

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

引用本文:

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 等. 种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1529–1537.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, ArifHusain, 张磊, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1305–1313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1292>

化肥配施生物炭对稻田田面水氮磷流失风险影响

冯轲, 田晓燕, 王莉霞, 欧洋, 阎百兴, 符雨

农业环境科学学报. 2016(2): 329–335 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.017>

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 等. 种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1529–1537.

YANG Z Y, LUO G W, ZHAO H, et al. Effects of planting patterns on ammonia volatilization and nitrogen and phosphorus loss in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1529–1537.



开放科学 OSID

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*

(湖南农业大学资源环境学院, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128)

摘要: 研究洞庭湖双季稻区不同种植方式下, 稻田氨挥发量变化、田面水氮磷浓度动态特征以及不同土壤深度养分含量差异, 可为水稻机械化精准施肥, 防控面源污染提供理论依据。研究采用田间试验方法, 设置农民习惯+直播(T1)、控释尿素减氮10%+直播(T2)和机插一次性施肥减氮10%(T3)3个处理, 原位监测早稻基肥期稻田氨挥发, 取样监测施肥后面水总氮、总磷及不同形态氮磷浓度, 收获期计产, 并取0~20 cm和20~40 cm土壤测定其基本理化性状。结果表明, 与T1相比, T3和T2田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度分别降低46.04%和27.03%, 氨挥发量分别降低18.62%和15.61%; 田面水总氮平均浓度分别降低53.55%和22.96%, 总磷浓度分别降低30.23%和11.63%; T3和T2均可显著增加稻田0~20 cm和20~40 cm土壤有机碳含量, 提高全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量, 水稻产量分别增加6.63%和5.98%。与T1相比, T3和T2两种施肥种植方式均能显著降低稻田氨挥发以及稻田田面水总氮、总磷浓度, 能有效增加0~20 cm和20~40 cm土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量。在3种植方式中, T3在降低农田氮、磷流失风险、维持土壤肥力、促进水稻增产方面效果更显著。

关键词: 水稻; 机插一次性深施肥; 氨挥发; 氮磷流失

中图分类号: S511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2021)07-1529-09 doi:10.11654/jaes.2020-1481

Effects of planting patterns on ammonia volatilization and nitrogen and phosphorus loss in paddy fields

YANG Zhenyu, LUO Gongwen, ZHAO Hang, HU Wang, WANG Yizhe, ZHANG Hanfeng, ZHANG Yuping*

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, National Engineering Laboratory of Soil and Resources Efficient Utilization, Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University, Changsha 410128, China)

Abstract: The main objective of this study is to investigate the effects of different planting patterns on ammonia volatilization of rice fields, dynamic change in N and P concentrations of field water, and the nutrient content at different soil depths. This study aims to provide a theoretical basis for the technical application and promotion of precision mechanized one-time fertilization and non-point source pollution prevention in the Dongting Lake double-cropping rice area. Three treatments, including farmer habit + direct seeding (T1), controlled-release urea to reduce N by 10% + direct seeding (T2), and machine transplanting one-time fertilization to reduce N by 10% (T3) were studied based on the field test method. The experiment monitored the ammonia volatilizes of the base fertilizer period and detected the content of different N and P forms in the field surface water after fertilization. Additionally, soil physicochemical properties at depths of 0~20 cm and 20~40 cm were measured and the total yield was analyzed. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration, ammonia volatilization amount, and total N and total P content of field water in the T3 treatment were decreased by 46.04%, 18.62%, 53.55%, and 30.23%, respectively, compared to the T1 treatment. These variables in the T2 treatment were decreased by 27.03%, 15.61%, 22.96%, and 11.63%, respectively, compared

收稿日期: 2020-12-23 录用日期: 2021-03-17

作者简介: 杨振宇(1996—), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: yangshi303@163.com

*通信作者: 张玉平 E-mail: zhyp2003@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800500); 湖南省重点领域研究发展计划项目(2019NK2021)

Project supported: The National Basic Research Program of China (2018YFD0800500); The Key Field Research and Development Program of Hunan Province (2019NK2021)

to the T1 treatment. The T2 and T3 treatments significantly increased the content of organic carbon, total N, total P, alkali hydrolyzable N, and available P in 0~20 cm and 20~40 cm soils compared to the T1 treatment and increased rice yield by 6.63% and 5.98%, respectively. The two management practices (T2 and T3) effectively decreased the ammonia volatilization in rice fields, and total N and total P content of rice field water, and increased the content of organic carbon, soil total N, total P, alkali hydrolyzable N, and available P in the 0~20 cm and 20~40 cm soils compared to the T1 treatment. The advantages of the T3 treatment for reducing N are prominent, shown by its better ability to reduce N and P losses and improve soil fertility and productivity.

Keywords: rice; one-time deep fertilization by machine transplantation; ammonia volatilization; nitrogen and phosphorus loss

我国是世界上最大的产稻国,水稻土的面积达 $2.53 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占世界水稻土面积的 23%, 占我国粮食耕地面积的 29%。但我国稻田中氮肥(碳铵和尿素)的利用率只有 30%~35%, 损失高达 50% 以上^[1]。大量的氮肥投入已成为农业面源污染的重要来源之一^[3]。有研究表明, 水稻生长季氨挥发损失的氮可达施入量的 9%~42%^[2,5-6], 是稻田氮肥损失的另一重要途径^[4], 进入大气中的 NH_3 有 90% 与大气中的酸作用转化成 NH_4^+ , 84% 的 NH_3 以 NH_4^+ 形态进入降水中^[7], 成为农田面源污染的重要影响因素^[8-10]。氮、磷既是作物生长的营养因子, 也是导致水体富营养化的主要污染元素^[11], 据报道, 湖泊、河流富营养化的养分分别有 50% 和 60% 来源于农田地表径流^[12], 而中国农业化肥的平均有效利用率仅为 30%~35%, 剩余部分约有 50% 通过地表径流流入江河湖海^[13], 因此, 减少氮磷的投入、流失是防控农业面源污染、改善周边水质的重要措施。当前水稻生产中常规施肥技术往往需要 1 次基肥、2~4 次追肥, 因施肥环节繁琐, 农民不易掌握其技术要点, 常存在肥料运筹不当、养分配比不科学等问题, 导致养分流失严重, 既污染了生态环境, 又增加了生产成本。研究表明, 在适宜的氮肥种类支撑下, 水稻一次性施肥能促进水稻根系发育, 增强水稻生长后期净光合速率^[14-15]。陈建生等^[16]的研究表明, 在氮肥和磷肥分别减施 22.1% 和 21.9% 的基础上, 水稻一次性施肥比分次施肥平均增产 8.22%。基于此, 通过研发基于施肥深度和肥料类型的一次性精简施肥技术, 协调肥料养分投入与作物对养分需求, 提高养分利用率, 减少流失, 成为当前水稻生产技术开发与应用的重点^[17]。

洞庭湖双季稻区地处亚热带季风气候, 稻季高温多雨, 农民习惯高化肥投入与直播栽培, 氨挥发量高, 氮磷养分流失严重, 目前关于该区域的肥料类型替代、化肥减量的研究较多, 且已有研究主要集中在一次性施肥技术的稳产机制以及稳产效果等方面, 关于一次性精量深施肥对水稻产量、氮磷养分流失等影响

的研究报道尚少。本文旨在以洞庭湖流域农民习惯的水稻施肥+直播栽培模式为对照, 研究控释尿素减氮 10%+直播和机插同步一次性深施肥减氮 10% 模式对稻田氨挥发、田面水氮磷浓度、不同层次土壤养分含量特征的影响, 探明该两种种植方式下的农田氨挥发与氮磷流失风险, 从而为洞庭湖双季稻区水稻精准化机械化一次性施肥和面源污染防控技术应用与推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年在湖南省岳阳市屈原管理区凤凰乡进行, 试验区位于湘江、汨罗江注入东洞庭湖交汇处, 东接汨罗市, 南连湘阴县, 西靠湘江, 北抵洞庭湖。地处 $109^\circ 18' \sim 109^\circ 48' \text{ E}$, $27^\circ 44' \sim 28^\circ 19' \text{ N}$, 属中亚热带季风湿润性气候。试验地土壤类型为湖积物发育的潮砂泥, 其基本理化性状指标分别为: pH 5.81, 有机质 $16.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $10.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $9.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $167.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采取大田试验方法, 共设置农民习惯施肥、机插同步一次性深施肥和缓控释肥+复合肥 3 个处理, 每个处理 3 次重复, 随机排列, 小区面积 60 m^2 , 四周设置保护行。3 个处理水稻品种均为陵两优 268, 其中, 农民习惯施肥+直播模式(T1): 采用厢面落水后, 尽量保持均匀撒播, 水稻播种量为 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。以复合肥(N:P₂O₅:K₂O=24:9:18)作基肥, 尿素、氯化钾作追肥, N、P₂O₅、K₂O 养分施用量分别为 117、45、90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷肥一次性作基肥施用, 基肥氮为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 控释尿素减氮 10%+直播(T2): 在农民习惯施肥的基础上, 利用控释尿素减少氮素 10%, 即 N、P₂O₅、K₂O 养分施用量分别为 105、45、90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中控释尿素氮占 20%, 其他化肥氮占 80%, 将普通尿素、磷酸铵、氯化钾按照比例充分混合后与控释尿素一起作基肥

一次性撒施;机插一次性深施肥减氮10%(T3):水稻机插插植密度均为 $12\text{ cm}\times 25\text{ cm}$,施肥深度为 5 cm 。将尿素、磷酸铵、氯化钾按照 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=21:9:18$,制成水稻机插一次性深施专用肥, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}$ 养分施用量分别为 $105, 45, 90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3 样品采集及指标测定方法

1.3.1 样品采集及测定指标

氨挥发样品:采用大田原位监测方法,使用通气法采集氨挥发样品。采样装置用聚氯乙烯硬质塑料管制成,内径 15 cm ,高 20 cm ,装置顶部配置遮雨盖,盖与塑料管之间可通气。分别将两块厚度均为 2 cm 、直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 5 mL 磷酸甘油溶液,置于硬质塑料管中,下层的海绵距管底 8 cm ,上层的海绵与管顶部相平。每个试验小区随机布设3个氨挥发采集装置,利用通气法在施基肥后连续监测 21 d ,前 6 d 每日采集1次气体样品,后 15 d 每 3 d 采集1次。采样时,将装置下层的海绵取出,迅速装入密实袋中密封,同时换上另一块刚浸过磷酸甘油的海绵;将换下的海绵带回实验室,分别放入 500 mL 塑料瓶,加入 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液 300 mL ,使海绵完全浸入其中,振荡 1 h ,测定浸提液中的铵态氮含量。上层的海绵每 3 d 更换1次。农民习惯施肥直播模式的监测时段为2019年4月1日—4月21日,机插一次性深施肥减氮模式和缓控释肥减氮直播模式均为一次性施肥,其监测时段为4月22日—5月12日。

田面水样品:在水稻每次施肥后第 2 d 开始取样,之后每 2 d 采集一次田面水样。样品采集采用 100 mL 注射器,以不扰动水层为前提,按对角线方向随机取各试验小区田面水样,每个试验小区取5个水样混合,装瓶带回实验室于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,用于测定总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、水溶性磷、颗粒态磷含量。

土壤样品:分别于早稻试验前与收获期随机采集各处理小区 $0\sim 20, 20\sim 40\text{ cm}$ 深度的分层土样,每个小区采集3个重复,混匀后带回实验室用于测定各处理各小区不同层次土壤的 pH 、全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量。

1.3.2 样品分析测定

氨挥发气体样品分析采用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液浸提,靛酚蓝比色法测定;水体总氮、总磷、颗粒态磷采用碱性过硫酸钾消解,紫外分光光度法测定;硝态氮、铵态氮使用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后,用全自动间断化学分析仪(Smart200)测定。

土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定^[18]。

全磷含量采用硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法测定;全钾含量采用火焰光度计法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤有效磷采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定。试验采用常规田间管理,水稻收获后按小区计产。

数据采用Excel、Origin软件进行计算与统计分析,运用LSD法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式对稻田氨挥发的影响

从图1A可以看出,3种处理下的氨挥发速率在施肥后呈逐渐下降的趋势,且各处理的氨挥发均集中在施肥前后 9 d ,分别占 $93.1\%、92.1\%$ 和 93% 。T2、T3的氨挥发峰值较T1延迟 1 d ,其峰值较T1分别降低 8.13% 和 14.69% 。3个处理间相比,T1在施肥前后 6 d 的日挥发量明显高于T2、T3,之后的3个处理间差异并不显著,而T2、T3之间相比,T2在施肥后的前 4 d 的氨挥发通量明显高于T3,第 5 d 开始两个处理之间差异并不明显。由此说明,稻田氨挥发主要集中在施肥后的1个星期,其氨挥发高峰期主要发生在施肥后的前 3 d 。

由图1B可知,3种植方式的基肥期氨挥发累积量动态与氨挥发通量趋势完全一致,即施肥后第 9 d 开始,各处理的氨挥发累积量基本趋于稳定。并且3个处理之间相比,其累积氨挥发量顺序为: $\text{T1}>\text{T2}>\text{T3}$,T1显著高于T2、T3,T2、T3差异较小,说明与农民习惯施肥+直播模式相比,控释尿素减氮+直播和机插同步深施肥模式能显著减少农田土壤氨挥发。各施肥栽培模式下的氨挥发量及排放系数比较结果(表1)表明,与T1相比,尽管T2、T3的基肥期施肥量较T1增加了 $15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,但氨挥发总量却分别降低了 15.61% 和 18.62% ,氨挥发排放系数分别减少了 $4.49、4.91$ 个百分点,且统计结果表明,T2、T3的氨挥发总量与T1相比,差异达极显著水平;T2和T3之间达显著性水平。由此说明T2和T3均有利于减少稻田氨挥发,并且与T2相比,T3种植方式对减少稻田氨挥发的效果更好。

2.2 不同种植方式对稻田田面水氮素流失风险的影响

2.2.1 不同种植方式对稻田田面水总氮含量的影响

由图2A可知,施肥后3种植方式的稻田田面水浓度在施肥后第 2 d 时浓度最高,第 4 d 急剧降低,T3处理在施肥后第 6 d 开始进入低总氮浓度期($<10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),T1、T2在施肥后第 8 d 后开始进入低总氮浓度期,说明水稻施肥后的第1个星期为氮素径流流

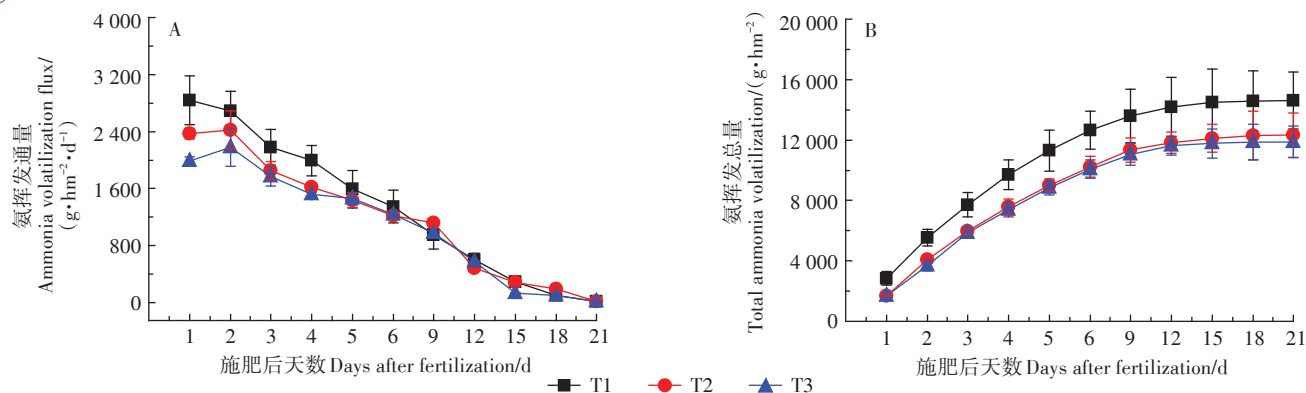


图1 不同处理早稻氨挥发通量与累积挥发量

Figure 1 Dynamics of ammonia volatilization flux and cumulative volatilization of early rice under different treatments

表1 各种植方式的氨挥发量及排放系数比较

Table 1 Comparison of ammonia volatilization and emission coefficients of various planting patterns

处理 Treatments	基肥期施氮量 Nitrogen application rate in base fertilizer stage/(kg·hm ⁻²)	氨挥发总量 Total ammonia volatilization /(kg·hm ⁻²)	氨排放系数 Ammonia emission coefficient/%
T1	90.00	14.61±0.91Aa	16.23
T2	105.00	12.33±0.71Bb	11.74
T3	105.00	11.89±0.76Bc	11.32

注:不同大写字母代表处理间的差异极显著($P<0.01$),不同小写字母代表处理间的差异显著($P<0.05$)。下同。

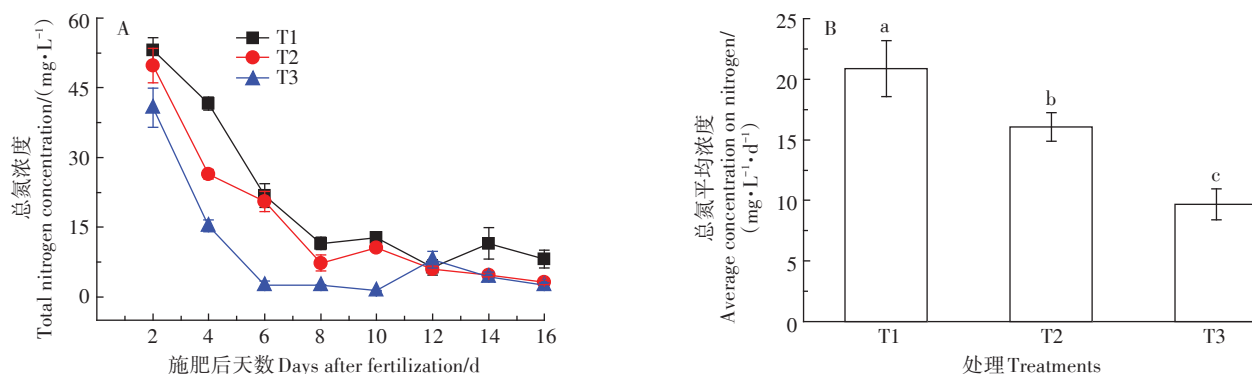
Note: The different uppercase letters indicate extremely significant differences among treatments ($P<0.01$), and the different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

的高风险阶段。从监测结果看出,在施肥后的前8 d, T1、T2、T3 3种模式的稻田田面水总氮浓度幅度分别为11.53~53.14、7.31~49.81、2.53~40.68 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, T2、T3在施肥后前8 d的流失较高风险期内平均浓度较T1分别降低了18.74%和52.29%, T2和T3之间相比,在氮素流失高风险期内T3的总氮平均浓度降低了

41.28%。从施肥后16 d的整个监测周期看出(图2B), T1、T2和T3总氮日平均浓度分别为20.86、16.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和9.69 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, T2、T3的稻田田面水总氮平均浓度分别较T1降低了22.96%和53.55%, T3较T2降低了39.70%。由此说明在肥料撒施和直播条件下,施用控释尿素可显著降低稻田田面水总氮的流失风险,如果采用T3种植方式,可进一步显著降低其流失风险。

2.2.2 不同种植方式对稻田田面水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的影响

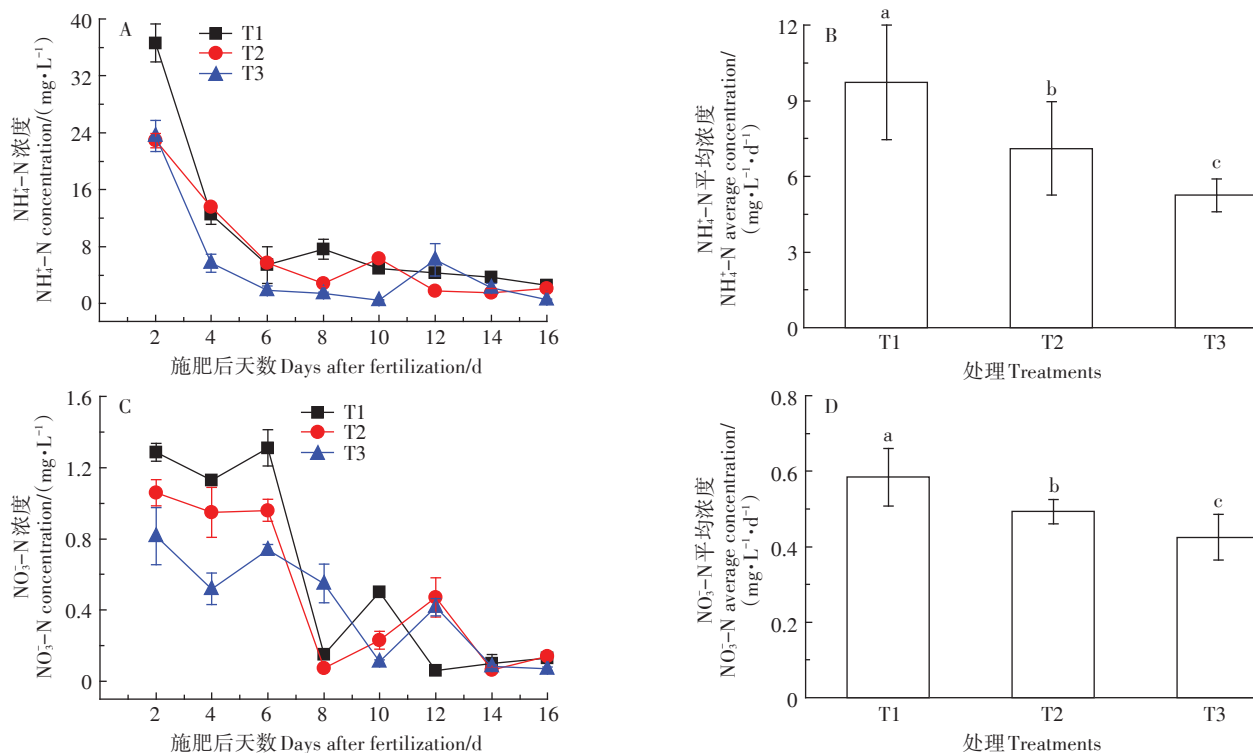
由图3A可知,水稻施基肥后第2 d各施肥处理田面水 NH_4^+-N 浓度达到峰值,之后迅速下降,并且从田面水 NH_4^+-N 浓度动态结果看出,施肥后前6 d田面水 NH_4^+-N 浓度较高,之后浓度处于相对较低且比较稳定时期,说明水稻施肥后前6 d是氮素损失风险较大时期。3个处理间相比,水稻施肥后前6 d的田面水 NH_4^+-N 平均浓度分别为18.20、14.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和10.38 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与T1相比, T2、T3分别降低了22.80%和



不同小写字母代表处理间的差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图2 早稻不同处理田面水总氮浓度动态及平均浓度

Figure 2 Dynamics and average concentration of total nitrogen in field surface water of early rice with different treatments

图3 不同处理稻田田面水 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度动态及平均浓度Figure 3 Dynamics and average concentration of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in paddy field surface water with different treatments

42.97%。从施肥后的整个监测期的结果看出(图3A、图3B),3个处理的稻田田面水 NH₄⁺-N 平均浓度分别为 9.73、7.10 mg·L⁻¹·d⁻¹ 和 5.25 mg·L⁻¹·d⁻¹, T2、T3 分别较 T1 降低了 27.03% 和 46.04%, 统计结果表明, 3 个处理的田面水 NH₄⁺-N 平均浓度之间差异均达显著水平。因此, 采用 T2 和 T3 种植方式可显著降低稻田田面水 NH₄⁺-N 浓度, 氨挥发损失风险明显降低。

由图3C和图3D可知, 各处理稻田田面水 NO₃⁻-N 浓度变化总体呈前期高, 后期低, 施肥后前 6 d 3 个处理的田面水浓度幅度分别为 1.13~1.31、0.95~1.06 mg·L⁻¹ 和 0.52~0.82 mg·L⁻¹, 后期均小于 0.55 mg·L⁻¹, 施肥后前 6 d 田面水 NO₃⁻-N 浓度显著高于后期, 说明施肥后前 6 d 为田面水 NO₃⁻-N 流失高风险期。施肥后前 6 d T1、T2、T3 的田面水 NO₃⁻-N 平均浓度分别为 1.24、0.99 mg·L⁻¹ 和 0.69 mg·L⁻¹, T2、T3 较 T1 分别降低了 20.16% 和 44.35%, T3 较 T2 降低了 30.30%。从施肥后的整个施肥期的监测期结果看出, 3 个处理 NO₃⁻-N 平均浓度依次为 0.58、0.49 mg·L⁻¹·d⁻¹ 和 0.41 mg·L⁻¹·d⁻¹, T2、T3 分别较 T1 降低了 15.52% 和 29.31%, T3 较 T2 降低了 16.33%, 统计表明, 3 个处理之间均有显著性差异。由此说明, 采用 T2 和 T3 种植方式可显著降低稻田田面水 NO₃⁻-N 浓度, 氮素流失风险显著降低。

2.3 不同种植方式对稻田田面水磷素流失风险的影响

2.3.1 不同种植方式对稻田田面水总磷含量的影响

由图4A可知, 3 个处理稻田田面水总磷浓度在施肥后第 2 d 达到浓度高峰, 第 4 d 之后均出现较大幅度的下降, 第 8 d 之后基本趋于稳定, 尽管 T3 种植方式因肥料深施导致田面水总磷浓度在施肥后自第 10 d 至第 12 d 有所回升, 但其浓度值仍处于较低水平, 说明施肥后第 1 周为稻田磷素流失风险较高的时期。在施肥后前 8 d, 3 个处理的稻田田面水总磷平均浓度分别为 0.91、0.86 mg·L⁻¹ 和 0.46 mg·L⁻¹, T2、T3 分别较 T1 降低了 5.49% 和 49.45%, T3 较 T2 降低了 46.51%。从整个监测期的田面水总磷平均浓度(图4B)看出, 3 个处理的稻田田面水平均浓度分别为 0.43、0.38 mg·L⁻¹·d⁻¹ 和 0.30 mg·L⁻¹·d⁻¹, T2、T3 分别较 T1 降低了 11.63% 和 30.23%, T3 较 T2 降低了 21.05%, 且 3 个处理之间差异显著。因此, 采用 T2 和 T3 种植方式可显著降低稻田田面水总磷浓度, 从而降低磷素流失风险。

2.3.2 不同种植方式对稻田田面水水溶性磷和颗粒态磷含量的影响

两种磷素形态的动态结果(图5A、图5C)表明, 自施肥第 2 d 开始, 除 T3 处理因肥料深施磷素溶出延缓

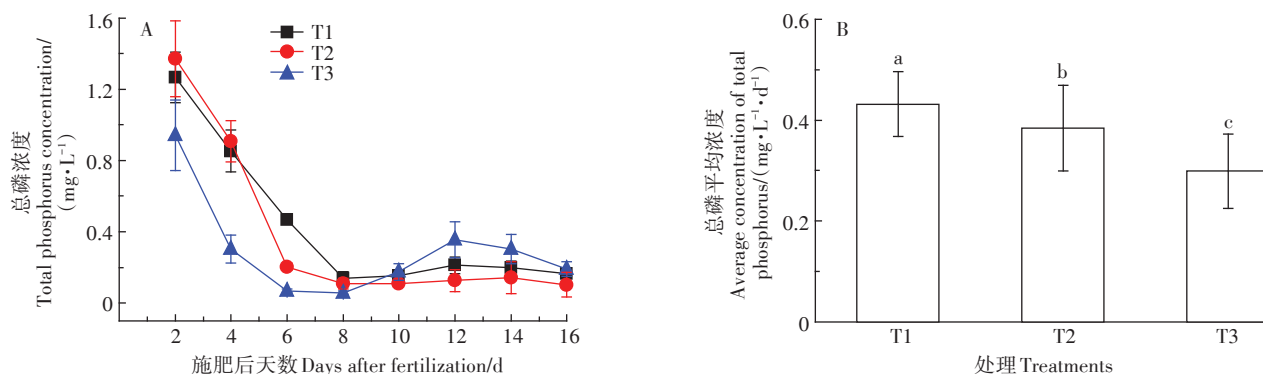


图4 不同处理稻田田面水总磷浓度动态及平均浓度

Figure 4 Dynamics and average concentration of total phosphorus concentration in paddy field surface water with different treatments

导致颗粒态磷和水溶性磷浓度分别在第12 d和第10 d略有回升外,各处理的稻田田面水颗粒态磷和水溶性磷浓度均呈总体不断下降趋势,且在第8 d后两种形态的磷素浓度基本稳定在低浓度水平,说明两种形态的磷素流失风险为施肥后的8 d之内。

由图5A可知,3个处理施肥后前8 d的颗粒态磷平均浓度分别为0.42、0.43、0.23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, T1、T2颗粒态磷浓度之间差异不明显,但是T3的田面水颗粒态磷的流失风险较T1、T2分别降低了45.24%和46.51%。由图5B可知,3个处理施肥后前8 d的水溶性磷平均浓度分别为0.27、0.20、0.11 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, T2、T3的田面水水溶性磷的流失风险分别较T1降低了25.93%和59.26%。说明施肥后前8 d磷素流失风险较高期,T2对不同形态的磷素流失风险影响较小,但是T3可明显降低两种磷素形态的流失风险。

由图5B和图5D可知,3种模式的颗粒态磷的平均浓度分别为0.25、0.24、0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,水溶性磷平均浓度分别为0.18、0.14 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和0.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。与T1相比,T2、T3的颗粒态磷平均浓度分别降低4.00%和20.00%,水溶性磷平均浓度分别降低22.22%和44.44%;T3较T2的颗粒态磷和水溶性磷平均浓度分别降低16.67%和28.57%。统计结果表明,施肥后,3个处理的稻田田面水两种形态磷素平均浓度之间均有显著性差异,因此从整个施肥期来看,相同种植方式下,施用缓控释肥有利于减少不同形态的磷素流失,并且机插同步深施肥对减少两种形态磷素流失的阻控效果最好。

2.4 不同种植方式对稻田不同层次土壤氮磷养分含量的影响

由表2可知,表层土(0~20 cm)的pH均低于下层土(20~40 cm),相同层次的土壤pH除T3的20~40 cm

明显低于T1、T2外,其他处理之间差异较小,说明稻田施肥可能会加速稻田表层土壤的酸化,T3可能对20~40 cm土壤有一定的酸化风险。0~20 cm土壤中全氮、全磷、碱解氮、有效磷含量均显著高于20~40 cm土壤,说明通过施肥可以增加表层土壤氮磷养分含量。各处理0~20 cm的土壤,T2、T3的全氮、全磷、碱解氮和有效磷均较T1略有增加,但无显著性差异,说明短期内T2和T3处理不会导致表层土壤养分的大幅变化。各处理20~40 cm的土壤,T3的全氮含量显著高于T1和T2,但T1、T2之间差异不显著,其原因可能是T3处理机插深施肥种植方式造成了土壤的差异或者不同土壤耕作导致了剖面分布的差异。但是各处理20~40 cm的土壤全氮、全磷、碱解氮、有效磷含量之间均无显著性差异,说明T2和T3种植方式不会导致下层土壤中氮磷的淋失风险增加。

2.5 不同种植方式对水稻产量的影响

由图6可知,T1、T2、T3 3种植植方式的水稻产量分别为6 769.51、7 174.54 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和7 218.03 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与T1相比,T2、T3分别增产5.98%和6.63%,T2、T3相比无显著差异。说明T2和T3均能促进水稻增产,并且T3增产效果更加明显。

3 讨论

稻田早稻季基肥期,T1基肥期施氮量增加15 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的前提下,T2、T3氨挥发程度峰值相较于T1延迟1 d,峰值大小顺序为T1>T2>T3,并且氨挥发损失大小的顺序依然为T1>T2>T3,其原因可能与肥料类型与施肥深度有关。稻田施入氮素肥料后,T1处理下氮素遇水快速水解,极易造成田面水 NH_3 浓度急剧升高,易在短时间内产生 NH_3 挥发。T2处理下,其种植方式与T1一致,但是由于控释尿素的缓释效应,有

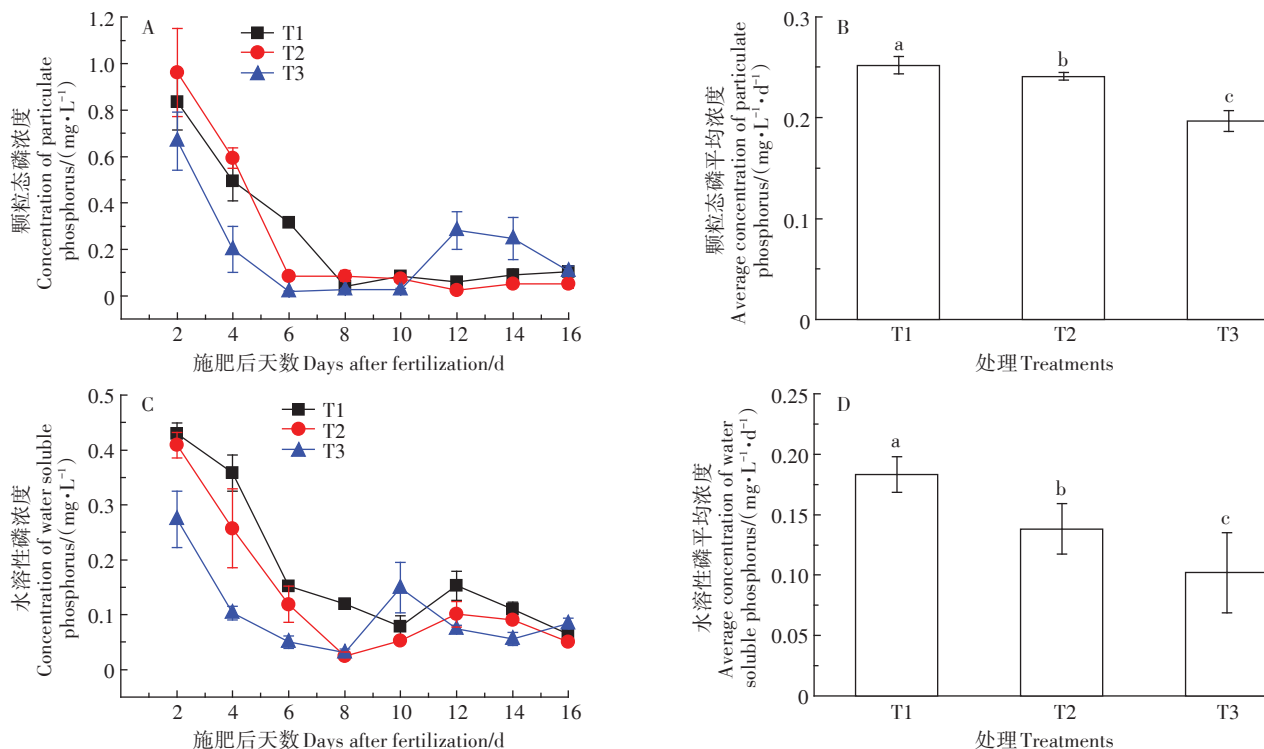


图5 早稻不同处理田面水颗粒态磷、水溶性磷浓度动态及平均浓度

Figure 5 Concentration dynamics and average concentration of particulate phosphorus and water-soluble phosphorus in field water of early rice with different treatments

表2 不同种植方式对稻田不同层次土壤养分含量的影响

Table 2 Effects of different planting patterns on soil nutrient content in different layers of paddy field

指标 Indexes	0~20 cm			20~40 cm		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
pH	5.04±0.04a	5.04±0.03a	5.03±0.04a	5.60±0.02a	5.51±0.01a	5.39±0.03b
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	1.42±0.08a	1.45±0.09a	1.51±0.15a	1.16±0.10b	1.21±0.11b	1.32±0.12a
碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	159.98±11.06a	165.34±15.31a	162.83±12.57a	112.91±3.16b	124.41±6.01a	128.23±5.36a
全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	0.57±0.11a	0.58±0.13a	0.62±0.10a	0.32±0.07a	0.34±0.08a	0.40±0.12a
有效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	9.50±0.13a	9.56±0.24a	9.61±0.23a	6.43±0.21a	6.49±0.21a	6.89±0.15a

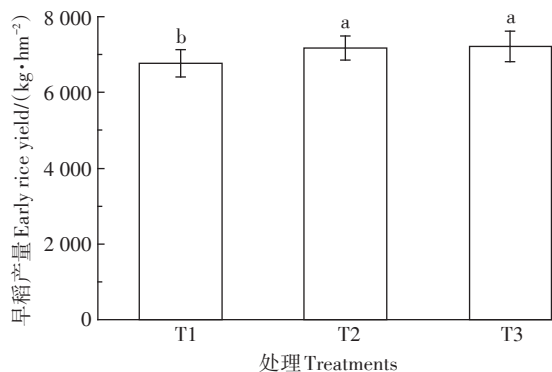


图6 不同种植方式早稻产量

Figure 6 Early rice yield of different planting patterns

利于土壤对氮素的固定,同时其肥效释放速度更适宜早稻苗期的生长发育,有利于水稻秧苗对氮素的吸收。而T3处理因其肥料施入5 cm以下,延缓了氮素的溶解和进入田面水,与控释尿素延缓肥力释放机理虽有差别,但结果基本一致,故在前几天氨挥发通量相对较小^[19-20]。同时邓美华等^[21]研究认为氮肥施入土壤深度显著影响氨的挥发速率和挥发损失量,且氨挥发强度随施肥深度而降低。周平遥等^[22]研究也表明与氮肥减量撒施相比,减量深施氨挥发损失率较减量撒施处理降低了23.89%~53.10%。机插同步深施肥模式下的复混肥料中的尿素深施后可以与土壤充分混合,被土壤吸附并减小其溶解范围,从而抑制氨挥

发。此外机插深施与直播两种模式下的初期田面均采取施肥后淹水,尿素首先被施入没有水的田面,然后再灌水使得氮肥进入较深层次的土壤中,从而促进了氮素被水稻根系吸收,使氮肥利用率提高;同时短期内田面缺水,造成水稻水分胁迫,促进了水稻根系生长,从而加强了水稻对氮素的吸收,因此进入田面水的 NH_4^+ 较少,田面水中的 NH_4^+ 浓度降低,进而减少了稻田的氮挥发^[23]。

本研究监测了基肥期各处理的稻田田面水不同形态的氮磷浓度动态,在水稻试验中发现,各处理稻田田面水的 NH_4^+-N 浓度分别是 NO_3^--N 浓度的16.78、14.49倍和12.80倍,稻田田面水颗粒态磷含量明显高于水溶性磷含量,说明稻田田面水氮素、磷素流失主体分别为铵态氮与颗粒态磷,其中铵态氮在田面水无机态氮中所占比例为92.52%~94.34%;颗粒态磷在稻田磷素流失中占比为58.33%~65.82%。此外,稻田田面水氮磷流失风险主要集中于施肥后一周左右,其流失比例分别占整个监测周期比例的69.84%~75.61%、57.24%~84.38%。在氮素投入低于T1、磷肥施用量相同的条件下,T2和T3两种种植方式的稻田田面水总氮平均浓度分别降低了23.01%和53.57%,总磷平均浓度分别降低了11.11%和30.79%,氮磷流失风险大大降低,这与王强等^[24]和蔡佳佩等^[25]的研究结论基本相符。但是本研究认为,在氮磷投入量相同的条件下,在水稻基肥期深施肥(T3)与直播(T2)相比,水稻苗期具有较强的养分吸收利用能力,更有利于减缓稻田氮磷养分溶出进入田面水,从而降低稻田氮磷流失的风险。此外,陈雄飞等^[26]生产试验表明水稻穴播同步侧位深施肥技术具有增产、节本的效用,在同等的施肥条件下,机械播种及深施肥处理的有效穗、穗平均实粒数、结实率均高于机械播种人工撒施肥和直播人工撒施肥,增产418.5~957.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅为5.86%~13.41%。朱从桦等^[27]研究认为,与撒施相比,机械侧深施肥的水稻产量增加4.46%~8.11%,氮素回收效率提高17.91%~54.10%。位国建等^[28]的研究表明,侧深施肥技术能减少氮挥发,增强水田对氮的吸附,减少氮素流失。以上研究均证实了机插同步一次性深施肥相比于撒施直播对水稻养分利用与产量的优势影响。本研究结果从土壤养分和产量两方面均印证了以上观点,即水稻收获期T2和T3两种种植方式土壤全氮、全磷、碱解氮和有效磷虽略有增加,但处理间无显著性差异,产量分别增加5.98%和6.63%,说明采用这两种种植方式较农民习惯种植方式有利于

降低稻田氮磷养分流失风险,促进水稻增产。

4 结论

(1)早稻基肥期氮挥发主要集中在施肥后的前9 d,其挥发量占监测期总挥发量的92%以上;一次性施肥种植方式相比于农民习惯施肥+直播模式可显著降低稻田氮挥发量,且机插同步一次性深施肥减氮10%模式效果更佳。

(2)水稻施肥后的第1个星期稻田田面水氮磷浓度相对较高,即为氮磷径流流失的高风险阶段。机插同步一次性深施肥减氮10%模式在降低稻田田面水氮磷流失风险上优于控释尿素减氮10%+直播模式。

(3)与农民习惯施肥+直播模式相比,机插同步一次性深施肥减氮10%和控释尿素减氮10%+直播两种耕作施肥模式有利于降低氮磷养分流失风险,且两种模式分别增产6.63%和5.98%。

参考文献:

- [1] 钦绳武, 范晓晖, 汪金舫. 五种主要作物的施肥技术[M]//徐静安. 施用技术与农化服务, 北京: 化学工业出版社, 2001. QIN S W, FAN X H, WANG J F. Fertilization techniques for five major crops[M]//Xu Jing-an. Application technology and agro-chemical services, Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [2] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783. ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [3] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *PNAS*, 2009, 106: 3041-3046.
- [4] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. ZHU Z L, WEN Q X. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Phoenix Science Press, 1992.
- [5] 蔡贵信. 稻田中化肥氮的气态损失[J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊2): 134-211. CAI G X. Gaseous loss of fertilizer nitrogen in paddy fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(Suppl 2): 134-211.
- [6] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失[C]//氮素循环与农业和环境学术研讨会论文(摘要)集, 厦门: 中国土壤学会, 2001. SHEN S M. Contribution of nitrogen fertilizer to agricultural development in China and nitrogen loss in agriculture[C]//Colloquium on Nitrogen Circulation and Agriculture and Environment, Xiamen: Soil Science Society of China, 2001.
- [7] 徐仁扣. 我国降水中的 NH_4^+ 及其在土壤酸化中的作用[J]. 农业环境保护, 1996, 15(3): 139-140. XU R K. NH_4^+ in precipitation and its role in soil acidification in China[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(3): 139-140.
- [8] 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, 2005, 24(2): 357-361. JIN J, YANG J P, SHI H X, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water

- body of a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):357-361.
- [9] 晏维金,尹澄清,孙濮,等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(3):312-316. YAN W J, YIN D Q, SUN P, et al. Conversion and runoff loss process of phosphorus and nitrogen in paddy wetland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3):312-316.
- [10] 张维理,冀宏杰, KOLEB H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国国家农业面源污染状况及控制[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7):1018-1025. ZHANG W L, JI H J, KOLEB H, et al. China's agricultural non-point source pollution situation estimation and control countermeasures II. Control of agricultural non-point source pollution in Europe and America[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1018-1025.
- [11] DANIEL J C, HANS W P, ROBERT W H, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323(20):1014-1015.
- [12] PARRY R. Agricultural phosphorus and water quality: A U. S. Environmental protection agency perspective[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2):251-317.
- [13] 王桂苓, 马友华, 石润圭, 等. 巢湖流域种植业面源污染现状与防治对策[C]//全国农业面源污染综合防治高层论坛论文集, 苏州: 中国农学会, 2008. WANG G L, MA Y H, SHI R G, et al. Current situation and prevention countermeasures of planting non-point source pollution in Chaohu Basin[C]// National High Level Forum on Integrated Prevention and Control of Agricultural Non-point Source Pollution, Suzhou: China Association of Agricultural Science Societies, 2008.
- [14] 张木, 唐拴虎, 逢玉万, 等. 不同氮肥及施用方式对水稻养分吸收特征及产量形成的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, 2:69-75. ZHANG M, TANG S H, PANG Y W, et al. Effects of different nitrogen fertilizer and fertilization patterns on nutrients uptake and yield formation of rice[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017, 2:69-75.
- [15] 彭玉, 马均, 蒋明金, 等. 缓控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5):1048-1057. PENG Y, MA J, JIANG M J, et al. Effects of slow/controlled release fertilizers on root morphological and physiological characteristics of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(5):1048-1057.
- [16] 陈建生, 徐培锴, 唐拴虎, 等. 一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果[J]. *应用生态学报*, 2005(10):1868-1871. CHEN J S, XU P Z, TANG S H, et al. Nutrient use efficiency and yield-increasing effect of single basal application of rice-specific controlled release fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005(10):1868-1871.
- [17] BERBER M R, HAFEZ I H, MINAGAWA K. A sustained controlled release formulation of soil nitrogen based on nitrate-layered double hydroxide nanoparticle material[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014(14):60-66.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 叶世超, 林忠成, 戴其根. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(1):71-78. YE S C, LIN Z C, DAI Q G. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(1):71-78.
- [20] 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 M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10):3133-3139.
- [21] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. *土壤*, 2006, 28(3):263-269. DENG M H, YIN B, ZHANG S L, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soil*, 2006, 28(3):263-269.
- [22] 周平遥, 张震, 王华, 等. 不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(11):2683-2691. ZHOU P Y, ZHANG Z, WANG H, et al. Effects of deep fertilization methods on ammonia volatilization and rice yield in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11):2683-2691.
- [23] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究[J]. *中国生态农业报*, 2006, 14(3):46-48. DONG W X, HU C S, ZHANG Y M. In situ determination of ammonia volatilization in field of North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3):46-48.
- [24] 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.
- [25] 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 J P, ZHU J, PENG H, et al. Effect of organic fertilizer application on loss risk of nitrogen and phosphorus in surface water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1):210-217.
- [26] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16):1-7. CHEN X F, LUO X W, WANG Z M, et al. Experiment of synchronous side deep fertilizing technique with rice hill-drop drilling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16):1-7.
- [27] 朱从桦, 张玉屏, 向镜, 等. 侧深施氮对机插水稻产量形成及氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(23):4228-4239. ZHU C H, ZHANG Y P, XIANG J, et al. Effects of fertilizing in deep sides of roots application on yield formation and nitrogen utilization of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(23):4228-4239.
- [28] 位国建, 荐世春, 崔荣江, 等. 水稻机插秧同步侧深施肥技术分析 & 试验[J]. *农机化研究*, 2017, 39(9):190-194. WEI G J, JIAN S C, CUI R J, et al. Analysis and experiment of mechanical transplanting rice sync with the side deep fertilizing technology[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(9):190-194.