

液体牛粪与化肥配施对东北春玉米农田土壤磷素平衡的影响

姜佰文, 刘丽红, 刘俊辉, 于士源, 梁源, 申海峰, 邵慧

引用本文:

姜佰文, 刘丽红, 刘俊辉, 于士源, 梁源, 申海峰, 邵慧. 液体牛粪与化肥配施对东北春玉米农田土壤磷素平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2232–2240.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0404>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 2004–2010 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0068>

施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响

王敏锋, 严正娟, 陈硕, 高杰云, 李吉进, 许俊香, 陈清

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1351–1359 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.018>

长期施用猪粪对土壤磷含量及无机磷组分的影响

张春龙, 李冰, 黄容, 唐晓燕, 肖怡, 白根川, 王昌全

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2241–2249 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0162>

沼液施用对贵州典型黄壤油菜地氮淋溶的影响

孙芳芳, 江涛, 成剑波, 何腾兵, 秦松, 汪国英, 洪建明

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1327–1336 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1190>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姜佰文, 刘丽红, 刘俊辉, 等. 液体牛粪与化肥配施对东北春玉米农田土壤磷素平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2232–2240.

JIANG B W, LIU L H, LIU J H, et al. Effects of dairy cattle slurry and chemical fertilizer on the soil phosphorus balance of spring maize fields in northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2232–2240.



开放科学 OSID

液体牛粪与化肥配施对东北春玉米 农田土壤磷素平衡的影响

姜佰文¹, 刘丽红¹, 刘俊辉¹, 于士源¹, 梁源¹, 申海峰², 邵慧^{1*}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 北京丹青诺和技术有限公司, 北京 100193)

摘要:为探究液体牛粪与化肥配施对玉米产量、植株养分吸收及土壤磷素淋洗与磷素盈亏的影响,田间条件下共设置6个处理,按照N 200 kg·hm⁻²、P₂O₅ 100 kg·hm⁻²、K₂O 80 kg·hm⁻²为总养分投入量进行施肥,包括不施肥(CK)、农户常规施化肥(F)、化肥与液体牛粪配施,并设置不同牛粪用量,分别为30、60、90、120 t·hm⁻²(FL30、FL60、FL90、FL120)。结果表明:与F处理相比,FL120处理玉米产量最高,达到14.72 t·hm⁻²,增产幅度达32.14%,此处理下耕层土壤磷素积累量最高,达到129.40 kg·hm⁻²,表明高比例施用液体牛粪能够提高作物产量和耕层土壤有效磷含量。FL60处理玉米磷含量和磷积累量最高,表明液体牛粪与化肥配施能够促进作物对磷素的吸收,提高养分利用效率;根据土壤Olsen-P和CaCl₂-P的关系发现,土壤磷素淋洗临界值为48.99 mg·kg⁻¹,FL90和FL120处理土壤Olsen-P含量均超过了磷素淋洗临界值,表明大量施用液体牛粪会加剧磷素的淋洗,造成磷素损失以及潜在的环境危害。因此,液体牛粪配施化肥模式下,液体牛粪的推荐施用量应控制在90 t·hm⁻²以内为宜。

关键词:液体牛粪;土壤磷盈亏;Olsen-P;CaCl₂-P;玉米

中图分类号:S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)10-2232-09 doi:10.11654/jaes.2022-0404

Effects of dairy cattle slurry and chemical fertilizer on the soil phosphorus balance of spring maize fields in northeast China

JIANG Baiwen¹, LIU Lihong¹, LIU Junhui¹, YU Shiyuan¹, LIANG Yuan¹, SHEN Haifeng², SHAO Hui^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Beijing Danqingnuohe Technology Co., Ltd., Beijing 100193, China)

Abstract: To investigate the effects of dairy cattle slurry combined with chemical fertilizer on maize yield, plant nutrient uptake, soil phosphorus leaching, and phosphorus loss, six treatments were set up under the following field conditions: N 200 kg·hm⁻², P₂O₅ 100 kg·hm⁻², and K₂O 80 kg·hm⁻² were the total nutrient input, including no fertilizer (CK), conventional fertilizer application (F), and combined fertilizer and dairy cattle slurry applications of 30, 60, 90 t·hm⁻², and 120 t·hm⁻² (hereinafter abbreviated as FL30, FL60, FL90, FL120), according to the different amounts of cattle slurry. Results showed that compared with F treatment, the maize yield under the FL120 treatment was the highest, reaching 14.72 t·hm⁻², with an increase of 32.14%. The soil phosphorus accumulation under the FL120 treatment was the highest, reaching 129.40 kg·hm⁻², indicating that a high proportion of dairy cattle slurry application could improve crop yield and soil available phosphorus content. The phosphorus content and phosphorus accumulation of corn treated with FL60 were the highest, indicating that the combination of dairy cattle slurry and chemical fertilizer could promote the absorption of phosphorus and

收稿日期:2022-04-21 录用日期:2022-07-13

作者简介:姜佰文(1970—),男,黑龙江克山人,教授,博士生导师,从事作物养分管理研究。E-mail:jbwneau@163.com

*通信作者:邵慧 E-mail:shaohuineau@neau.edu.cn

基金项目:黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28100200)

Project supported: The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDA28100200)

improve the nutrient utilization efficiency of crops. According to the relationship between soil Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$, the critical value of soil phosphorus leaching was $48.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the content of Olsen-P in the FL90 and FL120 soil exceeded the critical value of phosphorus leaching, indicating that a large amount of dairy cattle slurry would aggravate phosphorus leaching; this would result in phosphorus loss and potential environmental harm. Therefore, when combining dairy cattle slurry with chemical fertilizer, the recommended amount of cattle slurry should be controlled within $90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$.

Keywords: dairy cattle slurry; soil phosphorus deficit; Olsen-P; $\text{CaCl}_2\text{-P}$; maize

玉米作为第一大粮食作物,对保障国家粮食安全具有重要意义。东北春玉米产区面积约为1 277万 hm^2 ,总产量为8 870万t,是国家粮食生产的“压舱石”。磷作为作物的必需营养元素,在玉米生长发育与籽粒产量形成方面发挥重要作用^[1],施用磷肥是补充作物磷营养的重要途径^[2]。黑龙江省年均磷肥投入折纯量为55万t,但磷肥利用率不足20%^[3]。

伴随畜禽养殖的快速发展,大量粪污的产生加剧了环境压力与污染风险^[4],牛粪排泄物产生量年均高达7 000万t。黑龙江省是奶牛养殖大省,现有奶牛存栏109.7万头,位居全国前10名。大量的牛粪经无害化处理后可与化肥配施,从而减少磷肥投入。施用粪肥替代部分化肥逐渐被认为是缓解磷素缺乏的可行途径,同时也符合国家农业绿色发展政策^[5]。集约化养牛场的粪、尿及圈舍冲刷污水经囊式厌氧发酵后的液体牛粪施用技术已在欧美地区得到广泛应用,近年来得益于第三方服务公司的发展,该技术在东北地区方兴未艾,此项目合作企业为哈尔滨丹青农业科技股份有限公司。

目前,针对液体牛粪还田量的研究主要集中于作物产量的农学效应以及粪肥中氮的替代效应,对作物-土壤磷系统平衡的报道较少,而且牛粪还田还比较盲目,重产量、轻环境的现象普遍存在^[6]。尤其是液体牛粪含水量较高,过量施用对土壤磷素的淋洗与累积,以及施用后对植株-土壤磷平衡的影响尚不得而知。Olsen-P与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系一直被作为评估土壤中磷素淋洗风险的重要指标^[7],当Olsen-P的含量超过土壤磷素淋洗临界值时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量急剧增加,进而增加磷素的淋失风险^[8]。根据Olsen-P与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的相关性分析,可有效评估土壤磷素淋洗风险,从而确定适宜的液体牛粪还田量。

综上所述,本研究以东北春玉米为研究对象,以囊式厌氧发酵后的液体牛粪为材料,田间条件下设置不同化肥-牛粪配施处理,在生育期监测土壤Olsen-P与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的变化,关注植株磷累积与转运,评估液体牛粪还田的土壤磷素累积与淋洗风险,并综合农学与环境因素,确定适宜的液体牛粪还田量,为玉米绿

色生产与养分高效管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于2021年4—10月在黑龙江省哈尔滨市农业科学院玉米研究基地($126^{\circ}28'26''\text{E}$, $45^{\circ}51'30''\text{N}$,海拔120 m)开展。基地为温带半湿润季风气候,年平均气温为 4.4°C ,年平均降水量为500 mm。供试土壤类型为草甸黑土,0~20 cm耕层土壤理化性质为:pH 6.3,有机质 $29.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $124.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $42.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $166.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

田间试验按照 $\text{N } 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的总养分投入量进行施肥方案设计,包括不施肥处理(CK)、农民习惯施肥处理(即所有肥料播前一次性施入,也称“一炮轰”施肥,F)、化肥与液体牛粪配施处理(牛粪用量分别为30、60、90、120 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别记为FL30、FL60、FL90、FL120),液体牛粪均作为基肥,于播前一次性施入,各处理的养分投入情况如表1所示。试验采用完全随机区组设计,3次重复,供试玉米品种为垦沃1号,人工播种,播种密度为6万株 $\cdot \text{hm}^2$,参照当地农民习惯进行机械整地、田间除草与防虫管理。

参照液体粪肥施用指导方法计算粪肥带入的养分量,其余部分以化肥补足。供试化肥分别为尿素(N 46%)、重过磷酸钙(P_2O_5 46%)和硫酸钾(K_2O 52%)。供试液体牛粪取自双城米特利农业发展有限公司集约化奶牛养殖场,为粪、尿及圈舍冲洗污水经密闭存储囊式厌氧发酵(该装置及发酵技术示意图由北京丹青诺和技术有限公司提供,示意图见图1)后的固液混合物,总氮(N)含量为0.30%,总磷(P_2O_5)含量为0.08%,有效钾(K_2O)含量为0.25%,含水率 $\geq 90\%$,密度为 $1.04 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 样品的采集及测定

土样的采集与测定:于玉米播种前、吐丝期、成熟

表1 不同施肥处理养分投入情况(kg·hm⁻²)

Table 1 Nutrient inputs in different fertilization treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	液体牛粪 Dairy cattle slurry			化肥 Chemical fertilizer			总养分 Total nutrient		
	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	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	200	100	80	200	100	80
FL30	49.5	19.2	75	150.5	80.8	5	200	100	80
FL60	99.0	38.4	150	101.0	61.6	0	200	100	150
FL90	148.5	57.6	225	51.5	42.4	0	200	100	225
FL120	198.0	76.8	300	2.0	23.2	0	200	100	300

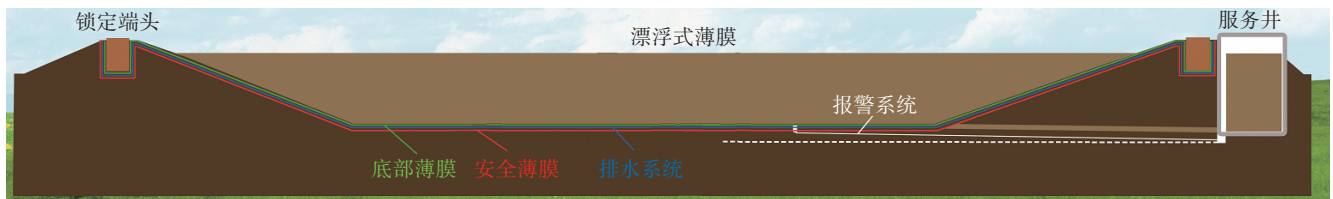


图1 液体粪肥密闭贮存及厌氧发酵处理囊示意图

Figure 1 Characteristics of capsule for slurry storage and anaerobic fermentation

期进行土壤样品采集,每小区在株间、行间位置各取1点,打入土钻,深度为0~100 cm,每层20 cm,挑出土样杂质,过1 mm筛后风干,测定各层土壤 Olsen-P 和 CaCl₂-P 含量。土壤 Olsen-P 用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (水土比为 20:1)浸提,振荡 30 min,土壤 CaCl₂-P 用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ (水土比为 10:1)浸提,振荡 15 min,用钼锑抗比色法在波长为 880 nm 的紫外分光光计上进行测定^[8]。

植物样的采集与测定:采集土壤样品的同时,每小区随机抽选 2 株长势均匀的代表性植株,按茎、叶、籽粒分开,于 105 ℃杀青 30 min,65 ℃烘干至恒质量,称质量后粉碎、过筛、研磨、H₂SO₄-H₂O₂联合消煮,钒钼黄比色法测定植物全磷含量^[9]。

收获测产:收获成熟期各小区中间位置 20 m²全部植株,记录总穗数并称质量,从中选取 10 个玉米穗,称 10 穗总鲜质量和脱粒后 10 穗籽粒鲜质量,籽粒含水量=(籽粒鲜质量-籽粒烘干质量)/籽粒鲜质量×100%,并记录测产行玉米的总株数、双穗数、空秆数等情况。根据下式^[10]计算出每公顷籽粒产量(折合为 14% 含水量):

$$Y=G \times [G_2 \times (1-W)] \div G_1 \div 20 \times 10\,000 \times (1-14\%)$$

式中:Y 为籽粒产量,kg·hm⁻²;G 为总籽粒质量,kg;G₁ 为 10 穗玉米总鲜质量,kg;G₂ 为脱粒后 10 穗玉米总鲜质量,kg;W 为含水量,%。

1.4 计算公式^[11]

$$\text{植株磷素积累量} = \text{干物质积累量} \times \text{植株磷素含量}$$

$$\text{土壤表观磷盈亏} = \text{磷肥的投入量} - \text{作物吸磷量}$$

$$\text{作物吸磷量} = \text{籽粒产量} \times \text{籽粒含磷量} + \text{茎秆生物量} \times \text{茎秆含磷量} + \text{叶片生物量} \times \text{叶片含磷量}$$

$$\text{磷素转运量} = \text{吐丝期植株磷素积累量} - \text{成熟期植株磷素积累量}$$

$$\text{磷素转运量对籽粒的贡献率} = \text{总转运量} / \text{成熟期籽粒磷素积累量} \times 100\%$$

1.5 数据处理

CaCl₂-P 随着土壤 Olsen-P 的增加而增加,通常会出现突变点,当土壤 Olsen-P 含量小于突变点时,不会发生磷素淋失,反之就会发生磷素淋失。在突变点以下 CaCl₂-P 含量很低,突变点以上 CaCl₂-P 急剧增加,因此用线性模型定义 Olsen-P 与 CaCl₂-P 之间的关系,具体关系如下^[8]:

$$y = a_1 + b_1 x \quad x \leq T$$

$$y = a_2 + b_2 x \quad x > T$$

式中:x 和 y 分别为土壤 Olsen-P 和 CaCl₂-P 的含量,mg·kg⁻¹;a 和 b 为模型参数,T 为曲线上变化点对应的 Olsen-P 含量,即该土壤的磷素淋洗临界值。

使用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析,Origin 2019b 制图,Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

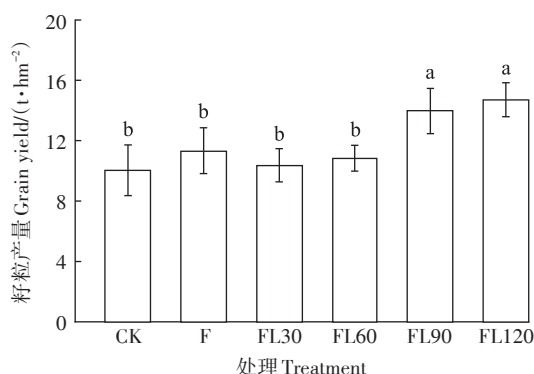
2.1 不同施肥处理对玉米籽粒产量的影响

如图 2 所示,所有施肥处理玉米产量均增加,表明施肥是实现玉米增产的重要措施。与 F 处理相比,

化肥与液体牛粪配施可以稳定或提高玉米籽粒产量,其中FL120处理玉米产量最高,为 $14.72\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,与F处理相比提高了32.14%,与CK处理相比提高了46.61%,与除FL90外的其他处理间差异显著;FL90处理玉米产量为 $12.97\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,与F处理相比提高了16.43%;FL30与FL60处理产量略低于F处理,但无显著性差异,说明提高有机肥施用比例具有增产效果。

2.2 不同施肥处理对植株磷转运与积累的影响

如表2所示,各组织器官的磷含量在FL60处理达到最高,转运对籽粒的贡献效率也达到最高,为49.73%。如图3所示,成熟期叶片磷积累量呈下降趋势,FL30处理叶片磷积累量最高,较F处理提高了41.79%,说明化肥配施液体牛粪能够促进玉米叶片磷积累;成熟期玉米各器官磷素向籽粒转移,籽粒磷积累量达到最大值,其中FL60处理籽粒磷素的积累



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$)

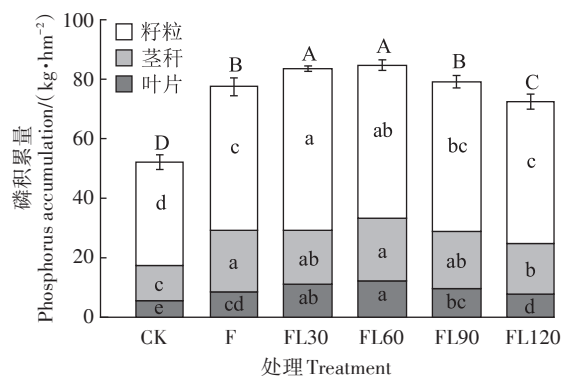
图2 不同施肥处理对玉米籽粒产量的影响

Figure 2 Effects of different fertilization treatments on maize grain yield

量最高,较F处理提高了12.54%,与除FL30以外的其他处理差异显著。成熟期植株各器官磷素向生殖器官转移完毕,FL60处理玉米总磷积累量最高,较F处理提高了9.44%。综上,化肥配施 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的液体牛粪能优化磷素在玉米各器官中的比例,促进生殖器官对磷素的吸收效果,增加籽粒磷素积累量,说明液体牛粪与化肥配施能够促进玉米对磷素的吸收。

2.3 不同施肥处理对土壤磷素盈亏的影响

从表3可以看出,随着液体牛粪施用比例的增加,磷素的盈余增多,FL120处理磷素盈余最多,为 $27.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较F处理增加了22.05%;FL30、FL60、FL90处理磷素盈余分别为16.44、15.27、 $20.85\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与F处理相比分别降低了27.19%、32.37%、7.67%;FL120处理土壤Olsen-P的变化量最大,为



不同小写字母表示不同处理同一组织器官间差异显著,不同大写字母表示处理间总磷积累量差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences in tissues and organs among treatments, different uppercase letters indicate significant differences in total phosphorus accumulation among treatments($P<0.05$)

图3 不同施肥处理对玉米各器官磷积累量的影响

Figure 3 Effects of different fertilization treatments on phosphorus accumulation in maize organs

表2 不同施肥处理对玉米磷素吸收及转运的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on phosphorus uptake and transport in maize

处理 Treatment	叶片 Leaf		茎秆 Stem		籽粒 Grain	
	磷含量 P concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	磷转运效率 P remobilization efficiency/%	磷含量 P concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	磷转运效率 P remobilization efficiency/%	磷含量 P concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	磷转运效率 P remobilization efficiency/%
CK	1.53d	58.40ab	0.98c	32.24a	2.75b	39.23b
F	2.51ab	61.69a	1.64ab	29.63a	3.66a	46.74ab
FL30	2.52ab	46.41b	1.47b	38.83a	3.74a	39.04b
FL60	2.75a	49.73ab	1.84a	39.10a	3.83a	49.73a
FL90	2.36bc	51.88ab	1.66ab	37.21a	3.37a	43.25ab
FL120	2.13c	57.28ab	1.46b	39.26a	3.49a	44.81ab

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

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

15.13 mg·kg⁻¹,是F处理的6.97倍;可见适量配施液体牛粪可以促进玉米对磷素的吸收并降低磷素盈余,而高比例的施用液体牛粪会造成磷素严重盈余,大量的磷素盈余会导致磷素在土壤中的积累。由图2可知,施用90 t·hm⁻²液体牛粪就可以满足作物生长对磷素的需求,达到增产的目的。

2.4 不同施肥处理对各土层磷累积的影响

从表4可以看出,各施肥处理中有效磷被大量留在了耕层土壤(0~20 cm),这是由于土壤对磷具有吸附作用,因此20 cm以下各处理土壤剖面磷含量均急剧下降;FL120处理耕层土壤磷素积累量最高,较F处理增加了28.92%,与除FL90以外的其他处理差异显著($P<0.05$)。由图4可知,成熟期FL120处理在80~100 cm土层Olsen-P含量为14.74 mg·kg⁻¹,相比于吐丝期增长了6.20%,可见过量施用液体牛粪会导致磷素向深层土壤运移,并在土壤中大量积累。

如图4所示,不同处理及不同生育期土壤Olsen-P和CaCl₂-P含量与土壤深度之间的关系表现出非常相似的趋势,0~40 cm土层Olsen-P和CaCl₂-P含量随土层深度的增加急剧下降,40 cm土层以下变化趋势平缓。与CK处理相比,除表层土壤中Olsen-P显著提高外,其他土层变化较小,说明施肥能够提高耕层土壤的Olsen-P含量。与F处理相比,FL30、FL60、FL90、FL120表层土壤Olsen-P含量显著提高,较F处

理增加了24.80%~38.40%,说明施用液体牛粪显著增加了土壤中Olsen-P含量;在80~100 cm土壤剖面Olsen-P含量显著增加,表明磷素在土壤中能够迁移至100 cm土层,且在各剖面中随着液体牛粪施用量的增加而逐渐增加。对比吐丝期和成熟期各土层Olsen-P含量发现,各处理在0~40 cm的Olsen-P含量随着生育期的进行而明显下降,在40~100 cm随着生育期的进行表现出不同程度的增加,这是由于作物对耕层养分的吸收以及磷素向深层土壤淋洗导致的;对比吐丝期和成熟期土层中CaCl₂-P含量发现,各处理的CaCl₂-P含量随生育期进行而明显降低,其中FL90处理和FL120处理表层降低幅度最大,分别减少了54.79%和4.17%,说明配施液体牛粪能促进作物对养分的吸收,但也造成了磷的淋洗。

2.5 土壤磷素淋洗临界值的确定

如图5所示,用线性回归模型描述Olsen-P与CaCl₂-P之间的关系($R^2=0.964, n=83, P<0.05$),两者之间存在显著相关性,图像总体趋势为CaCl₂-P随着Olsen-P的增加而增加,在拐点处对应的Olsen-P含量即为土壤磷素淋洗的临界值。临界值为48.99 mg·kg⁻¹,对应的CaCl₂-P为1.24 mg·kg⁻¹,在临界值以下,随Olsen-P增加CaCl₂-P的增加趋势缓慢,Olsen-P每增加1 mg·kg⁻¹时,CaCl₂-P仅增加0.016 mg·kg⁻¹,此时Olsen-P的变化范围为6.55~48.99 mg·kg⁻¹,CaCl₂-P的

表3 不同处理条件下土壤磷素盈余状况(0~20 cm)

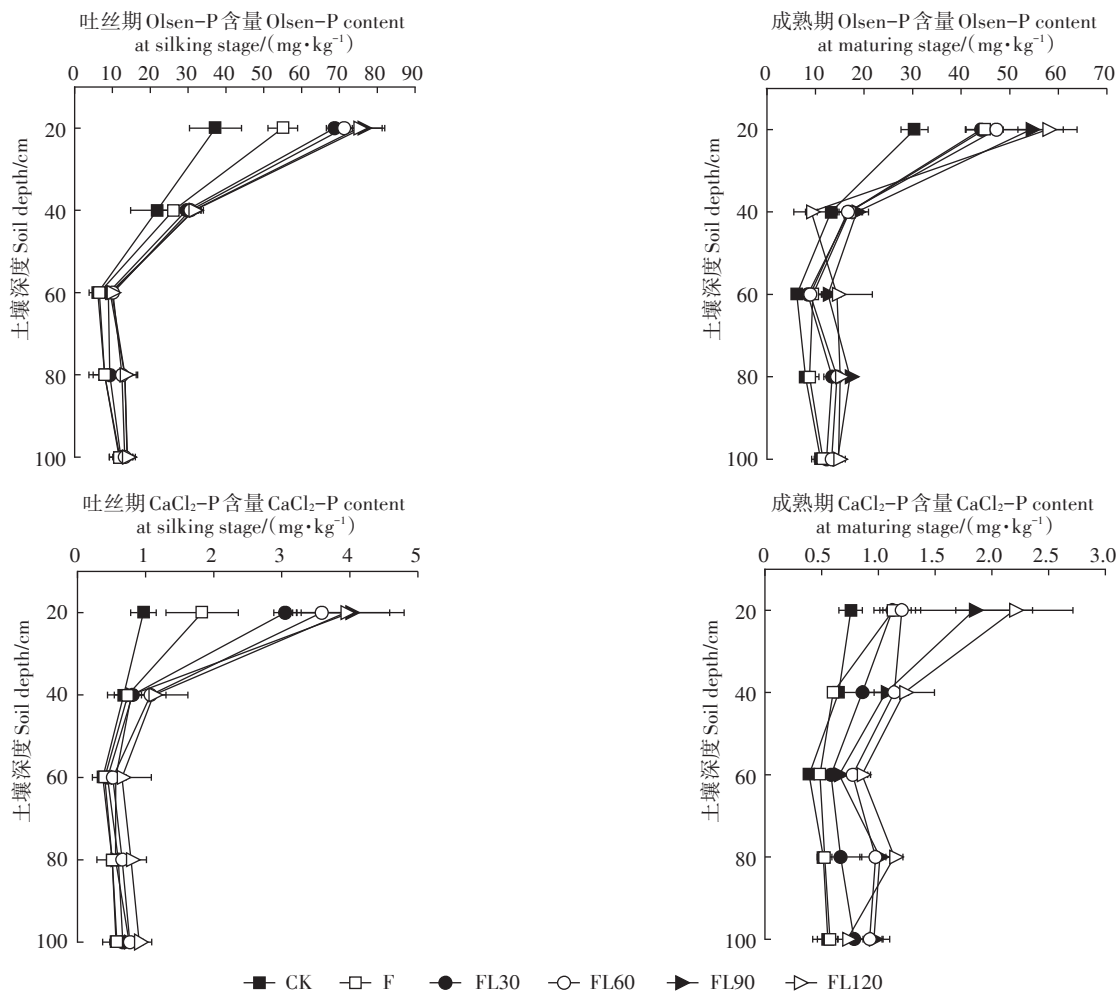
Table 3 Soil P surplus under different treatment conditions (0~20 cm)

处理 Treatment	磷投入 P input/(kg·hm ⁻²)	作物携出量 P removal/(kg·hm ⁻²)	磷素盈余 P surplus/(kg·hm ⁻²)	土壤有效磷 Soil Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)		
				播种前 Before planting	收获后 After harvest	变化量 Variation
CK	0	52.13	-52.13	42.64	30.40	-12.24
F	100	77.42	22.58	42.64	44.81	2.17
FL30	100	83.56	16.44	42.64	45.34	2.71
FL60	100	84.73	15.27	42.64	47.26	4.62
FL90	100	79.15	20.85	42.64	54.35	11.71
FL120	100	72.44	27.56	42.64	57.77	15.13

表4 不同深度土层土壤Olsen-P积累情况(kg·hm⁻²)

Table 4 Accumulation of Olsen-P in soils of different depths(kg·hm⁻²)

土层深度 Soil depth/cm	CK	F	FL30	FL60	FL90	FL120
0~20	68.09c	100.37b	101.57b	105.85b	121.74ab	129.40a
20~40	30.14b	38.76a	38.57a	38.02ab	42.12a	20.83c
40~60	14.24b	21.98ab	19.54ab	20.67ab	29.16ab	33.51a
60~80	19.05b	21.06b	32.20a	34.60a	37.15a	36.16a
80~100	27.90b	29.06ab	30.95ab	33.66ab	36.71a	37.15a

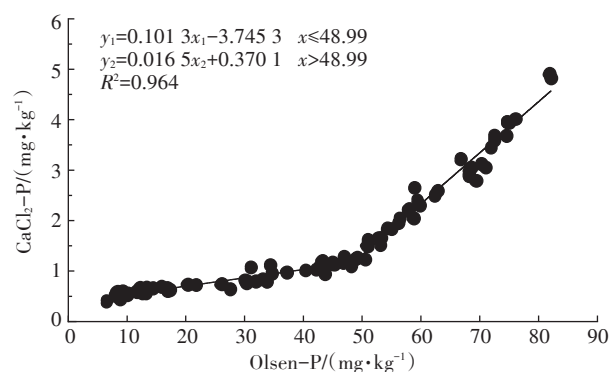
图4 吐丝期与成熟期剖面土壤Olsen-P和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量变化情况Figure 4 Changes of Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ contents in soil profile at silking and maturing stages

变化范围为 $0.39 \sim 1.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此时磷肥的施入是以增加土壤的 Olsen-P 为主, 对 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的影响偏小, 表明磷肥施用首先提高土壤 Olsen-P 含量。当 Olsen-P 含量高于 $48.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 迅速增加, 会引起磷素的淋失风险, Olsen-P 每增加 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 增加 $0.101 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅较之前增加了 5.31 倍, 此时 Olsen-P 的变化范围为 $48.99 \sim 82.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的变化范围为 $1.24 \sim 4.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明当土壤中的 Olsen-P 积累到一定程度后, 土壤对施入的磷素的吸附能力下降, 使土壤中的磷素更易水解而造成损失, 从而增加对环境潜在的危害。

3 讨论

3.1 液体牛粪-化肥配施对玉米产量及养分吸收的影响

研究发现, FL120 处理玉米的产量最高, 与 F 处理相比差异显著, 表明化肥配施液体牛粪能够为作物

图5 土壤Olsen-P与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的定量关系Figure 5 Quantitative relationship between Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ contents

提供充足的营养并达到增产效果。有机肥被认为是一种优良的土壤改良剂, 可以在提供磷的同时提高土壤磷的有效性, 从而达到提高产量的效果^[12]。20多个

长期试验结果一致发现有机肥与矿物肥料配施可使作物产量更高^[13],农家肥与化肥配施在提高作物产量的同时,还能提高土壤速效磷、速效钾和有机碳含量,并延长土壤磷素的有效性^[14-15]。粪肥主要通过影响有效氮和有效磷来影响作物产量,这占作物产量变化的64%^[16]。

合理配施粪肥,是维持土壤肥力和农业绿色生产的重要举措之一,施用粪肥可以增强微量元素的可利用性^[17],还可以通过矿化提供营养物质供植物吸收利用^[18]。从表2可以看出,配施液体牛粪能够提高玉米各器官的磷含量,促进养分的吸收利用。有研究表明粪肥投入比例的增加可以显著提高植物不同部位的磷含量,提高地上磷的吸收^[19]。从图3可以看出,配施液体牛粪处理的植物各器官磷素积累量有所提高,磷素的总积累量均高于F处理,可见化肥配施粪肥能够提高肥料利用效率^[20],使作物产量和秸秆生物量增加,获得更高和更稳定的产量^[16]。粪便对作物产量有积极的残留影响^[21],在前期只有一部分粪肥可供植物利用,所以其残留效应可维持作物产量水平数年^[22]。由于残留养分的可利用性,作物对粪肥的产量反应可能会超过施用年份^[23],因此,长期施用粪肥的残留效应常会导致作物产量在后期增加^[24]。

3.2 液体牛粪-化肥配施对土壤磷平衡的影响

研究发现,适量配施液体牛粪可以促进玉米对磷素的吸收并降低磷素盈余,随着液体牛粪施用比例增加,磷素盈余增多,大量的磷素盈余会导致土壤磷的积累,使土壤中的磷素更容易发生淋洗损失。土壤中磷积累会增加磷饱和度,降低土壤对磷的吸收能力^[25],使表层土壤中更不稳定的磷向下运移到深层土壤^[26]。施用粪肥显著增加磷素盈余和累积,连续施用粪肥促使土壤磷素活化,促进了土壤中磷的迁移,增加磷素淋失潜能^[27]。

施肥处理各土层 Olsen-P 含量与 CK 处理相比均呈现出不同程度的增加趋势,并随着液体牛粪施用量的增加而增加。连续施用磷肥会导致土壤中不同形态磷素的积累,使土壤中各土层 Olsen-P 含量均得到相应的提高^[28],积累磷盈亏与土壤 Olsen-P 含量间呈显著正相关^[29-30]。牛粪与化肥配施主要增加了土壤无机磷组成浓度^[31],施用粪肥可促进土壤中有机磷向无机磷的转化,增加土壤中正磷酸盐的含量^[32],从而提高土壤磷素的有效性和潜在的供应能力,使 Olsen-P 含量随土层深度的增加呈下降趋势^[33]。长期施用,特别是大量施用粪肥,会导致磷素在土壤中的积

累^[34],因此适量的粪肥配施化肥是提高土壤磷素有效性和利用率的关键。

3.3 液体牛粪-化肥配施对土壤磷淋洗风险的影响

研究发现试验基地土壤磷素临界值为 $48.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,施用 $90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $120 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 液体牛粪时土壤中 Olsen-P 含量均超过磷素淋洗的临界值。所有土壤类型的 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间都存在一个临界值点,不同类型土壤的临界值差异很大,通过研究全国 13 个地区的 10 种土壤类型,得出 23 个不同地区及土壤类型的土壤磷素淋洗临界值,发现 Olsen-P 的临界值点在 $29.96 \sim 156.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,对应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 在 $0.14 \sim 3.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[35]。国内外文献统计报道的 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的变化点在 $17.7 \sim 156.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[11,36-39]。有研究发现哈尔滨黑土土壤磷素淋洗的临界值为 $51.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[40],与本试验研究结果相近。不同地区及类型的土壤临界值差异很大,确定磷素的临界水平对于推荐农民最佳施肥量具有重要意义。

土壤磷素吸附饱和度值越大,土壤磷素淋洗的临界值则越低,发生土壤磷素淋失的风险就越大^[41]。酸性土壤的临界值明显高于中性和石灰性土壤,并且在临界值以上 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的增幅更大,表明在酸性土壤中,一旦 Olsen-P 超过临界值,造成磷流失的风险将极大增加^[40],本研究土壤为偏酸性土,因此土壤磷素的临界值偏大。由于土壤对磷素的强吸附作用^[42],施用磷肥后大部分磷素留在了土壤耕层,过量施肥会使土壤 Olsen-P 含量超过磷素淋洗的临界值,导致磷素淋溶至下层土壤,增加土壤磷流失的风险^[43]。本研究结果表明,当施用粪肥超过 $90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时就会造成磷素淋失的风险。土壤 Olsen-P 临界值的确定是制定合理的磷肥施肥建议、保障环境安全和作物生产的重要基础。

4 结论

(1) 化肥配施 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 液体牛粪时玉米各器官磷素吸收量最高,配施 $120 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 液体牛粪时玉米产量、土壤 Olsen-P 含量最高,表明配施液体牛粪能够提高玉米的产量和土壤 Olsen-P 含量,增强玉米磷吸收和土壤磷的利用效率。

(2) 本研究土壤的磷素临界值为 $48.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,当液体牛粪施用量超过 $90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤中 Olsen-P 含量均超过磷素淋洗的临界值,土壤磷素淋失风险增加。配施牛粪处理的磷素迁移量显著高于单施化肥处理,土壤磷素的淋失风险增加。

(3)施用 $60\sim 90\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 液体牛粪处理能够在提高作物产量的同时满足作物养分吸收,在降低土壤磷素盈余的同时减少磷素淋洗带来的磷素损失。

参考文献:

- [1] GILBERT N. Environment: The disappearing nutrient[J]. *Nature*, 2009, 461(7265):716–718.
- [2] GUO S, PAN J, ZHAI L, et al. The reactive nitrogen loss and GHG emissions from a maize system after a long-term livestock manure incorporation in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720:137558.
- [3] SHARMA S B, SAYYED R Z, TRIVEDI M H, et al. Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils[J]. *Springer Plus*, 2013, 2(1):1–14.
- [4] ZHOU K, SUI Y, LIU X, et al. Crop rotation with nine-year continuous cattle manure addition restores farmland productivity of artificially eroded Mollisols in northeast China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 171:138–145.
- [5] CHADWICK D, JIA W, TONG Y A, et al. Improving manure nutrient management towards sustainable agricultural intensification in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209:34–46.
- [6] DAI X, LI Y, OUYANG Z, et al. Organic manure as an alternative to crop residues for no-tillage wheat–maize systems in North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2013, 149:141–148.
- [7] 申艳, 段英华, 黄绍敏, 等. 潮土 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量对磷肥施用的响应及其淋失风险分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1689–1696. SHEN Y, DUAN Y H, HUANG S M, et al. Response of $\text{CaCl}_2\text{-P}$ to phosphorus fertilization and leaching risk in fluvo-aquic soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6):1689–1696.
- [8] HESKETH N, BROOKES P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):105–110.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 495. BAO S D. Soil agriculture chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:495.
- [10] 伍大利. 滴灌施肥对春玉米产量、养分水分利用效率及根系分布的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. WU D L. Effects of drip irrigation and fertilization on yield, nutrient water use efficiency and root distribution of spring maize[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [11] HUA K, ZHANG W, GUO Z, et al. Evaluating crop response and environmental impact of the accumulation of phosphorus due to long-term manuring of vertisol soil in northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 219:101–110.
- [12] SMITH L E D, SICILIANO G. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209:15–25.
- [13] EL SHEIKHA A. Mixing manure with chemical fertilizers, why? and what is after?[J]. *Nutr Food Technol*, 2016, 2(1):1–5.
- [14] DIACONO M, MONTEMURRO F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility[M]. Dordrecht: Springer, 2011:761–786.
- [15] ZHAO Y, WANG P, LI J, et al. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat–maize cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(1):36–42.
- [16] CAI A, ZHANG W, XU M, et al. Soil fertility and crop yield after manure addition to acidic soils in south China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 111(1):61–72.
- [17] SCHOENAU J J. Benefits of long-term application of manure[J]. *Advances in Pork Production*, 2006, 17:153.
- [18] CAI A, XU H, SHAO X, et al. Carbon and nitrogen mineralization in relation to soil particle-size fractions after 32 years of chemical and manure application in a continuous maize cropping system[J]. *PLoS One*, 2016, 11(3):e0152521.
- [19] XIN X, QIN S, ZHANG J, et al. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long-term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat–maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 208:27–33.
- [20] XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of southern China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(10):1245–1252.
- [21] RAMAMURTHY V, SHIVASHANKAR K. Residual effect of organic matter and phosphorus on growth, yield and quality of maize (*Zea mays*)[J]. *Indian Journal of Agronomy*, 1996, 41(2):247–251.
- [22] DEMELASH N, BAYU W, TESFAYE S, et al. Current and residual effects of compost and inorganic fertilizer on wheat and soil chemical properties[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 100(3):357–367.
- [23] EGHBALL B, GINTING D, GILLEY J E. Residual effects of manure and compost applications on corn production and soil properties[J]. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*, 2004, 96(2):442–447.
- [24] XUN W, XIONG W, HUANG T, et al. Swine manure and quicklime have different impacts on chemical properties and composition of bacterial communities of an acidic soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100:38–44.
- [25] ABBOUD F Y, FAVARETTO N, MOTTA A C V, et al. Phosphorus mobility and degree of saturation in oxisol under no-tillage after long-term dairy liquid manure application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177:45–53.
- [26] QIN X, GUO S, ZHAI L, et al. How long-term excessive manure application affects soil phosphorous species and risk of phosphorous loss in fluvo-aquic soil[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266:115304.
- [27] 王敏锋, 严正娟, 陈硕, 等. 施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7):1351–1359. WANG M F, YAN Z J, CHEN S, et al. Effects of manure and biogas slurry applications on phosphorus accumulation and mobility in organic vegetable soil under greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7):1351–1359.

- [28] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬, 等. 连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 218–224. LI X L, HOU X Y, MU H B, et al. P fertilization effects on the accumulation, transformation and availability of soil phosphorus[J]. *Acta Prata-culturae Sinica*, 2015, 24(8): 218–224.
- [29] 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.
- [30] AKHTAR K, WANG W, REN G, et al. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guanzhong, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 182: 94–102.
- [31] MCDOWELL R W, STEWART I. An improved technique for the determination of organic phosphorus in sediments and soils by ^{31}P nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. *Chemistry and Ecology*, 2005, 21(1): 11–22.
- [32] YAN Z, CHEN S, LI J, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 26–35.
- [33] KHAN A, LU G, AYAZ M, et al. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 256: 1–11.
- [34] 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.
- [35] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国23个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2275–2280. ZHONG X Y, ZHAO X R, BAO H J, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2275–2280.
- [36] MCDOWELL R, TRUDGILL S. Variation of phosphorus loss from a small catchment in south Devon, UK[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 79(2/3): 143–157.
- [37] ZHAO X, ZHONG X, BAO H, et al. Relating soil P concentrations at which P movement occurs to soil properties in Chinese agricultural soils[J]. *Geoderma*, 2007, 142(3/4): 237–244.
- [38] WANG R, GUO S, LI N, et al. Phosphorus accumulation and sorption in calcareous soil under long-term fertilization[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0135160.
- [39] LIANG L Z, SHEN R F, YI X Y, et al. The phosphorus requirement of *Amaranthus mangostanus* L. exceeds the ‘change point’ of P loss[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25(2): 152–158.
- [40] BAI Z, LI H, YANG X, 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): 27–37.
- [41] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期定位施肥对土壤磷素吸持特性与淋失突变点影响的研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1187–1194. QI R S, DANG T H, YANG S Q, et al. The impact on soil phosphorus adsorption characteristics and leaching change-point under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5): 1187–1194.
- [42] 严正娟, 陈硕, 周怀平, 等. 施用粪肥对农田土壤磷素累积和饱和度增加速率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1110–1118. YAN Z J, CHEN S, ZHOU H P, et al. Effects of manure applications on rates of phosphorus accumulation and phosphorus saturation degree increase in arable soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1110–1118.
- [43] LIU X P, BI Q F, QIU L L, et al. Increased risk of phosphorus and metal leaching from paddy soils after excessive manure application: Insights from a mesocosm study[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 778–785.

(责任编辑: 宋潇)