

品种与肥料互作对稻田田面水氮磷流失风险的影响

许长鑫, 冯金飞, 方福平, 李凤博

引用本文:

许长鑫, 冯金飞, 方福平, 等. 品种与肥料互作对稻田田面水氮磷流失风险的影响[J]. [农业环境科学学报](#), 2026, 415(1): 168–178.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响](#)

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>

[秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果](#)

肖其亮, 朱坚, 彭华, 简燕, 纪雄辉

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(12): 2788–2800 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0318>

[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>

[稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应](#)

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 郜红建

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(9): 1935–1943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>

[生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响](#)

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 段婧婧, 薛利红, 杨林章

[农业环境科学学报](#). 2020, 39(7): 1623–1632 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0084>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

许长鑫, 冯金飞, 方福平, 等. 品种与肥料互作对稻田田面水氮磷流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 168–178.
XU C X, FENG J F, FANG F P, et al. Effects of cultivar–fertilizer interactions on nitrogen and phosphorus loss risks in paddy field surface water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 168–178.



开放科学 OSID

品种与肥料互作对稻田田面水氮磷流失风险的影响

许长鑫, 冯金飞, 方福平, 李凤博*

(中国水稻研究所, 杭州 311401)

摘要:为了探究不同类型水稻品种与肥料互作对水稻产量和稻田田面水氮磷流失风险的影响,采用随机区组裂区试验设计,设置3次重复,主区设常规施肥(CK)、控释肥(CRN)和尿素配施硝化抑制剂(DMPP),副区设中浙优8号(ZZY8)、甬优1540(YY1540)和浙禾香2号(ZHX2),通过大田试验进行研究。结果表明:各施肥处理田面水总氮(TN)和硝态氮(NO_3^- -N)浓度分别在施肥后1 d和7 d达到峰值,铵态氮(NH_4^+ -N)浓度在施肥后1~3 d达到峰值,随后不断降低。施用不同类型肥料显著影响稻田田面水氮素峰值浓度及形态占比,CRN处理的氮素浓度峰值与仅一半施肥量的CK相近,且各形态氮素浓度下降均较缓慢,直至晒田前田面水TN浓度降至 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;综合不同类型肥料施用基肥和追肥后各形态氮素浓度变化可知,施肥后7 d内是稻田田面水氮素损失的关键控制期,且各施肥处理田面水中氮素均以 NH_4^+ -N为主,其中CRN处理的 NH_4^+ -N/TN最高,达到了61.36%~65.43%。种植不同水稻品种显著影响稻田田面水氮素浓度变化,种植YY1540显著降低了田面水TN、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度,其降幅分别为12.19%、16.50%和11.15%。YY1540与CRN互作稻田田面水各形态氮素平均浓度均最低,且稻谷产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力均显著高于其他处理。施用CRN显著降低田面水总磷(TP)浓度和可溶性磷(DIP)浓度,其降幅分别为29.45%和21.65%。水稻品种与肥料互作对稻田田面水的磷素浓度无显著影响。研究表明,种植籼粳杂交稻品种(YY1540)并配施CRN既能实现水稻增产,又能有效降低稻田田面水氮磷流失风险。

关键词:水稻品种;控释肥;硝化抑制剂;田面水;氮磷流失

中图分类号:X52;X71 文献标志码:A 文章编号:1672–2043(2026)01–0168–11 doi:10.11654/jaes.2025–0027

Effects of cultivar–fertilizer interactions on nitrogen and phosphorus loss risks in paddy field surface water

XU Changxin, FENG Jinfei, FANG Fuping, LI Fengbo*

(China National Rice Research Institute, Hangzhou 311401, China)

Abstract: To investigate the interactive effects of rice cultivars and fertilizer types on rice yield, nitrogen–phosphorus loss risks in paddy field surface water. A randomized block design with split plots with three replications was used. The main plots comprised three fertilizer types: conventional fertilization (CK), controlled–release fertilizer (CRN), and urea combined with a nitrification inhibitor (DMPP). The split plots included three rice cultivars: Zhongzheyou 8 (ZZY8), Yongyou 1540 (YY1540), and Zhehexiang 2 (ZHX2). The results showed that under all fertilization treatments, the concentrations of total nitrogen (TN) and nitrate nitrogen (NO_3^- -N) in paddy field surface water reached their peak levels at 1 day and 7 days after fertilization, respectively, while ammonium nitrogen (NH_4^+ -N) peaked within 1–3 days after fertilization, followed by a continuous decline. The application of different fertilizer types significantly influenced peak nitrogen concentrations and speciation distribution in paddy field surface water. The TN peak concentration under the CRN treatment was

收稿日期:2025–01–09 录用日期:2025–03–25

作者简介:许长鑫(1999—),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为稻田生态。E-mail:xcxsda@163.com

*通信作者:李凤博 E-mail:lifengbo@caas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42177455);浙江省“尖兵”“领雁”项目(2022C02058);衢州市科技项目(2023K079);中央公益性科研院所基本科研业务费项目(CPSIBRF–CNRI–202408);中国农业科学院创新工程项目(ASTIP);农业农村长期因子综合观测工作项目(CALTON–FY)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(42177455); “Pioneer” and “Leading Goose” R&D Program of Zhejiang(2022C02058); Science and Technology Plan Projects of Quzhou(2023K079); Central Public–interest Scientific Institution Basal Research Fund(CPSIBRF–CNRI–202408); Agricultural Science and Technology Innovation Program(ASTIP); Chinese Agro–system Long–Term Observation Network(CALTON–FY)

comparable to that of the half-fertilized CK while all nitrogen forms in the CRN treatment showed slower reduction rates, with TN decreasing to $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ prior to mid-season field drying. Integrated analysis of nitrogen speciation dynamics following basal and supplemental fertilization revealed that the 7-day period post-application constitutes the critical window for mitigating nitrogen losses in paddy field surface water. Across all fertilization regimes, NH_4^+-N dominated the dissolved nitrogen pool, with the CRN treatment exhibiting the highest $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{TN}$ ratio (61.36%–65.43%). The cultivation of different rice cultivars significantly influenced nitrogen content dynamics in surface water of paddy fields. Cultivating YY1540 significantly reduced TN, NH_4^+-N , and NO_3^--N concentrations by 12.19%, 16.50%, and 11.15%, respectively. The interaction between YY1540 and CRN resulted in the lowest average concentrations of all nitrogen forms in surface water, while simultaneously achieving significantly higher grain yield, nitrogen partial factor productivity (NFPF), and phosphorus partial factor productivity (PPFP) compared to other treatments. Application of CRN fertilizer demonstrated substantial reductions in total phosphorus (TP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) concentrations, with reduction rates reaching 29.45% and 21.65% respectively. However, no significant interaction effect between rice cultivar and fertilizer type was observed on phosphorus content dynamics in surface water. In summary, cultivating indica-japonica hybrid rice (YY1540) and applying CRN had the best effect on rice yield increase and the risk of nitrogen and phosphorus loss in paddy field surface water.

Keywords: rice cultivar; controlled-release fertilizer; nitrification inhibitor; surface water; nitrogen and phosphorus loss

水稻是我国主要的口粮作物,全国约60%的人口以大米为主食^[1]。因此,持续稳定地提高水稻产量,对保障国家粮食安全具有十分重要的战略意义。2023年我国水稻平均单产达到 $7\ 137 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较1990年提高了24.6%^[2]。大量施用化肥是获得水稻高产的关键,但是我国化肥利用率较低,平均仅约33%,远低于发达国家水平。过量、不合理施肥引发的农业面源污染不断加剧,成为制约我国农业可持续发展的重要因素之一^[3]。我国农业面源污染的重要原因之一是农田施肥后氮、磷元素的流失^[4]。有研究表明,稻田面源污染的直接来源是田面水中冗余的氮磷^[5]。因此探明田面水氮磷浓度变化特征对防控稻田养分流失带来的面源污染具有重要的意义。

不同类型肥料或硝化抑制剂直接影响养分的释放速率和氮肥利用率^[6-7],进而影响稻田田面水氮磷浓度和水稻产量。大量的研究表明,控释肥能稳定释放肥效,其氮素释放曲线与水稻的氮素吸收曲线相吻合,可显著提高氮肥利用率和水稻产量^[8-9]。尿素配施硝化抑制剂可通过调节不同形态氮素的时空和比例分布,提高主要作物产量和农田氮肥利用率,其平均增幅分别可达25.64%和10.97%^[10-11]。控释肥和硝化抑制剂对养分释放和氮肥利用率的影响机制不同,其田面水氮磷浓度动态特征同样存在差异。与普通尿素相比,施用控释氮肥可有效降低稻田田面水氮素浓度^[12]。尿素配施硝化抑制剂同样可显著降低田面水总无机氮浓度^[13]。因此,合理选择肥料类型有利于实现水稻增产、提高肥料利用率,同时降低稻田田面水氮磷流失风险。

水稻对肥料的利用率直接影响氮磷养分在稻田

生态系统中的分布。不同类型水稻品种对肥料的利用率存在较大差异,籼型杂交稻和粳型杂交稻对氮素的吸收利用能力显著强于粳型常规稻^[14],但无论种植何种类型水稻品种,施用控释肥的稻田田面水氮素浓度均显著低于常规尿素^[12,15]。以往的研究主要关注种植单一水稻品种在不同施肥条件下的稻田田面水氮磷浓度的变化,然而鲜有关于种植不同类型水稻品种的稻田田面水氮磷浓度变化的比较研究。随着我国人民生活水平的提高,对优质粳型水稻品种的需求逐年提高,目前,“籼改粳”已成为我国南方多省稳粮增粮的重要举措^[16]。在“籼改粳”的大背景下,研究种植不同类型水稻品种的稻田田面水氮磷浓度变化显得尤为重要。因此,本试验选择粳型常规稻、籼型杂交稻以及兼有两种类型性状的籼粳杂交稻作为研究材料,以期探明种植不同类型水稻品种配施不同类型肥料对稻田氮磷流失风险的影响。

目前,关于肥料减量施用^[17]、肥料施用类型及方式^[18]对稻田田面水氮磷浓度影响,以及水稻品种对氮磷利用率影响的研究较多,但关于品种与肥料互作对稻田田面水氮磷浓度变化的影响鲜有报道。本试验以单季稻为研究对象,通过研究品种与肥料互作对水稻产量和稻田田面水氮磷浓度的影响,为水稻优质丰产,提高氮肥利用率并降低稻田田面水氮磷流失风险,以及水稻品种与肥料类型的合理搭配提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验点概况

本试验于2024年6—10月在浙江省杭州市富阳

区中国水稻研究所试验基地内(30°05' N, 119°54' E)进行。该地区属亚热带季风气候区,年均气温20.3℃,年降雨量1516 mm。试验地表层(0~20 cm)土壤基本化学性质:全氮1.94 g·kg⁻¹,全磷2.49 g·kg⁻¹,全钾10.97 g·kg⁻¹,有机质33.30 g·kg⁻¹,铵态氮(NH₄⁺-N)25.24 mg·kg⁻¹,硝态氮(NO₃⁻-N)7.97 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

采用双因素裂区试验设计,主区设常规施肥(CK)、控释肥(CRN)和尿素配施硝化抑制剂(DMPP),副区设中浙优8号(ZZY8)、甬优1540(YY1540)和浙禾香2号(ZHX2)。各施肥处理的氮磷钾施用量相同(表1),N、P₂O₅和K₂O的施用量分别为220、80 kg·hm⁻²和150 kg·hm⁻²,其中磷肥(P₂O₅ 12%)和钾肥(K₂O 60%)均作基肥一次性施用。CK处理中的尿素(N 46%)分3次施用,基肥:分蘖肥:穗肥为5:3:2。CRN处理的掺混肥料(N-P₂O₅-K₂O:22-8-15,控释130 d)作基肥一次性施用,该肥料是以生物基的高性能聚酯多元醇和生物基的异氰酸酯在尿素表面交联固化成膜,其释放原理为膜内外压强差。DMPP与尿素混合作基肥一次性施用,用量为施氮量的1.5%。

表1 不同肥料处理的施肥方案

Table 1 Fertilization schemes for different fertilizer treatments

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer/ (kg·hm ⁻²)	分蘖肥 Tillering fertilizer/ (kg·hm ⁻²)	穗肥 Panicle fertilizer/ (kg·hm ⁻²)
CK	110 N+80 P ₂ O ₅ +150 K ₂ O	66 N	44 N
CRN	220 N+80 P ₂ O ₅ +150 K ₂ O	0	0
DMPP	220 N+80 P ₂ O ₅ + 150 K ₂ O+3.3 DMPP	0	0

本试验设置3次重复,各小区面积为22.25 m²,共27个小区。各小区四周筑田埂围隔,并覆塑料膜阻隔水肥侧渗,设置独立排灌口。水稻种植管理为:5月10日育秧,6月12日插秧(行株距为15 cm×20 cm),10月10日完成收获。施肥管理为:各施肥处理的基肥于移栽前日统一施用,CK处理于7月2日追施分蘖肥,8月12日追施穗肥。

1.3 样品的采集与测定

在水稻移栽和施肥后第1、2、3、5、7天采集田面水样,之后采样间隔时间为7 d。采用注射器进行无扰动取样,每个小区随机取5处田面水样品混合成1个样品(300 mL),测定其总氮(TN)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、总磷(TP)和可溶性磷(DIP)浓度。TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;NO₃⁻-N先经0.45 μm

孔径滤膜过滤,随后采用紫外分光光度法测定;NH₄⁺-N经0.45 μm孔径滤膜过滤后,采用靛酚蓝比色法测定;TP采用碱性过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定;DIP经0.45 μm孔径滤膜过滤后使用钼酸铵分光光度法测定^[9]。水稻收获后测产,并计算氮肥偏生产力、磷肥偏生产力和收获指数,计算公式如下^[20]:

氮肥偏生产力(NPFP, kg·kg⁻¹)=施肥处理产量(kg·hm⁻²)/施氮量(kg·hm⁻²)

磷肥偏生产力(PPFP, kg·kg⁻¹)=施肥处理产量(kg·hm⁻²)/施磷量(kg·hm⁻²)

收获指数=经济产量/生物产量×100%。

由于CRN和DMPP处理是一次性施肥,因此其施分蘖肥后和穗肥后的样品采集和测定按照CK处理的频次进行。

1.4 数据处理

数据统计分析采用R语言。作图采用Origin 2024。通过双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验品种、肥料及其互作效应对结果的影响,采用Tukey HSD法进行事后两两比较。

2 结果与分析

2.1 品种与肥料互作对稻田田面水各形态氮浓度的影响

2.1.1 田面水TN浓度变化特征

施肥后田面水TN浓度变化特征如图1a所示,各肥料处理田面水TN浓度均在施肥后1 d达到峰值,而后逐渐降低。CK处理田面水TN浓度分别在施用基肥、分蘖肥和穗肥后1 d达到峰值,分别为141.81~146.81、69.29~102.37 mg·L⁻¹和36.79~50.26 mg·L⁻¹,随后呈下降趋势,施肥后7 d下降到约5 mg·L⁻¹。而CRN和DMPP处理田面水TN浓度在施基肥后1 d达到峰值,分别为133.52~161.67 mg·L⁻¹和333.32~396.36 mg·L⁻¹,施肥后7 d分别下降到14.96~17.91 mg·L⁻¹和24.50~25.55 mg·L⁻¹,随后呈缓慢下降趋势,直至晒田前田面水TN浓度下降到5 mg·L⁻¹左右。可见,施用CRN可显著降低田面水TN峰值的浓度,且减缓养分的释放,养分随径流流失的风险大幅降低。

从整个监测时期看(图2a),施肥类型显著影响稻田田面水TN浓度。CK处理田面水的TN平均浓度为38.50 mg·L⁻¹,较CRN显著增加了55.81%,而DMPP处理田面水的TN平均浓度为57.40 mg·L⁻¹,增加了TN流失风险。种植不同类型水稻品种的稻田田面水TN浓度在不同施肥处理中表现基本一致:种植ZHX2

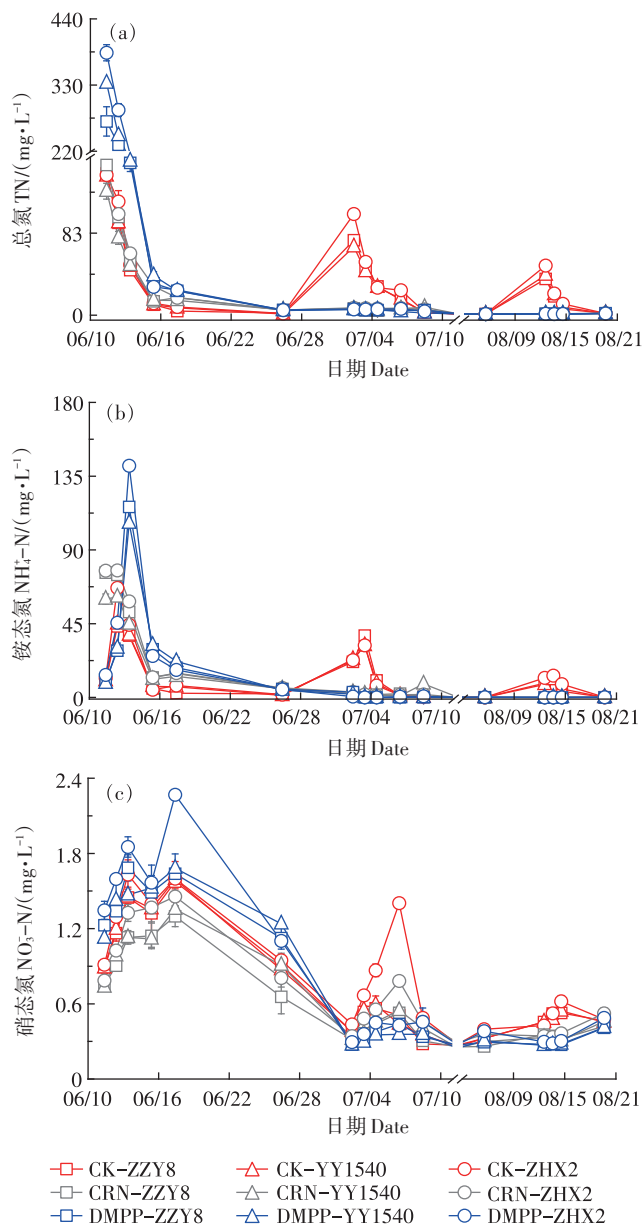


图1 稻田田面水总氮、铵态氮和硝态氮浓度的动态变化
Figure 1 Dynamic changes of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the surface water of paddy field

在3种施肥处理下的稻田田面水TN浓度均最高,在CK处理中,种植ZHX2的稻田田面水TN浓度较ZZY8显著提升了11.53%。在CRN处理中种植YY1540和ZZY8的稻田田面水TN浓度分别较ZHX2显著降低了18.78%和12.10%。在DMPP处理中,与ZHX2相比,种植YY1540和ZZY8的稻田田面水TN浓度分别显著降低了14.84%和12.31%。从总体看,种植杂交稻品种(ZZY8和YY1540)并配施CRN对田面水TN浓度的控制效果较好。

不同施肥时期田面水TN浓度如图2所示,施基

肥后1周,DMPP处理的田面水TN浓度达到了 $165.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较CK和CRN分别显著提高了174.75%和148.91%。施分蘖肥后1周,CRN和DMPP处理(均未追肥)的田面水TN浓度分别较CK处理显著降低了83.70%和86.45%,施穗肥后1周则分别较CK处理显著降低了91.78%和92.78%。水稻品种与CRN和DMPP互作对田面水TN浓度的影响主要在施基肥后1周:种植ZZY8和YY1540均显著降低了CRN和DMPP稻田田面水TN浓度。而水稻品种与CK互作则是在施用分蘖肥和穗肥后1周对田面水TN浓度有显著影响:田面水TN浓度最低的为种植YY1540和ZZY8两个处理。

2.1.2 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化特征

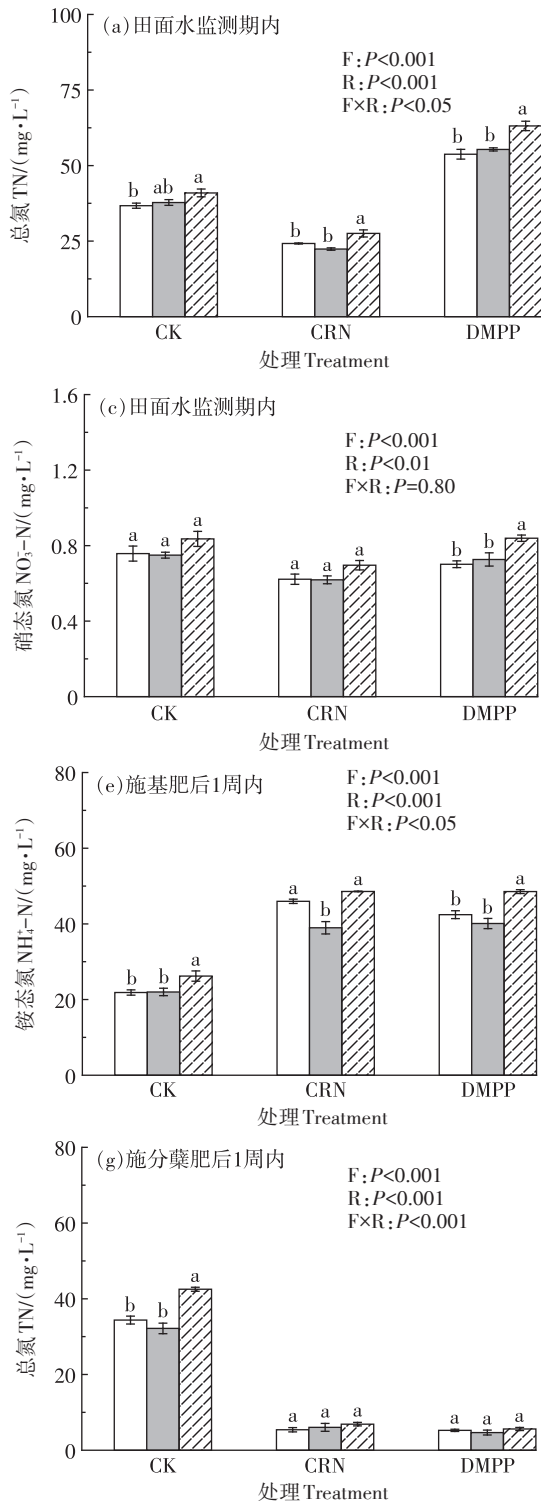
不同施肥处理对稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化的影响呈现不同的变化规律(图1b),施用CRN后1d田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度达到峰值,为 $63.52\sim 79.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后呈缓慢下降趋势,晒田前下降到 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,在水稻生长后期趋于平缓。DMPP处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈现先升高后降低的趋势,在施肥后3d达到峰值($106.35\sim 141.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随后逐渐降低。而CK处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在施肥和追肥后呈现先升高后降低的趋势,均在施肥后2d出现峰值,且峰值随施氮量的降低而降低,在施基肥后其田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值浓度最高,达到了 $47.74\sim 66.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与一次性施肥的CRN峰值基本一致。因此,CRN处理对田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的控制效果最佳。

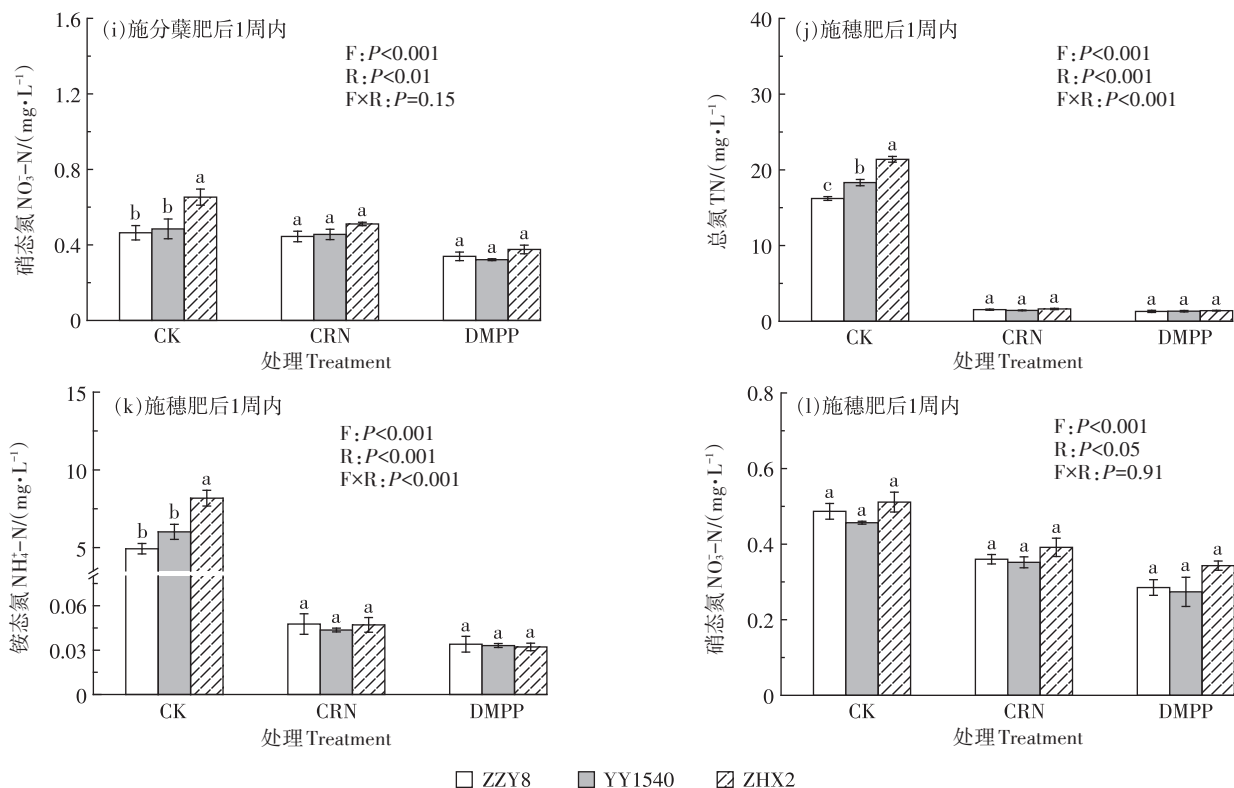
从施基肥后一周田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的平均值看(图2e),CRN和DMPP处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较CK分别显著提高了90.52%和87.03%。施分蘖肥后,CRN和DMPP处理(未追肥)田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较CK显著降低了86.04%和96.00%,施穗肥后两处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度进一步降低,较CK降幅均超99.20%。在整个监测期内(图2b),不同类型水稻品种与肥料互作对田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的影响规律不一致:在CK处理中,种植杂交稻品种的稻田 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较ZHX2显著降低了13.71%;在DMPP处理中,种植ZZY8和YY1540的稻田 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别较ZHX2显著降低了11.91%和17.06%;而在CRN处理下,种植YY1540的稻田 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最低,较ZHX2显著降低了18.67%。不同施肥时期表现不同,主要差异在CK处理:杂交稻品种(ZZY8和YY1540)和CK互作显著降低了施基肥和穗肥后1周的田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。

2.1.3 田面水 NO₃-N 浓度变化特征

各肥料处理稻田田面水 NO₃-N 浓度均在施基肥后 7 d 达到峰值(图 1c), 但不同施肥处理的田面水 NO₃-N 浓度峰值存在差异。在施基肥后, CRN 处理田面水 NO₃-N 浓度峰值比 CK 显著降低了 8.68%~26.61%。而在施用 DMPP 下种植 YY1540 和 ZHX2 的田面水

NO₃-N 浓度峰值显著高于 CK 处理。从整个监测期看(图 2c), 施用 CRN 的稻田田面水 NO₃-N 浓度最低, 较 CK 和 DMPP 显著降低了 17.33% 和 15.01%。DMPP 处理下种植杂交稻品种的稻田田面水 NO₃-N 浓度较 ZHX2 显著降低了 12.03%~16.44%, 其他施肥处理下种植不同水稻品种的田面水 NO₃-N 浓度无显著差





F代表肥料处理,R代表水稻品种。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

F, Fertilizer treatment; R, Rice cultivar. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图2 田面水监测期内、施基肥后1周内、施分蘖肥后1周内和施穗肥后1周内稻田田面水的总氮、铵态氮和硝态氮平均浓度
Figure 2 Mean concentrations of TN, $\text{NH}_4\text{-N}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ in the surface water of paddy field during monitoring period, 1 week after base fertilizer application, 1 week after tillering application and 1 week after panicle fertilizer application

异。从不同施肥时期看,种植杂交稻与DMPP交互显著降低了施基肥后稻田田面水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度。种植杂交稻与CK交互显著降低了施分蘖肥后稻田田面水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度。

2.1.4 田面水 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{TN}$

从整个监测期看(图3a、图3b),施用不同类型肥料对田面水 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{TN}$ 的影响均达显著水平($P<0.001$)。施用CRN的稻田田面水 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 为61.36%~65.43%,较CK显著提高了67.39%。CRN处理的 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{TN}$ 为2.53%~2.77%,其次为CK、DMPP处理。此外,种植不同类型水稻品种的稻田田面水 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 在不同施肥处理中表现不同:在CRN处理中,种植不同类型水稻品种的稻田田面水 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 无显著差异。在CK处理中,种植YY1540的田面水 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 比ZHX2显著降低了6.72%,在DMPP处理中,种植YY1540的田面水 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 比ZZY8显著降低了8.66%。

2.2 品种与肥料互作对稻田田面水磷浓度的影响

2.2.1 田面水TP浓度变化特征

施肥后田面水TP浓度呈波动变化特征(图4a),

CK和CRN处理田面水TP浓度均在 $0.05\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动变化。而DMPP田面水TP浓度则在 $0.06\sim 0.73\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内呈波动变化趋势,可见,DMPP处理田面水TP流失风险更大。从整个监测期平均值看(图5a),施肥类型显著影响田面水TP浓度。施用DMPP后的田面水TP平均浓度最高($0.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),较CK和CRN显著提高了19.00%和29.45%。在不同施肥处理中种植各水稻品种的稻田田面水TP浓度排序一致,均呈现为ZZY8>YY1540>ZHX2。在CRN处理中,种植YY1540和ZHX2的稻田田面水TP浓度分别较ZZY8显著降低了6.78%和8.53%,而CK和DMPP处理中各水稻品种间的稻田田面水TP浓度差异未达显著水平。

2.2.2 田面水DIP浓度变化特征

如图4b所示,所有处理的田面水DIP浓度均呈波动变化趋势,在后期逐渐趋于平缓。CRN和DMPP处理田面水DIP均在施磷肥后1d达到最高值,分别为 $0.16\sim 0.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.18\sim 0.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。施肥类型显著影响田面水DIP浓度。从整个监测期看(图5b),

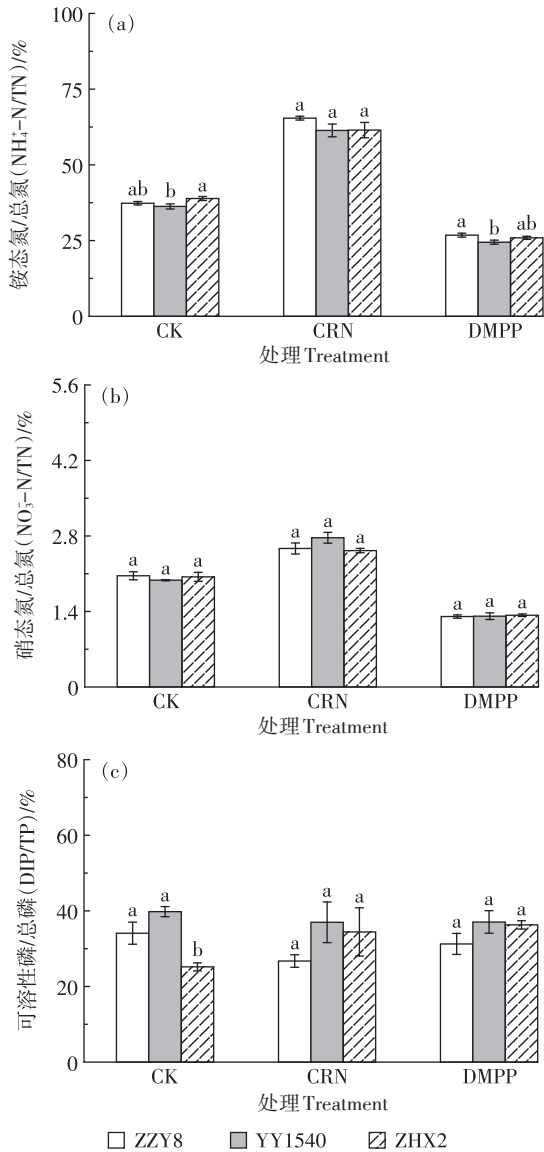


图3 田面水监测期内稻田田面水的铵态氮/总氮、硝态氮/总氮和可溶性磷/总磷

Figure 3 NH₄⁺-N/TN, NO₃⁻-N/TN, and DIP/TP in the surface water of paddy field during monitoring period

DMPP处理的田面水DIP平均浓度最高,达到了0.08 mg·L⁻¹,较CK和CRN显著增加了14.83%和21.65%。在CK处理下种植ZHX2的稻田田面水DIP浓度显著低于其他品种。

2.2.3 田面水DIP/TP

施用不同类型肥料对稻田田面水DIP/TP无显著影响(图3c)。种植不同类型水稻品种的稻田田面水DIP/TP在不同施肥处理下表现规律不同:在CK处理下种植ZHX2的稻田田面水DIP/TP显著低于其他两个品种;在CRN和DMPP处理中种植不同水稻品种对稻田田面水DIP/TP无显著影响。

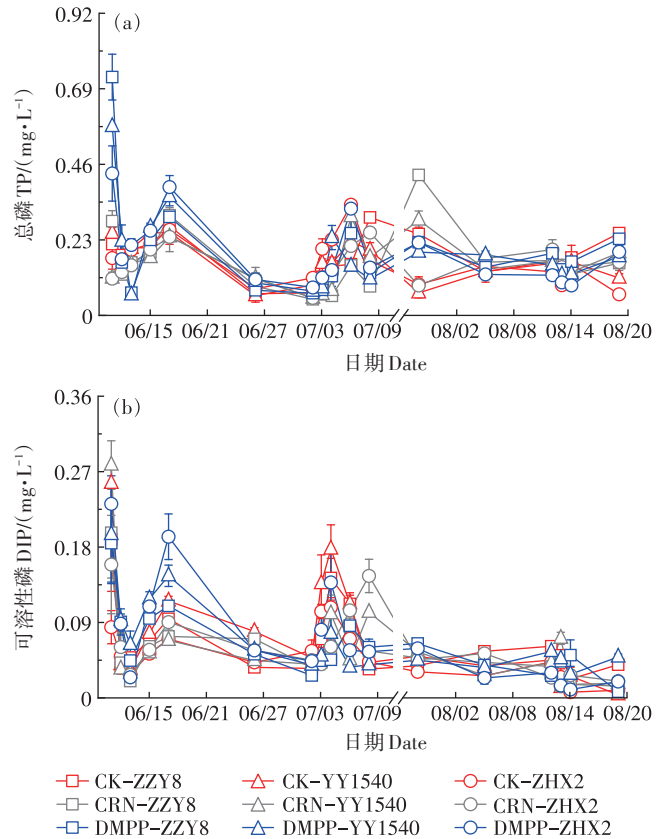


图4 稻田田面水总磷和可溶性磷浓度的动态变化

Figure 4 Dynamic changes of TP, and DIP in the surface water of paddy field

2.3 品种与肥料互作对水稻产量、氮肥偏生产力、磷肥偏生产力和收获指数的影响

由表2可知,施肥类型显著影响水稻产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力,但对水稻收获指数无显著影响。与CK处理相比,CRN处理使水稻产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力均提升了13.72%,且均达显著水平($P < 0.01$);而DMPP处理虽对上述指标略有提升,但未达显著水平($P > 0.05$)。不同类型水稻品种对产量、氮肥偏生产力、磷肥偏生产力和收获指数的影响均达极显著水平($P < 0.001$)。YY1540在产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力指标上均显著优于其他品种,较ZHX2平均提升了71.24%,且其收获指数亦以28.57%的增幅显著高于ZHX2。

进一步分析发现,各施肥处理中不同水稻品种的产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力的表现具有一致性,均表现为YY1540>ZZY8>ZHX2,且品种与肥料互作对产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力均产生显著影响。常规稻ZHX2在不同施肥处理间的产量无显著差异($P > 0.05$),平均产量稳定在4 338.50 kg·hm⁻²。

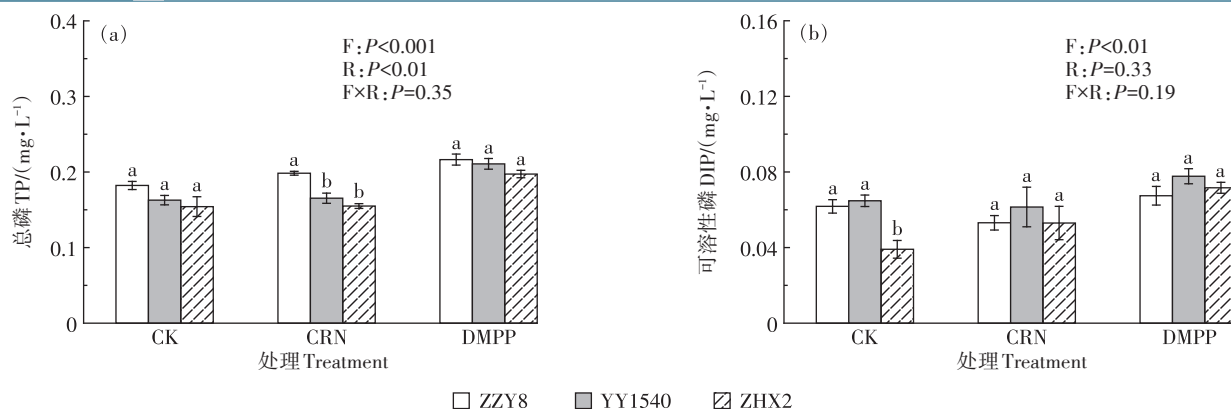


图5 田面水监测期内总磷和可溶性磷的平均浓度

Figure 5 Mean concentrations of TP, and DIP in the surface water of paddy field during monitoring period

表2 水稻产量、氮肥偏生产力、磷肥偏生产力和收获指数

Table 2 Rice yield, partial factor productivity of nitrogen fertilizer, partial factor productivity of phosphorus fertilizer and harvest index

影响因子 Factor	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	氮肥偏生产力 NFPF/(kg·kg ⁻¹)	磷肥偏生产力 PPFP/(kg·kg ⁻¹)	收获指数 Harvest index
肥料处理(F)	CK	5 501.29b	25.01b	68.77b	0.49a
	CRN	6 255.81a	28.44a	78.20a	0.49a
	DMPP	5 857.88ab	26.63ab	73.22ab	0.46a
水稻品种(R)	ZZY8	5 847.55b	26.58b	73.09b	0.50b
	YY1540	7 428.94a	33.77a	92.86a	0.54a
	ZHX 2	4 338.50c	19.72c	54.23c	0.42c
F×R	CK-ZZY8	5 093.02d	23.15d	63.66d	0.51b
	CK-YY1540	7 069.77b	32.14b	88.37b	0.56a
	CK-ZHX2	4 341.09de	19.73de	54.26de	0.41c
	CRN-ZZY8	6 457.36bc	29.35bc	80.72bc	0.50b
	CRN-YY1540	8 085.27a	36.75a	101.07a	0.54ab
	CRN-ZHX2	4 224.81e	19.20e	52.81e	0.43c
F×R	DMPP-ZZY8	5 992.25c	27.24c	74.90c	0.50b
	DMPP-YY1540	7 131.78b	32.42b	89.15b	0.46b
	DMPP-ZHX2	4 449.61de	20.23de	55.62de	0.42c
F		**	**	**	
R		***	***	***	***
F×R		*	*	*	

注:数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。*、**和***分别代表在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters after the value represent the significant difference at $P<0.05$. *, **, and *** represent significant difference at $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$ levels, respectively.

品种对比分析表明,在CK处理中YY1540较ZHX2增产了62.86%,在DMPP处理中增产幅度达60.28%,而在CRN处理中该品种的增产幅度进一步提升至91.38%,表明种植YY1540与CRN互作可显著提升水稻产量。与CK处理相比,CRN处理中种植YY1540的氮肥偏生产力和磷肥偏生产力显著提升了91.38%。综上所述,种植YY1540并配施CRN对提高水稻产量及养分利用的效果最好。

3 讨论

3.1 品种与肥料互作对田面水氮素流失风险的影响

诸多研究表明,CRN和DMPP对养分释放的影响机制不同,进而影响施肥后田面水不同形态氮素的浓度变化及形态占比^[7,21]。本试验结果显示,CRN处理施肥后1 d田面水TN浓度达到峰值,其田面水TN峰值浓度与CK处理相近(图1a),这与叶玉适等^[12]的研

究结果一致。尽管在施基肥时CRN施氮量高于CK,但二者田面水TN峰值浓度基本一致。施用CRN降低田面水TN浓度的原因与其养分释放速率有关,CRN的包膜材料和加工工艺以及土壤的温度、pH和微生物等均能影响其释放氮的速率^[22]。施用CRN显著降低田面水TN浓度,在该施肥条件下种植杂交稻品种可进一步降低TN浓度,其原因是杂交稻品种具有更高的氮素吸收和再分配效率^[23],进而提升氮肥偏生产力(表2)。从整个监测期看(图2a),施用DMPP的稻田田面水TN浓度显著高于CK,这与吴静雅等^[6]的研究结果一致。施用DMPP增加了田面水TN流失风险,一方面是由于施基肥时DMPP的施氮量为CK的2倍,因此显著提高了田面水TN浓度峰值^[17];另一方面是DMPP抑制了土壤硝化作用和硝酸还原酶活性,从而减少了 NO_3^- -N淋失和 N_2O 排放,使得有效态氮在土壤中得以留存并释放进入田面水^[24]。而俞巧钢等^[13]的研究结果表明,施用DMPP显著降低了田面水总无机氮浓度,与本研究结果不一致的原因是土壤固持了大部分 NH_4^+ -N,只有少部分 NH_4^+ -N进入田面水,导致田面水总无机氮浓度偏低^[25]。种植杂交稻品种显著降低了施用DMPP的稻田田面水TN浓度。

本试验表明,施用CRN后1d和7d田面水 NH_4^+ -N浓度和 NO_3^- -N浓度分别达到峰值(图1b和图1c),并且其田面水 NH_4^+ -N/TN和 NO_3^- -N/TN显著高于其他处理(图3a和图3b),与叶玉适等^[12]的研究结果一致。稻田田面水氮素形态占比存在差异是因为CRN抑制了有机氮的矿化,使其在水稻生长时期内持续释放有效态氮^[26],而CK在3次施肥后田面水 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N占TN比例均在短期内骤升,同时增加了氨气挥发风险,使其平均占比较低^[12]。不同类型水稻品种对氮素的吸收利用能力存在差异,从而影响田面水 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度变化。在本试验中,3种施肥条件下种植YY1540均显著降低了施基肥后田面水 NH_4^+ -N浓度(图2b),这主要归因于杂交稻品种在返青期对 NH_4^+ -N的吸收偏好^[27],而籼粳杂交稻尤为发达的根系进一步增强了对 NH_4^+ -N的吸收能力^[28]。施用基肥后,DMPP处理田面水 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度分别在3d和7d达到峰值,且浓度峰值显著高于同期CK处理,这与吴静雅等^[6]、俞巧钢等^[13]的研究结果一致。施用DMPP提高了前期氮素流失风险,其原因是更高的施氮量促使田面水中溶解的 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度显著升高。在施用DMPP条件下种植ZZY8和YY1540显著降低了田面水 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度,其原因是杂

交稻品种的根系更发达,对其吸收能力更强^[23]。

3.2 品种与肥料互作对田面水磷素流失风险的影响

前人研究指出,在施肥后1d田面水TP和DIP的浓度达到峰值,随后逐渐下降^[17,29]。本试验结果表明,田面水TP和DIP浓度在施肥后1d达到峰值,随后呈波动变化。通过对比研究发现,前人研究中的灌溉频次较低(3次),对磷素迁移的影响有限,而本试验的灌溉频次较高,加速了颗粒态磷的溶解,增强了土壤-水界面磷素交换,导致其产生波动变化^[30]。不同类型水稻品种在磷素营养方面存在显著差异^[31]。种植YY1540和ZHX2并配施CRN对稻田田面水TP浓度的控制效果较好,原因是这两个水稻品种对磷的吸收利用与同化作用效果较好^[32]。

研究表明,在施肥后7d,CRN处理的田面水TP和DIP浓度与CK处理相近或稍低,两施肥处理的田面水氮素浓度也表现为相近或稍低。而施用DMPP的田面水磷素和氮素浓度均显著高于其他处理。产生该现象的原因是氮磷的协同作用,其协同促进水稻对氮磷吸收利用的同时也促进了肥料颗粒溶解^[33]。因此,施用不同类型肥料的氮素释放速率不同,对磷素的释放也有影响。

3.3 品种与肥料互作对水稻产量、氮肥偏生产力、磷肥偏生产力和收获指数的影响

施用CRN和DMPP较CK提高了水稻产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力,与肖雪玉等^[18]、Yao等^[34]的研究结果一致。植株吸收利用的氮素主要是 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N,氮效率的高低决定了产量,CRN和DMPP均使速效氮能在土壤中保留一段时间,从而促进了植株对养分的吸收,故产量有所提升。水稻品种配合不同的施肥措施有不同的表现^[15]。种植杂交稻品种在施用CRN和DMPP条件下显著提高了水稻产量、氮肥偏生产力和磷肥偏生产力。杂交稻品种在施用两种新型肥料后的产量和肥料利用率均表现优异,原因是其具有更高的收获指数(表2)和更强的根系活力^[35]。本试验在等施肥量条件下揭示了品种与肥料互作对稻田田面水氮磷流失及水稻产量的影响,结果与生产中籼粳杂交稻高产栽培的高施氮量存在差异,未来的研究中应增加施肥梯度、水稻品种数量来探究对田面水氮磷流失风险及水稻产量的影响,为高产绿色稻作系统提供理论支持。

4 结论

(1)控释肥替代常规施肥的优势明显,替代后田

面水氮素浓度峰值有效降低且各形态氮素浓度下降较缓,其中甬优1540与控释肥互作显著降低田面水TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别达18.78%和18.67%。

(2)施肥后7d内是稻田田面水氮素损失的关键控制期。稻田田面水中氮素以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主,施用控释肥较常规施肥显著提升了 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$,其占比增幅达到67.39%。

(3)种植籼粳杂交稻品种(甬优1540)并配施控释肥既能显著降低田面水氮素流失风险,又能实现水稻增产,为“籼改粳”过程中品种和肥料的科学搭配提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] YUAN L P. Development of hybrid rice to ensure food security[J]. *Rice Science*, 2014, 21(1):1-2.
- [2] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 2023年我国水稻产业形势分析及2024年展望[J]. 中国稻米, 2024, 30(2):1-4. XU C C, JI L, CHEN Z D, et al. Analysis of China's rice industry in 2023 and the outlook for 2024[J]. *China Rice*, 2024, 30(2):1-4.
- [3] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9):1095-1103. PENG S B, HUANG J L, ZHONG X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9):1095-1103.
- [4] 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 W L, WU S X, JI H J, 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]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1008-1017.
- [5] GAO C, SUN B, ZHANG T L. Sustainable nutrient management in Chinese agriculture: challenges and perspective[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2):253-263.
- [6] 吴静雅, 许超, 曾巧云, 等. DMPP对热带地区稻田田面水氮素转化的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12):134-138. WU J Y, XU C, ZENG Q Y, et al. Experiment of nitrogen transformation in paddy-field water in tropical area: effects of DMPP nitrification inhibitor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(12):134-138.
- [7] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1):168-175. WANG Q, JIANG L N, PAN J Q, et al. Dynamic variation and runoff loss evaluation of nitrogen in the surface water of paddy fields as affected by single basal fertilizer application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1):168-175.
- [8] 韩天富, 马常宝, 黄晶, 等. 基于Meta分析中国水稻产量对施肥的响应特征[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11):1918-1929. HAN T F, MA C B, HUANG J, et al. Variation in rice yield response to fertilization in China: Meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11):1918-1929.
- [9] 蒋曦龙, 陈宝成, 张民, 等. 控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):215-220. JIANG X L, CHEN B C, ZHANG M, et al. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):215-220.
- [10] LUO G W, LI L, FRIMAN V P, et al. Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: a Meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124:105-115.
- [11] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):95-104. LU Y H, NIE J, LIAO Y L, et al. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1):95-104.
- [12] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):105-112. YE Y S, LIANG X Q, JIN Y, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):105-112.
- [13] 俞巧钢, 陈英旭. DMPP对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9):1274-1280. YU Q G, CHEN Y X. Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation and potential runoff loss in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9):1274-1280.
- [14] 李敏, 张洪程, 李国业, 等. 水稻氮效率基因型差异及其机理研究进展[J]. 核农学报, 2011, 25(5):1057-1063. LI M, ZHANG H C, LI G Y, et al. Genotypic difference of nitrogen use efficiency in rice its morphological and physiological mechanisms[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(5):1057-1063.
- [15] 丁周宇, 张娜, 舒小伟, 等. 栽培措施对水稻氮素吸收利用及稻田尾水氮磷含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9):2004-2015. DING Z Y, ZHANG N, SHU X W, et al. Effects of cultivation practices on nitrogen absorption and utilization of rice and nitrogen and phosphorus contents of paddy tailwater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9):2004-2015.
- [16] 张磊, 苗珊珊, 陆建飞. 江苏省粳稻生产成本收益时序变化与省际比较[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2020, 41(4):21-28. ZHANG L, MIAO S S, LU J F. Time-series change and inter-provincial comparison on cost-benefit of Japonica rice production in Jiangsu Province[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2020, 41(4):21-28.
- [17] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4):838-846. SHI Z S, XU Y B, LEI B K, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface waters of paddy soils in the northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):838-846.

- [18] 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产量影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2252-2257. XIAO X Y, ZHU W B, YANG D, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen dynamic characteristics in surface water and yield in early paddy field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12): 2252-2257.
- [19] 国家环境保护总局编. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [20] 廖薇, 何军, 王平章, 等. 控制排水条件下黄豆氮磷吸收利用及产量的试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 49-55. LIAO W, HE J, WANG P Z, et al. Experimental study on the absorption and utilization of nitrogen and phosphorus and the yield of soybean under controlled drainage conditions[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2023, 44(1): 49-55.
- [21] 缪杰杰, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 86-93. MIAO J J, LIU Y F, HU H X, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen and phosphorus loss and yield in paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 86-93.
- [22] 刘俊松, 吴雅萍, 左思杰, 等. 控释肥养分释放机理及其影响因素研究进展[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 464-470. LIU J S, WU Y P, ZUO S J, et al. Research advances on nutrients release mechanisms and influencing factors in controlled release fertilizers[J]. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 2020, 42(4): 464-470.
- [23] XU L, YUAN S, WANG X Y, et al. High yields of hybrid rice do not require more nitrogen fertilizer than inbred rice: a Meta-analysis[J]. *Food and Energy Security*, 2021, 10: 341-350.
- [24] ZHU G D, JU X T, ZHANG J B, et al. Effects of the nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on gross N transformation rates and N₂O emissions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(6): 603-615.
- [25] 俞巧钢, 陈英旭, 张秋玲, 等. DMPP对氮素垂直迁移转化及淋溶损失的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 4813-4818. YU Q G, CHEN Y X, ZHANG Q L, et al. Effect of DMPP on inorganic nitrogen transformation and leaching in vertical flow of simulated soil column[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 4813-4818.
- [26] BAKSHI S, BANIK C, LAIRD D A, et al. Enhancing biochar as scaffolding for slow release of nitrogen fertilizer[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(24): 8222-8231.
- [27] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 水稻对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. 中国水稻科学, 1998(4): 249-252. HE W S, LI S X, LI H T. Characteristics of ammonium and nitrate uptake in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998(4): 249-252.
- [28] 湛江华, 汪峰, 史骏, 等. 甬优籼粳杂交稻作再生稻种植的再生特性及产量形成分析[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(3): 132-138. CHEN J H, WANG F, SHI J, et al. Ratoon characteristics and yield formation of Yongyou indica-Japonica hybrid rice as ratoon rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*. 2024, 43(3): 132-138.
- [29] 傅朝栋, 梁新强, 赵越, 等. 不同土壤类型及施磷水平的水稻田面水磷素浓度变化规律[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 7-12. FU C D, LIANG X Q, ZHAO Y, et al. Temporal changes of P concentrations in floodwater under different soil types and P fertilizer rates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 7-12.
- [30] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 21-25. XIA X J, HU Q Y, ZHU L Q, et al. Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in Taihu region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 21-25.
- [31] 闫金垚, 鲁君明, 侯文峰, 等. 磷肥用量对不同水稻品种产量和磷肥利用率的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(8): 74-81. YAN J Y, LU J M, HOU W F, et al. Influence of phosphorus application dosage on the yield and phosphorus recovery efficiency of different rice varieties[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(8): 74-81.
- [32] 林文雄, 石秋梅, 郭玉春, 等. 水稻磷效率差异的生理生化特性[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(6): 578-583. LIN W X, SHI Q M, GUO Y C, et al. Physio-biochemical characters of P-efficient differences in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(6): 578-583.
- [33] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645-653. WANG W N, LU J W, HE Y Q, et al. Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(6): 645-653.
- [34] YAO Y L, ZENG K, SONG Y Z. Biological nitrification inhibitor for reducing N₂O and NH₃ emissions simultaneously under root zone fertilization in a Chinese rice field[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 264: 114821.
- [35] 莫俊杰, 胡嘉欣, 林雄健, 等. 水稻收获指数与产量形成主要性状的相关性研究[J]. 杂交水稻, 2023, 38(2): 32-37. MO J J, HU J X, LIN X J, et al. Correlation of harvest index to main traits of yield formation in rice[J]. *Hybrid Rice*, 2023, 38(2): 32-37.

(责任编辑:潘淑君)