

## 单季稻氮磷吸收及径流流失对不同肥料施用的响应

方晨露<sup>1</sup>, 简永旗<sup>1</sup>, 吴家森<sup>1</sup>, 张艳<sup>1</sup>, 鲁长根<sup>2</sup>, 邵建均<sup>2</sup>, 郭飞飞<sup>3</sup>, 姜培坤<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省农业农村生态与能源总站, 浙江 杭州 310012; 3. 中国大自然保护协会, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 【目的】旨在探讨施用有机肥(菜籽饼)、调理剂(贝壳砂)、炭基肥对稻田土壤氮磷流失和水稻 *Oryza sativa* 产量的影响。【方法】共设置不施肥(ck)、常规施肥(T<sub>1</sub>)、有机肥(T<sub>2</sub>)、常规施肥+调理剂(T<sub>3</sub>)、炭基肥(T<sub>4</sub>)5个处理, 不同施肥处理的氮、五氧化二磷、氧化钾用量均为 270、75、150 kg·hm<sup>-2</sup>。通过对比 5 个处理之间土壤施肥前后氮磷质量分数、水稻产量、水稻籽粒和秸秆中的氮磷质量分数, 结合 6–9 月径流水氮磷质量浓度监测结果, 研究不同施肥处理减少氮磷流失的效果。【结果】施肥显著提高了水稻籽粒、秸秆的氮磷积累量和水稻籽粒产量。与 ck 相比, 4 个施肥处理增加水稻籽粒产量 51.22%~63.41%( $P<0.05$ ), 但 4 个处理之间无显著差异。5 个处理的氮和磷的流失量分别为 4.91~9.56 和 0.70~1.35 kg·hm<sup>-2</sup>, 其流失量从大到小依次为 T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、ck。4 个施肥处理的氮和磷的流失率分别为 0.82%~1.72% 和 0.65%~1.99%, 从大到小依次为 T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>。【结论】施用调理剂和炭基肥均能有效增加水稻产量, 减少氮磷的流失, 但施用有机肥处理具有最大径流流失量, 因此需注意施肥的时间和方式, 有效减少氮磷的流失和环境污染。图 5 表 4 参 32

**关键词:** 有机肥; 调理剂; 炭基肥; 氮磷流失

中图分类号: S157 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)06-1187-08

## Response of nitrogen and phosphorus uptake and runoff loss in single cropping rice to different fertilization treatments

FANG Chenlu<sup>1</sup>, JIAN Yongqi<sup>1</sup>, WU Jiasen<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, LU Changgen<sup>2</sup>,  
SHAO Jianjun<sup>2</sup>, GUO Feifei<sup>3</sup>, JIANG Peikun<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Agricultural and Rural Ecology and Energy Station, Hangzhou 310012, Zhejiang China; 3. China Nature Conservancy, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] The purpose of this study is to investigate the effects of organic fertilizer (rapeseed cake), conditioner (shell sand), and carbon based fertilizer on soil nitrogen and phosphorus loss and rice yield of *Oryza sativa*. [Method] The five treatments of this study were no fertilization (ck), conventional fertilization (T<sub>1</sub>), organic fertilizer substitution (T<sub>2</sub>), conventional fertilization+conditioner (T<sub>3</sub>), and carbon based fertilizer (T<sub>4</sub>). The amount of nitrogen (N), phosphorus pentoxide (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and potassium oxide (K<sub>2</sub>O) used in different fertilization treatments were 270, 75 and 150 kg·hm<sup>-2</sup>. The effects of different fertilization treatments on nitrogen and phosphorus loss were studied by comparing the nitrogen and phosphorus contents in soil, rice yield, rice grain and straw before and after fertilization among the five treatments, combined with the monitoring results of nitrogen and phosphorus concentration in runoff from June to September.

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2021-04-25

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C03121); 浙江省公益技术应用研究项目(LGF18D010003, 2017C33111)

作者简介: 方晨露 (ORCID: 0000-0001-9808-6137), 从事农业资源利用研究。E-mail: 834155904@qq.com。通信作者: 姜培坤 (ORCID: 0000-0002-2311-2350), 教授, 从事农业资源与环境研究。E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

**[Result]** Fertilization significantly increased nitrogen and phosphorus accumulation in rice grain and straw as well as rice grain yield. Compared with ck, the four treatments increased grain yields by 51.22%–63.41% ( $P<0.05$ ), but there was no significant difference among the four treatments. The loss of nitrogen and phosphorus of the five treatments were 4.91–9.56  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  and 0.70–1.35  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  respectively, and the descending order of loss was  $T_2$ ,  $T_1$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  and ck. The runoff rates of nitrogen and phosphorus of the four fertilization treatments were 0.82%–1.72% and 0.65%–1.99%, respectively and the descending order was  $T_2$ ,  $T_1$ ,  $T_3$  and  $T_4$ . **[Conclusion]** The application of conditioner and carbon based fertilizer can effectively increase rice yield and reduce the loss of nitrogen and phosphorus ( $P<0.05$ ), but organic fertilizer treatment has the maximum runoff loss. Therefore, it is necessary to pay attention to the time and method of fertilization to effectively reduce nitrogen and phosphorus loss and environmental pollution. [Ch, 5 fig. 4 tab. 32 ref.]

**Key words:** organic fertilizer; conditioning agent; carbon based fertilizer; nitrogen and phosphorus loss

中国施用化肥量占全球总量的 1/3 以上<sup>[1]</sup>, 施肥重化肥、轻有机肥, 存在化肥过量、肥料利用效率低下等诸多问题。过量施肥会导致土壤中的氮含量偏高, 造成氮素和磷素流失<sup>[2]</sup>, 这些被流失的氮磷会随着地表径流和土壤垂直渗流至湖泊、河流, 导致水体污染<sup>[3]</sup>。氮磷养分流失是农业面源污染的主要来源之一<sup>[4]</sup>。水质恶化, 发黑、发臭, 对环境和人体健康产生了严重的负面影响<sup>[5]</sup>。科学施肥能提高肥料利用率, 减少氮磷流失<sup>[6]</sup>。已有研究发现: 化肥配施有机肥可增加作物产量<sup>[7]</sup>, 提高氮、磷、钾肥的利用率<sup>[8–10]</sup>, 显著降低土壤中的无机氮含量<sup>[11]</sup>; 贝壳粉调理剂有提高土壤养分、调节土壤酸碱度的功能<sup>[12]</sup>; 生物炭肥料能有效减少磷的损失<sup>[13]</sup>, 防止因大量使用化肥而造成的土壤退化, 提高氮的利用效率<sup>[14]</sup>, 实现作物高产、可持续生产<sup>[15]</sup>。本研究旨在探究有机肥、调理剂和生物炭为基质的炭基肥施加对减少氮磷流失、提高肥料利用率以及提高水稻 *Oryza sativa* 产量的效应。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于浙江省杭州市淳安县安阳乡上梧村 (30°24′46.4″N, 119°51′13.9″E), 为山地丘陵区。该区属中亚热带季风气候, 四季分明, 热量丰富, 雨量充沛, 光照充足, 无霜期长。年均气温为 17 ℃, 其中最低气温为 5.0 ℃, 最高气温为 28.9 ℃, 无霜期为 260~270 d, 年降水量为 1 153~1 864 mm, 年均相对湿度为 76%。土壤质地为黏土, pH 4.98, 有机质为 33.30  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮为 2.07  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全磷为 1.14  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全钾为 2.56  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效磷为 144  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾为 138  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

本研究在 2019 年 3–10 月进行, 3–4 月建立监测工程小区, 共建立 15 个径流小区, 小区面积为 6.5 m×4.5 m, 随机排列, 小区设有独立的灌水、排水系统和径流池装置, 径流池面积 3.0 m×0.8 m。如表 1 所示: 以等氮量为标准, 设置 5 个不同施肥处理: 不施肥 (ck), 常规施肥 ( $T_1$ ), 有机肥 ( $T_2$ ), 常规施肥+调理剂 ( $T_3$ ) 和炭基肥 ( $T_4$ ), 随机排列, 重复 3 次。2019 年 6 月 14 日翻耕农田, 6 月 16 日灌水和第 1 次施肥, 6 月 17 日插秧, 6 月 26 日对  $T_2$ 、 $T_3$  处理进行灌水和追肥,  $T_4$  处理一次性施肥,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理分 2 次施肥, 控制氮、磷施加量相等。7 月 30 日开始烤田, 10 月 5 日收割水稻并采样。

表 1 施肥处理及用量

Table 1 Fertilization treatments in rice season

| 处理    | 肥料氮用量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 基肥(6月16日)及用量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 追肥(6月26日)及用量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) |
|-------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| ck    | 0                                        | 0                                               | 0                                               |
| $T_1$ | 270.0                                    | 复合肥 750.0, 钙镁磷肥 125.0                           | 尿素 293.5, 氯化钾 24.2                              |
| $T_2$ | 270.0                                    | 菜籽饼 2 700.0, 钙镁磷肥 62.5                          | 尿素 293.5, 氯化钾 24.2                              |
| $T_3$ | 270.0                                    | 复合肥 750.0, 钙镁磷肥 125.0, 调理剂 333.3                | 尿素 293.5, 氯化钾 24.2                              |
| $T_4$ | 270.0                                    | 炭基肥 1 500.0                                     | 0                                               |

供试肥料为复合肥 ( $m_N : m_{P_2O_5} : m_{K_2O} = 18 : 8 : 18$ )；钙镁磷肥 (五氧化二磷质量分数为 12%)；尿素 (氮质量分数为 46%)；氯化钾 (氧化钾质量分数为 62%)；菜籽饼 ( $m_N : m_{P_2O_5} : m_{K_2O} = 5.0 : 2.5 : 1.0$ )；调理剂为海洋生物贝壳类经 550 ℃ 高温煅烧 2 h 后研磨成 2 mm 贝壳砂，基本理化性质为 pH 9.21，钙 57.8 g·kg<sup>-1</sup>，碳 119.1 g·kg<sup>-1</sup>，硫 2.5 g·kg<sup>-1</sup>，氮 0.8 g·kg<sup>-1</sup>，钾 122.0 g·kg<sup>-1</sup>；炭基肥 (遂昌绿金有机肥有限公司研制， $m_N : m_{P_2O_5} : m_{K_2O} : m_C = 18 : 5 : 10 : 25$ )。

### 1.3 样品采集与分析

1.3.1 土壤样品采集与分析 试验开始前和水稻收割之后均采用具有刻度的管形取土器采集，保持田面平整，使采集深度一致，将管型取土器钻入土层，取出土钻时上层水即流走，剩下潮湿土壤装入塑料袋中，小区内“S”型布点采样。采集的样品自然风干后过 2 mm 筛，封装待测。土壤 pH 采用 pH 计测定 ( $m_{水} : m_{土} = 2.5 : 1.0$ )；土壤有机质采用重铬酸钾容量法外加热法测定；土壤全氮采用浓硫酸消煮-半微量开氏法测定；土壤全磷采用高氯酸-硫酸消煮-钼锑抗比色法测定；土壤全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定；土壤有效磷采用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定；土壤速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定；土壤硝氮、氨氮采用氯化钾浸提-流动分析仪测定<sup>[16]</sup>。

1.3.2 作物样品采集与分析 水稻收割后，每小区采集 1 m<sup>2</sup> 有代表性的水稻植株和秸秆，将水稻籽粒烘干后称量，测定其平均含水率，测定水稻籽粒和秸秆的全磷、全氮质量分数。样品用硫酸-过氧化氢消煮，全磷采用钼锑抗分光光度法测定，全氮采用奈氏比色法测定<sup>[16]</sup>。

1.3.3 径流水样品采集与分析 水稻生长期间，在降雨产生径流后根据径流池内的水深，计算出径流量，并采集径流水样测定。径流水样的总磷采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定；总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

通过地表径流途径流失的氮磷量等于整个监测期间各次径流水中氮磷的质量浓度与径流水体积乘积之和。计算公式为： $P = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$ 。其中： $P$  为氮磷流失量 (kg·hm<sup>-2</sup>)； $C_i$  为第  $i$  次径流水中氮、磷的质量浓度 (mg·L<sup>-1</sup>)； $V_i$  为第  $i$  次径流水的体积 (m<sup>3</sup>)； $n$  为总径流次数。流失率等于不同施肥处理氮/磷径流总量与不施肥相比增加的百分比。计算公式为： $\eta_L = \frac{(L_m - L_0)}{L_0} \times 100\%$ 。其中： $\eta_L$  为流失率 (%)； $L_m$  为氮/磷流失量 (kg·hm<sup>-2</sup>)； $L_0$  为不施肥处理径流总量 (kg·hm<sup>-2</sup>)。肥料的养分利用率等于不同施肥处理作物氮/磷吸收积累总量比不施肥处理增加量占肥料中氮/磷量的百分比。计算公式为： $\eta_F = \frac{(A_d - A_0)}{F} \times 100\%$ 。其中： $\eta_F$  为肥料利用率 (%)； $A_d$  为不同施肥处理下作物氮/磷积累量 (kg·hm<sup>-2</sup>)； $A_0$  为不施肥处理下作物氮/磷积累量 (kg·hm<sup>-2</sup>)； $F$  为肥料中的氮/磷量。

采用 Origin 2018 作图，SPSS 22.0 进行数据分析及方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对土壤养分的影响

由表 2 可以看出：pH、有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾在不同施肥处理之间均没有显著差

表 2 不同施肥处理的土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties of different fertilization treatments

| 处理             | pH          | 有机质/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全钾/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------|-------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 本底             | 4.98        | 33.30                     | 2.07                     | 1.14                     | 25.60                    | 144                        | 138                        | 133                        |
| ck             | 5.03±0.25 a | 30.00±0.75 a              | 1.57±0.14 a              | 0.83±0.02 a              | 9.35±0.26 b              | 57±3 a                     | 72±5 a                     | 141±3 c                    |
| T <sub>1</sub> | 5.19±0.22 a | 25.07±2.03 a              | 1.29±0.16 a              | 0.96±0.15 a              | 10.37±0.77 ab            | 107±43 a                   | 82±8 a                     | 150±4 b                    |
| T <sub>2</sub> | 5.14±0.07 a | 28.67±0.44 a              | 1.62±0.21 a              | 0.95±0.02 a              | 11.53±1.47 ab            | 84±3 a                     | 79±12 a                    | 148±3 bc                   |
| T <sub>3</sub> | 5.67±0.26 a | 24.23±2.85 a              | 1.46±0.26 a              | 0.91±0.09 a              | 15.80±3.12 a             | 102±35 a                   | 68±26 a                    | 205±2 a                    |
| T <sub>4</sub> | 5.07±0.20 a | 33.73±8.66 a              | 1.45±0.10 a              | 0.84±0.04 a              | 10.33±1.28 ab            | 74±18 a                    | 65±2 a                     | 197±1 a                    |

说明：数据为平均值±标准差；不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

异 ( $P>0.05$ )。T<sub>3</sub> 处理的土壤全钾质量分数相较于 ck 增加了 68.98% ( $P<0.05$ )。不同施肥处理相较于 ck 均能增加 4.96%~45.39% 土壤碱解氮, 其中 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 处理显著高于 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理 ( $P<0.05$ )。

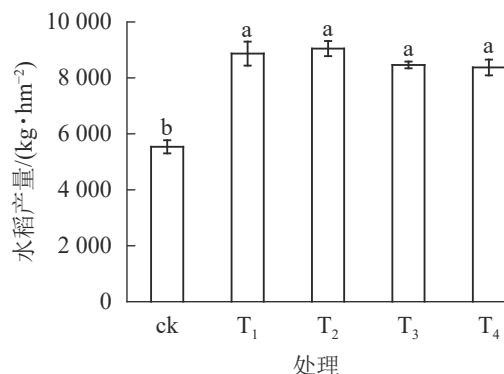
## 2.2 不同施肥处理对作物产量的影响

由图 1 可知: 不同肥料施用均显著增加了水稻籽粒产量 ( $P<0.05$ )。与 ck 相比, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理的水稻产量分别增产 60.16%、63.41%、52.84% 和 51.22%, 4 种不同施肥处理间的产量没有显著性差异 ( $P>0.05$ )。

## 2.3 不同施肥处理对水稻氮磷吸收及利用率的影响

如表 3 所示: 在水稻籽粒中, 不同施肥处理氮质量分数差异显著 ( $P<0.05$ ), 其中以 T<sub>1</sub> 处理最高, 为 10.93 g·kg<sup>-1</sup>, 其次是 T<sub>3</sub> 处理, 以 ck 处理最低; 磷质量分数无显著差异 ( $P>0.05$ ), 与 ck 相比, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理有略微下降; 钾质量分数从高到低依次为 ck、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>1</sub> 和 T<sub>3</sub>, 不同施肥处理均呈下降趋势。在水稻秸秆中, 氮质量分数以 T<sub>3</sub> 处理

最高, 相较于 ck, 增加了 107.35%, 差异显著 ( $P<0.05$ ); 与 ck 相比, 除 T<sub>4</sub> 处理外, 磷质量分数均减小, 但差异不显著 ( $P>0.05$ ); 钾质量分数没有明显的变化规律, 其中以 T<sub>3</sub> 处理最高, 为 31.64 g·kg<sup>-1</sup>, T<sub>4</sub> 处理最低, 各处理之间无显著差异 ( $P>0.05$ )。



不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )

图 1 不同施肥处理的水稻籽粒产量

Figure 1 Rice grain yields of different fertilization treatments

表 3 水稻植株中的氮磷质量分数

Table 3 Contents of N and P in rice plants

| 处理             | 籽粒/(g·kg <sup>-1</sup> ) |             |              | 秸秆/(g·kg <sup>-1</sup> ) |             |              |
|----------------|--------------------------|-------------|--------------|--------------------------|-------------|--------------|
|                | 氮                        | 磷           | 钾            | 氮                        | 磷           | 钾            |
| ck             | 8.41±0.18 c              | 3.74±0.07 a | 4.63±0.08 a  | 2.45±0.14 b              | 1.70±0.09 a | 31.03±0.65 a |
| T <sub>1</sub> | 10.93±0.36 a             | 3.71±0.14 a | 4.15±0.14 bc | 3.99±0.44 ab             | 1.37±0.05 a | 29.11±1.50 a |
| T <sub>2</sub> | 9.22±0.40 bc             | 3.73±0.11 a | 4.51±0.22 ab | 4.28±0.34 a              | 1.53±0.09 a | 28.22±0.17 a |
| T <sub>3</sub> | 9.98±0.67 ab             | 3.63±0.08 a | 4.03±0.06 c  | 5.08±0.94 a              | 1.39±0.15 a | 31.64±1.47 a |
| T <sub>4</sub> | 9.69±0.18 abc            | 3.77±0.08 a | 4.16±0.09 bc | 4.22±0.10 a              | 1.90±0.39 a | 28.12±1.51 a |

说明: 数据为平均值±标准差; 不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )

如图 2 所示: 在水稻籽粒中, 氮积累量从高到低依次为 T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>、ck, 且 T<sub>1</sub> 处理相较于 ck 显著增加了 106.9% ( $P<0.05$ ); 与 ck 相比, 磷积累量均显著增加 ( $P<0.05$ ), 但不同施肥处理之间无显著差异 ( $P>0.05$ )。在水稻秸秆中, 氮积累量以 T<sub>3</sub> 处理增量最大, 较 ck 处理增加了 29.48 kg·hm<sup>-2</sup>, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理积累量均显著高于 ck ( $P<0.05$ ); 磷积累量相较于 ck, 只有 T<sub>4</sub> 处理显著增加 ( $P<0.05$ ), 增量为 4.39 kg·hm<sup>-2</sup>, 其他施肥处理的磷积累量均无差异。且在不同施肥处理下, 水稻籽粒和秸秆对氮的积累量, 除 T<sub>1</sub> 处理外, T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理均有相同的变化趋势; 对磷积累量, 除 T<sub>4</sub> 处理外, 均有相同的增加趋势, 从高到低依次为 T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>。

如图 3 所示: 不同施肥处理的氮肥利用率为 20.74%~26.59%, 以 T<sub>1</sub> 处理最高, T<sub>4</sub> 处理最低, 磷肥利用率从高到低依次为 T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>, 不同处理间均没有显著差异 ( $P>0.05$ )。

## 2.4 不同施肥处理对径流氮磷流失的影响

从图 4 可以看出: T<sub>3</sub> 处理径流总氮起始质量浓度最高, 7 月 2 日和 5 日, T<sub>2</sub> 处理总氮质量浓度明显高于其他处理。水稻季期间 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理的总氮质量浓度有明显的起伏变化, ck、T<sub>4</sub> 处理总氮质量浓度变化波动平缓, 总体趋于稳定。从图 5 可以看出: 6 月 26 日和 7 月 29 日的径流总磷质量浓度明显高于其他时间, 不同施肥处理的总磷整体质量浓度变化趋势相同, 但最终都趋于稳定。

从表 4 可以看出: 与 ck 相比, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理的氮流失量均显著增加 ( $P<0.05$ ), 其中以

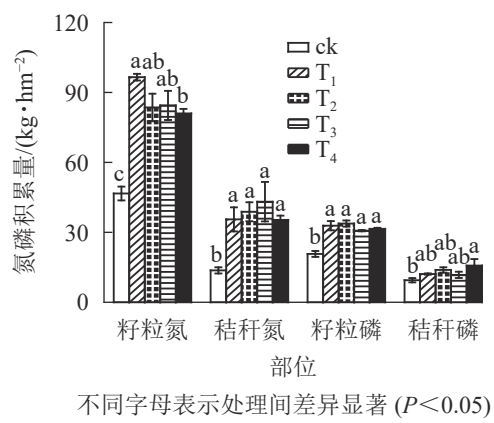


图 2 不同施肥处理的水稻籽粒和秸秆的氮磷积累量

Figure 2 Accumulation rates of nitrogen and phosphorus in grains and straws of rice with different fertilization treatments

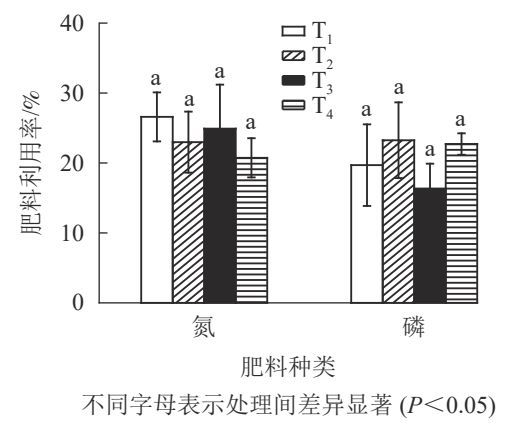


图 3 不同施肥处理的水稻氮磷肥料利用率

Figure 3 Nitrogen and phosphorus fertilizer utilization rates of rice with different fertilization treatments

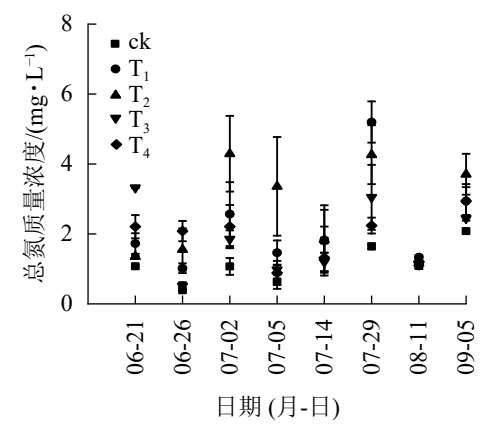


图 4 不同施肥处理的径流总氮质量浓度随时间的变化

Figure 4 Changes of total nitrogen concentrations in runoff from different fertilization treatments with time

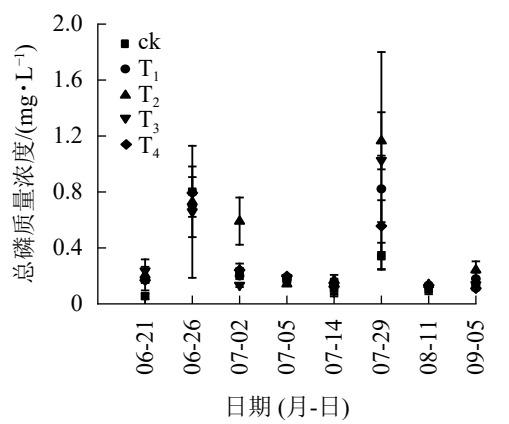


图 5 不同施肥处理的径流总磷质量浓度随时间的变化

Figure 5 Changes of total phosphorus concentrations in runoff from different fertilization treatments with time

表 4 氮和磷的径流流失量和流失率

| 处理             | 流失量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |              | 流失率/%       |             |
|----------------|----------------------------|--------------|-------------|-------------|
|                | 氮                          | 磷            | 氮           | 磷           |
| ck             | 4.91±0.01 c                | 0.70±0.05 b  |             |             |
| T <sub>1</sub> | 7.83±0.17 ab               | 1.03±0.08 ab | 1.08±0.07 a | 1.03±0.37 a |
| T <sub>2</sub> | 9.56±1.22 a                | 1.35±0.12 a  | 1.72±0.46 a | 1.99±0.50 a |
| T <sub>3</sub> | 7.64±0.77 ab               | 0.96±0.19 ab | 1.01±0.29 a | 0.79±0.71 a |
| T <sub>4</sub> | 7.13±0.49 b                | 0.91±0.14 b  | 0.82±0.18 a | 0.65±0.38 a |

T<sub>2</sub> 处理最大，增加了 94.70%。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理的磷流失量分别增加了 47.14%、92.86%、37.14% 和 30.00%，其中 T<sub>2</sub> 处理流失量显著高于 T<sub>4</sub>。氮、磷流失率分别为 0.82%~1.72%、0.65%~1.99%，不同处理间均无显著差异 ( $P>0.05$ )。不同施肥处理氮磷流失量的增幅和流失率的大小变化均呈现相同的趋势。

3 讨论

3.1 不同肥料施用对土壤性质、水稻产量的影响及机制

本研究表明：不同肥料施用均能使水稻显著增产，但 4 种不同施肥处理之间产量无显著差异 ( $P>0.05$ )。由 ck 土壤碱解氮质量分数显著低于 T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 处理可知，不同施肥处理的增产效应是由不

施肥处理土壤养分供应不足所导致。施加有机肥,能提高土壤 pH 和养分含量<sup>[17]</sup>;调理剂具有比表面积大,孔隙度大等特点,能改善土壤理化性质<sup>[18]</sup>,有效供应养分;炭基肥能增强水稻的光合作用<sup>[19]</sup>,改良土壤性质,增加水稻生物量的产量<sup>[20]</sup>,因此不同施肥处理水稻均能增产<sup>[21]</sup>。除了 T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理土壤碱解氮显著高于 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理外 ( $P < 0.05$ ),不同处理之间的土壤 pH、有机质和养分质量分数均无显著差异 ( $P > 0.05$ ),从而导致了不同施肥处理之间的水稻籽粒产量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 3.2 不同肥料施用对作物氮磷吸收积累量及肥料利用率的影响

本研究表明:不同施肥处理的籽粒氮、磷质量分数及秸秆氮质量分数均显著高于 ck ( $P < 0.05$ ),这与崔新卫等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。施加炭基肥同时增加了籽粒和秸秆的氮磷积累量,这可能是由于生物炭的施加提高了土壤的供肥能力,同时增强了作物光合作用<sup>[23]</sup>,说明不同施肥处理均能有效供应作物所需的养分。然而,4种不同施肥处理的水稻氮磷积累量和肥料利用率均无显著差异 ( $P > 0.05$ ),可能是不同施肥处理的供肥能力差异较小所致。

### 3.3 不同肥料施用对径流氮磷流失的影响及机制

T<sub>2</sub> 处理径流流失量最大,且大于 T<sub>1</sub> 处理,即本研究施加有机肥没有有效减少径流氮磷流失,这与 HUSAIN<sup>[24]</sup> 研究结果不同。可能是由于 6 月 26 日对 T<sub>2</sub> 处理进行追肥,当天降雨,产生了径流,导致追肥的肥料未被土壤和作物吸收就被雨水大量冲刷,产生了径流水中最大的质量浓度;7 月 29 日,降雨量大,导致产生了最大径流量。这与王莺等<sup>[25]</sup> 研究结果一致,即降雨是影响径流的重要因子,径流量和降雨量存在显著正相关。因此,T<sub>2</sub> 处理产生了最大的径流流失量。

贝壳粉调理剂具有比表面积大、孔隙度大等特点,且贝壳粉炭为碱性,能使土壤 pH 升高,有利于改善土壤养分,提高肥料利用率,增加土壤保肥能力<sup>[26-28]</sup>。生物炭基肥由于其特殊的结构和理化性质,可以吸附土壤中未被作物利用的水分和养分,延缓养分释放,减弱其在土壤中的迁移转化能力<sup>[29]</sup>,提高土壤氮养分的有效性。这与本研究结果一致。本研究表明:T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理均能使土壤 pH 升高,从而有利于土壤中氮磷的吸附和固定<sup>[30]</sup>,减少未被作物吸收的氮磷,从而提高肥料利用率,减少氮磷流失。

因此,在施用不同肥料时,要注意施肥方式和时间,避免由于一次性大量施入肥料或者施肥后遭遇强降水而导致的径流流失量的剧增。在水稻生长期应合理控制灌溉和水肥管理,重视和提倡合理施肥方法,控制稻田氮磷的径流量,从而减少氮磷流失带来的环境污染<sup>[31-32]</sup>。

## 4 结论

4 种不同施肥处理均能显著提高水稻产量,其增产率为 51.22%~63.41%,但不同肥料之间增产无显著差异 ( $P > 0.05$ )。氮和磷的流失量分别介于 4.91~9.56 和 0.70~1.35 kg·hm<sup>-2</sup>,不同处理的流失量均按如下次序递减:T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、ck。氮和磷的流失率分别为 0.82%~1.72% 和 0.65%~1.99%,大小均按如下次序递减:T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>,不同施肥处理之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。T<sub>2</sub> 处理的径流流失量最大,T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理能有效减少氮磷流失。因此,要注意合理的施肥方式和时间,从而减少氮磷流失造成的面源污染。

## 5 参考文献

- [1] 栾江,仇焕广,井月,等.我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J].*自然资源学报*,2013,28(11):1869-1878.  
LUAN Jiang, QIU Huanguang, JING Yue, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China [J]. *J Nat Resour*, 2013, 28(11): 1869-1878.
- [2] 段永惠,张乃明,张玉娟.施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究[J].*土壤*,2005,37(1):48-51.  
DUAN Yonghui, ZHANG Naming, ZHANG Yujuan. Effect of fertilization application on nitrogen and phosphorus loss with farmland runoff [J]. *Soils*, 2005, 37(1): 48-51.
- [3] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策(I)21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].*中国农业科学*,2004,37(7):1008-1017.  
ZHANG Weili, WU Shuxia, JI Hongjie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the

- alleviating strategies ( I ) Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century [J]. *Sci Agric Sin*, 2004, **37**(7): 1008 – 1017.
- [4] CARUSO B S. Integrated assessment of phosphorus in the Lake Hayes catchment, South Island, New Zealand [J]. *J Hydrol*, 2000, **229**(3): 168 – 189.
- [5] IQBAL A, HE Liang, ALI I, *et al.* Manure combined with chemical fertilizer increases rice productivity by improving soil health, post-anthesis biomass yield, and nitrogen metabolism[J]. *PLoS One*, 2020, **15**(10): e0238934. doi: [10.1371/journal.pone.0238934](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238934).
- [6] 王晓荣, 唐万鹏, 付甜, 等. 不同管理措施对三峡库区柑橘园土壤养分和径流氮磷流失的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, **37**(11): 95 – 102.
- WANG Xiaorong, TANG Wanpeng, FU Tian, *et al.* Effects of different management practices on soil nutrient and nitrogen and phosphorus losses with runoff of citrus orchard in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2021, **37**(11): 95 – 102.
- [7] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(5): 5 – 10.
- HUANG Dongfeng, WANG Guo, LI Weihua, *et al.* Effects of different kinds of fertilization modes on yield, nitrate's content of vegetable and loss of nitrogen and phosphorus in vegetable field [J]. *J Soil Water Conserv*, 2008, **22**(5): 5 – 10.
- [8] 黄东风, 李卫华, 王利民, 等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(2): 62 – 66.
- HUANG Dongfeng, LI Weihua, WANG Limin, *et al.* Effects of water and fertilizer managements on yield, nutrition uptake of rice and loss of nitrogen and phosphorus by runoff from paddy field [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27**(2): 62 – 66.
- [9] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(1): 1 – 7.
- ZHAO Bingqiang. Modification of conventional fertilizers for enhanced property and function [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2016, **22**(1): 1 – 7.
- [10] 徐秋芳, 姜培坤. 有机肥对毛竹林间及根区土壤生物化学性质的影响[J]. *浙江林学院学报*, 2000, **17**(4): 22 – 26.
- XU Qiufang, JIANG Peikun. Effects of fertilizing on biological properties of root region soil under *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2000, **17**(4): 22 – 26.
- [11] GUO Wei, ZHANG Qingzhong, LIU Jinhua, *et al.* Studies on changes of soil carbon and nitrogen dynamics under long-term fertilizer in the black soil based on DSSAT model [J]. *Int Conf Energy Environ Sustainable Dev*, 2015, **3702**: 1743 – 1750.
- [12] 张琢, 王梅, 任杰, 等. 贝壳粉对污染土壤中 Pb、Zn、Cd 的稳定化作用[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(1): 14 – 18.
- ZHANG Zhuo, WANG Mei, REN Jie, *et al.* Effect of sea shell powder on the stabilization of Pb, Zn and Cd in contaminated soil [J]. *Environ Pollut Prev*, 2016, **38**(1): 14 – 18.
- [13] HEYMANN K, XING B, KEILUWEIT M, *et al.* Influence of dissolved organic carbon from natural and synthetic fertilizers on phosphate leaching from a sand-based golf green [J]. *Int Turfgrass Soc Res J*, 2017, **13**(1): 103 – 112.
- [14] 习斌, 翟雨梅, 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 Limei, LIU Shen, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2015, **21**(2): 326 – 335.
- [15] ZHENG Yu, HAN Xiaori, LI Yuying, *et al.* Effects of mixed controlled release nitrogen fertilizer with rice straw biochar on rice yield and nitrogen balance in Northeast China [J]. *Sci Rep*, 2020, **10**(1): 9452.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] QASWAR M, CHAI R, AHMED W, *et al.* Partial substitution of chemical fertilizers with organic amendments increased rice yield by changing phosphorus fractions and improving phosphatase activities in fluvo-aquic soil [J]. *Soil Tillage Res*, 2019, **20**(3): 1285 – 1296.
- [18] FARHA A, AKHTAE I. Interactive effect of potassium and flyash: a soil conditioner on metal accumulation, physiological and biochemical traits of mustard (*Brassica juncea* L.) [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, **26**(8): 7847 – 7862.
- [19] 范星露. 新型炭基复混肥料对水稻生理的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.

- FAN Xinglu. *Effect of Carbon-based Compound Fertilizer on Physiology of Oryza sativa L.* [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.
- [20] PURAKAYASTHA T, BERA T, DEBARATI B, *et al.* A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: pathways to climate change mitigation and global food security [J]. *Chemosphere*, 2019, **227**: 345 – 365.
- [21] WEI Haiyan, CHEN Zhifeng, XING Zhipeng, *et al.* Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice [J]. *J Integrative Agric*, 2018, **17**(10): 2222 – 2234.
- [22] 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 Xinwei, ZHANG Yangzhu, GAO Jusheng, *et al.* Effects of long-term fertilization treatments on soil properties, rice yield and quality in reddish paddy soil [J]. *Acta Agric Boreal-Sin*, 2019, **34**(6): 190 – 197.
- [23] 史华, 吴冰洁, 陈爽, 等. 生物炭和保水剂用量对火鹤花叶绿素和光合特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, **47**(14): 139 – 142.
- SHI Hua, WU Bingjie, CHEN Shuang, *et al.* Effects of biochar and water retention agents on chlorophyll and photosynthetic characteristics of *Flamoea sinensis* [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, **47**(14): 139 – 142.
- [24] HUSAIN A. 洱海流域典型轮作模式下不同施肥模式对淋溶及地表径流氮磷流失的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- HUSAIN A. *Analysis of Nitrogen and Phosphorus Losses in leached and Surface Runoff Water with Application of Different Fertilizers and Management Strategies under Typical Crop Rotation System in the Erhai Lake Basin, Yunnan, China* [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [25] 王莺, 陆荣杰, 吴家森, 等. 山核桃林闭合区内径流氮磷流失特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(5): 802 – 809.
- WANG Ying, LU Rongjie, WU Jiasen, *et al.* Nitrogen and phosphorus loss in runoff and sediment for a closed zone of a *Carya cathayensis* stand [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(5): 802 – 809.
- [26] HONG S H, LEE E Y. Restoration of eroded coastal sand dunes using plant and soil-conditioner mixture [J]. *Int Biodeterioration Biodegradation*, 2016, **113**: 161 – 168.
- [27] ZHU Haoyu, GAO Ming, LONG Yi, *et al.* Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field [J]. *Environ Sci*, 2020, **41**(4): 1921 – 1929.
- [28] 董晓伟. 牡蛎壳土壤调理剂对大棚土壤理化、生物性状影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- DONG Xiaowei. *Effect of Oyster Shell Soil Remediation on Soil Physical-Chemical and Biology Character of Plastic Greenhouse* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [29] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, **30**(4): 409 – 415.
- CHU Jun, XUE Jianhui, JIN Meijuan, *et al.* Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural non-point source pollution [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2014, **30**(4): 409 – 415.
- [30] 陈闻, 吴家森, 许开平, 等. 集约经营雷竹林土壤磷素状况及流失潜能[J]. *浙江农林大学学报*, 2011, **28**(5): 687 – 693.
- CHEN Wen, WU Jiasen, XU Kaiping, *et al.* Soil phosphorus and potential loss in *Phyllostachys praecox* stands with intensive management [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(5): 687 – 693.
- [31] 朱成立, 郭相平, 刘敏昊, 等. 水稻沟田协同控制灌排模式的节水减污效应[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(3): 86 – 91.
- ZHU Chengli, GUO Xiangping, LIU Minhao, *et al.* Reduction of nitrogen, phosphorous and runoff by coordination controlled drainage with basin and ditch in paddy field [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, **32**(3): 86 – 91.
- [32] YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzheng, *et al.* Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields [J]. *Paddy Water Environ*, 2015, **13**(1): 71 – 80.