



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响

普燕爽, 王春雪, 陈建军, 李元, 祖艳群, 张克强

引用本文:

普燕爽, 王春雪, 陈建军, 等. 牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 286–294.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0270>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洱海流域不同轮作与施肥方式对农田氮磷径流损失的影响

姚金玲, 郭海刚, 倪喜云, 王风, 郑宏艳, 杨怀钦, 杨苏树, 任天志

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 600–613 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0039>

不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征

李盟军, 艾绍英, 宁建凤, 王荣辉, 姚建武, 余丹妮

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 33–42 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0091>

不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律

王月, 房云清, 纪婧, 秦弋丰, 马瑞君, 李旭东

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 814–821 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0210>

湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征

刘方谊, 夏颖, 黄敏, 雷秋良, 刘宏斌, 范先鹏, 张富林, 吴茂前

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 550–558 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0030>

广东典型稻田系统磷素径流流失特征

宁建凤, 姚建武, 艾绍英, 李盟军, 余丹妮, 王思源, 罗英健

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 257–268 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0308>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

普燕爽, 王春雪, 陈建军, 等. 牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 286–294.

PU Yan-shuang, WANG Chun-xue, CHEN Jian-jun, et al. Effects of different rotation patterns on nitrogen and phosphorus loss in paddy fields under an optimal ratio of cow manure and fertilizer[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 286–294.



开放科学 OSID

牛粪化肥最优配比条件下 不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响

普燕爽¹, 王春雪¹, 陈建军¹, 李元^{1*}, 祖艳群¹, 张克强²

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南省农业环境污染控制与生态修复工程实验室, 昆明 650201; 2. 农业农村部大理农业环境科学观测实验站, 云南 大理 671004)

摘要:为探讨牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响,通过田间小区试验设置Y-OL(70%化肥+30%牛粪-黑麦草-水稻)、Y-OV(70%化肥+30%牛粪-紫花苜蓿-水稻)、Y-ON(70%化肥+30%牛粪-冬闲-水稻)3种轮作处理,以C-ON(100%化肥-冬闲-水稻)为对照,研究不同轮作模式下水稻产量及稻田田面水、下渗水、径流中的总氮(TN)和总磷(TP)浓度变化特征。结果表明:不同处理田面水TN浓度在施穗肥后第2 d达到峰值,TP浓度在施基肥第2 d达到峰值,且最高值均出现在Y-ON处理;C-ON和Y-ON处理下渗水TN浓度在施基肥第2 d出现峰值,Y-OL和Y-OV处理下渗水TN浓度在施穗肥后第2 d出现峰值,在整个水稻生育期Y-OV处理下渗水TP浓度整体低于其他处理;不同处理间稻田氮磷径流流失量无显著差异,稻田氮磷径流流失量与降雨量极显著相关,且降雨量最大时,各处理TN径流流失量占径流流失总量的70.24%~73.42%,TP径流流失量占径流流失总量的35.12%~42.42%;Y-OV、Y-OL、Y-ON处理TN总流失量与C-ON相比分别降低43.92%、25.21%、35.74%,Y-OL、Y-ON处理TP总流失量与C-ON相比分别显著上升66.67%、13.13%,Y-OV处理TP总流失量与C-ON无显著差异;Y-OV、Y-OL、Y-ON各处理水稻产量与C-ON相比无显著差异。研究表明,70%化肥+30%牛粪施肥条件下,紫花苜蓿-水稻的轮作方式可保证水稻产量,有效降低下渗水和径流中氮素流失量且维持较低水平的磷素流失量,是一种有效减少氮磷面源污染、增加土地利用效率的种植模式。

关键词:化肥;牛粪;轮作;稻田;氮磷流失

中图分类号:S141;S143;S344.1 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)02-0286-09 doi: 10.13254/j.jare.2020.0270

Effects of different rotation patterns on nitrogen and phosphorus loss in paddy fields under an optimal ratio of cow manure and fertilizer

PU Yan-shuang¹, WANG Chun-xue¹, CHEN Jian-jun¹, LI Yuan^{1*}, ZU Yan-qun¹, ZHANG Ke-qiang²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Yunnan Engineering Laboratory for Agricultural Environment Pollution Control and Ecological Remediation, Kunming 650201, China; 2. Dali Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China)

Abstract: In this study, based on a field plot experiment, we aimed to investigate the effects of different crop rotation methods on the loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields under an optimal ratio of cow manure and fertilizer. To examine the changes in rice yield and total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations in paddy field surface water, infiltrated water, and runoff under different rotation patterns, we applied the following three rotation treatments: Y-OL (70% chemical fertilizer+30% cow manure-*Lolium multiflorum* Lamk.-

收稿日期: 2020-05-21 录用日期: 2020-07-27

作者简介: 普燕爽(1995—),女,云南玉溪人,硕士研究生,研究方向为农业面源污染控制。E-mail: 946415920@qq.com

*通信作者: 李元 E-mail: liyuan@ynau.edu.cn

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金产业化培育项目(2016CY11); 云南省农田无公害生产创新团队项目(2017HC015)

Project supported: Yunnan Provincial Education Department's Scientific Research Fund Industrialization Project (2016CY11); The Science Technology Innovation Team of Yunnan Province (2017HC015)

rice); Y-OV (70% chemical fertilizer+30% cow manure-*Vicia villosa* Roth-rice); and Y-ON (70% chemical fertilizer+30% cow manure-winter fallow-rice). A conventional fertilization and tillage mode (C-ON: 100% chemical fertilizer-winter fallow-rice) was used as a control treatment. The results revealed that the TN concentration in the surface water in different treatments peaked on the 2nd day after applying spiked fertilizer, the TP concentration peaked on the 2nd day of applying the basal fertilizer, and the highest values were obtained using the Y-ON treatment. In the C-ON and Y-ON treatments, the TN concentrations in infiltrated water peaked on the 2nd day of applying the basal fertilizer, whereas TN concentrations in the Y-OL and Y-OV treatments showed a peak on the 2nd day after applying panicle fertilizer. The overall TP concentration in infiltrated water during the entire rice growth period under Y-OV treatment was lower than other treatments. There were no significant differences in the amounts of nitrogen and phosphorus runoff loss between paddy fields. The amounts of nitrogen and phosphorus runoff loss in paddy fields were significantly correlated with rainfall, with TN runoff loss in each treatment accounting for 70.24%~73.42% of the total runoff loss, and TP runoff loss accounted for 35.12%~42.42% of the total runoff loss. Compared with the C-ON treatment, TN total loss in the Y-OV, Y-OL, and Y-ON treatments decreased by 43.92%, 25.21%, and 35.74%, respectively, whereas compared with C-ON, TP loss in the Y-OL and Y-ON treatments increased by 66.67% and 13.13%, respectively. However, TP total loss in the Y-OV treatment showed no significant difference from that in C-ON. Furthermore, we detected no significant differences in the rice yields obtained in the Y-OV, Y-OL, and Y-ON treatments and that obtained in the C-ON treatment. In summary, application of 70% chemical fertilizer+30% cow dung fertilization in the *Vicia villosa* Roth-rice rotation system can ensure a high rice yield, effectively reduce the amounts of nitrogen loss in infiltration water and runoff, and maintain a low level of phosphorus loss, and can thus be considered an effective planting model for reducing non-point source nitrogen and phosphorus pollution and enhancing land-use efficiency.

Keywords: chemical fertilizer; cow manure; rotation; paddy field; nitrogen and phosphorus loss

水稻是我国主要的粮食作物之一, 占我国粮食总产量的30%以上^[1]。为追求高产稳产, 农户大量施用化肥, 致使部分稻田年均化学氮肥施用量高达500 kg·hm⁻²^[2]。我国的稻田化肥施用量高、利用率低, 氮肥利用率为30%~35%, 磷肥利用率为10%~20%^[3]。大部分肥料养分不能被植物吸收利用, 残留在土壤中, 随农田排水和地表径流进入江河湖海, 影响水质, 造成水体富营养化, 增加环境污染的风险^[4]。大量研究表明, 施肥方式是影响田间氮磷素流失的重要因素^[5-6], 有机肥与化肥的合理配施有利于降低农田田面水中氮素浓度, 减少氮素的径流流失, 且可维持较低水平的磷素流失, 从而提高肥料利用效率和作物产量^[7-13]。

牛粪是一种很好的有机肥资源, 合理的牛粪和化肥配施比例可减少土壤养分累积、避免淋洗或径流过程中养分损失^[14]。近年来, 牧草合理轮作被证实为解决大量施用化肥而造成的土壤退化和水环境污染等问题中有着重要应用价值^[15]。牧草可分为禾本科和豆科, 研究表明禾本科牧草发达的根系穿插在土壤中, 能提高农田土壤保水持水能力, 大幅降低地表径流流速, 减少农田的水土流失^[16]; 豆科牧草根系能与土壤中的根瘤菌群结合形成根瘤, 从而提高土壤含氮量, 提高土壤肥力, 为作物提供必需的氮素营养^[17]。

洱海流域奶牛养殖业发展迅速, 牛粪产生量大,

采用奶牛粪便配施化肥的施肥方式与水稻-牧草轮作的种植方式相结合的农业生产模式, 可减轻畜禽粪便的污染负荷, 提高土地资源的利用率。多花黑麦草(*Lolium multiflorum* Lamk.)是一年生禾本科植物, 光叶紫花苕(*Vicia villosa* Roth)是一年生或越年生豆科植物, 二者均可作为家畜青贮饲料。本研究针对当地的实际情况, 研究优化施肥条件下两种轮作植物对后茬水稻的产量及稻田氮磷流失量的影响, 对于降低洱河流域农业面源污染、提高化肥利用效率、提高土地利用效率、构建物质资源循环利用的生态农业模式有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验田位于农业农村部环境保护科研监测所云南省大理综合实验站(25°50'N, 100°07'E)。该区域季风气候明显, 干湿季分明, 海拔1 900 m, 降雨主要集中在5—10月, 2019年稻季(2019年6月—2019年10月)总降雨量为466.2 mm, 平均气温在21℃左右, 总日照时数为1 663 h, 平均相对湿度为79.22%, 风向主要为西南风, 平均风速0.57 m·s⁻¹。供试土壤为潜育型水稻土, 土壤(0~20 cm)基本理化性质: pH 7.57, 全氮3.93 g·kg⁻¹, 碱解氮336.81 mg·kg⁻¹, 全磷1.15 g·kg⁻¹, 速效磷61.13 mg·kg⁻¹, 有机质70.47 g·kg⁻¹, 全钾21.71 g·kg⁻¹, 速效钾73.84 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于2019年6月3日至2019年10月5日开展,采用田间小区试验,共设3种轮作模式。轮作方式分别为水稻-黑麦草轮作(Y-OL)、水稻-紫花苜蓿轮作(Y-OV)、水稻-冬闲(Y-ON),施肥方式为优化施肥,并以常规施肥-冬闲(C-ON)模式作为对照,每种处理3个重复。各处理随机分布,各小区长6 m,宽5 m,面积30 m²。常规施肥是指根据当地农民习惯施肥,施入肥料全为化肥,优化施肥是指用牛粪部分替代化肥施入。在此之前,该试验小区已于2017年5月至2019年6月按照同样的试验设计进行了两轮的水稻-牧草轮作试验。前期研究结果表明,70%化肥+30%牛粪的化肥配施比例在控制稻田氮磷流失风险方面表现最优^[18]。施入的牛粪为大理当地奶牛粪便,其全氮、全磷、全钾含量分别为0.49%±0.05%、0.19%±0.01%、0.10%±0.02%,含水量为78.20%±2.66%。由于牛粪存在磷素过量的问题,为了使每个处理的氮磷比例都达到最优,采用不同的磷替代比例。试验所用氮、磷、钾肥分别为尿素(N,46.6%)、过磷酸钙(P₂O₅,16%)、硫酸钾(K₂O,50%),氮和磷的施入量均为纯氮160 kg·hm⁻²,纯磷48 kg·hm⁻²,不同处理的牛粪与化肥配施用量见表1。其中,牛粪和化学磷肥、钾肥作为底肥一次性施入,常规施肥处理尿素按1:1:1的比例分为基肥、分蘖肥、穗肥施入稻田;优化施肥处理基肥不施尿素,尿素按1:1的比例分为分蘖肥、穗肥施入稻田。供试水稻品种为“云梗25”,水稻种植密度为350 600 穴·hm⁻²,每穴3~4株。2019年6月2日开始插秧,6月3日施入基肥,插秧7 d后(6月10日)施分蘖肥,58 d后(7月30日)施穗肥,125 d(10月5日)时收割。

1.3 样品采集和指标测定

水样采集:于每次施肥的第2 d进行水样采集,不施肥期每10 d采一次水样,施穗肥后第2 d采一次水样,之后每20 d采一次水样,每次采样同时采集田面水和60 cm处下渗水,整个水稻季共采集水样10次。于每次形成地表径流后采集田面水,整个水稻季共采

集5次径流,水样采好后装于250 mL的聚乙烯瓶中带回实验室,于4℃冷藏,并于48 h内测定。采用碱性过硫酸钾消煮-紫外分光光度法测定水样总氮(TN),采用钼酸铵分光光度法测定水样总磷(TP)。

水稻测产:水稻收获期在每种处理的重复地块随机选取样方(1 m²)收割测产。

氮磷渗漏损失量(kg·hm⁻²)=氮磷时间间隔加权平均浓度(mg·L⁻¹)×渗水量(m³)/面积(hm⁻²)×10⁻³^[19]

氮磷时间间隔加权平均浓度(mg·L⁻¹)=Σ[每次渗漏水氮磷浓度(mg·L⁻¹)×时间间隔(d)]/总生长时间(d)^[20]

渗水量(m³)=渗水速度(mm·d⁻¹)×面积(m²)×浸没天数(d)×10⁻³

氮磷径流流失量(kg·hm⁻²)=Σ[每次径流过程中氮磷浓度(mg·L⁻¹)×每次径流过程中径流体积(m³·hm⁻²)×10⁻³]^[21]

氮磷流失率=[氮磷流失量(kg·hm⁻²)/氮磷施入量(kg·hm⁻²)]×100%^[22]

整个水稻季稻田浸没天数为88 d,总生长时间125 d,稻田平均渗水速度经测定为12 mm·d⁻¹,渗水速度具体测定方法:在每个小区中央插入一个白色不透明塑料圆筒,插入田面以下深度不小于30 cm以防止测渗,在筒里加水且水位和田面水位持平,再在筒上加盖,防止太阳照射和水面蒸发以及降水,每隔7 d或半月时间观测一次测渗筒内水位下降高度,然后换算成平均日渗漏量。

1.4 数据处理

采用Excel 2010进行试验数据整理,采用SPSS 21.0进行差异性统计分析(P<0.05),采用Origin 9.0软件进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 田面水TN和TP浓度变化特征

在牛粪化肥最优配施条件下,不同轮作方式对稻田田面水中总氮、总磷浓度有明显影响(表2)。施基

表1 不同处理牛粪与化肥施用量(kg·hm⁻²)

Table 1 The amount of cow manure and fertilizer application in different treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatments	施肥总量 Total amount of fertilizer				基肥 Base fertilizer				分蘖肥 Tillering fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer
	尿素(N, 46.4%)	过磷酸钙 (P ₂ O ₅ , 16%)	硫酸钾 (K ₂ O, 50%)	牛粪	尿素 (N, 46.4%)	过磷酸钙 (P ₂ O ₅ , 16%)	硫酸钾 (K ₂ O, 50%)	牛粪	尿素 (N, 46.4%)	尿素 (N, 46.4%)
常规施肥	345	687	116	0	115	687	116	0	115	115
优化施肥	265	481	116	7535	0	481	116	7535	132	132

肥后第2 d,各处理田面水 TN 浓度范围为 2.42~12.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中,C-ON 处理浓度最高,Y-ON 处理最低。施分蘖肥后第2 d,各处理田面水 TN 浓度范围为 3.55~5.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中,Y-ON 处理浓度最高,Y-OL 处理浓度最低。施分蘖肥后田面水 TN 浓度缓慢下降并趋于稳定。稻田田面水 TN 浓度再次波动出现在施穗肥后的第2 d,且增幅明显,在整个水稻季中达到峰值,浓度范围为 17.15~38.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与 C-ON 处理相比,Y-ON 处理浓度上升 62.66%,Y-OV 处理浓度下降 16.16%,Y-OL 处理浓度下降 16.90%。随后稻田田面水 TN 浓度下降并趋于稳定(表2)。各处理田面水 TP 均在施基肥后第2 d 达到峰值,且牛粪化肥配施的处理田面水 TP 浓度均显著高于只施化肥的处理($P<0.05$),其中 Y-ON 处理浓度为 3.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为 C-ON 处理的 3.58 倍。与施基肥后第2 d 相比,施分蘖肥后第2 d 各处理田面水 TP 浓度均下降,下降至浓度范围 0.29~0.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。施分蘖肥后的第10 d 各处理田面水 TP 浓度有上升趋势,且牛粪化肥配施的各处理浓度均高于对照。随后各处理田面水 TP 浓度下降,施穗肥后回升至 0.34~0.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后浓度下降至 0.15~0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表2)。

2.2 下渗水 TN、TP 浓度变化特征

下渗水 TN、TP 浓度变化如表3所示。无轮作的两种处理下渗水 TN 浓度均在施基肥后第2 d 达到峰值,且浓度显著高于轮作处理($P<0.05$),其中 C-ON 处理浓度为 8.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比 Y-ON 处理高 88.30%;轮作的两种处理下渗水 TN 浓度均在施穗肥后第2 d 达

到峰值,其中 Y-OL 处理浓度为 2.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比 Y-OV 处理高 24.68%。施分蘖肥后的第10 d 与施分蘖肥后第2 d 相比,牛粪化肥配施的三种处理下渗水 TN 浓度均有上升趋势,只施化肥的处理浓度下降。施基肥后第2 d 各施肥处理下渗水 TP 浓度范围为 0.22~0.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,无轮作处理浓度均显著高于轮作处理($P<0.05$),其中 Y-ON 处理浓度为 0.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,C-ON 处理浓度为 0.64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在整个水稻生长季达到峰值。施分蘖肥后的第10 d 与施分蘖肥后第2 d 相比各处理下渗水 TP 浓度均上升,Y-ON 处理浓度升幅最大,Y-OV 次之,Y-OL 最小。在随后的两次采样中各处理下渗水 TP 浓度持续下降,在7月21日浓度有上升趋势,Y-OL 处理升幅最大。施穗肥后第2 d,Y-ON 处理下渗水 TP 浓度上升,其他三种处理浓度均下降,Y-OV 浓度比 C-ON 处理低 0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为最低。施穗肥后第20 d 轮作处理下渗水 TP 浓度均上升,无轮作处理下渗水 TP 浓度下降。

2.3 田面水和下渗水 TN、TP 时间间隔加权平均浓度分析

由表4可知,Y-ON 处理的田面水 TN 时间间隔加权平均浓度显著高于其他3种处理($P<0.05$),优化施肥处理的田面水 TP 时间间隔加权平均浓度均显著高于常规施肥处理($P<0.05$)。C-ON 处理的下渗水 TN 时间间隔加权平均浓度显著高于其他3种处理;在优化施肥的各处理中,Y-OL 处理的下渗水 TN 时间间隔加权平均浓度显著高于 Y-OV 和 Y-ON 处理,其中 Y-OV 处理的氮素流失风险最低;就 TP 而言,Y-OL 处理的

表2 不同处理稻田田面水 TN、TP 浓度变化($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 2 TN and TP concentration changes in paddy field surface water with different treatments($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

日期 Date	总氮 TN				总磷 TP			
	C-ON	Y-OL	Y-OV	Y-ON	C-ON	Y-OL	Y-OV	Y-ON
2019-06-04	12.44±1.95a	3.65±0.23b	2.48±0.22c	2.42±0.15c	1.11±0.19c	3.87±0.26a	1.91±0.19b	3.97±0.05a
2019-06-11	3.89±0.26a	3.55±0.67a	4.39±0.57a	5.20±1.21a	0.29±0.03b	0.37±0.03a	0.33±0.01ab	0.35±0.04a
2019-06-21	1.85±0.21b	2.07±0.36b	4.04±0.28a	4.06±0.11a	0.37±0.05b	0.50±0.07b	0.93±0.05a	1.08±0.17a
2019-07-01	1.83±0.77b	2.44±0.24a	2.31±0.38ab	2.16±0.29ab	0.69±0.01a	0.70±0.04a	0.68±0.07a	0.72±0.02a
2019-07-11	1.57±0.27b	2.21±0.14a	1.67±0.16b	1.53±0.24b	0.37±0.02b	0.65±0.12a	0.63±0.03a	0.57±0.06a
2019-07-21	1.24±0.01a	1.24±0.20a	1.41±0.10a	1.21±0.08a	0.28±0.03ab	0.25±0.04b	0.32±0.03a	0.30±0.02ab
2019-07-31	23.46±0.87b	17.15±1.51c	19.67±1.89c	38.16±6.38a	0.50±0.10a	0.38±0.06ab	0.34±0.07b	0.46±0.03ab
2019-08-20	1.40±0.30a	1.02±0.17ab	0.99±0.10b	0.93±0.14b	0.19±0.03a	0.24±0.05a	0.21±0.05a	0.18±0.00a
2019-09-09	1.76±0.12b	2.27±0.26a	2.04±0.21ab	1.98±0.13ab	0.16±0.01a	0.14±0.02ab	0.15±0.01ab	0.13±0.02b
2019-09-29	1.33±0.15a	1.38±0.22a	1.13±0.07ab	0.93±0.07b	0.17±0.02a	0.17±0.03a	0.15±0.02a	0.17±0.01a

注:同行不同字母表示总氮或总磷处理间差异显著($P<0.05$)(平均值±标准差)。下同。

Note: Different letters in the same line indicate significant differences among treatments of TN or TP ($P<0.05$) (Mean value±SD). The same below.

表3 不同处理稻田下渗水TN、TP浓度变化($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 3 TN and TP concentration changes in infiltration water of paddy field with different treatment ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

日期 Date	总氮 TN				总磷 TP			
	C-ON	Y-OL	Y-OV	Y-ON	C-ON	Y-OL	Y-OV	Y-ON
2019-06-04	8.21±0.75a	2.84±0.39c	2.14±0.22c	4.36±0.63b	0.64±0.12a	0.30±0.05b	0.22±0.03b	0.79±0.19a
2019-06-11	4.09±0.35a	1.09±0.21b	0.73±0.07c	1.22±0.23b	0.10±0.01a	0.08±0.00a	0.06±0.01b	0.08±0.01a
2019-06-21	3.94±0.33a	2.49±0.19b	1.43±0.32c	2.18±0.14b	0.29±0.05c	0.18±0.02d	0.38±0.02b	0.46±0.02a
2019-07-01	2.54±0.38a	1.82±0.17b	0.95±0.20c	1.33±0.19c	0.24±0.01a	0.25±0.03a	0.27±0.02a	0.23±0.01a
2019-07-11	2.25±0.24a	2.13±0.41ab	0.80±0.09c	1.69±0.21b	0.04±0.01ab	0.06±0.01a	0.03±0.01b	0.03±0.01b
2019-07-21	1.90±0.14a	2.00±0.32a	1.01±0.15b	1.11±0.24b	0.25±0.03b	0.56±0.06a	0.26±0.04b	0.19±0.01b
2019-07-31	2.75±0.30a	2.88±0.15a	2.31±0.28ab	2.10±0.49b	0.24±0.03bc	0.32±0.06ab	0.15±0.02c	0.36±0.08a
2019-08-20	2.30±0.28a	1.58±0.10b	1.02±0.12c	0.94±0.12c	0.23±0.02b	0.66±0.12a	0.26±0.05b	0.27±0.05b
2019-09-09	1.53±0.26a	0.62±0.04b	0.74±0.09b	0.77±0.13b	0.03±0.01b	0.07±0.02a	0.03±0.00b	0.02±0.00b
2019-09-29	1.07±0.13a	1.21±0.16a	1.21±0.18a	1.13±0.16a	0.05±0.01b	0.20±0.05a	0.06±0.01b	0.07±0.01b

表4 不同处理田面水和下渗水TN、TP时间间隔加权平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 4 Weighted average concentration of TN and TP time-intervals of field surface water and infiltrating water under different treatments ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatments	田面水 Field surface water		下渗水 Infiltrating water	
	总氮 TN	总磷 TP	总氮 TN	总磷 TP
C-ON	3.43±0.04b	0.29±0.01c	2.15±0.14a	0.15±0.01c
Y-OL	2.98±0.21b	0.34±0.00b	1.53±0.09b	0.26±0.02a
Y-OV	3.26±0.16b	0.35±0.02ab	1.05±0.10c	0.15±0.01c
Y-ON	4.69±0.73a	0.38±0.02a	1.23±0.07c	0.17±0.00b

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

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

下渗水时间间隔加权平均浓度显著高于其他处理模式,其中Y-OV处理的浓度最低。

2.4 径流TN、TP流失量变化特征

从图1可以看出,该试验区在整个水稻季共产生5次径流,且径流TN、TP流失量随降雨量变化而变化,降雨量和TN、TP流失量的相关性分析结果显示极显著相关($P<0.01$),说明降雨是影响稻田氮磷径流流失的主要因素之一。在降雨量最高时,不同处理间径流TN流失量无显著差异,此时TN流失量占整个生育期TN流失量的70%以上。在整个水稻生育期内,两种轮作处理的径流TN流失量无显著差异且变化趋势基本一致(图1A)。稻田径流TP流失量受降雨量影响较大,降雨量最高时,各处理间TP流失量无显著差异,其TP流失量占整个生育期的35%以上(图1B)。由表5可知,各处理间氮磷径流流失量无显著差异,所以施肥方式与轮作植物对径流氮磷流失的影响较小,径流流失主要与降雨量有关。

2.5 下渗水和径流氮磷流失总量分析

由表6可知,优化施肥各处理TN流失量均显著

表5 不同处理氮磷径流总流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 5 Total runoff loss of nitrogen and phosphorus runoff under different treatments ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	总氮 TN	总磷 TP
C-ON	3.60±0.23a	0.43±0.04a
Y-OL	3.46±0.28a	0.50±0.03a
Y-OV	3.64±0.23a	0.46±0.04a
Y-ON	3.65±0.29a	0.45±0.04a

低于常规施肥处理,且Y-OV处理TN流失量最低,低于常规施肥处理43.92%,Y-OL处理和Y-ON处理分别低于常规施肥处理25.21%和35.74%。常规施肥处理的TP流失量低于优化施肥各处理,在优化施肥处理中Y-OV处理TP流失量最低,且与常规施肥处理无显著差异。

2.6 不同轮作稻田系统的水稻产量分析

由表7可知,Y-OL处理的水稻产量最高,Y-OV处理次之,C-ON处理最低。不同处理间差异性分析显示,各处理间水稻产量无显著差异($P<0.05$)。因此,减少化肥投入、增加轮作次数对水稻产量无显著

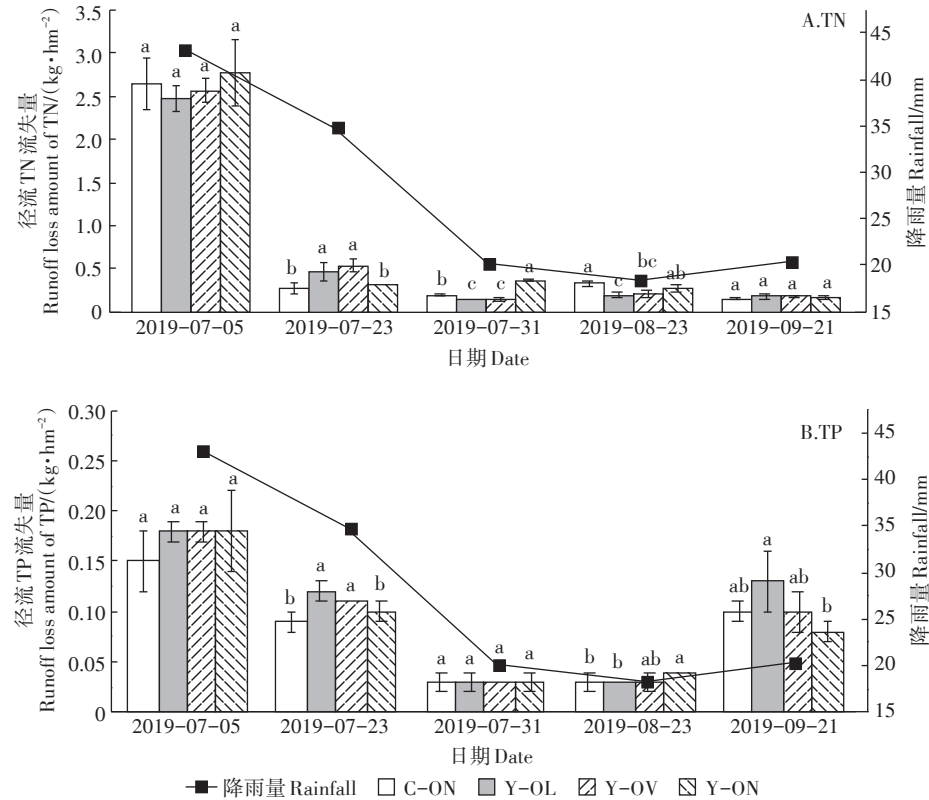


图1 不同处理稻田径流TN、TP流失量变化

Figure 1 Runoff loss amount changes of TN and TP at different treatments in rice field

表6 不同处理氮磷下渗和径流流失总量(kg·hm⁻²)

Table 6 The total nitrogen and phosphorus loss of infiltrating water and runoff under different treatments(kg·hm⁻²)

处理Treatments	总氮TN	总磷TP
C-ON	26.30±1.70a	1.98±0.11c
Y-OL	19.67±0.91b	3.30±0.17a
Y-OV	14.75±1.22c	2.01±0.01c
Y-ON	16.90±0.36c	2.24±0.01b

影响。以C-ON处理相对产量为100%,Y-OL、Y-OV和Y-ON的相对产量分别为116.50%、115.15%、102.69%,三种处理均表现为相对增产。

3 讨论

3.1 优化施肥条件下不同轮作系统对稻田田面水TN、TP的影响

降雨、施肥管理、种植模式等均为影响稻田氮磷流失的重要因素^[23]。本研究中,施基肥后第2 d,优化施肥处理TN浓度显著低于常规施肥处理,而TP浓度则显著高于常规施肥处理。究其原因,尿素易溶于水,且在转化前不能被土壤固定,导致田面水中TN浓度升高,又因牛粪中碱解氮释放量仅为20.6%^[24],所以

表7 不同处理水稻产量(kg·hm⁻²)

Table 7 The yield of rice under different treatments(kg·hm⁻²)

处理Treatments	水稻产量Rice yield/(kg·hm ⁻²)	相对产量Relative yield/%
C-ON	9 900±860a	100.00±10.64a
Y-OL	11 533±555a	116.50±6.87a
Y-OV	11 400±1 435a	115.15±17.75a
Y-ON	10 166±449a	102.69±5.56a

施肥第2 d,常规施肥处理田面水TN浓度远高于有机化肥配施处理;作物对过磷酸钙的利用率极低,肥料中的水溶性磷酸钙容易被固定,移动性差,而牛粪中的速效磷释放量达61.3%^[24],且有机肥与化肥的配施减少了肥料与土壤的接触,从而使田面水中TP浓度高于常规施肥处理。杨坤宁等^[22]研究表明施有机肥可使稻田田面水TN浓度比常规施肥降低34.05%,该研究结果与本研究一致。施穗肥后第2 d田面水TN浓度在整个水稻季中达到峰值,且无论作处理TN浓度高于轮作处理。其中,Y-ON处理浓度最高,相比C-ON上升62.66%。出现该现象的原因可能是穗肥期优化施肥处理尿素施入量比常规施肥处理多。有机肥化肥配施条件下,轮作制度也会引起稻田田面

水 TN、TP 浓度的变化。本研究中优化施肥条件下, 无轮作处理的田面水 TN、TP 时间间隔加权平均浓度显著高于轮作处理, 原因可能是作物轮作可降低土壤容重, 提高土壤总孔隙度和非毛管孔隙度^[25], 有利于团聚体聚合, 形成良好的团聚体组成结构^[26], 增强稻田土壤的持水、保水能力^[16], 从而有利于土壤对化肥中营养元素的固定。

3.2 优化施肥条件下不同轮作系统对稻田下渗水 TN、TP 的影响

本研究中稻田下渗水中氮磷流失风险较低的是 Y-OV 处理。常规施肥处理下渗水 TN 时间间隔加权平均浓度显著高于优化施肥处理。其原因可能是有机化肥配合施用可提高土壤脲酶等土壤酶活性, 促进肥料中氮素分解转化^[27-28], 增加土壤中碳和铵态氮含量, 减少土壤硝态氮的淋溶, 提高作物对氮素的利用率, 从而降低下渗水中氮素流失量^[29]。优化施肥处理中除 Y-OV 外其余两种处理下渗水 TP 时间间隔加权平均浓度均显著高于常规施肥处理。这可能是由于有机化肥配合施用可显著增加土壤中磷素的累积, 降低土壤对磷的吸附能力, 增加土壤对磷的解吸, 提高土壤磷的有效性, 同时显著提高了土壤磷吸附饱和度, 增加了磷素的流失风险^[30]。不同处理稻田下渗水 TP 浓度在 7 月 21 日上升的原因可能是土壤中磷素的累积量达到一个临界值, 引起了下渗水中磷含量的显著提高。有研究表明, 土壤中的 Olsen-P 含量达到一定的范围时, 会使土壤磷素下渗, 淋失量显著增加^[31-32]。而水旱轮作系统中土壤干湿交替使土壤有机质溶解和微生物细胞破裂溶解, 将磷释放出来, 提高土壤有效磷的含量, 从而提高磷肥利用率和磷素长效性, 降低磷素流失风险^[33-34]。在降低土壤活性磷吸附累积、增强植物对磷素的吸收利用效果上水稻-紫花苕轮作处理优于水稻-黑麦草轮作处理^[35]。

3.3 优化施肥条件下不同轮作系统对稻田氮磷下渗和径流流失总量的影响

本研究中不同施肥和轮作处理间氮磷径流流失量无显著差异, 但是降雨量越大, 氮磷流失量越高, 所以降雨量是影响稻田氮磷径流流失的主要因素, 并且各处理中 TN、TP 径流流失量分别占总流失量的 13.69%~24.68%、15.15%~22.89%。优化施肥各处理 TN 流失总量均显著低于常规施肥处理, 常规施肥处理的 TP 流失量低于优化施肥各处理, 在优化施肥处理中 Y-OV 处理 TP 流失量最低, 且与常规施肥无显著差异。其原因可能是不同处理中氮、磷总流失量的

差异主要取决于氮、磷的下渗流失量, 且施肥方式和轮作植物也能影响氮磷的下渗流失量。

3.4 优化施肥条件下不同轮作系统对水稻产量的影响

合理的有机化肥配施和轮作模式可降低稻田氨挥发和氮素损失, 增加地上部的吸氮量^[36], 提高土壤有机物含量和速效养分含量, 有利于水稻对养分的利用^[37-38], 从而提高水稻的有效穗数和穗粒数^[39], 使水稻增产。本研究中, 虽然优化施肥的各处理水稻产量与常规施肥模式无显著差异, 但总体上均表现为相对增产。

4 结论

(1) 牛粪化肥配施可显著降低稻田下渗和径流中 TN 流失量, 显著增加稻田下渗和径流中 TP 流失量。无轮作条件下, 牛粪化肥配施与单施化肥相比, 稻田下渗和径流中 TN 流失量减少 35.74%, TP 流失量增加 13.13%。

(2) 水稻-牧草轮作处理, 稻田下渗和径流 TN 流失量均低于常规施肥不轮作处理, 而水稻-牧草轮作对稻田下渗和径流 TP 流失量无消减效果。与常规施肥不轮作处理相比, 水稻-黑麦草、水稻-紫花苕轮作处理 TN 流失量分别下降 25.21%、43.92%。与常规施肥不轮作相比, 水稻-黑麦草轮作处理 TP 流失量上升 66.67%; 水稻-紫花苕轮作处理 TP 流失量无显著变化。

(3) 牛粪化肥配施与水稻牧草轮作的方式对水稻产量无显著影响。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 宋勇生, 范晓晖. 太湖地区稻田氮肥吸收及其利用的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2081-2083. SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui. Nitrogen uptake and its utilization by rice in paddy field of Taihu area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 2081-2083.
- [3] 杨家曼, 张士云. 判断我国主要化肥污染区及其对策建议[J]. 山西农业大学学报(社会科学版), 2014, 13(1): 65-68. YANG Jia-man, ZHANG Shi-yun. Determining main chemical fertilizer pollution areas and its countermeasures[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Social Science Edition), 2014, 13(1): 65-68.
- [4] 尹芳, 张无敌, 赵兴玲, 等. 农业面源污染对农业可持续发展影响分析[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 151-153. YIN Fang, ZHANG Wu-di, ZHAO Xing-ling, et al. Analysis on impact of non-point source pollution on agricultural sustainable development[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 151-153.

- [5] Schroeder P D, Radcliffe D E, Cabrera M L. Rainfall timing and poultry litter application rate effects on phosphorus loss in surface runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6):2201-2209.
- [6] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7):103-110. SHANG Fang-ze, YANG Pei-ling, LI Yun-kai, et al. Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7):103-110.
- [7] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fraction sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1):37-47.
- [8] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11):1835-1846. LI Yan-qing, WEN Yan-chen, LIN Zhi-an, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11):1835-1846.
- [9] 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 等. 有机肥与无机肥配施对潮土 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3):1474-1481. SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, et al. Effect of organic fertilizer and inorganic fertilizer application on N_2O emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3):1474-1481.
- [10] 刘斌祥, 王兴龙, 周芳, 等. 减氮配施不同种类有机肥对玉米物质分配、转运与产量的影响[J/OL]. 生态学杂志, 2020, 39(1):130-138. LIU Bin-xiang, WANG Xing-long, ZHOU Fang, et al. Effects of reducing nitrogen combined with application of different types of organic fertilizers on dry matter allocation, transport, and yield of maize [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1):130-138.
- [11] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. 作物杂志, 2019, 45(5):89-96. MA Fan-fan, XING Su-lin, GAN Man-qin, et al. Effects of organic fertilizer substituting for chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Crops*, 2019, 45(5):89-96.
- [12] 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 Ke-yu, DUAN Ying-hua, XU Ming-gang, 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.
- [13] 吕真真, 刘秀梅, 侯红乾, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土磷素及水稻磷营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8):1316-1324. LÜ Zhen-zhen, LIU Xiu-mei, HOU Hong-qian, et al. Effects of long-term fertilizations on soil phosphorus and its supply to rice in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8):1316-1324.
- [14] 贾伟, 李宇虹, 陈清, 等. 京郊畜禽粪肥资源现状及其替代化肥潜力分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8):156-167. JIA Wei, LI Yu-hong, CHEN Qing, et al. Analysis of nutrient resources in live-stock manure excretion and its potential of fertilizers substitution in Beijing suburbs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8):156-167.
- [15] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):843-850. ZHANG Tao-lin, LI Zhong-pei, WANG Xing-xiang. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):843-850.
- [16] Madari B, Machado P L, Torres E, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 80(1/2):185-200.
- [17] 杨庆. 施肥对两种决明属牧草农艺性状和土壤可溶性氮素的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. YANG Qing. Effects of fertilization application on agronomic traits of two *Chamaecrista* spp and soil soluble nitrogen[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [18] 李敏, 王春雪, 李元, 等. 牛粪化肥配施对稻田下渗水氮素流失和水稻氮素积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4):903-911. LI Min, WANG Chun-xue, LI Yuan, et al. Infiltration water nitrogen loss and rice nitrogen accumulation in a paddy field fertilized with a combination ratio of cow manure and chemical fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):903-911.
- [19] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156(4):1-11.
- [20] Zhao X, Zhou Y, Wang S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in southern China[J]. *Soil Science Society*, 2011, 76:1068-1078.
- [21] 郭智, 刘红江, 张岳芳, 等. 不同施肥模式对菜-稻轮作农田土壤磷素径流损失与表观平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4):102-109. GUO Zhi, LIU Hong-jiang, ZHANG Yue-fang, et al. Effects of different fertilization modes on phosphorus(P) loss by surface runoff and apparent P balance in the vegetable-rice rotation fields of Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4):102-109.
- [22] 杨坤宇, 王美慧, 王毅, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1723-1734. YANG Kun-yu, WANG Mei-hui, WANG Yi, et al. Characteristics and determinants of nitrogen and phosphorus runoff losses under different agronomic measures in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1723-1734.
- [23] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10):3292-3302. ZHANG Zi-lu, LIU Feng, HOU Ting-yu. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10):3292-3302.
- [24] 赵明, 赵征宇, 蔡葵, 等. 畜禽有机肥料当季速效氮磷钾养分释放规律[J]. 山东农业科学, 2004(5):59-61. ZHAO Ming, ZHAO Zheng-yu, CAI Kui, et al. Release law of available nitrogen, phospho-

- rus and potassium nutrients in livestock and poultry organic fertilizer season[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2004(5):59-61.
- [25] 王华, 黄宇, 阳柏苏, 等. 中亚热带红壤地区稻-稻-草轮作系统稻田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2005, 25(12):3271-3281. WANG Hua, HUANG Yu, YANG Bai-su, et al. Paddy soil quality assessment under rice-ryegrass rotation system in red soil region of mid-subtropics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12):3271-3281.
- [26] 黄冲平, 丁鼎良. 水旱轮作对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 浙江农业学报, 1995, 7(6):448-450. HUANG Chong-ping, DING Ding-liang. The effects of paddy upland rotation on crop yield and soil physical and chemical properties[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1995, 7(6):448-450.
- [27] 汤桂容, 周旋, 田昌, 等. 有机无机氮肥配施对典型菜地土壤微生物和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(4):129-136. TANG Gui-rong, ZHOU Xuan, TIAN Chang, et al. Effects of organic and inorganic nitrogen fertilizer on soil microorganism and enzyme activities of typical vegetable soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(4):129-136.
- [28] 崔新卫, 张杨珠, 高菊生, 等. 长期不同施肥处理对红壤稻田土壤性质及晚稻产量与品质的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6):190-197. CUI Xin-wei, ZHANG Yang-zhu, GAO Ju-sheng, et al. Effects of long-term different fertilization treatments on soil properties, rice yield and quality in reddish paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(6):190-197.
- [29] 杨修一, 耿计彪, 于起庆, 等. 有机肥替代化肥氮素对麦田土壤碳氮迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5):230-236. YANG Xiu-yi, GENG Ji-biao, YU Qi-qing, et al. Effects of organic fertilizer replacing nitrogen of chemical fertilizer on transport characteristics of soil carbon and nitrogen in wheat field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):230-236.
- [30] 王琮, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期不同施肥处理黑土磷的吸附-解吸特征及对土壤性质的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21):3866-3877. WANG Qiong, ZHAN Xiao-ying, ZHANG Shu-xiang, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics and its response to soil properties of black soil under long-term different fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21):3866-3877.
- [31] 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 Xiao-ying, ZHAO Xiao-rong, BAO Hua-jun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2275-2280.
- [32] 王新军, 廖文华, 刘建玲. 菜地土壤磷素淋失及其影响因素[J]. 华北农学报, 2006, 21(4):67-70. WANG Xin-jun, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling. Phosphorus leaching from vegetable fields and impact factors[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21(4):67-70.
- [33] 袁国印, 韩玉玲, 陈文, 等. 周年磷肥旱季集中底施对玉-稻轮作磷肥效应的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12):2137-2145. YUAN Guo-yin, HAN Yu-ling, CHEN Wen, et al. Influence on P use efficiency by application of annual P as basal fertilizer in maize season under maize-rice rotation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(12):2137-2145.
- [34] 林国林, 云鹏, 陈磊, 等. 小麦季磷肥施用对后作玉米的效果及土壤中无机磷形态转化的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3):676-680. LIN Guo-lin, YUN Peng, CHEN Lei, et al. Effects of phosphate fertilizer applied to winter wheat on following maize and transformation of phosphate fractions in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3):676-680.
- [35] 舒正文, 王春雪, 李敏, 等. 水稻-牧草轮作牧草季土壤磷对牛粪浆施用的响应特征[J]. 江西农业学报, 2019, 31(8):35-41. SHU Zheng-wen, WANG Chun-xue, LI Min, et al. Response characteristics of phosphorus in rice-herbage rotation to dairy slurry application[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(8):35-41.
- [36] 朱文博, 刘鸣达, 肖珣, 等. 化肥配施有机肥对早稻产量及稻田氮素归趋的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(6):728-733. ZHU Wen-bo, LIU Ming-da, XIAO Xun, et al. Effects of chemical fertilizer combined with organic manure on early rice yield and nitrogen fate in paddy fields[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2019, 50(6):728-733.
- [37] 王兰, 黄国勤, 孙丹平, 等. 稻田水旱复种轮作对作物产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2018, 37(11):3284-3290. WANG Lan, HUANG Guo-qin, SUN Dan-ping, et al. Crop yield and soil nutrients under paddy-upland multiple cropping rotation systems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(11):3284-3290.
- [38] 李清华, 王飞, 林诚, 等. 水旱轮作对冷浸田土壤碳、氮、磷养分活化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):113-117. LI Qing-hua, WANG Fei, LIN Cheng, et al. Effects of paddy-upland rotation on the nitrogen activation of soil carbon, nitrogen and phosphorus activation in cold waterlogged paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6):113-117.
- [39] 方畅宇, 屠乃美, 张清壮, 等. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3):462-468. FANG Chang-yu, TU Nai-mei, ZHANG Qing-zhuang, et al. Effects of fertilization modes on available nutrient contents of reddish paddy soils and rice yields[J]. *Soils*, 2018, 50(3):462-468.