

## 洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响

姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 于双, 邹洪涛, Arif Husain, 张磊, 张克强

引用本文:

姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 等. 洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1305–1313.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1292>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 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, 王风, 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>

### 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征

吴凡, 张克强, 谢坤, 王风, 王瑞琦, 尹高飞, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1735–1742 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1621>

### 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>

### 控释氮肥减量施用对春玉米土壤N<sub>2</sub>O排放和氨挥发的影响

谢勇, 荣湘民, 张玉平, 何欣, 石敦杰, 刘强

农业环境科学学报. 2016, 35(3): 596–603 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.025>

### 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响

谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 杨俊诚, 邓仕槐, 李先, 郭俊梅, 李玲玲, 刘晓, 周贵宇

农业环境科学学报. 2015(3): 578–584 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.022>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 等. 洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1305–1313.  
JIANG Hai-bin, SHEN Shi-zhou, GU Yan-ru, et al. Effects of different fertilization treatments on runoff losses of nitrogen and phosphorus in paddy fields in Erhai Lake basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1305–1313.



开放科学 OSID

# 洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响

姜海斌<sup>1,2,3</sup>, 沈仕洲<sup>1,3</sup>, 谷艳茹<sup>1</sup>, 于双<sup>2</sup>, 邹洪涛<sup>2</sup>, Arif Husain<sup>1,3</sup>, 张磊<sup>4</sup>, 张克强<sup>1,3\*</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 3. 国家农业环境大理观测实验站, 云南 大理 671004; 4. 大理市农业环境保护监测站, 云南 大理 671000)

**摘要:**为探究洱海流域水稻种植的合理施肥模式,减少稻田氮磷径流流失,通过田间小区试验,研究不同施肥模式对稻田氮磷径流流失和水稻产量的影响。结果表明:与常规施肥处理(CF)相比,化肥减量20%处理(T1)总氮径流流失量无显著差异,有机肥替代处理(T2~T5)总氮径流流失量降低31.6%~40.4%,缓控释肥处理(T6)总氮径流流失量降低15.7%;与CF处理相比,T1、T2和T6处理总磷径流流失量无显著差异,T3和T5处理总磷径流流失量分别降低23.3%和17.4%,T4处理总磷径流流失量增加57.0%。与CF处理相比,T6处理和T1处理籽粒产量无显著差异,T2~T5处理籽粒产量降低11.8%~42.9%;与T1处理相比,T5和T3处理籽粒产量无显著差异。与CF处理相比,T1、T6和T4处理秸秆产量无显著差异,T2、T3和T5处理秸秆产量分别降低15.5%、16.0%和36.0%。综合考虑不同施肥处理的稻田径流流失量和水稻产量等因素,化肥减量(T1)、有机无机配施(T3和T5)和缓控释肥(T6)处理是可供选择的友好型施肥模式。

**关键词:**洱海流域;施肥模式;稻田;径流;氮磷流失;产量

中图分类号:X524;X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)06-1305-09 doi:10.11654/jaes.2020-1292

## Effects of different fertilization treatments on runoff losses of nitrogen and phosphorus in paddy fields in Erhai Lake basin, China

JIANG Hai-bin<sup>1,2,3</sup>, SHEN Shi-zhou<sup>1,3</sup>, GU Yan-ru<sup>1</sup>, YU Shuang<sup>2</sup>, ZOU Hong-tao<sup>2</sup>, Arif Husain<sup>1,3</sup>, ZHANG Lei<sup>4</sup>, ZHANG Ke-qiang<sup>1,3\*</sup>

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 3. Dali Observation and Experimental Station of National Agricultural Environment, Dali 671004, China; 4. Dali Agricultural Environmental Protection Monitoring Station, Dali 671000, China)

**Abstract:** To explore the rice planting fertilization mode in Erhai Lake basin and reduce runoff losses of nitrogen and phosphorus in paddy fields, this study investigated the effects of different fertilization treatments through field plot experiments. Results showed that the total phosphorus (TP) concentration in the T6 runoff was significantly higher than that of other fertilization treatments. The TP concentration in the T4 runoff was significantly higher than the other fertilization treatments. The total nitrogen (TN) loss of the chemical fertilizer reduction pattern (T1) exhibited no significant difference as compared to the conventional fertilization pattern (CF), while the TN loss of the organic fertilizer replacement patterns (T2~T5) decreased by 31.6%~40.4%. The slow and controlled release fertilizer pattern (T6) decreased by 15.7%. Compared to the CF, the TP losses of T1, T4, and T6 increased by 16.3%, 57.0%, and 45.3%, respectively. There was no significant difference in the TP losses between T2 and the CF. The grain yields of T1 and T2~T5 decreased by 9.5% and 11.8%~42.9%, respectively, compared to the CF. The grain yield of T6 did not differ significantly from the CF. Moreover, there were no significant differences in straw yields of the CF, T1, T4, and T6, whereas compared to the CF, the T2, T3, and T5 straw yields decreased by 15.5%, 16.0%, and 36.0%.

收稿日期:2020-11-09 录用日期:2021-02-09

作者简介:姜海斌(1989—),男,辽宁朝阳人,硕士研究生,主要研究方向为农业面源污染防治。E-mail:jianghb1989@163.com

\*通信作者:张克强 E-mail:keqiangzhang68@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800103);云南省科技创新开放基金项目(2017HC015);云南省基础研究青年基金项目(2019FD120)

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFD0800103); Yunnan Science and Technology Innovation Open Fund (2017HC015); Yunnan Basic Research Youth Fund (2019FD120)

respectively. Considering the runoff losses and rice yields of the different fertilization patterns and the loss of the chemical fertilizer reduction pattern (T1), the combined application of organic and inorganic fertilizer patterns (T3 and T5) and the slow/controlled-release fertilizer pattern (T6) are more environmentally-friendly fertilization models for paddy fields in Erhai Lake basin.

**Keywords:** Erhai Lake basin; fertilization pattern; paddy field; runoff; N and P loss; yield

洱海是云南省第二大高原湖泊,水域面积 252 km<sup>2</sup>,是大理市主要饮用水源地,也是苍山洱海国家级自然保护区和风景名胜区的核心,被称为大理人民的“母亲湖”<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来,洱海水质呈下降趋势(从 II 类水质下降至 III 类水质),处于中度富营养化阶段<sup>[2]</sup>。研究表明,目前农业面源污染已成为洱海流域富营养化的主要污染源之一<sup>[3]</sup>,而水稻又是流域主要的种植作物,占农作物播种总面积 34.80%,因水稻种植期降雨量较大<sup>[4]</sup>,径流是农田氮磷流失的重要途径,因此研究水稻种植过程中氮磷径流流失是削减农业面源污染的重要方式之一。多项研究表明,施肥是影响稻田氮磷流失的主要原因之一。姚金铃等<sup>[5]</sup>对洱海流域稻田氮磷径流流失的研究表明,常规施肥条件下,稻田氮、磷径流流失量分别为 6.80 kg·hm<sup>-2</sup> 和 1.30 kg·hm<sup>-2</sup>,占施肥总量的 8.92% 和 16.27%。Lee 等<sup>[6]</sup>研究表明,化肥减量施用可有效减少氮磷流失量,提高化肥利用率。蔡佳佩等<sup>[7]</sup>研究表明,化肥减量 20% 配施 1 500 kg·hm<sup>-2</sup> 有机肥能够有效降低施肥后 7 d 内田面水中总氮和总磷含量,同时降低氮磷径流流失风险,有效增加水稻籽粒和秸秆产量。石敦杰等<sup>[8]</sup>的研究结果表明,控释氮肥发挥了肥效长的优势,能够满足水稻中后期的生长需求,使水稻产量提高了 8.30%,而田面水总氮含量比常规施肥降低了 89.11%。前人在洱海流域开展的氮磷流失研究,多是测定稻田田面水氮磷浓度,分析氮磷流失风险,并未设置径流池直接测定氮磷径流流失量,且对不同施肥模式下稻田的氮磷径流流失规律研究较少。为此,本研究设置化肥减施、有机肥替代和缓控释肥等施肥处理,通过田间径流小区试验,研究洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响,并结合水稻产量,探究有效减少稻田氮磷径流流失的施肥模式,为洱海流域水稻种植氮磷减排提供科学数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于云南省大理市喜洲镇,农业农村部环境保护科研监测所大理综合实验站内(25°53′34″N, 100°10′27″E)。该地区属于典型低纬高原中亚热带

西南季风气候类型,海拔 1 980 m,气候温和,光照充足,年平均气温 14.6 ℃,多年平均降雨量为 1 048 mm<sup>[9]</sup>。供试土壤为水稻土,0~20 cm 土壤基本理化性质为:有机质 57.3 g·kg<sup>-1</sup>,pH 7.1,全氮 3.3 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.9 g·kg<sup>-1</sup>,硝态氮 21.64 mg·kg<sup>-1</sup>,铵态氮 14.22 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 35.3 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验共设 8 个处理:不施肥(CK);常规施肥(CF);常规施肥减量 20%(T1);有机肥等氮替代 T1(T2);有机肥等磷替代 T1,尿素补齐氮肥(T3);考虑有机肥矿化率 25%,以氮计,有机肥替代 T1(T4);考虑有机肥矿化率 25%,以磷计,有机肥替代 T1,尿素补齐氮肥(T5);缓控释肥(T6)。各处理施肥量见表 1,每个处理重复 3 次,共 24 个小区,随机区组设计。每个试验小区面积为 30 m<sup>2</sup>(6 m×5 m),小区间用水泥砂浆筑埂,埂宽 0.24 m、埂高 0.20 m,地表面以下筑入 1 m,径流口距田面 0.15 m。每个径流小区在排水端设径流收集池,径流池容积为 4.5 m<sup>3</sup>(宽×长×深=1 m×4.5 m×1 m),池表面覆盖彩钢瓦密封,防止雨水进入。

### 1.3 田间管理

供试水稻品种为云粳 25,种植时间为 2019 年 5 月 30 日—10 月 11 日。水稻种植施肥管理按当地种植管理方式,其中常规施肥氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾;缓控释肥氮磷钾比例为 23:10:12;有机肥为牛粪商品有机肥,含有机质 14.5%,氮(N)2.3%,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)2.4%,钾(K<sub>2</sub>O)5.7%。有机肥作基肥,在翻耕前一次性施入,翻耕深度约 20 cm,缓控释肥和磷钾肥在分蘖期一次性施入,单施化肥处理(CF、T1)和有机无机配施处理(T3、T5)的尿素分两次施入,在分蘖期施入 70%,在穗肥期施入 30%。所有施肥处理肥料均人工撒施。2019 年 5 月 30 日施入有机肥并且翻耕土地,6 月 3 日插秧,株距 9 cm,行距 23 cm,每蔸 2~3 株,6 月 12 日施分蘖肥,8 月 2 日施穗肥,10 月 11 日水稻收获。稻田田面水高度维持在 10 cm 左右,水面低至 2~3 cm 时补充灌溉水,每周约 2 次,在水稻生长中期人工除草 1 次。

### 1.4 样品采集和测定

稻田产生径流时采集径流水样,并测量径流池水

表1 不同处理施肥类型和施肥量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )Table 1 Types and amount of fertilization application of different treatments( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 处理<br>Treatments | 基肥 Base fertilizer        |            | 分蘖肥 Tillering fertilizer |                          |                                     | 穗肥 Spike fertilizer | 合计折纯 Fold pure total |                               |                  |
|------------------|---------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|
|                  | 有机肥<br>Organic fertilizer | 尿素<br>Urea | 过磷酸钙<br>Superphosphate   | 氯化钾<br>Potassium muriate | 缓控释肥<br>Control released fertilizer |                     | N                    | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
| CK               | 0                         | 0          | 0                        | 0                        |                                     | 0                   | 0                    | 0                             | 0                |
| CF               | 0                         | 297        | 450                      | 180                      |                                     | 127                 | 195                  | 72                            | 90               |
| T1               | 0                         | 237        | 375                      | 144                      |                                     | 102                 | 156                  | 60                            | 72               |
| T2               | 6 500                     | 0          | 0                        | 0                        |                                     | 0                   | 156                  | 150                           | 375              |
| T3               | 2 609                     | 142        | 0                        | 0                        |                                     | 61                  | 156                  | 60                            | 149              |
| T4               | 26 000                    | 0          | 0                        | 0                        |                                     | 0                   | 624                  | 598                           | 1 482            |
| T5               | 10 436                    | 142        | 0                        | 0                        |                                     | 61                  | 343                  | 240                           | 595              |
| T6               | 0                         | 0          | 0                        | 0                        | 624                                 | 0                   | 156                  | 68                            | 81               |

面高度。采集前先混匀水样,再将水样装于100 mL塑料瓶带回实验室测定,不能及时测定时将水样放于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷冻保存。采集完毕后排空径流池,关闭上部彩钢瓦以防止降雨直接进入径流池。分别测定水样中总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、可溶磷浓度:总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,铵态氮采用纳氏试剂分光光度法,硝态氮采用紫外分光光度法,总磷采用钼酸铵分光光度法,可溶性磷采用钼锑抗比色法<sup>[10]</sup>。水稻成熟后分别收获每个小区的水稻籽粒和秸秆测产。

### 1.5 数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2010进行数据整理,Origin 2018绘图,采用SPSS 19单因素方差分析进行显著性检验( $P<0.05$ 表示差异显著),LSD和Duncan法进行均值比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻季降雨和径流特征

水稻季降雨量和径流量如图1所示。水稻季降

雨量变化范围为 $0.20\sim 43.20\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,降雨量总和为 $407.20\text{ mm}$ ,集中发生在7月,其占整个水稻季降雨量的49.40%。生长期共采集径流水样6次,径流变化范围为 $25.40\sim 195.00\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,径流总量为 $476.50\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,其中4次径流集中在7月发生,占总径流量的62.40%。径流量除直接受降雨量影响以外,还受灌溉和水稻生长情况以及降雨强度等因素影响,这些导致径流量与降雨量不呈线性关系。

### 2.2 不同施肥模式稻田径流氮素浓度

不同施肥模式稻田径流总氮浓度如图2所示。整个水稻季径流总氮浓度范围为 $0.27\sim 10.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均浓度为 $3.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。施分蘖肥后第6 d总氮浓度最高,为 $1.61\sim 10.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。7月2日除CF处理外,其他各处理总氮浓度均低于 $3.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。7月5日降雨量较大,各施肥处理径流总氮浓度都有升高且较为接近,为 $6.85\sim 7.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。7月27日所有施肥处理的总氮浓度降至最低,平均为 $0.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。8月24日由于穗肥的施入,各施肥处理浓度略有升高。在水稻不同阶段施肥后,各施肥处理径流总氮浓度均表现为分

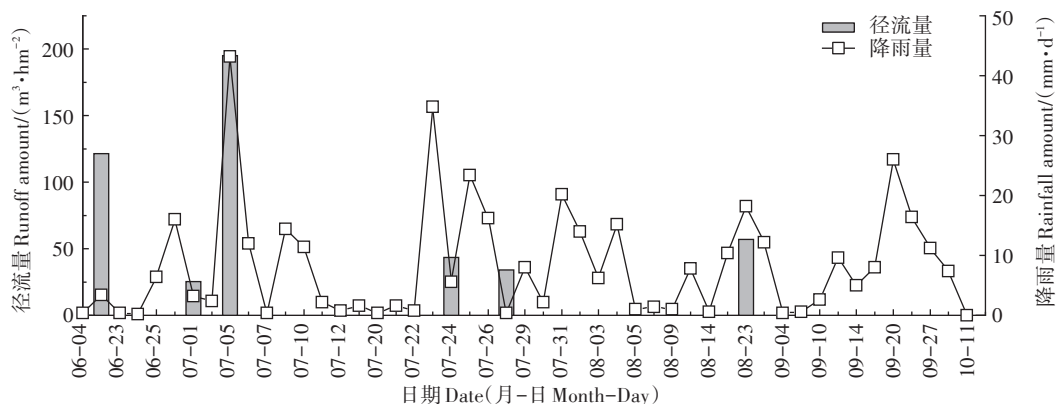


图1 水稻生长期降雨量和径流量

Figure 1 Rainfall and runoff during rice growing period

藁肥期>穗肥期。整个水稻生长期,化肥处理(CF和T1)径流总氮浓度高于施用有机肥替代化肥(T2~T5)和缓控释肥(T6)处理,这与宁建凤等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。

不同施肥模式稻田径流铵态氮浓度如图3所示。整个水稻季径流铵态氮浓度范围为0.17~6.19 mg·L<sup>-1</sup>,平均浓度为0.80 mg·L<sup>-1</sup>。6月18日CF处理铵态氮浓度高至6.19 mg·L<sup>-1</sup>。从7月2日开始径流铵态氮浓度处于较低水平,且趋于稳定,在0.13~1.35 mg·L<sup>-1</sup>之间。分蘖肥的施入提高了稻田径流铵态氮浓度,6月18日采集的稻田径流铵态氮浓度均高于其余5次采集的浓度,后期径流铵态氮浓度低于1.35 mg·L<sup>-1</sup>,由于穗肥的施入量较小并且施入时间距离发生径流时间间隔较长,因此稻田径流铵态氮浓度没有显著升高,各施肥处理铵态氮浓度峰值均表现为分蘖肥>穗

肥。在整个水稻生长阶段,CK处理铵态氮浓度均低于0.35 mg·L<sup>-1</sup>。

不同施肥模式径流硝态氮浓度如图4所示。水稻径流硝态氮浓度受施肥和降雨影响较为显著,整个水稻季径流硝态氮浓度范围为0.21~3.00 mg·L<sup>-1</sup>,平均浓度为1.33 mg·L<sup>-1</sup>。施入分蘖肥后,第一次采集的稻田径流各施肥处理硝态氮浓度都处于相对较高水平,高于1.35 mg·L<sup>-1</sup>。7月2日各施肥处理硝态氮浓度显著下降,7月5日受强降雨影响,各施肥处理硝态氮浓度都略有回升,提高了径流池水样硝态氮浓度,这和陈永高等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。补施穗肥氮素后,8月24日各施肥处理硝态氮浓度呈现升高趋势。T4处理初始硝态氮浓度仅为1.76 mg·L<sup>-1</sup>,在8月24日其硝态氮浓度达到3.00 mg·L<sup>-1</sup>。

### 2.3 不同施肥模式径流磷素浓度

不同施肥模式径流总磷浓度如图5所示。稻田径流总磷浓度在0.03~0.91 mg·L<sup>-1</sup>之间,平均浓度为0.30 mg·L<sup>-1</sup>,在整个水稻生长期,径流总磷浓度趋于稳定。T6处理总磷浓度高于其他施肥处理,平均浓度为0.71 mg·L<sup>-1</sup>,其中7月24日和7月27日采集的径流样总磷浓度为0.52 mg·L<sup>-1</sup>和0.91 mg·L<sup>-1</sup>。T4处理前3次采样总磷浓度较低,在0.23~0.28 mg·L<sup>-1</sup>之间,从7月24日开始升高,7月27日达到峰值,为0.61 mg·L<sup>-1</sup>。

不同施肥模式径流可溶磷浓度如图6所示。稻田径流可溶磷的浓度在0.04~0.45 mg·L<sup>-1</sup>之间,平均浓度为0.34 mg·L<sup>-1</sup>,各施肥处理可溶磷浓度普遍低于0.50 mg·L<sup>-1</sup>,较为稳定。6月18日CF处理可溶磷浓度

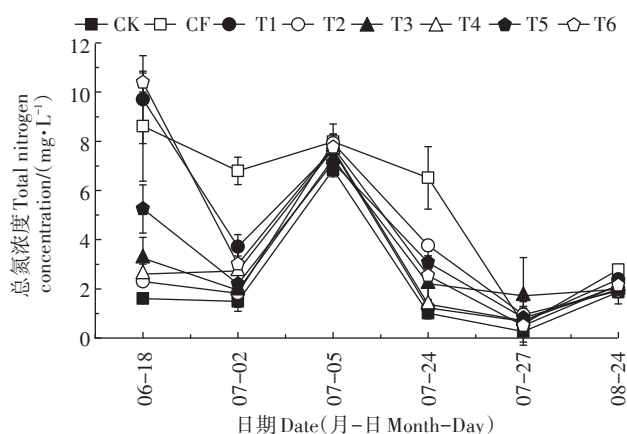


图2 稻田径流总氮浓度

Figure 2 Concentrations of total nitrogen in runoff water from rice fields

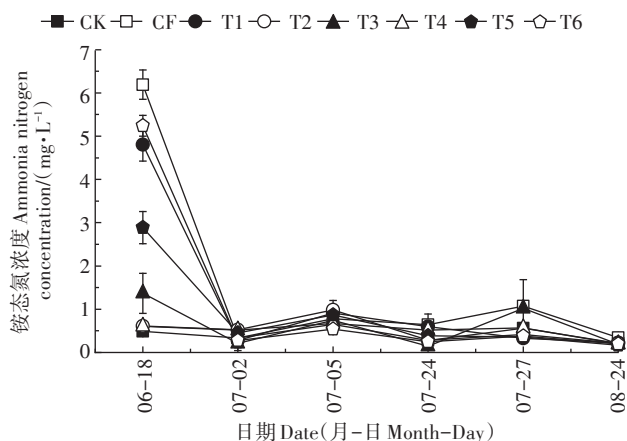


图3 稻田径流铵态氮浓度

Figure 3 Concentrations of ammonia nitrogen in runoff water from rice fields

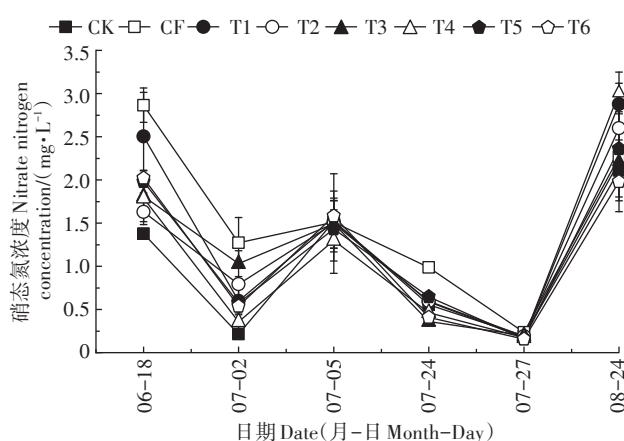


图4 稻田径流硝态氮浓度

Figure 4 Concentrations of nitrate nitrogen in runoff water from rice fields

高于其他施肥处理,7月24日和27日采集的水样可溶磷浓度显著低于T4和T6处理。T4的可溶磷浓度较高,在 $0.17\sim 0.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,前5次采样中可溶磷浓度缓慢升高,在7月27日达到峰值 $0.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,随后可溶磷浓度开始降低。T6的可溶磷浓度同样有升高的趋势,在7月24日达到峰值 $0.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

## 2.4 不同施肥模式对稻田径流氮磷流失量的影响

稻田径流氮素流失量如表2所示。稻田径流总氮流失量呈 $\text{T1}>\text{CF}>\text{T6}>\text{T3}>\text{T4}>\text{T5}>\text{CK}>\text{T2}$ , CF和T1处理的总氮流失量分别为 $32.26\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $32.30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,都处于较高水平,两者之间差异不显著。T6处理总氮流失量为 $27.18\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,比CF的总氮流失量降低了15.7%。施用有机肥的T3、T4、T5和T2处理总氮流失量分别比CF低10.19、12.47、12.62  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和13.03  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,即分别降低31.6%、38.6%、39.1%和40.4%。稻田径流铵态氮流失量在 $2.56\sim 8.55\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

之间,占稻田径流总氮的13.2%~30.6%,呈 $\text{CF}>\text{T1}>\text{T4}>\text{T2}>\text{T3}>\text{T5}>\text{CK}>\text{T6}$ , CF处理的铵态氮流失量最大,为 $8.55\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。T1处理可降低稻田径流铵态氮流失量,较CF处理降低了 $2.03\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施用有机肥的T4、T2、T3、T5处理铵态氮流失量分别较CF处理降低2.49、2.98、4.00、 $5.17\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,即分别降低29.1%、34.9%、46.8%和60.5%。T6处理对稻田径流铵态氮流失量的削减效果最好,铵态氮浓度低至 $2.16\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。稻田径流硝态氮占总氮流失量的22.5%~37.2%,稻田径流硝态氮的流失量呈 $\text{CF}>\text{T1}>\text{T4}>\text{T5}>\text{T3}>\text{T2}>\text{T6}>\text{CK}$ 的趋势,CF处理的硝态氮流失量最大,达到 $9.12\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。T1处理有效降低了硝态氮浓度,比CF低了14.7%。T6处理也降低了硝态氮的流失量,降幅为32.9%。施用有机肥处理的T4、T5、T3和T2处理都不同程度降低了硝态氮浓度,降幅为19.3%~30.2%。

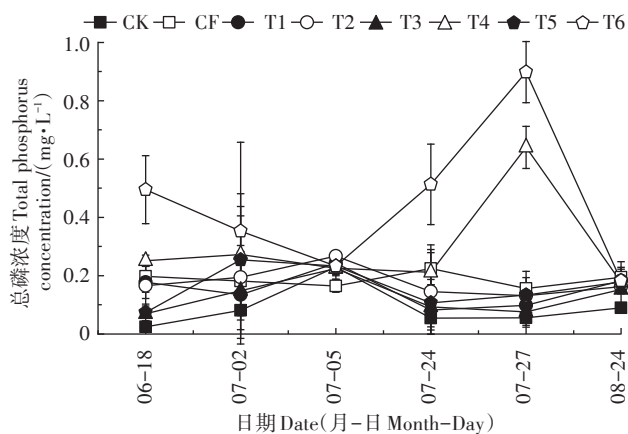


图5 稻田径流总磷浓度

Figure 5 Concentrations of total phosphorus in runoff water from rice fields

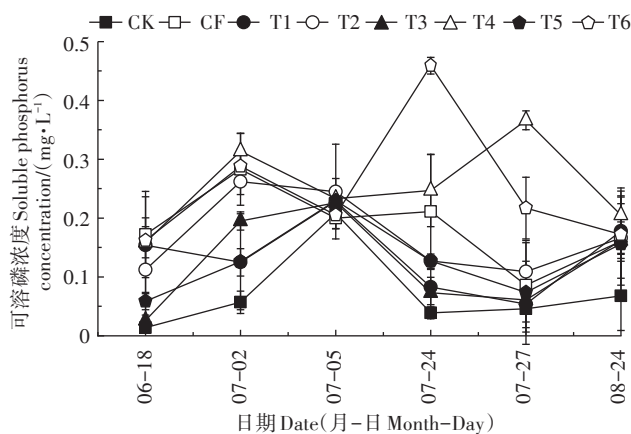


图6 稻田径流可溶磷浓度

Figure 6 Concentrations of soluble phosphorus in runoff water from rice fields

表2 稻田径流氮磷流失量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Table 2 N and P loss in runoff water from rice fields( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 处理<br>Treatments | 总氮<br>TN                | 铵态氮<br>$\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 硝态氮<br>$\text{NO}_3^--\text{N}$ | 总磷<br>TP                 | 可溶磷<br>SP               |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| CK               | $19.42\pm 0.04\text{b}$ | $2.56\pm 0.21\text{e}$          | $5.96\pm 0.11\text{d}$          | $0.73\pm 0.08\text{c}$   | $0.61\pm 0.04\text{b}$  |
| CF               | $32.26\pm 0.03\text{a}$ | $8.55\pm 0.13\text{a}$          | $9.12\pm 0.21\text{a}$          | $0.86\pm 0.10\text{bc}$  | $0.85\pm 0.03\text{ab}$ |
| T1               | $32.30\pm 0.03\text{a}$ | $6.52\pm 0.15\text{b}$          | $7.78\pm 0.22\text{b}$          | $1.00\pm 0.07\text{abc}$ | $0.91\pm 0.02\text{ab}$ |
| T2               | $19.23\pm 0.02\text{b}$ | $5.57\pm 0.22\text{c}$          | $6.37\pm 0.09\text{d}$          | $0.88\pm 0.03\text{bc}$  | $0.78\pm 0.11\text{ab}$ |
| T3               | $22.07\pm 0.02\text{b}$ | $4.55\pm 0.34\text{c}$          | $6.49\pm 0.21\text{cd}$         | $0.66\pm 0.12\text{c}$   | $0.61\pm 0.06\text{b}$  |
| T4               | $19.79\pm 0.05\text{b}$ | $6.06\pm 0.25\text{bc}$         | $7.36\pm 0.05\text{bc}$         | $1.43\pm 0.05\text{a}$   | $1.28\pm 0.05\text{a}$  |
| T5               | $19.64\pm 0.02\text{b}$ | $3.38\pm 0.22\text{d}$          | $6.55\pm 0.18\text{cd}$         | $0.71\pm 0.12\text{c}$   | $0.65\pm 0.11\text{b}$  |
| T6               | $27.18\pm 0.06\text{a}$ | $2.16\pm 0.33\text{e}$          | $6.12\pm 0.20\text{d}$          | $1.25\pm 0.07\text{ab}$  | $1.10\pm 0.09\text{ab}$ |

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 row indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same below.

稻田径流磷素流失量如表2所示。稻田径流总磷流失量和可溶磷流失量均呈  $T_4>T_6>T_1>CF>T_2>CK>T_5>T_3$ 。与CF处理相比,  $T_1$ 、 $T_4$ 和 $T_6$ 处理增加了总磷流失量的16.3%、66.3%和45.3%,而 $T_3$ 和 $T_5$ 降低了总磷流失量的23.3%和17.4%,  $T_2$ 无显著差异。稻田径流可溶磷流失量占总磷流失量的83.6%~98.8%,磷素流失形态以可溶磷为主。

## 2.5 不同施肥模式对水稻产量的影响

不同施肥模式水稻籽粒和秸秆产量见表3。稻田籽粒产量呈  $T_6>CF>T_1>T_5>T_3>T_4>T_2>CK$ 。 $T_6$ 处理的籽粒产量达到  $11.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与CF处理无显著差异,  $T_1$ 处理的籽粒产量为  $10.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,比CF处理下降9.5%,施用有机肥处理( $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 和 $T_5$ )的籽粒产量比CF处理下降11.8%~42.9%,其中 $T_2$ 籽粒产量仅为  $6.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。但和等氮(磷)投入的化肥减量模式 $T_1$ 处理相比,施用有机肥模式的 $T_3$ 和 $T_5$ 处理的籽粒产量无显著差异。 $CK$ 水稻籽粒产量最低,仅为  $5.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。稻田秸秆产量与稻田籽粒产量较为相似,呈  $T_6>CF>T_1>T_4>T_3>T_5>CK>T_2$ 。 $T_6$ 、 $T_1$ 和 $T_4$ 处理秸秆产量与CF处理无显著差异,施用有机肥的 $T_2$ 、 $T_3$ 和 $T_5$ 处理均不同程度降低了稻田秸秆的产量,降幅为15.5%~36%。 $CK$ 水稻秸秆产量最低,仅为  $5.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

## 3 讨论

### 3.1 不同施肥模式对氮素径流流失的影响

本研究中,稻田径流总氮浓度受施肥和降雨影响较大,整个水稻季径流总氮浓度范围为  $0.27 \sim 10.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。6月18日总氮浓度在  $1.61 \sim 10.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其原因为6月12日施入分蘖肥所致,化肥施入稻田后除一部分被作物吸收外,大部分会存在于田面水中,从而使此次采集的径流水样浓度最高。7月5日降雨量

较大,各施肥处理下径流总氮浓度都有升高且较为接近,处于  $6.85 \sim 7.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。强降雨对稻田土壤的冲击力较大,导致农田土壤随径流水流失的风险加大,原本存在于土壤中的氮素也会溶于水,提高了径流总氮浓度。6月18日采集的稻田径流铵态氮浓度在  $0.49 \sim 6.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,高于其余5次稻田径流铵态氮的浓度,其余径流铵态氮浓度均低于  $1.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,说明铵态氮在水稻生长前期明显高于水稻生长后期,这主要由于施肥主要在水稻生长前期,且水稻生长量偏小,对肥料养分需求小。水稻径流硝态氮浓度受施肥和降雨影响较为显著,整个水稻季径流硝态氮浓度变化范围为  $0.21 \sim 3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。6月18日各施肥处理硝态氮浓度均值为  $1.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,8月24日各施肥处理硝态氮浓度均值为  $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,高于其他4次稻田径流硝态氮浓度,这可能是因为前期水稻秧苗较小对氮素利用较少,且灌溉水、雨水和施入穗肥补充了氮素所致。

不同施肥处理下稻田径流总氮流失量为  $19.23 \sim 32.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,稻田径流总氮流失量呈  $T_1>CF>T_6>T_3>T_4>T_5>CK>T_2$ 。CF处理施用的尿素为无机养分,在土壤中释放较快,而水稻在生长期需要持续供应养分,所以导致部分未被利用的养分随径流流失<sup>[13]</sup>。如表2所示,CF处理的总氮流失量为  $32.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , $T_1$ 和 $T_6$ 处理的总氮流失量和CF处理无显著差异,但显著高于有机肥处理 $T_2 \sim T_5$ 和 $CK$ 处理( $P<0.05$ )。与肖雪玉等<sup>[14]</sup>的研究结果一致, $T_6$ 处理的总氮流失量、铵态氮流失量和硝态氮流失量分别为  $27.18$ 、 $2.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和  $6.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,均低于CF处理的氮素流失量。与吴美玲等<sup>[15]</sup>研究结果相似,施用有机肥可以显著降低水稻径流总氮浓度,本研究 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 和 $T_5$ 处理总氮流失量为  $19.23$ 、 $22.07$ 、 $19.79$ 和  $19.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,分别较CF处理降低40.4%、31.6%、38.6%、39.1%,施用有机肥同样降低了铵态氮和硝态氮流失量。张玉平等<sup>[16]</sup>研究结果也表明,在等氮、磷养分施用条件下,有机无机肥配施有利于降低地表氮磷径流损失。

### 3.2 不同施肥模式对磷素径流流失的影响

本研究中,稻田径流总磷和可溶磷浓度较为稳定,稻田径流总磷浓度在  $0.03 \sim 0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度为  $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 $T_6$ 处理总磷浓度在水稻生长前期和水稻生长后期均高于其他施肥处理,前期可能与缓控释肥溶解缓慢,部分未溶解的缓控释肥直接通过径流损失,导致径流总磷浓度升高。后期缓控释肥养分缓慢释放提高了田面水的浓度,进而提高了径流总

表3 水稻籽粒和秸秆产量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 3 Grain and straw yield of rice( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

| 处理<br>Treatments | 籽粒产量<br>Grain yield       | 秸秆产量<br>Straw yield      |
|------------------|---------------------------|--------------------------|
| CK               | $5.91 \pm 0.76\text{e}$   | $5.50 \pm 0.86\text{c}$  |
| CF               | $11.05 \pm 1.58\text{ab}$ | $7.27 \pm 1.40\text{ab}$ |
| $T_1$            | $10.00 \pm 0.16\text{bc}$ | $7.16 \pm 0.50\text{ab}$ |
| $T_2$            | $6.31 \pm 0.90\text{e}$   | $4.65 \pm 1.31\text{c}$  |
| $T_3$            | $9.67 \pm 1.30\text{cd}$  | $6.14 \pm 1.56\text{b}$  |
| $T_4$            | $8.84 \pm 0.77\text{d}$   | $6.53 \pm 0.27\text{b}$  |
| $T_5$            | $9.75 \pm 1.53\text{cd}$  | $6.11 \pm 1.23\text{b}$  |
| $T_6$            | $11.24 \pm 0.84\text{a}$  | $7.52 \pm 0.72\text{a}$  |

磷浓度。T4处理总磷浓度在7月24日开始升高,这与有机肥使用量大和有机肥养分释放缓慢有关。稻田径流可溶磷的浓度在 $0.04\sim 0.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度为 $0.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水稻生长中期各施肥处理径流可溶磷浓度高于水稻生长前期,这可能是稻田长期在淹水条件下受降雨扰动,释放出了一部分被固持在土壤中的磷素,从而使径流可溶磷浓度升高。后期各施肥处理径流水样可溶磷浓度开始降低,这与作物中后期需磷量升高有关。不同处理间可溶磷浓度变化规律与总磷一致,T4和T6处理在7月24日和7月27日磷素浓度明显高于其他施肥模式磷素浓度。

不同施肥模式下稻田径流总磷流失量为 $0.66\sim 1.43\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,稻田径流总磷流失量呈 $T4>T6>T1>T2>CF>CK>T5>T3$ 。与CF处理相比,T1、T4和T6处理增加了总磷流失量的16.3%、66.3%和45.3%,而T3和T5处理降低了总磷流失量的23.3%和17.4%,T2处理无显著差异。T4处理有机肥投入量高达 $26\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,导致该处理径流总磷流失量为 $1.43\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [17-18]。T6处理水稻径流总磷流失量较大,为 $1.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,这可能是由于高强度降雨对土壤的冲刷强度较大,雨滴溅蚀破坏土壤团聚体结构,分散表层土壤,土壤颗粒被径流水携带进入径流池,径流中泥沙颗粒含量较高,泥沙中的缓控释肥导致产流中磷流失量升高[19]。有机肥处理中的T3和T5处理的总磷流失量为 $0.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.71\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。T3处理投入的磷素全部来自有机肥,有机肥中的磷素以有机态磷为主,不能被作物吸收利用,有机态磷需要一定时间水解矿化成无机态磷,同时T3处理有机肥投入量为 $2\,609\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,低于其他3个有机肥处理施肥量,所以T3总磷流失量处于最低水平[20]。T5处理的有机肥投入量高于T2处理,有机肥提供所需磷素,用尿素补充所缺氮素,导致T5处理的有机肥投入量的总磷流失量低于T2处理,化肥配施有机肥可明显降低磷素流失量,有利于水稻高产稳产[21-22]。T4处理的总磷流失量有机肥施用量为 $26\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,总磷流失量为 $1.43\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,比CF处理增加66.3%,说明施用有机肥量增至一定程度时,反而会增加总磷流失量[23]。水稻径流可溶磷流失量趋势与总磷流失量类似,总体呈 $T4>T6>T1>CF>T2>T5>T3>CK$ ,可溶磷流失量占总磷流失量83.6%~98.8%,说明磷素的流失以可溶态为主。

### 3.3 不同施肥模式对水稻产量的影响

水稻籽粒产量呈 $T6>CF>T1>T5>T3>T4>T2>CK$ ,

T6处理籽粒产量达到 $11.24\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与CF处理的籽粒产量无显著差异。缓控释肥作为新型肥料,能很好地满足作物不同生长时期的养分需求,通过提高作物生长中后期的供肥能力,促进速效养分对作物生长的供应,从而提高了水稻籽粒和秸秆的产量[24]。T1处理籽粒产量为 $10.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,和CF处理相比未出现显著减产。与T1处理相比,施用等磷投入的有机肥处理T3和T5在施用有机肥的基础上增施尿素提供氮源,在有机无机配施的基础上能保证作物的产量,3个处理间籽粒产量无显著差异,这和蔡媛媛等[25]的研究结果一致。有机肥施用处理T4和T2其籽粒产量均有所下降,其中T2降低最多,仅为 $6.31\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,其原因是仅投入有机肥料,有机肥释放养分较为缓慢,不能满足水稻生育前期营养需求,进而造成水稻减产[26]。CK处理水稻籽粒产量最低,仅为 $5.91\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,说明施肥可有效提高水稻籽粒产量。水稻秸秆产量趋势与水稻籽粒产量较为相似,呈 $T6>CF>T1>T4>T3>T5>CK>T2$ 。可以发现,T6处理同时提高了水稻籽粒和秸秆的产量,有机肥施用的T5、T3和T2处理秸秆产量同样下降,而T4处理秸秆产量大于其他有机肥处理,可能原因是T4处理有机肥投入较高,造成水稻贪青晚熟,秸秆产量较高,从而使水稻籽粒产量降低[27]。

## 4 结论

(1)与常规施肥相比,化肥减量处理的总氮径流流失量无显著差异,有机肥替代处理和缓控释肥处理均降低总氮径流流失量;与常规施肥相比,有机肥替代处理T2总磷径流流失量无显著差异,高量施用有机肥和施用缓控释肥处理均增加总磷径流流失量。

(2)与常规施肥相比,施用缓控释肥处理的籽粒产量无显著差异,化肥减量和有机肥替代处理的籽粒产量分别降低9.5%和11.8%~42.9%,与减量施肥相比,施用有机肥处理T3和T5的籽粒产量无显著差异;与常规施肥相比,化肥减量、施用有机肥处理T5和施用缓控释肥处理的秸秆产量无显著差异,其他施肥处理的秸秆产量降低15.5%~36.0%。

(3)综合考虑不同施肥模式的稻田径流流失量和水稻产量等因素,化肥减量、有机无机配施模式和施用缓控释肥是可供选择的环境友好型施肥模式。

### 参考文献:

- [1] 项颂,万玲,庞燕.土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J].农业环境科学学报,2020,39(1):160-170. XIANG

- Song, WAN Ling, PANG Yan. Spatial-temporal variation of inflow river water quality under land use effect[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(1): 160-170.
- [2] 刘培财, 雷宝坤, 翟丽梅, 等. 农田氮素管理模式对洱海流域大蒜生长和氮素流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1364-1370. LIU Pei-cai, LEI Bao-kun, ZHAI Li-mei, et al. Effects of nitrogen managements on growth of garlic and risk of nitrogen loss in field of Erhai Lake basin, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(7): 1364-1370.
- [3] Bengtsson L, Herschy R W, Fairbridge R W. Encyclopedia of lakes and reservoirs[M]. Netherlands: Springer, 2012: 258-270.
- [4] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同施肥强度对水稻季稻田氨挥发的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 672-678. SHI Ze-sheng, XU Yong-bo, LEI Bao-kun, et al. Ammonia volatilization under different nitrogen application rates in paddy soil in the northern Erhai Lake area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 672-678.
- [5] 姚金玲, 张克强, 郭海刚, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2287-2296. YAO Jin-ling, ZHANG Ke-qiang, GUO Hai-gang, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses during rice-garlic rotation in Erhai Lake basin under different fertilization methods[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2017, 36(11): 2287-2296.
- [6] Lee C, Feyereisen G W, Hristov A N, et al. Effects of dietary protein concentration on ammonia volatilization, nitrate leaching, and plant nitrogen uptake from dairy manure applied to lysimeters[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 398-408.
- [7] 蔡佳佩, 朱坚, 彭华, 等. 有机肥施用对田面水氮磷流失风险的影响[J]. 环境科学研究, 2020, 33(1): 210-217. CAI Jia-pei, ZHU Jian, PENG Hua, et al. Effects of organic fertilizer on the risk of nitrogen and phosphorus loss in soil surface water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 3(1): 210-217.
- [8] 石敦杰, 杨兰, 荣湘民, 等. 控释氮肥和氮磷减量对水稻产量及田面水氮磷流失的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 44-47. SHI Dun-jie, YANG Lan, RONG Xiang-min, et al. Effects of controlled release nitrogen and reduction of nitrogen and phosphorus on rice yield and nitrogen and phosphorus loss in paddy fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(11): 44-47.
- [9] 栾玉泉, 谢宝川. 洱海流域环境保护和综合管理[J]. 大理学院学报, 2007, 12(6): 38-40. LUAN Yu-quan, XIE Bao-chuan. Environment protection and comprehensive administration of the basin of Erhai[J]. *Journal of Dali University*, 2007, 12(6): 38-40.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701-705. State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701-705.
- [11] 宁建凤, 徐培智, 杨少海, 等. 有机无机肥配施对菜地土壤氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 17-21. NING Jian-feng, XU Pei-zhi, YANG Shao-hai, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on soil nitrogen runoff in vegetable field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 17-21.
- [12] 陈永高, 张瑞斌. 不同施肥模式对太湖流域农田土体氮磷流失与营养累积的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 115-119. CHEN Yong-gao, ZHANG Rui-bin. Effects of fertilization patterns on loss of soil nitrogen, phosphorus and nutrients accumulation in farmlands of Taihu Lake basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2): 115-119.
- [13] 张爱平, 刘汝亮, 杨世琦, 等. 基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 555-562. ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, YANG Shi-qi, et al. Effect of side bar fertilization technology based on slow-release fertilizer on rice yield and nitrogen losses[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2012, 31(3): 555-562.
- [14] 肖雪玉, 朱文博, 杨丹, 等. 施用控释氮肥对早稻田面水氮素动态变化和水稻产量的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2252-2257. XIAO Xue-yu, ZHU Wen-bo, YANG Dan, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen dynamic characteristics in surface water and yield in early paddy field[J]. *Ecology and Environment*, 2018, 27(12): 2252-2257.
- [15] 吴美玲, 张绍荣, 龙国, 等. 有机肥控制稻田氮磷流失风险效果初步研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(18): 4328-4332. WU Mei-ling, ZHANG Shao-rong, LONG Guo, et al. Preliminary study on the risk controlling effect of organic fertilizer on nitrogen and phosphorus loss in paddy field[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(18): 4328-4332.
- [16] 张玉平, 荣湘民, 刘强, 等. 有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 44-48, 54. ZHANG Yu-ping, RONG Xiang-min, LIU Qiang, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilizer on crop nutrient utilization rate, nitrogen and phosphorus loss in dry land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 44-48, 54.
- [17] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 326-335. XI Bin, ZHAI Li-mei, LIU Shen, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 326-335.
- [18] 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, 35(5): 89-96. MA Fan-fan, XING Su-lin, GAN Man-qin, et al. Effects of organic fertilizer substitution on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Crops*, 2019, 35(5): 89-96.
- [19] 关荣浩, 马保国, 黄志僖, 等. 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 581-589. GUAN Rong-hao, MA Bao-guo, HUANG Zhi-xi, et al. Experimental study of simulated rainfall on nitrogen and phosphorus loss from farmland in Southern Hebei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(3): 581-589.
- [20] 张春霞, 文宏达, 刘宏斌, 等. 优化施肥对大棚番茄氮素利用和氮素淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1139-1145. ZHANG Chun-xia, WEN Hong-da, LIU Hong-bin, et al. Effect of op-

- timum fertilization on nitrogen use efficiency and nitrate leaching in the greenhouses[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5):1139-1145.
- [21] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10):3133-3139. XU Ming-gang, LI Dong-chu, LI Ju-mei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10):3133-3139.
- [22] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2):532-542. MENG Lin, ZHANG Xiao-li, JIANG Xiao-fang, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2):532-542.
- [23] 田昌, 周旋, 杨俊彦, 等. 化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2):311-319. TIAN Chang, ZHOU Xuan, YANG Jun-yan, et al. Effects of reducing nitrogen and phosphorous fertilizers on rice yield, nitrogen and phosphorus losses in paddy field[J]. *Soils*, 2020, 52(2):311-319.
- [24] 刘汝亮, 王芳, 王开军, 等. 不同类型肥料对东北地区稻田氮磷损失和水稻产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10):63-68. LIU Ru-liang, WANG Fang, WANG Kai-jun, et al. Effects of different types of fertilizers on nitrogen and phosphorus loss and rice yield in northeast China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10):63-68.
- [25] 蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 等. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4):503-510. CAI Yuan-yuan, WANG Rui-qi, WANG Li-li, et al. Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4):503-510.
- [26] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2):405-412. LIU Hong-jiang, CHEN Yu-wen, SUN Guo-feng, et al. Effects of different organic-inorganic fertilizer combination ratios on rice yield and nutrient loss with surface runoff[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(2):405-412.
- [27] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5):61-66. LIU Hong-jiang, JIANG Hua-wei, SUN Guo-feng, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5):61-66.