

稻麦轮作农田有机无机肥配施下磷平衡研究

于云飞, 汪玉, 李爽, 陈光蕾, 赵洪猛, 赵旭, 王慎强

引用本文:

于云飞, 汪玉, 李爽, 陈光蕾, 赵洪猛, 赵旭, 王慎强. 稻麦轮作农田有机无机肥配施下磷平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1554–1562.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1184>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究

姚金玲, 张克强, 郭海刚, 王凤, 张贵龙, 任天志

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2287–2296 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0537>

渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 124–133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0827>

不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究

杨坤宇, 王美慧, 王毅, 尹黎明, 李勇, 吴金水

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1723–1734 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0609>

沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究

周炜, 孙国峰, 王鑫, 童红玉, 盛婧

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1743–1750 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1614>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

于云飞, 汪玉, 李爽, 等. 稻麦轮作农田有机无机肥配施下磷平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1554–1562.

YU Y F, WANG Y, LI S, et al. Phosphorus surplus under organic fertilizer substitution in a rice–wheat rotation system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1554–1562.

稻麦轮作农田有机无机肥配施下磷平衡研究

于云飞^{1,2}, 汪玉^{1,2*}, 李爽^{1,2}, 陈光蕾¹, 赵洪猛¹, 赵旭^{1,2}, 王慎强^{1,2*}

(1. 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为探究太湖流域稻麦轮作农田有机无机肥不同配施方式下的磷平衡,通过控氮控磷(4 a)和控氮不控磷(24 a)两种配施方式的田间定位试验,分析稻麦产量及磷吸收量、土壤磷含量、径流磷损失以及磷平衡。控氮控磷试验设有6个处理:不施磷肥(CK),单施化肥(CF),有机无机肥配施中包括商品肥OM、猪粪PM、鸡粪CM及牛粪DM(均为有机肥等氮磷钾替代30%化学磷肥);控氮不控磷试验设有3个处理:不施磷肥(CK)、单施化肥(CF)、猪粪有机无机肥配施(PM),配施方式为有机肥仅等氮替代稻季40%和麦季50%化学氮肥。结果表明:相较CF处理,控氮控磷配施方式各处理稻麦周年磷素略有盈余,径流磷损失量无显著性差异,CF、OM、PM、CM、DM磷平衡(以P计)分别为-0.76、2.29、4.58、4.40、8.54 kg·hm⁻²,径流磷损失量为0.08~0.15 kg·hm⁻²;控氮不控磷配施方式PM稻麦周年磷平衡及径流磷损失量显著提高3.41倍和50.4倍,CF和PM磷盈余量分别为26.7、118 kg·hm⁻²,径流磷损失量分别为0.10、5.14 kg·hm⁻²。相较控氮控磷,控氮不控磷配施的磷盈余及径流磷损失量均大幅增加。综上表明,有机无机肥总投入量过高会导致土壤磷大量盈余,极大增加磷损失的环境风险。因此,施用有机肥的同时应考虑控制氮磷施入量,有机肥部分替代化肥养分等量控制是可行的有机无机肥配施方式。

关键词:有机无机肥配施;稻麦轮作;作物产量;磷损失;磷平衡

中图分类号:S147 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)07-1554-09 doi:10.11654/jaes.2022-1184

Phosphorus surplus under organic fertilizer substitution in a rice–wheat rotation system

YU Yunfei^{1,2}, WANG Yu^{1,2*}, LI Shuang^{1,2}, CHEN Guanglei¹, ZHAO Hongmeng¹, ZHAO Xu^{1,2}, WANG Shenqiang^{1,2*}

(1. Changshu National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Suitable organic fertilizer substitutions for crop yield, phosphorus uptake, soil nutrient content, runoff loss, and phosphorus surplus in paddy soil was studied. Field experiments included partial organic substitution for chemical N and P (4th-yr) and partial organic substitution for chemical N (24th-yr). The treatments with partial organic substitution for chemical N and P included no phosphate fertilizer (CK), chemical fertilizer (CF), commercial organic fertilizer (OM), pig manure (PM), chicken manure (CM) and cow manure substitution (DM); the treatments with partial organic substitution for chemical N included no fertilizer (CK), chemical fertilizer (CF), and pig manure substitution (PM). The principal findings were that the partial organic substitution for chemical N resulted in a significantly higher runoff phosphorus loss and phosphorus surplus. In the treatment with partial organic substitution for chemical N and P, the annual P loss of runoff was 0.08–0.15 kg·hm⁻², and no significant differences in organic replacement treatments compared with chemical fertilizer were observed.

收稿日期:2022-11-19 录用日期:2023-02-22

作者简介:于云飞(1997—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事农田土壤磷循环及环境效应研究。E-mail:yuyunfei@issas.ac.cn

*通信作者:王慎强 E-mail:sqwang@issas.ac.cn; 汪玉 E-mail:wangyu@issas.ac.cn

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(NMKJXM202009);国家自然科学基金项目(42277026);长江生态环境保护修复联合研究二期项目(2022-LHYJ-02-0502-05)

Project supported: The Key Science and Technology Project of Inner Mongolia Autonomous Region (NMKJXM202009); The National Natural Science Foundation of China (42277026); Yangtze River Ecological Environment Protection and Restoration Project II (2022-LHYJ-02-0502-05)

The annual P balance of CF, OM, PM, CM, and DM was -0.76 , 2.29 , 4.58 , 4.40 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and 8.54 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. In the treatment with partial organic substitution for chemical N, compared with chemical fertilizer, the annual runoff P loss and P surplus were significantly increased by 50.4 fold and 3.41 fold; the runoff P loss P of PM and CF was 5.14 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 0.10 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the P balance was 118 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 26.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Concurrently, the wheat yield, soil available phosphorus, and total phosphorus content were significantly increased. Our results indicate that excess P input through organic fertilizer would lead to P surplus and potential environmental risk. Therefore, partial replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer should control the input of nitrogen and phosphorus.

Keywords: organic fertilizer substitution; rice-wheat rotation; crop yield; phosphorus loss; phosphorus balance

磷素是作物生长必需的大量营养元素,也是限制作物产量的主要因子,施用磷肥对维持土壤有效磷库和作物产量具有重要意义。然而,由于磷素易被土壤矿物吸附固定,大量的磷肥施用既造成资源浪费,也会加大环境污染风险^[1-3]。调查表明太湖流域稻麦轮作农田化学磷肥施用量(以 P_2O_5 计)高达每年 120 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,超出作物营养需求^[4],造成土壤速效磷过量累积,其中65.2%的农田土壤有效磷高于 20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而引起该区域环境风险的土壤有效磷阈值为 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[5]。畜禽粪便是有效的替代磷源,近年来畜禽粪便作为有机肥部分替代化肥被认为是可以减少化肥投入、降低农田磷流失风险的有效措施^[6]。据调查,我国畜禽粪尿有机废弃物资源年产生量达38亿t,其中 P_2O_5 含量可达1 100万t^[7]。因此,提高畜禽粪尿有机物料还田率,推广有机肥替代化学磷肥对减磷增效和农业绿色发展具有重要意义。然而,如何科学合理地配施有机无机肥以提高资源利用效率和作物产量仍需进一步探讨。

不同的有机无机肥配施方式对作物产量有积极影响,但也可能存在一定的环境风险。李圆宾等^[8]通过整合分析稻麦轮作体系下有机肥配施方式对作物产量的影响,表明有机肥配施能使稻麦分别显著增产3.1%和3.0%,土壤有机质、全氮、全磷和有效磷等养分含量增幅11.7%~38.4%;黄晶等^[9]的长期定位试验表明,有机肥在等氮替代无机氮肥条件下,没有显著增加水稻产量,但显著提高了土壤磷素累积,磷素年均盈余量是等氮量无机氮肥处理的2.59倍。也有研究表明^[10],畜禽有机粪肥含磷量高,等氮量的有机粪肥处理相比于化学肥料造成农田磷损失增加45%~237%,仅控制等氮量的有机肥投入容易引发环境污染问题。因此,控制农田磷投入是降低土壤磷持续累积和从源头减少农田面源污染的重要举措,通过养分平衡法来评价不同有机无机肥配施方式下农田磷养分的盈亏,可以为养分优化管理及环境风险评估提供理论依据。

本研究以太湖流域田间定位试验为研究对象,比较两种有机无机肥配施方式——控氮控磷(4 a)及控氮不控磷(24 a)处理下农田磷盈亏状况,及其对作物产量、磷吸收、磷损失和土壤磷养分含量等的影响,以期对稻麦轮作农田有机肥施用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验依托常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站($31^{\circ}33' \text{N}$, $120^{\circ}42' \text{E}$,实验始于1998年)和常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站宜兴基地($31^{\circ}16' \text{N}$, $119^{\circ}54' \text{E}$,实验始于2018年)。两地都位于太湖流域,同属亚热带季风湿润气候,年平均温度 17°C ,年平均降水量 $1\ 200$ mm,为典型的稻麦轮作区,土壤均为湖积物母质发育的水稻土。常熟0~20 cm耕层土壤基本理化性质(1997年测定)为:有机碳 10.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 1.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总磷 0.54 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 9.41 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。宜兴0~20 cm耕层土壤基本理化性质(2018年测定)为:有机碳 9.10 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 0.94 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总磷 0.46 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 15.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水稻品种均为南粳48号,小麦品种为杨麦16号。

1.2 试验设计

常熟试验田为控氮不控磷有机无机肥配施(有机肥替代稻季40%和麦季50%的化学氮肥,不考虑有机肥带入的磷、钾等养分),小区面积 4 m^2 ,包括3个处理:不施肥(CK)、单施化肥(CF)、猪粪有机肥与无机肥配施(PM)。宜兴试验田为控氮控磷有机无机肥配施(有机肥替代30%化学磷肥,氮、磷、钾的总养分投入相同),小区面积为 60 m^2 ,包括6个处理:不施磷肥(CK)、单施化肥(CF)、商品有机肥与无机肥配施(OM)、猪粪有机肥与无机肥配施(PM)、鸡粪有机肥与无机肥配施(CM)、牛粪有机肥与无机肥配施(DM)。所有处理均设置3个重复,各小区采用完全随机排列。

所有试验处理的施肥量见表1,试验所需无机肥

表1 两种有机无机肥配施方式下化学肥料和有机肥料养分施用量
Table 1 Organic fertilizer and chemical fertilizer inputs in the field experiments

控氮控磷配施 Partial organic substitution for chemical N and P					控氮不控磷配施 Partial organic substitution for chemical N				
作物 Crop	处理 Treatment	施肥量 Fertilizer(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)/(kg·hm ⁻²)			作物 Crop	处理 Treatment	施肥量 Fertilizer(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)/(kg·hm ⁻²)		
		化肥 Chemical fertilizer	有机肥 Organic fertilizer	合计 Total			化肥 Chemical fertilizer	有机肥 Organic fertilizer	合计 Total
稻季同 麦季 Rice and wheat	CK	240-0-60	0	240-0-60	稻季 Rice	CK	0	0	0
	CF	240-60-60	0	240-60-60	麦季 Wheat	CF	375-75-150	0	375-75-150
	OM	227-42-51	13-18-9	240-60-60		PM	225-45-90	150-185-115	375-230-205
	PM	233-42-45	7-18-15	240-60-60		CK	0	0	0
	CM	225-42-49	15-18-11	240-60-60		CF	300-120-120	0	300-120-120
	DM	230-42-54	10-18-6	240-60-60		PM	150-60-60	150-185-115	300-245-175

为氮(尿素,46% N)、磷(过磷酸钙,12% P₂O₅)、钾(氯化钾,60% K₂O),有机肥采用当地生产的不同类型有机肥料,每季经测定养分含量后计算施用的实物量。氮肥每季按照30%基肥、40%分蘖追肥和30%拔节追肥施用,有机肥同钾肥和磷肥作基肥一次性施用。田间管理均按照当地农业生产实践进行。

1.3 样品采集与测定方法

样品采集于2021—2022年稻麦轮作周期,每季作物种植前取有机肥样品和水稻移栽幼苗/小麦种子,分别烘干测定含水率和全磷含量;各小区单打单收计产,取部分秸秆和籽粒鲜样烘干测定含水率后再测定全磷含量;采用S型布点法对小区内随机取点,采集0~20 cm耕层土壤,混合均匀,风干、研磨后过20目筛测定土壤有效磷含量,过100目筛测定土壤总磷含量;两地农田灌溉水于首次灌溉时采集,径流样品通过径流池收集并分别于2021-09-25、2022-04-27(宜兴)和2021-07-05、2021-08-09、2021-11-28(常熟)采集,过定量滤纸后测定全磷浓度。

样品测定参照《土壤农业化学分析方法》^[11]。有机肥和作物全磷采用硫酸-过氧化氢消煮-钼锑抗比色法测定;土壤有效磷采用碳酸氢钠(pH=8.5)浸提-钼锑抗比色法测定;土壤总磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定;径流及灌溉水总磷采用流动分析仪(Skala,荷兰)消煮测定。

1.4 磷平衡计算方法

磷平衡作为衡量农田磷素投入与产出的一种方法^[12-14],在国内外已被广泛应用^[15-18]。本研究以稻麦轮作小区为研究对象,对有关农田输入与输出的磷量分别进行测算,并合算输入与输出的差值得到磷平衡值。磷平衡(kg·hm⁻²,以P计)正值表示磷盈余,负值表示磷亏缺:

磷平衡=磷输入量-磷输出量

磷输入量=肥料磷+水稻秧苗/小麦种子磷+灌溉水磷

磷输出量=作物吸磷量+径流损失磷量

灌溉水磷=灌溉水总量×灌溉水总磷浓度

作物吸磷量=秸秆生物量×秸秆全磷含量+籽粒生物量×籽粒全磷含量

径流损失磷量=径流总量×径流总磷浓度

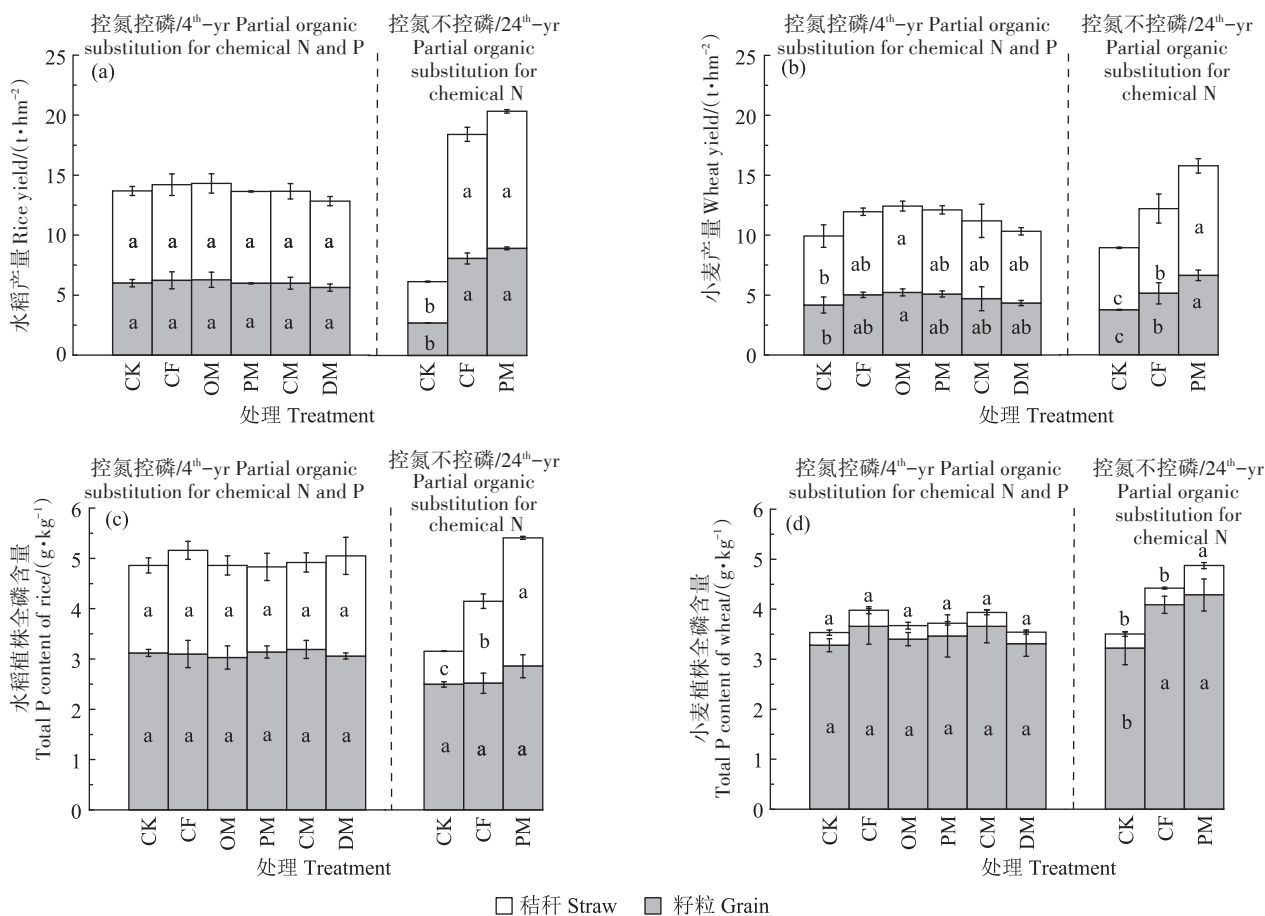
1.5 数据处理

利用Microsoft Excel 2020软件进行数据整理,用SPSS 24.0软件进行不同处理间各指标的单因素方差分析并选择Duncan法($P<0.05$)进行多重比较,采用Origin 2022软件进行数据可视化。

2 结果与分析

2.1 两种有机无机肥配施对稻麦产量及磷吸收的影响

不同处理稻麦籽粒与秸秆产量及全磷含量如图1所示。控氮控磷有机无机肥配施相较于CF处理,稻麦产量均无显著差异($P>0.05$),但OM处理有增加稻麦产量的趋势,施肥第4年OM处理稻、麦籽粒产量高于CF处理(6.23 t·hm⁻²和5.02 t·hm⁻²),达到6.28 t·hm⁻²和5.22 t·hm⁻²。控氮不控磷有机无机肥配施处理中,施肥第24年PM处理相比于CF处理水稻产量无显著差异($P>0.05$),但小麦产量显著($P<0.05$)增加29.2%,小麦籽粒和秸秆产量分别为6.63 t·hm⁻²和9.14 t·hm⁻²。控氮控磷各处理中稻麦籽粒与秸秆全磷含量无显著差异($P>0.05$),全磷含量范围分别为3.03~3.19 g·kg⁻¹(稻季籽粒)和1.69~2.06 g·kg⁻¹(稻季秸秆),3.28~3.66 g·kg⁻¹(小麦籽粒)和0.23~0.32 g·kg⁻¹(小麦秸秆)。控氮不控磷下PM处理稻麦籽粒全磷含量稍高于CF处理但差异不显著($P>0.05$),稻、麦



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

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

图1 两种有机无机肥配施方式下稻麦地上部生物量和全磷含量

Figure 1 Aboveground biomass and total phosphorus content of crops under different organic substitution treatments

秸秆全磷含量显著高于CF处理56.5%和77.4% ($P<0.05$)。

2.2 两种有机无机肥配施对土壤磷养分含量的影响

土壤有效磷和总磷含量在不同的有机无机肥配施方式下的变化趋势不同(表2)。控氮控磷下各有机无机肥配施处理土壤有效磷及总磷含量较CF处理均无显著差异($P>0.05$),稻季土壤有效磷含量为15.7~19.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷含量为0.48~0.51 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,麦季有效磷含量为18.0~24.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷含量为0.46~0.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。控氮不控磷下,PM处理土壤有效磷和总磷含量均显著高于CF处理($P<0.05$),稻季有效磷和总磷含量分别高达132.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和2.03 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为CF处理的2.70倍和1.80倍,麦季有效磷和总磷含量增至175.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和2.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比CF处理高2.15倍和1.75倍。

2.3 两种有机无机肥配施对农田径流磷损失的影响

不同有机无机肥配施方式对稻麦轮作农田径流总磷浓度的影响有很大差异(图2)。在控氮控磷条

件下,各处理稻麦季农田径流总磷浓度无显著差异($P>0.05$),CK、CF、OM、PM、CM和DM水稻季径流总磷平均浓度依次为0.025、0.062、0.058、0.046、0.045 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.029 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,小麦季依次为0.027、0.031、0.027、0.038、0.030 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.026 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在控氮不控磷条件下,PM处理稻麦季径流总磷平均浓度均显著高于CF处理($P<0.05$),其中水稻季径流总磷平均浓度为2.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,小麦季径流总磷平均浓度为0.68 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比CF处理分别高出72.2倍和20.8倍。

2.4 两种有机无机肥配施对稻麦轮作农田磷平衡的影响

表3统计了稻麦轮作农田磷的输入与输出指标,可以看到磷的输入主要为有机无机肥料,水稻秧苗、小麦种子及灌溉水带入量较少,磷的输出主要为稻麦籽粒、秸秆带走和少量径流。控氮不控磷有机无机肥配施下,PM处理肥料带入的磷量远高于CF处理,稻、麦季分别达到100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和107 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。磷的输出

表2 两种有机无机肥配施方式下稻麦季土壤磷含量
Table 2 Soil phosphorus content under different organic substitution treatments

有机无机配施方式 Condition	处理 Treatment	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)		总磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	
		稻季 Rice	麦季 Wheat	稻季 Rice	麦季 Wheat
控氮控磷 Partial organic substitution for chemical N and P	CK	9.28±0.19b	9.47±2.52b	0.42±0.03b	0.37±0.01b
	CF	17.6±2.64a	24.8±7.12a	0.48±0.02a	0.50±0.05a
	OM	19.4±2.29a	21.1±2.51a	0.51±0.04a	0.49±0.03a
	PM	17.4±2.48a	20.2±4.37a	0.49±0.01a	0.48±0.03a
	CM	15.7±3.54a	18.9±4.20a	0.48±0.02a	0.46±0.05a
	DM	18.0±5.37a	18.0±3.24a	0.48±0.03a	0.46±0.03a
控氮不控磷 Partial organic substitution for chemical N	CK	2.83±0.12c	2.42±0.05c	0.40±0.01c	0.38±0.01c
	CF	35.8±4.31b	55.9±7.40b	0.72±0.02b	0.85±0.05b
	PM	132.3±21.3a	175.9±9.43a	2.03±0.24a	2.33±0.47a

注:表中数据为平均值±标准误,数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: The data in the table are represented with mean ± standard error, different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$). The same below.

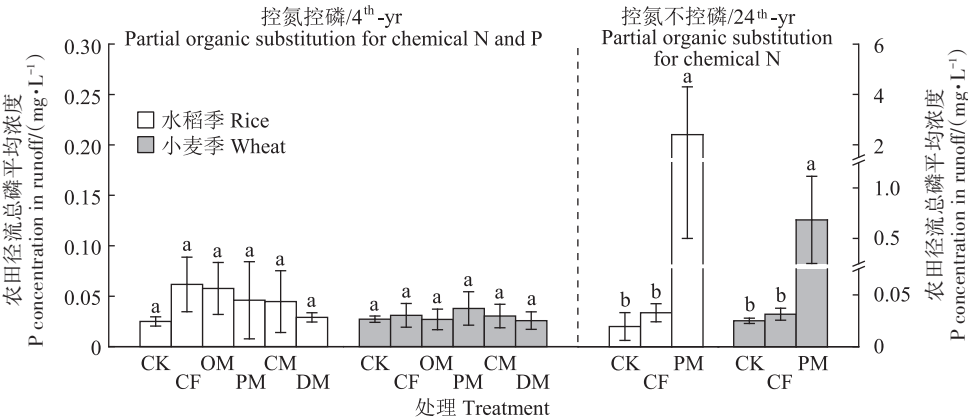


图2 两种有机无机肥配施方式下稻麦轮作农田径流总磷浓度
Figure 2 Average concentration of total phosphorus in runoff under different organic substitution treatments

主要取决于稻麦地上部生物吸收量,控氮控磷有机无机肥配施下,OM、PM和CM处理稻麦地上部吸磷量与CF处理无显著差异($P>0.05$),而DM处理则显著低于CF处理($P<0.05$);控氮不控磷配施中,PM处理稻麦吸磷量均显著高于CF处理($P<0.05$)。径流磷流失量在控氮控磷条件下各处理无显著差异($P>0.05$),其中稻季磷流失量为0.05~0.11 kg·hm⁻²,麦季磷流失量为0.03~0.05 kg·hm⁻²;控氮不控磷条件下,PM相较于CF处理稻麦季累计径流磷流失量高达5.14 kg·hm⁻²,为CF处理的50.4倍。

图3为不同有机无机肥配施下稻麦轮作农田磷平衡状况。控氮不控磷条件下PM处理稻、麦季磷平衡均表现为盈余状态,分别达44.4 kg·hm⁻²和73.4 kg·hm⁻²,显著高于CF处理($P<0.05$);而稻麦周年PM处理磷盈余量为118 kg·hm⁻²,比CF处理高3.41倍。控

氮控磷条件下各配施处理稻季磷平衡与CF处理无显著差异($P>0.05$),均表现为略亏缺状态;OM、PM、CM、DM处理麦季磷盈余量比CF处理分别提高14.1%、18.8%、26.0%和75.2%,均处于磷盈余状态;稻麦周年磷平衡OM、PM、CM和DM处理均略有盈余。

3 讨论

磷平衡分析是评价农田磷养分管理可持续性的重要依据,也可为环境风险评估提供重要参考^[19-20]。科学合理地减施化学肥料并保证作物高产稳产,维持土壤充足养分又不至于过量盈余,降低面源污染风险及优化资源配施,是有机无机肥配施可持续应用的原则。本研究表明,控氮控磷各有机无机肥配施处理中土壤磷均略有盈余,年盈余量为2.29~8.55 kg·hm⁻²,而控氮不控磷有机无机肥配施下磷年盈余量高达

表 3 两种有机无机肥配施方式下各处理稻麦季磷的输入与输出量(kg·hm⁻²)

Table 3 Input and output of phosphorus in rice and wheat season under different organic substitution treatments(kg·hm⁻²)

有机无机肥 配施方式 Condition	时间 Time	处理 Treatment	磷输入 Input				磷输出 Output			
			肥料 Fertilizer	秧苗/种子 Seedlings/seeds	灌溉水 Irrigation water	合计 Amount	籽粒 Grain	秸秆 Straw	径流 Runoff	合计 Amount
控氮控磷 Partial organic substitution for chemical N and P	稻季 Rice	CK	0	2.53	0.06	2.59	18.7±0.85a	13.4±1.79a	0.05±0.01a	32.2
		CF	26.2			28.8	19.4±3.35a	16.5±3.24a	0.11±0.05a	36.0
		OM	26.2			28.8	19.1±3.25a	14.6±0.21a	0.10±0.05a	33.8
		PM	26.2			28.8	18.8±0.77a	13.0±1.99a	0.08±0.07a	31.8
		CM	26.2			28.8	19.1±0.88a	13.3±2.46a	0.08±0.06a	32.5
		DM	26.2			28.8	17.2±0.94a	14.2±1.92a	0.05±0.01a	31.5
	麦季 Wheat	CK	0	0.87	0	0.87	13.7±2.26c	1.44±0.40b	0.03±0.01a	15.1
		CF	26.2			27.1	18.3±1.59a	2.23±0.39a	0.04±0.01a	20.6
		OM	26.2			27.1	17.7±0.35ab	1.93±0.37ab	0.03±0.01a	19.7
		PM	26.2			27.1	17.6±1.56ab	1.78±0.21ab	0.05±0.02a	19.4
		CM	26.2			27.1	17.1±2.98ab	1.82±0.62ab	0.04±0.01a	18.9
		DM	26.2			27.1	14.3±0.59bc	1.39±0.26b	0.03±0.01a	15.7
控氮不控磷 Partial organic substitution for chemical N	稻季 Rice	CK	0	2.53	0.06	2.59	6.99±0.17c	2.28±0.03c	0.04±0.02b	9.3
		CF	32.8			35.3	21.6±1.66b	16.9±2.20b	0.06±0.02b	38.6
		PM	100			103	25.1±0.54a	29.1±0.19a	4.32±3.42a	58.6
	麦季 Wheat	CK	0	0.87	0	0.87	12.1±1.30c	1.47±0.23c	0.03±0.01b	13.6
		CF	52.4			53.3	21.0±3.79b	2.34±0.32b	0.04±0.01b	23.3
		PM	107			108	28.3±0.28a	5.36±0.28a	0.82±0.52a	34.5

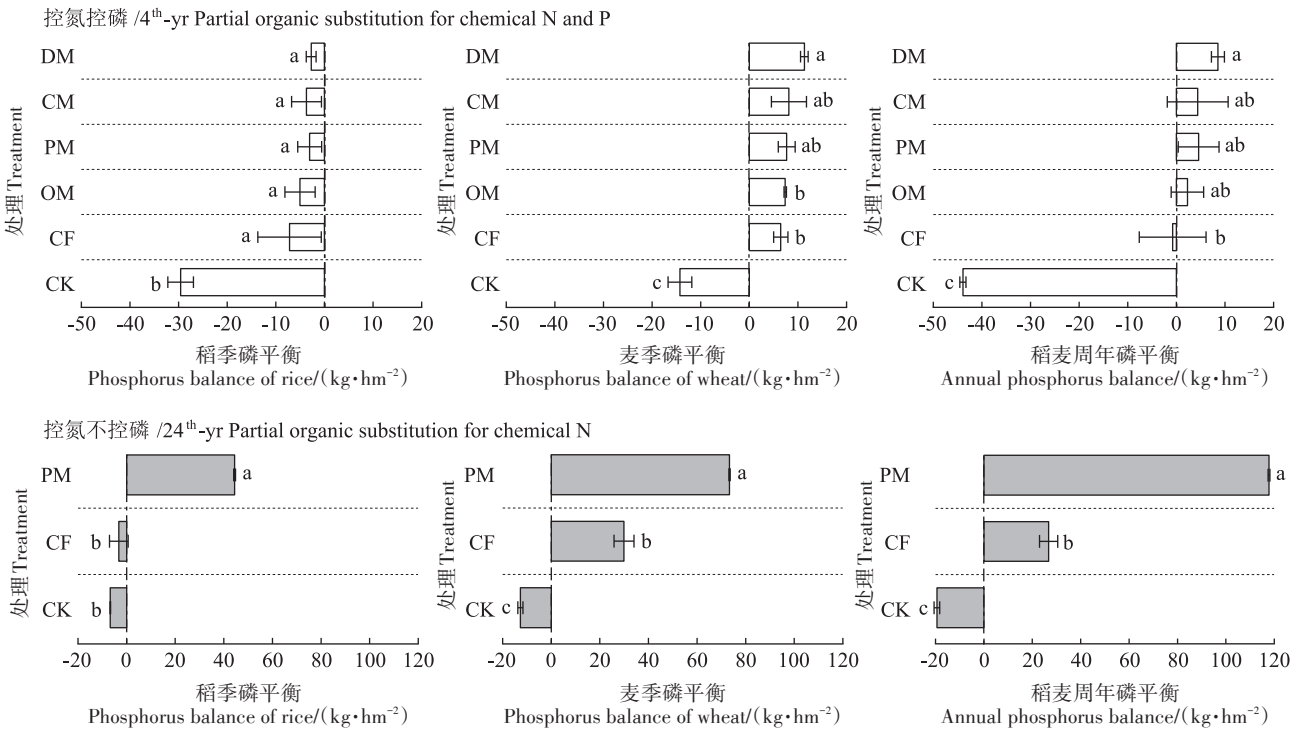


图 3 两种有机无机配施方式下稻麦轮作农田磷平衡

Figure 3 Soil phosphorus balance of rice–wheat rotation cropland under different organic substitution treatments

118 kg·hm⁻²。依据不同配施方式下各处理磷的输入与输出量(表 3),控氮不控磷有机无机肥配施带入的肥料磷是控氮控磷的 3.96 倍,而二者磷的输出量基本稳定在同一范围。因此,控氮控磷各有机无机肥配施

处理均能使土壤磷平衡处于略盈余状态,而控氮不控磷有机无机肥配施与控氮控磷相比,大量的磷肥投入会造成土壤磷过量累积。

土壤磷素累积是土壤磷含量升高的根本原因,但土壤磷含量变化对磷素累积量的响应关系因土壤类型、土地利用方式和施肥方式等不同而存在差异。有研究表明,土壤磷每盈余 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,红壤性水稻土有效磷增加 $0.4 \sim 3.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[9],黄壤性水稻土有效磷可增加 $2.0 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21],黄壤旱地有效磷可增加 $5.6 \sim 21.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22]。本研究中两种有机无机肥配施方式下磷均有盈余,能保障作物磷吸收的持续供应,保证或提高作物产量,这与前人研究一致。李其胜等^[23]发现有机无机肥配施处理相较于单施化肥土壤有效磷和全磷含量分别提高 $25.0\% \sim 33.0\%$ 和 $14.3\% \sim 15.4\%$;任科宇等^[24]的研究表明有机肥替代与单施化肥相比水稻产量增加 $2.7\% \sim 4.7\%$;鲁伟丹等^[25]研究发现 18% 有机肥替代化学肥料可提高小麦有效分蘖,增加有效穗数,显著提高小麦产量。有机肥能提高土壤有效磷水平的原因在于,其本身含有一部分易分解释放的磷素,且带入的有机磷矿化后释放磷的过程中还会产生小分子有机酸等活性物质,从而促进土壤无机磷的溶解释放^[26-27]。另外有机肥中的磷多为有机磷或稳定性较高的磷组分,其转化为作物可利用性磷的过程相对缓慢,因此可延长肥料磷的持效性。

合理的肥料运筹对土壤供磷和作物吸磷起到调控作用,有机无机肥配施既有速效无机养分促进作物分蘖,又有缓效有机养分满足后期需求。本研究表明控氮不控磷有机无机肥配施显著提高小麦产量和稻麦秸秆磷含量,这可能与有机无机肥配施改善作物叶片光合性能、促进籽粒灌浆有关^[28-29]。但相比于控氮控磷,控氮不控磷有机无机肥配施能大幅增加土壤有效磷和全磷含量达 $176 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,远超作物正常生长发育所需的土壤磷水平。从磷平衡角度考虑,磷肥投入量应与作物吸收带走量基本持平,而土壤磷素的适度盈余有助于提升土壤肥力。因此,控氮控磷有机无机肥配施可达到提升土壤肥力和作物产量的目的且不会造成过量磷累积。

土壤磷素过量累积是造成农田面源污染的主要因素^[30-31]。肥料磷施入土壤后,大部分被土壤吸附固定,但随着施入量的增加,土壤磷吸附位点逐渐饱和,无法被吸附固定的磷向水体迁移^[32]。径流磷损失只占农田磷输出的小部分,但由于自然环境水体对磷素输入的敏感性,农田磷素的迁移损失易产生水环境问

题且过程复杂,目前衡量磷损失的环境风险指标还不完善^[33-34]。在本研究中,控氮控磷有机无机肥配施较单施化肥均降低了稻季径流磷损失;而控氮不控磷有机无机肥配施则显著提高了径流总磷浓度和径流磷损失量。这一结果与郭智等^[35]、马凡凡^[36]的研究结果一致。郭智等^[35]的研究表明,猪粪有机肥等氮磷部分替代化肥的减排效果较好,在不影响水稻产量的前提下可降低总磷径流流失率 23.32% ;马凡凡^[36]研究发现,等氮量猪粪有机肥替代处理磷素带入量较高,特别是有机肥作为基肥一次性施入,作物生长发育前期对磷养分吸收能力低,因此部分磷素会迅速集中地随径流流失。这表明在一定量的施用范围内,有机肥的缓释性具有抵抗径流磷损失风险的潜力^[37],从而降低径流磷损失。本研究中控氮控磷有机无机肥配施稻麦周年土壤磷平衡表现为稍有盈余,径流磷损失量低,可有效避免土壤磷素过量累积造成的资源浪费和环境风险。

磷平衡对农田磷养分管理和合理施磷具有重要意义,也可作为农田磷素损失的环境风险指标以提高环境风险评估的准确性^[38]。因此,从维持作物高产和提升土壤肥力、降低土壤养分的环境损失和表观盈余量等方面考虑,控氮控磷有机无机肥配施是更合理的有机无机肥配施方式。因试验条件限制,本研究中控氮控磷有机无机肥配施处理进行到第4年,下一步工作还需深入研究控氮控磷下不同有机肥类型及用量与化肥合理配施的长期效应。

4 结论

控氮控磷有机无机肥配施稻麦轮作周年磷平衡表现为略有盈余,且对径流磷损失无显著影响,而控氮不控磷有机无机肥配施稻麦轮作周年磷平衡及径流磷损失均大幅增加,造成农田磷面源污染风险增加。因此,在采取有机无机肥配施时应考虑控制磷投入量,避免农田土壤磷过量累积和流失,以实现作物稳产的同时,兼顾优化肥料资源利用和降低环境风险。

参考文献:

- [1] 汪玉,赵旭,王磊,等.太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J].农业环境科学学报,2014,33(5):829-835. WANG Y, ZHAO X, WANG L, et al. Accumulation, environmental risk and control of phosphorus in rice/wheat rotation farmland in Taihu Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 829-835.

- [2] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, et al. Reducing phosphorus to Curb Lake eutrophication is a success[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50:8923–8923.
- [3] JAGMANDEEP D, GUILHERME T, ETHAN D, et al. World phosphorus use efficiency in cereal crops[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(4): 1670–1677.
- [4] 王慎强, 赵旭, 邢光熹, 等. 太湖流域典型地区水稻土磷库现状及科学施磷初探[J]. 土壤, 2012, 44(3): 158–162. WANG S Q, ZHAO X, XING G X, et al. Phosphorus pool in paddy soil and scientific fertilization in typical areas of Taihu Lake watershed, China[J]. *Soils*, 2012, 44(3): 158–162.
- [5] 汪玉, 袁佳慧, 陈浩, 等. 太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1640–1649. WANG Y, YUAN J H, CHEN H, et al. Soil phosphorus pool evolution and environmental risk prediction of paddy soil in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(6): 1640–1649.
- [6] SIMON T, CZAKO A. Influence of long-term application of organic and inorganic fertilizers on soil properties[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2014, 60(7): 314–319.
- [7] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462–1479. NIU X S, JU X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1462–1479.
- [8] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3231–3239. LI Y B, LI P, WANG S H, et al. Effects of organic fertilizer application on crop yield and soil properties in rice–wheat rotation system: a meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3231–3239.
- [9] 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.
- [10] WANG L, ZHAO X, GAO J X, et al. Effects of fertilizer types on nitrogen and phosphorous loss from rice–wheat rotation system in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 285: 106605.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146–315. LU R K. Methods for soil and agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146–315.
- [12] OECD, Gross phosphorus balance handbook[DB/OL].[2022–12–15]. <http://www.oecd.org/tad/env/indicators>.
- [13] CHEN D J, HU M P, GUO Y, et al. Long-term (1980–2010) changes in cropland phosphorus budgets, use efficiency and legacy pools across townships in the Yongan watershed, eastern China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2017, 236: 166–176.
- [14] 蔡美芳, 刘晓伟, 吴孝情, 等. 基于土壤养分平衡的畜禽养殖承载力研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1431–1440. CAI M F, LIU X W, WU X Q, et al. Livestock and poultry carrying capacity of land based on soil nutrient balance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1431–1440.
- [15] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207–4229. LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [16] HAO C L, XIAO W H, ZHOU Y Y, et al. Phosphorus balance in typical rainfield of black soil region in northeast China[J]. *Geosciences Journal*, 2019, 23(4): 637–648.
- [17] O'DONNELL C, EGAN A, HARRINGTON J, et al. An overview on deficit and requirements of the Irish national soil phosphorus balance [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147251.
- [18] LIM J Y, ISLAM B M S, LEE S B, et al. Agricultural nitrogen and phosphorus balances of Korea and Japan: highest nutrient surplus among OECD member countries[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117353.
- [19] 朱芸, 廖世鹏, 刘煜, 等. 长江流域油–稻与麦–稻轮作体系周年养分收支差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 64–73. ZHU Y, LIAO S P, LIU Y, et al. Differences of annual nutrient budgets between rapeseed–rice and wheat–rice rotations in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 64–73.
- [20] 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.
- [21] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土磷平衡及农学阈值的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1903–1912. LIU Y L, LI Y, ZHANG Y R, et al. Effect of long-term fertilization on the P balance and critical value of soil Olsen-P in paddy soil from yellow earth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1903–1912.
- [22] 李渝, 刘彦伶, 张雅蓉, 等. 长期施肥条件下西南黄壤旱地有效磷对磷盈亏的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2321–2328. LI Y, LIU Y L, ZHANG Y R, et al. Response of Olsen-P to P balance in yellow soil upland of southwestern China under long-term fertilization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2321–2328.
- [23] 李其胜, 赵贺, 汪志鹏, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作土壤养分利用和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 912–919. LI Q S, ZHAO H, WANG Z P, et al. Effects of organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on nutrient utilization and soil enzyme activity in a rice–wheat cropping system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4): 912–919.
- [24] 任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 716–725. REN K Y, LU D M, ZOU H Q, et al. Effect of substituting manure for fertilizer on yield and nitrogen content of rice grain in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(4): 716–725.
- [25] 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8):

- 1330–1338. LU W D, LI J H, LUO T, et al. Effects of different organic fertilizer replacement rates on wheat yield and soil nutrients over three consecutive years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8):1330–1338.
- [26] SHARPLEY A N, MCDOWELL R W, KLEINMAN P J A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6):2048–2057.
- [27] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5):1057–1064. YU W T, JIANG Z S, MA Q, et al. Effects of application of manure on soil fertility[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(5):1057–1064.
- [28] 王秋君, 张小莉, 罗佳, 等. 不同有机无机复混肥对小麦产量、氮效率和土壤微生物多样性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5):1003–1009. WANG Q J, ZHANG X L, LUO J, et al. Effects of different organic inorganic mixed fertilizations on yield of wheat, nitrogen use efficiency and soil microbial diversity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(5):1003–1009.
- [29] 张晶, 张定一, 王丽, 等. 不同有机肥和氮磷组合对旱地小麦的增产机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1):238–243. ZHANG J, ZHANG D Y, WANG L, et al. The mechanism of different combinations of organic and N, P fertilizers increasing yield of dry-land wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1):238–243.
- [30] WANG Y, ZHAO X, WANG L, et al. Phosphorus fertilization to the wheat-growing season only in a rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198:32–39.
- [31] YAN L, XUE L H, EVANGELOS P, et al. Nutrient loss by runoff from rice-wheat rotation during wheat season is dictated by rainfall duration[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285:117382.
- [32] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷有效性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7):245–248. ZHANG Y P, CHEN Q, LI Y, et al. Effect of phosphorus levels on form and bioavailability of inorganic P in plough layer of cinnamon soil in Shandong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7):245–248.
- [33] 魏红安, 李裕元, 杨蕊, 等. 红壤磷素有效性衰减过程及磷素农业与环境学指标比较研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6):1116–1126. WEI H A, LI Y Y, YANG R, et al. The declining process of soil phosphorus availability and comparison between agronomic and environmental indexes in red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(6):1116–1126.
- [34] 杨旺鑫, 夏永秋, 姜小三, 等. 我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):319–325. YANG W X, XIA Y Q, JIANG X S, et al. Influencing factors and estimation of total phosphorus runoff from farmlands in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):319–325.
- [35] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6):21–25, 61. GUO Z, ZHOU W, CHEN L G, et al. Effects of pig manure application on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during the paddy season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6):21–25, 61.
- [36] 马凡凡. 有机肥替代对稻-麦产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2019:21–35. MA F F. Effects of organic fertilizer replacement on rice-wheat yield, soil fertilizer and nitrogen and phosphorus loss from farmland[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019:21–35.
- [37] ZHANG Y, GAO W, LUAN H, et al. Long-term organic substitution management affects soil phosphorus speciation and reduces leaching in greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 327:129464.
- [38] 林诚, 王飞, 李清华, 等. 长期不同施肥下南方黄泥田有效磷对磷盈亏的响应特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5):1175–1183. LIN C, WANG F, LI Q H, et al. Response characteristics of Olsen-P to P balance in yellow paddy fields of southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5):1175–1183.