the growth of wheat and heavy metal accumulation in soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(Suppl 1):494-499.
- [62] 茹淑华, 徐万强, 侯利敏, 等. 连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10):2070-2078. RU S H, XU W Q, HOU L M, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil-crop systems[J]. *Ecology and Environmen-*

- tal Sciences, 2019, 28(10):2070-2078.
- [63] SHEN P, XU M, ZHANG H. Long-term response of soil available phosphorus and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers[J]. *Catena*, 2014, 118:20-27.
- [64] 展晓莹, 任意, 张淑香, 等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4728-4737. ZHAN X Y, REN Y, ZHANG S X, et al. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in the main types of soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4728-4737.
- [65] 马星竹, 武志杰, 陈利军, 等. 长期施肥对黑土、棕壤微生物量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(1):60-64. MA X Z, WU Z J, CHEN L J, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass in black soil and brown earth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1):60-64.
- [66] 耿晨光. 有机农业生产中有机肥的合理施用[J]. 内蒙古农业科技, 2008(4):93-95. GENG C G. Proper application of organic fertilizer on the organic agriculture[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2008(4):93-95.
- [67] 王琼, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期有机无机肥配施提高黑土磷含量和活化系数[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1679-1688. WANG Q, ZHAN X Y, ZHANG S X, et al. Increment of soil phosphorus pool and activation coefficient through long-term combination of NPK fertilizers with manures in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6):1679-1688.
- [68] SMITH F W. The phosphate uptake mechanism[J]. *Plant and Soil*, 2002, 245:105-114.
- [69] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 不同用量有机肥对陇东旱塬黑垆土磷素形态转化及有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2):32-38. ZHANG J J, DANG Y, ZHAO G, et al. Effects of different amount organic manure on soil phosphorus forms transformation and its availability in calcic kastanozems in eastern Gansu[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(2):32-38.
- [70] VETSCH J A, RANDALL G W. Corn production as affected by tillage system and starter fertilizer[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94:532-540.
- [71] 李洋, 石柯, 朱长伟, 等. 不同轮作模式对黄淮平原潮土区土壤养分及作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2):312-321. LI Y, SHI K, ZHU C W, et al. Effect of different crop rotations on soil nutrients and crop yield in fluvo-aquic soil in Huang Huai Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):312-321.
- [72] 曹越. 不同轮作体系对玉米磷素吸收及根际土壤丛枝菌根真菌的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2017:34-37. CAO Y. Effect of different rotation system on maize phosphorus uptake and arbuscular mycorrhizal fungi in maize rhizosphere[D]. Changchun: Jilin University, 2017:34-37.
- [73] PENG Y, DUAN Y, HUO W, et al. Soil microbial biomass phosphorus can serve as an index to reflect soil phosphorus fertility[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(5):657-669.
- [74] YANG X Y, SUN B H, ZHANG S L. Trends of yield and soil fertility in a long-term wheat-maize system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(2):402-414.
- [75] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. SHEN S M. Soil fertility in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [76] SIMS J T, SIMARD R R, JOEM B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998(27):277-293.
- [77] BARROW N. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1983(34):733-750.
- [78] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6):1132-1141. HUANG J, ZHANG Y Z, XU M G, et al. Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6):1132-1141.
- [79] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6):1136-1146. QI R S, DANG T H, YANG S Q, et al. Forms of soil phosphorus P adsorption in soils under long-term crop rotation and fertilization systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6):1136-1146.

(责任编辑:叶飞)