

不同施肥对稻-菜种植模式氮磷吸收及径流流失的影响

张 崑¹, 徐 坚², 鲁长根³, 邵建均³, 蔡广越¹, 张 艳¹, 吴家森¹

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 仙居县农业农村局, 浙江 仙居 317300; 3. 浙江省农业农村生态与能源总站, 浙江 杭州 310012)

摘要: 【目的】探讨不同肥料对作物养分吸收及农田氮磷流失的影响。【方法】利用水稻 *Oryza sativa* -白菜 *Brassica pekinensis* 轮作田间小区试验, 设置不施肥 (ck)、纯化肥 (FP)、半替代有机肥 (50% 有机肥替代, CM)、炭基肥 (CC) 4 个处理, 研究不同处理下水稻和白菜产量, 作物氮磷吸收量和氮磷径流损失量的变化。【结果】与 ck 相比, 施肥条件下水稻产量显著增加了 33.5%~42.5% ($P < 0.05$), 白菜产量显著增加了 26.0%~31.8% ($P < 0.05$), 水稻氮吸收量显著提高了 41.9%~57.4% ($P < 0.05$), 磷吸收量显著提高了 22.8%~41.7% ($P < 0.05$), 但 3 种施肥间没有显著差异。与 ck 相比, 3 种施肥条件下白菜氮吸收量提高了 33.8%~53.6%, CM 处理显著高于其他 ($P < 0.05$), 磷吸收量提高了 163.5%~267.8%, 增幅从大到小依次为 FP、CM、CC、ck, 不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。稻季 3 种施肥处理的氮磷径流流失量为 13.49~15.32 和 2.19~2.61 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 径流率为 3.5%~4.2% 和 2.0%~2.4%, 菜季氮磷流失量为 6.33~6.82 和 0.35~0.44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 径流率为 1.3%~1.6% 和 0.1%~0.4%, 不同施肥处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。【结论】相同养分当量情况下, 纯化肥、半替代有机肥、炭基肥对稻菜种植模式氮磷养分吸收及径流流失无影响。图 3 表 4 参 25

关键词: 稻-菜种植模式; 氮; 磷; 吸收; 径流

中图分类号: S792.39 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)04-0784-08

Effects of different fertilizer types on nitrogen and phosphorus nutrient absorption and runoff loss in rice-vegetable rotation system

ZHANG Kun¹, XU Jian², LU Changgen³, SHAO Jianjun³, CAI Guangyue¹, ZHANG Yan¹, WU Jiasen¹

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Xianju, Xianju 317300, Zhejiang, China; 3. Rural Energy and Environmental Agency of Zhejiang, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to explore the effect of different fertilization on nitrogen and phosphorus content in farmland in Xianju County, Zhejiang Province. [**Method**] A rice/Chinese cabbage rotation experiment was conducted to study the change of four fertilization treatments to crop yield, fertilizer absorption, runoff-driven N and P loss. The four treatments were no fertilizer application (ck), pure chemical fertilizer application (FP), 50% organic fertilizer replacement (CM) and carbon-based fertilizer application (CC). [**Result**] Compared with ck, the yield of rice and Chinese cabbage under three fertilization increased significantly by 33.5%~42.5% and 26.0%~31.8%, respectively. But there was no significant difference among three fertilizer treatments. Compared with ck, nitrogen absorption in Chinese cabbage increased by 33.8%~53.6%, whereas those of CM treatment were significant higher than others. Phosphorus absorption increased by 163.5%~267.8%, and the increase between different treatments was $\text{CM} > \text{FP} > \text{CC} > \text{ck}$. However,

收稿日期: 2020-09-13; 修回日期: 2021-04-06

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2019C03121); 浙江省科技厅公益项目资助 (LGF18D010003)

作者简介: 张崑 (ORCID: 0000-0002-7197-4000), 从事农业资源与环境研究。E-mail: zhangkunzafu@163.com。通信作者: 吴家森 (ORCID: 0000-0001-5519-9385), 正高级工程师, 博士, 从事森林土壤与环境研究。E-mail: jswu@zafu.edu.cn

there was no significant difference among each treatment ($P < 0.05$). For rice, runoff volume of nitrogen and phosphorus under three fertilization treatments was 13.49–15.32, 2.19–2.61 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and runoff rate was 3.5%–4.2%, 2.0%–2.4%, respectively. For Chinese cabbage, nitrogen and phosphorus loss was 6.33–6.82, and 0.35–0.44 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, runoff rate was 1.3%–1.6%, 0.1%–0.4%, respectively. However, there was no significant difference among three fertilization treatments. While maintaining the same nutrient equivalent. There was no significant difference between pure chemical fertilizer application, 50% organic fertilizer replacement and carbon-based fertilizer application. [Ch, 3 fig. 4 tab. 25 ref.]

Key words: rice-vegetable rotation system; nitrogen; phosphorus; absorption; runoff water

农田氮磷流失是农业面源污染的主要来源。农业生产中，肥料的不合理施用是农田氮磷流失的主要原因，肥料施用后未能被作物吸收的部分氮磷通过径流进入河流等水体，造成氮磷流失^[1]。因此，合理控制施肥量、调整肥料种类是减少氮磷流失的必要手段^[2-3]。在太湖、巢湖、滇池等农业集中区域开展的稻田养分流失研究^[4]表明：相比于习惯性施肥(化肥)，有机肥 50% 替代氮肥可减少稻季总氮(5.49%)、总磷(23.32%)径流流失量，显著降低菜-稻周年总磷径流流失量(45.66%)^[5]，而水稻 *Oryza sativa* 产量未显著下降^[6]。研究^[7]发现：随着生物质炭施用量的增加，农田径流氮磷流失降低；与纯化肥相比，总氮流失量减少 1.77–6.96 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，流失率下降 0.29–3.62%，总磷流失量减少 0.32–0.51 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，流失率下降 0.12–0.44%。与纯化肥或纯有机肥相比，有机肥和化肥配施可显著提高作物产量^[8]。生物质炭与肥料复合制成的生物质炭基肥可以改良土壤，促进作物生长和增产，提升农用效益^[9]。炭基肥施用对不同作物增产效益不同^[10]，可使玉米 *Zea mays* 增产 10.02%–24.32%，水稻增产 11.54%–13.00%。目前关于有机肥和炭基肥配施影响农田氮磷流失的研究较少，不同肥料对于农业面源污染的影响趋势尚不明确。本研究拟探讨在相同氮磷施用条件下，纯化肥、半替代有机肥、炭基肥 3 种不同肥料施用对水稻-白菜 *Brassica pekinensis* 养分吸收及氮磷流失的影响，为控制农业面源污染提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地浙江省台州市仙居县横溪镇下陈村(28°46'9.32"N, 120°28'49.04"E)属典型亚热带季风气候，年平均气温为 17.7 °C，年平均降水量为 1 796.8 mm，全年无霜期 240.0 d。土壤类型为水稻土，土壤 pH 4.99，有机质、全氮、全磷质量分数分别为 44.39、2.78、0.51 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，碱解氮、有效磷、速效钾质量分数分别为 83.90、19.90、97.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采用随机区组设计，4 个处理，3 次重复，共 12 个试验小区。各小区面积 30 m^2 ，随机排列，各小区间用深 50 cm 宽 35 cm 的水泥田埂隔离以防肥水渗漏。同时各小区配置 1 个径流池，池深 1.3 m，长 3.0 m，宽 1.0 m，试验地外围设置栅栏保护。试验于 2019 年 5 月至 2020 年 5 月进行，供试水稻品种为嘉丰优 2 号，白菜品种为早熟 5 号。

设不施肥(ck)、习惯性纯化肥(FP)、半替代有机肥(50% 替代, CM)、炭基肥(CC)等 4 个处理。通过不同肥料配比配施，保持不同施肥处理相同养分当量，参考当地施肥氮磷习惯投入量，各小区稻季氮磷投入量分别为 270.0、75.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，菜季氮磷投入量分别为 184.5、51.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同处理肥料施用量及施肥时间如表 1 所示。稻季水稻于 2019 年 5 月 8 日播种幼苗，6 月 8 日移栽秧苗，7 月 16 日涸田，8 月 2 日复水，10 月 13 日收获。菜季白菜于 2019 年 10 月 3 日播种，2020 年 5 月 10 日收获。

1.3 样品采集及测定

1.3.1 植物样品采集及测定 采用全收获法测定不同小区水稻、白菜产量。不同作物收获时，每个小区中间位置取作物样 5 株(丛)，带回实验室，用水清洗后，置于 105 °C 干燥环境中 30 min，再置于 75 °C 烘箱中烘干 48 h，在粉碎机中研磨过 0.149 mm 筛，待用。植物全氮采用凯氏定氮法测定，全磷采用氢氧化钠(NaOH)熔融-钼锑抗比色法测定。

表1 稻-菜种植模式不同肥料处理施用量及时间

Table 1 Rice-vegetable mode different fertilizer application amount and time

| 处理 | 水稻季/(kg·hm ⁻²) | | 白菜季/(kg·hm ⁻²) | |
|----|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| | 基肥(2019年6月5日) | 追肥(2019年6月23日) | 基肥(2019年10月23日) | 追肥(2020年1月5日) |
| ck | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FP | 配方肥750.0, 钙镁磷肥125.0 | 尿素290.3, 氯化钾24.3 | 配方肥450.0, 钙镁磷肥127.1 | 尿素225.0, 氯化钾34.7 |
| CM | 菜籽饼2700.0, 钙镁磷肥62.5 | 尿素290.3, 氯化钾198.4 | 菜籽饼1620.0, 钙镁磷肥42.7 | 尿素225.0, 氯化钾135.6 |
| CC | 炭基肥1500.0 | | 炭基肥1025.0 | |

说明: 配方肥 $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=18:8:18$; 菜籽饼肥 $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=10:5:2$; 炭基肥 $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O}):m(\text{C})=18:5:10:25$; 氯化钾中 K_2O 质量分数为62%; 尿素中N质量分数为46%; 钙镁磷肥中 P_2O_5 质量分数为12%

1.3.2 土壤样品采集及测定 轮作结束后, 每个小区均用5点采样法采集表层土壤样品(0~30 cm)约1 kg带回实验室。土壤样品经室内风干后, 过2或0.149 mm筛, 待用。土壤pH采用电位法, 有机质采用外加热-重铬酸钾容量法, 全氮采用半微量开氏法, 全磷采用硫酸-高氯酸消解-钼锑抗比色法, 有效磷采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾-氟化铵浸提-钼锑抗比色法, 速效钾采用 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 中性醋酸铵浸提-火焰分光法测定, 碱解氮采用碱解扩散法。

1.3.3 径流水样采集及测定 每次大雨或连绵雨期产生径流后, 测量径流池中径流量, 将池中的水混匀, 用采样器采集1000 mL水样, 带回实验室; 采样后, 洗净、抽干径流池后用于下一次径流水的收集。水样总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, 总磷采用钼酸铵分光光度法测定。

1.4 数据处理与分析

利用公式 $M = \sum_{i=1}^n C_i V_i$ 计算氮磷径流量; 其中: M 为氮磷的流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); C_i 为第 i 次径流水中氮、磷的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); V_i 为第 i 次径流水的体积(L)。计算肥料利用率=[不同施肥处理作物吸收氮(磷)量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)-对照作物吸收氮(磷)量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)]/施入氮(磷)量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100\%$ 。径流损失率=[不同施肥处理径流氮(磷)流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)-对照径流氮(磷)流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)]/施入氮(磷)量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100\%$ 。

试验数据应用SPSS 22进行方差分析和统计检验, 使用Excel 2016处理数据并作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

由表2可知: 稻-菜轮作当季结束后, 不同处理土壤pH、有机质、全氮、全磷无显著差异($P>0.05$)。3种施肥处理土壤碱解氮、有效磷质量分数显著高于ck($P<0.05$), 不同施肥处理无显著差异; FP、CC处理土壤速效钾质量分数显著高于ck($P<0.05$)。

表2 稻-菜季结束后土壤性质

Table 2 Soil properties after the rice-cabbage season

| 处理 | pH | 有机质/(g·kg ⁻¹) | 全氮/(g·kg ⁻¹) | 全磷/(g·kg ⁻¹) | 碱解氮/(mg·kg ⁻¹) | 有效磷/(mg·kg ⁻¹) | 速效钾/(mg·kg ⁻¹) |
|----|-------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ck | 5.04±0.22 a | 44.50±1.10 a | 2.76±0.05 a | 0.49±0.04 a | 94.50±9.83 b | 16.10±1.36 b | 76.10±7.77 b |
| FP | 4.97±0.13 a | 45.00±3.71 a | 2.81±0.32 a | 0.48±0.02 a | 101.30±13.11 a | 22.70±2.98 a | 88.45±18.17 a |
| CM | 5.07±0.24 a | 45.10±1.12 a | 2.78±0.16 a | 0.48±0.02 a | 98.60±15.67 a | 20.30±3.00 a | 81.60±14.57 ab |
| CC | 4.91±0.20 a | 43.00±4.43 a | 2.80±0.15 a | 0.50±0.02 a | 104.30±15.18 a | 20.60±2.26 a | 91.35±16.37 a |

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

2.2 不同施肥处理对作物产量的影响

3种施肥处理显著提高作物产量(图1), 与ck相比, 水稻产量显著增加33.5%~42.5%($P<0.05$), 白菜产量显著增加26.0%~31.8%($P<0.05$)。

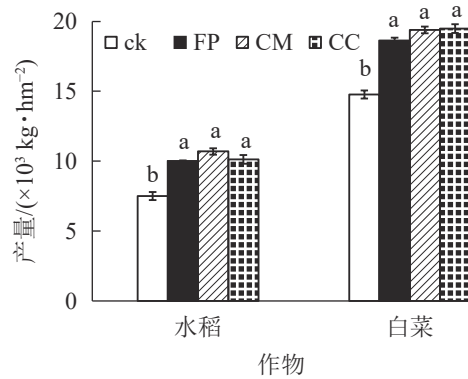
2.3 不同施肥处理对作物氮磷吸收的影响

与ck相比, 施肥显著提高水稻地上部分氮吸收量($P<0.05$), 但不同施肥间无显著差异($P>0.05$)。

由图 2 可知：稻季不同施肥处理的水稻氮吸收量为 79.89~125.38 kg·hm⁻²，比 ck 显著提高 41.9%~57.4% ($P < 0.05$)；水稻地上部分磷吸收量为 23.78~33.69 kg·hm⁻²，比 ck 显著提高 22.8%~41.7% ($P < 0.05$)。

菜季不同施肥处理的白菜地上部分氮吸收量为 75.67~116.20 kg·hm⁻²，比 ck 显著提高 33.8%~53.6%，CM 处理氮吸收量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。白菜地上部分磷吸收量从大到小依次为：CM、FP、CC、ck，不同处理差异显著 ($P < 0.05$)。与 ck 相比，施肥处理磷吸收量分别提高 267.8%、217.9%、163.5%。

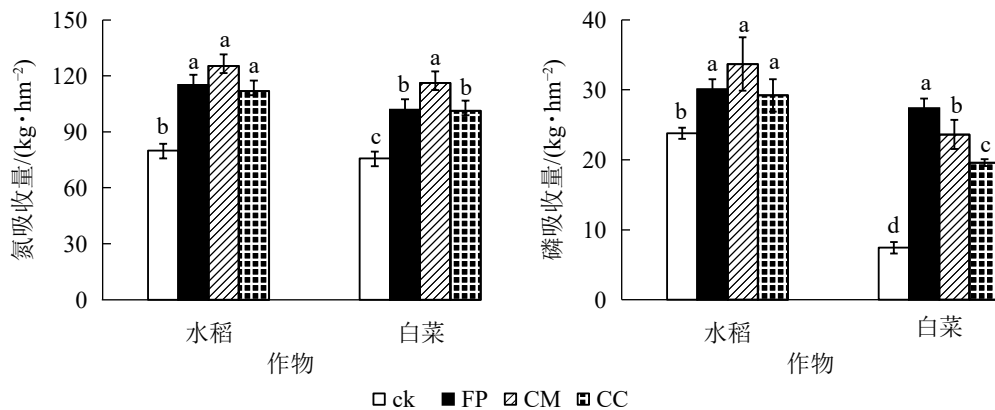
稻-菜轮作肥料氮磷利用率如表 3。稻季氮肥利用率为 13.0%~16.8%，不同处理无显著性差异，磷肥利用率为 7.2%~13.2%，其中 CM 显著高于 FP、CC ($P < 0.05$)。菜季氮肥利用率为 13.9%~22.0%，CM 显著高于 FP、CC ($P < 0.05$)，磷肥利用率为 23.7%~38.8%，从大到小依次为 FP、CM、CC，不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。



不同字母表示同一作物不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 不同施肥处理下的作物产量

Figure 1 Crop yields with different fertilization



不同字母表示同一作物不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同施肥处理下稻-菜地上部分的氮磷吸收量

Figure 2 Amount of nitrogen and phosphorus absorbed in different fertilized rice-vegetable land parts

表 3 不同施肥处理下稻-菜全季中氮磷的利用率

Table 3 Utilization rate of nitrogen and phosphorus fertilizer in the whole rice-vegetable season

| 处理 | 稻季 | | 菜季 | | 全季 | |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 氮/% | 磷/% | 氮/% | 磷/% | 氮/% | 磷/% |
| FP | 13.01±0.98 a | 8.39±1.04 b | 14.32±1.53 b | 38.84±1.65 a | 13.85±1.97 b | 27.66±2.11 a |
| CM | 16.83±1.03 a | 13.24±1.12 a | 22.02±1.27 a | 31.57±1.37 b | 19.72±1.45 a | 22.44±1.67 b |
| CC | 11.76±0.96 a | 7.23±0.88 b | 13.94±1.07 b | 23.71±1.41 c | 13.17±1.08 b | 16.85±1.37 c |

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

2.4 径流水中氮磷质量浓度的变化

稻-菜轮作全季共出现 10 次径流，其中稻季 7 次，菜季 3 次，不同时间径流水中氮、磷质量浓度变化不同。由图 3 可知：CC 处理水中氮、磷质量浓度以 2019 年 6 月 21 日的径流为最高，而 FP、CM 处理水中氮、磷质量浓度则以 6 月 26 日的径流为最高；随着时间推移，不同施肥处理径流水中氮、磷质量浓度均呈下降并保持相对稳定的趋势；不同处理氮质量浓度在 2020 年 3 月 16 日又有所上升，达到第 2 个峰值，随后重新出现下降趋势。相比之下，不同采样时间 ck 处理径流水中的氮、磷质量浓度相对稳定，分别为 0.91~2.35 和 0.11~1.57 mg·L⁻¹。

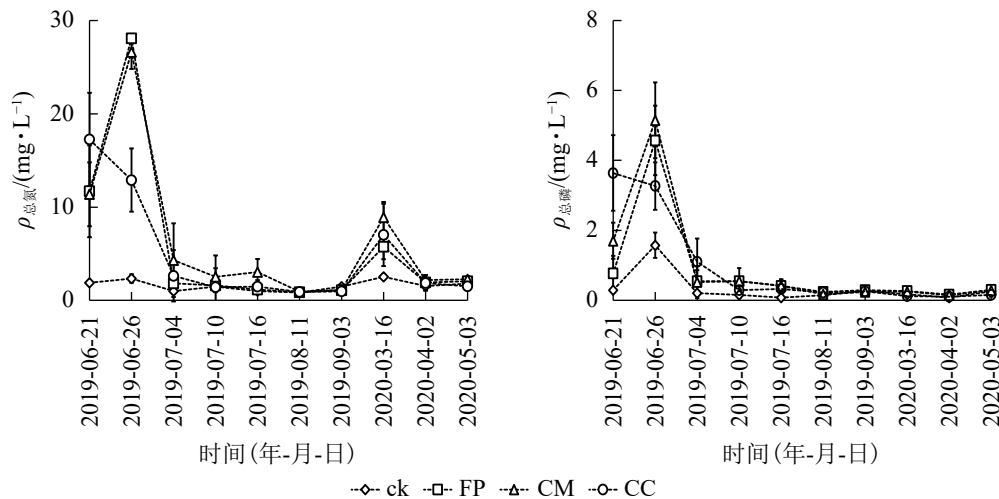


图3 不同施肥处理径流水中氮磷的质量浓度

Figure 3 Nitrogen and phosphorus concentration in different fertilization treatment run-off waters

2.5 稻-菜轮作农田径流氮磷流失量及流失率

如表4所示: 稻季不同施肥处理氮流失量为 $13.49\sim 15.32\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 流失率为 $3.53\%\sim 4.18\%$, 磷流失量为 $2.19\sim 2.61\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 流失率为 $2.04\%\sim 2.37\%$; 不同处理间差异不显著($P>0.05$)。菜季不同施肥处理氮流失量为 $6.33\sim 6.82\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 流失率为 $1.31\%\sim 1.62\%$, 磷流失量为 $0.35\sim 0.44\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 流失率为 $0.09\%\sim 0.39\%$; 不同处理间差异也不显著($P>0.05$)。

表4 稻-菜轮作不同处理径流氮磷损失量及径流流失率

Table 4 Amount of nitrogen and phosphorus loss and runoff loss in different treatment stakes in the rice-cabbage season

| 种植模式 | 施肥处理 | 氮 | | 磷 | |
|------|------|--|-------------------------|--|-------------------------|
| | | 流失量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 径流率/% | 流失量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 径流率/% |
| 稻季 | FP | $14.24\pm 0.86\text{ a}$ | $3.81\pm 0.92\text{ a}$ | $2.33\pm 0.64\text{ a}$ | $2.11\pm 0.68\text{ a}$ |
| | CM | $13.49\pm 0.64\text{ a}$ | $3.53\pm 0.79\text{ a}$ | $2.19\pm 0.62\text{ a}$ | $2.04\pm 0.94\text{ a}$ |
| | CC | $15.32\pm 1.01\text{ a}$ | $4.18\pm 0.88\text{ a}$ | $2.61\pm 0.89\text{ a}$ | $2.37\pm 0.83\text{ a}$ |
| 菜季 | FP | $6.33\pm 0.46\text{ a}$ | $1.31\pm 0.21\text{ a}$ | $0.44\pm 0.21\text{ a}$ | $0.39\pm 0.11\text{ a}$ |
| | CM | $6.51\pm 0.87\text{ a}$ | $1.49\pm 0.37\text{ a}$ | $0.35\pm 0.13\text{ a}$ | $0.09\pm 0.07\text{ a}$ |
| | CC | $6.82\pm 0.72\text{ a}$ | $1.62\pm 0.48\text{ a}$ | $0.36\pm 0.17\text{ a}$ | $0.21\pm 0.09\text{ a}$ |

说明: 数据为平均值±标准差; 同列相同字母表示稻季或菜季不同处理间差异不显著($P>0.05$)

3 讨论

3.1 不同施肥处理对作物产量及氮磷吸收的影响

有机肥部分替代化肥可以改善土壤氮素供给状态, 促进作物对氮素的吸收, 达到增产目的^[11]。生物质炭基肥可以有效控制水稻的无效分蘖, 有利于提高水稻群体质量^[12]和作物净光合速率^[13]; 连续施入炭基肥及生物质炭还可有效提高土壤铵态氮含量^[14], 从而提高水稻产量。本研究表明: 3种施肥处理下作物产量无显著差异, 主要原因应为试验地土壤氮磷含量较高。3种施肥处理对水稻增产效果显著优于对白菜增产效果, 与刘琪琪^[15]研究肥料对不同作物增产效果不同的结果一致。

作物的养分含量及积累量可以反映土壤的供肥能力。与对照相比, 3种施肥处理作物地上部分氮磷吸收量显著提高, 说明施肥对维持作物生长, 满足作物营养需求效果显著, 这与王新霞等^[16]、杜加银等^[17]研究结果相似。3种施肥处理下作物地上部氮磷吸收量无显著差异, 这与范星露等^[18]研究结果相似。

半替代有机肥的氮利用率显著高于纯化肥和炭基肥, 炭基肥的磷利用率显著低于纯化肥和半替代有机肥, 这与张萌等^[19]发现生物质炭基肥肥料利用率高于常规施肥的结果不符, 主要原因在于炭基肥制备过程中, 不同碳氮比影响了炭基肥的缓释效果^[20-21], 造成磷的利用显著低于其他处理, 具体影响还有待于相关的试验研究。

3.2 不同施肥对径流氮磷流失的影响

稻季首次径流, CC 处理的氮磷质量浓度显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 第 2 次径流, FP、CM 处理的氮磷质量浓度显著高于 CC ($P < 0.05$), 显著高于首次径流 ($P < 0.05$)。主要原因是施肥处理方式和施肥时间不同; CC 处理的氮磷肥于 6 月 6 日一次性施入, 单次施肥量过大, 是首次径流水中氮磷质量浓度显著高于其他处理的原因, 而 FP、CM 处理于 6 月 21 日追肥, 6 月 26 日产生的径流水中氮磷质量浓度达到峰值且显著高于 CC。提示炭基肥应当视情况斟酌施入, 以避免大径流造成养分流失。

3 种不同施肥方案通过径流形式流失的氮磷总量无显著差异。刘红江等^[22]发现: 有机-无机配施可以减少氮磷流失量, 但有机-无机配施在达到一定比例后, 氮磷流失量随肥料中有机占比提高而增加, 过高的有机投入同样会增加氮磷流失的风险。本研究中, 炭基肥为单次施入, 当首次极大径流出现时, 高质量浓度的炭基肥并不能减少农田氮磷流失。研究区夏季多暴雨, 径流产生频繁, 施肥后如遇强降雨, 会引起养分大量流失^[23]。因此需要根据气象条件, 选择合适的施肥时间。

与纯化肥相比, 半替代有机肥、炭基肥在制备时使用秸秆等废弃物, 可以有效回收部分通过植物废弃物流失的氮磷, 减少面源污染。目前符合国家标准炭基肥中, 秸秆炭质量分数约 16%^[24], 同时炭基肥原料丰富, 作物秸秆及动物粪便均可使用^[21]。因此尽管对径流流失量影响不大, 但半替代有机肥、炭基肥对减少氮磷流失更有利, 与刘辉等^[25]推算优化施肥下氮磷潜在流失量低于习惯性化肥施肥, 氮潜在流失率大于磷潜在流失率的结果相似。

4 结论

相同养分当量投入下, 纯化肥、半替代有机肥、炭基肥对作物氮、磷吸收和肥料利用率无显著差异; 3 种肥料施用后农田中氮磷径流流失量和流失率的差异也不显著。相同氮磷量投入下, 3 种肥料对农田氮磷流失影响结果差异不显著。

5 参考文献

- [1] 闵炬, 纪荣婷, 王霞, 等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(8): 1230 - 1238. MIN Ju, JI Rongting, WANG Xia, et al. Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28(8): 1230 - 1238.
- [2] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 67 - 72. GAO Chao, ZHANG Taolin, WU Weidong. Phosphorus sorption and desorption of agricultural soils under different land uses [J]. *Environ Sci*, 2001, 22(4): 67 - 72.
- [3] 金洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2001, 22(4): 67 - 72. JIN Jie, YANG Jingping, SHI Hongxin, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2001, 22(4): 67 - 72.
- [4] 王季丰. 稻田养分流失和经济林水土流失控制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. WANG Jifeng. *Studies on the Techniques for Controlling Nutrient Runoff Losses from Rice Fields and Soil Erosion from Nonwood Forests* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [5] 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 Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liugen, et al. Effect of pig manure application on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during the paddy season in intensive rice-wheat rotation field [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, 27(6): 21 - 25, 61.
- [6] 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 Hongjiang, ZHANG Yuefang, 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]. *J Soil Water Conserv*, 2019, 33(4): 102 - 109.
- [7] 吴蔚君. 生物炭对水稻产量及稻田氮磷流失影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.

- WU Weijun. *Effect of Biochar on Rice Yield and Loss of Nitrogen and Phosphorus in Rice Field* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
- [8] 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 Yuanyuan, WANG Ruiqi, WANG Lili, *et al.* Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain [J]. *J Agric Resour Environ*, 2020, **37**(4): 503 – 510.
- [9] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(10): 1948 – 1955.
- GAO Haiying, HE Xusheng, CHEN Xinxiang, *et al.* Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2012, **31**(10): 1948 – 1955.
- [10] 臧清波, 马玺, 张静峰, 等. 生物质炭基肥对玉米和水稻产量性状的影响[J]. 北方农业学报, 2019, **47**(4): 61 – 65.
- ZANG Qingbo, MA Xi, ZHANG Jingfeng, *et al.* Effect of biochar fertilizer on the yield traits of maize and rice [J]. *J Northern Agric*, 2019, **47**(4): 61 – 65.
- [11] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 1033 – 1042.
- CHEN Xiangbi, HU Yajun, QIN Hongling, *et al.* Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem: a review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(3): 1033 – 1042.
- [12] 乔志刚, 陈琳, 李恋卿, 等. 生物质炭基肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2014, **30**(5): 175 – 180.
- QIAO Zhigang, CHEN Lin, LI Lianqing, *et al.* Effects of biochar fertilizer on growth and nitrogen utilizing rate of rice [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, **30**(5): 175 – 180.
- [13] 徐孟泽, 梁敏, 李苗苗, 等. 炭基肥与化肥配施对生菜产量与品质的影响[J]. 农学学报, 2020, **10**(7): 45 – 49.
- XU Mengze, LIANG Min, LI Miaomiao, *et al.* Effect of combined application of biochar-based fertilizer and chemical fertilizer on yield and quality of lettuce [J]. *J Agric*, 2020, **10**(7): 45 – 49.
- [14] 李玥, 余亚琳, 张欣, 等. 连续施用炭基肥及生物炭对棕壤有机氮组分的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(10): 2903 – 2909.
- LI Yue, YU Yalin, ZHANG Xin, *et al.* Effects of continuous application of biochar-based fertilizer and biochar on organic nitrogen fractions in brown soil [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(10): 2903 – 2909.
- [15] 刘琪琪. 秸秆生物质炭基肥对水稻和玉米生长及产量的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- LIU Qiqi. *Effect of Straw Biochar based Fertilizer on Rice and Maize Growth and Grain Yield* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [16] 王新霞, 左婷, 王肖君, 等. 稻-麦轮作条件下 2 种施肥模式作物产量和农田氮磷径流流失比较[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(3): 20 – 27.
- WANG Xinxia, ZUO Ting, WANG Xiaojun, *et al.* Comparative of two fertilization modes on crop yields and nitrogen/phosphorus runoff losses under rice-wheat rotation [J]. *J Soil Water Conserv*, 2020, **34**(3): 20 – 27.
- [17] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(3): 523 – 533.
- DU Jiayin, RU Mei, NI Wuzhong. Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2013, **19**(3): 523 – 533.
- [18] 范星露, 易自力, 刘福来, 等. 炭基复混肥对水稻氮磷钾吸收及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(24): 11 – 17.
- FAN Xinglu, YI Zili, LIU Fulai, *et al.* Effects of carbon-based compound fertilizer on nitrogen, phosphorus and potassium absorption and yield of *Oryza sativa* L. [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2016, **32**(24): 11 – 17.
- [19] 张萌, 魏全全, 肖厚军, 等. 不同用量专用生物炭基肥对贵州朝天椒提质增效的影响[J]. 核农学报, 2019, **33**(7): 1457 – 1464.
- ZHANG Meng, WEI Quanquan, XIAO Houjun, *et al.* Effects of different dosage of biochar-based fertilizer on quality and efficiency of hot pepper in Guizhou [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2019, **33**(7): 1457 – 1464.
- [20] 马谦, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 生物质炭基缓释肥的成型特性研究[J]. 农机化研究, 2015(4): 242 – 246.

- MA Qian, JIANG Enchen, WANG Mingfeng, *et al.* Molding characteristics study of carbon-based biomass release fertilizer [J]. *J Agric Mech Res*, 2015(4): 242 – 246.
- [21] 李艳梅, 张兴昌, 廖上强, 等. 生物炭基肥增效技术与制备工艺研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(10): 1 – 14.
LI Yanmei, ZHANG Xingchang, LIAO Shangqiang, *et al.* Research progress on synergy technologies of carbon-based fertilizer and its application [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2017, **48**(10): 1 – 14.
- [22] 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 Hongjiang, CHEN Yuwen, SUN Guofeng, *et al.* Effects of different organic-inorganic fertilizer combination ratios on rice yield and nutrient loss with surface runoff [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(2): 405 – 412.
- [23] 郭智, 肖敏, 陈留根, 等. 稻麦两熟农田稻季养分径流流失特征[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(7): 1622 – 1627.
GUO Zhi, XIAO Min, CHEN Liugen, *et al.* The characteristics of surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during rice season in intensive rice-wheat rotation field [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(7): 1622 – 1627.
- [24] 马欢欢, 周建斌, 王刘江, 等. 秸秆炭基肥料挤压造粒成型优化及主要性能[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(5): 270 – 276.
MA Huanhuan, ZHOU Jianbin, WANG Liujiang, *et al.* Straw carbon based fertilizer granulation molding optimization and its main properties [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, **30**(5): 270 – 276.
- [25] 刘辉, 胡梦甜, 韩永伟, 等. 8 种面源污染防治种植模式对土壤温度、湿度和氮磷流失风险的影响[J]. *环境生态学*, 2019, **1**(8): 28 – 34.
LIU Hui, HU Mengtian, HAN Yongwei, *et al.* Effects of eight planting models on soil temperature, moisture and risk of nitrogen and phosphate by integrating non-point source pollution control [J]. *Environ Ecol*, 2019, **1**(8): 28 – 34.