



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

不同氮肥运筹对直播稻田氮素损失与利用的影响

彭瑞雪, 朱建强, 吴启侠, 乔月, 周乾顺, 范楚江, 段小丽, 杨利

引用本文:

彭瑞雪, 朱建强, 吴启侠, 乔月, 周乾顺, 范楚江, 段小丽, 杨利. 不同氮肥运筹对直播稻田氮素损失与利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 651–659.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0330>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 夏颖, 张志毅, 程子珍, 吴茂前, 高红兵, 毛波, 孔祥琼

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 858–866 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0171>

氮肥施用对四川紫色土矿质态氮淋失特征及春玉米产量的影响

刘明鹏, 徐开未, 肖华, 陈晓辉, 彭丹丹, 卢俊宇, 陈远学

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 88–98 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0655>

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545–555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 118–128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

彭瑞雪, 朱建强, 吴启侠, 等. 不同氮肥运筹对直播稻田氮素损失与利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 651–659.

PENG R X, ZHU J Q, WU Q X, et al. Nitrogen loss and utilization characteristics of different N fertilizer translocations in direct-seeded rice [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 651–659.

不同氮肥运筹对直播稻田氮素损失与利用的影响

彭瑞雪^{1,2}, 朱建强¹, 吴启侠^{1*}, 乔月¹, 周乾顺¹, 范楚江¹, 段小丽², 杨利^{2*}

(1. 长江大学农学院/湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025; 2. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064)

摘要:为探讨不同类型氮肥按不同基肥比例配施对直播稻田径流氮流失、氨挥发及氮肥利用率的影响,本研究开展了田间小区试验,设置了7个施氮处理,即不施氮肥的空白对照(CK)、普通复合肥(基肥)与尿素(分蘖肥)基肥配比4:6(U₄₀)和6:4(U₆₀)、控释掺混肥(基肥)与尿素(分蘖肥)基肥配比7:3(C₇₀)和10:0(C₁₀₀)、海藻多糖尿素基肥配比4:6(H₄₀)和6:4(H₆₀),每个处理设置3个重复。结果表明:径流氮流失量主要集中在基肥施入后,以铵态氮(NH₄⁺-N)为主,与U₆₀处理相比,C₁₀₀、H₆₀、U₄₀、C₇₀和H₄₀处理总氮流失量分别减少了7.20%、13.36%、24.30%、26.41%和35.92%;不同氮肥之间的氨挥发损失量和损失率呈现出普通复合肥与尿素配施处理>海藻多糖尿素处理>控释掺混肥与尿素配施处理;与U₆₀处理相比,U₄₀、H₆₀、H₄₀、C₇₀和C₁₀₀处理的氨挥发总损失量分别降低了7.89%、20.81%、27.84%、42.08%和47.00%,C₇₀、C₁₀₀处理降低效果显著($P<0.05$);与U₆₀、C₁₀₀和H₆₀处理相比,U₄₀、C₇₀和H₄₀处理径流的总氮流失量分别降低了24.30%、20.70%和26.04%。氮肥后移的U₄₀、C₇₀和H₄₀处理的径流氮流失及氨挥发损失均有所降低,且不影响产量;C₇₀处理产量和氮肥农学利用率均为最高,分别为9 116.67 kg·hm⁻²和29.64 kg·kg⁻¹,且氮肥表观利用率为41.99%。研究表明,C₇₀和C₁₀₀处理均能显著降低稻田径流氮流失,减少氨挥发损失,提高氮肥利用率和直播稻产量。综合考虑产量及环境影响,以控释掺混肥(基肥)与尿素(分蘖肥)按基肥配比7:3配施更值得推广。

关键词:直播稻;控释掺混肥;氮损失;氮肥利用率;产量

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)03-0651-09

doi: 10.13254/j.jare.2022.0330

Nitrogen loss and utilization characteristics of different N fertilizer translocations in direct-seeded rice

PENG Ruixue^{1,2}, ZHU Jianqiang¹, WU Qixia^{1*}, QIAO Yue¹, ZHOU Qianshun¹, FAN Chujiang¹, DUAN Xiaoli², YANG Li^{2*}

(1. College of Agriculture, Yangtze University/Engineering Research Center for Wetland Ecology and Agricultural Utilization, Ministry of Education, Jingzhou 434025, China; 2. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: To explore the effects of different types of nitrogen fertilizers and different tillering ratios on runoff nitrogen loss, ammonia volatilization, and nitrogen fertilizer use efficiency in direct-seeded rice fields, seven nitrogen application treatments were arranged in field plot experiments with three replicates, including the blank control (CK) without nitrogen fertilizer, common compound fertilizer (base fertilizer), and urea (tiller fertilizer) at ratios of 4:6 (U₄₀) and 6:4 (U₆₀), controlled-release blended fertilizer (base fertilizer) and urea (tiller fertilizer) at ratios of 7:3 (C₇₀) and 10:0 (C₁₀₀), and seaweed polysaccharide urea at ratios of 4:6 (H₄₀) and 6:4 (H₆₀). The results showed that runoff N loss mainly occurred after basal fertilizer application and was dominated by ammonium nitrogen (NH₄⁺-N). Compared with the U₆₀ treatment, Total N loss in the C₁₀₀, H₆₀, U₄₀, C₇₀, and H₄₀ treatments decreased by 7.20%, 13.36%, 24.30%, 26.41%, and

收稿日期:2022-05-28 录用日期:2022-07-26

作者简介:彭瑞雪(1998—),女,湖北恩施人,硕士研究生,主要从事稻田面源污染防控研究。E-mail:1443757158@qq.com

*通信作者:吴启侠 E-mail:qixiawu@yangtzeu.edu.cn; 杨利 E-mail:yangligaofeinongye@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(U21A2039);国家重点研发计划项目(2016YFD0800503,2016YFD0200807,2018YFD0301300)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (U21A2039); National Key Research and Development Program of China (2016YFD0800503,2016YFD0200807,2018YFD0301300)

35.92%, respectively. The order of the amount and rate of ammonia volatilization loss between different N fertilizers was as follows: treatment of common compound fertilizer with urea > treatment of seaweed polysaccharide urea > treatment of controlled-release blended fertilizer with urea. Compared with the U₆₀ treatment, the total ammonia volatilization loss in the U₄₀, H₆₀, H₄₀, C₇₀, and C₁₀₀ treatments decreased by 7.89%, 20.81%, 27.84%, 42.08%, and 47.00%, respectively, with significant differences between the C₇₀ and C₁₀₀ treatments ($P < 0.05$). The total N losses from runoff were reduced by 24.30%, 20.70%, and 26.04% for U₄₀, C₇₀, and H₄₀ treatments compared with U₆₀, C₁₀₀, and H₆₀ treatments, respectively. N fertilizer setback reduced runoff N loss and ammonia volatilization loss in the U₄₀, C₇₀, and H₄₀ treatments, with no yield loss. The maximum yield of 9 116.67 kg·hm⁻² and the highest N fertilizer agronomic utilization of 29.64 kg·kg⁻¹ occurred in the C₇₀ treatment, and the apparent N fertilizer utilization was 41.99%. The study suggested that the C₇₀ and C₁₀₀ treatments both significantly reduced runoff N loss and ammonia volatilization loss in direct-seeded rice fields, while improving N fertilizer utilization efficiency and yield. The ratio of 7:3 between controlled-release blended fertilizer (base fertilizer) and urea (tiller fertilizer) at the base tiller fertilizer ratio is worth pursuing for productivity and environmental protection.

Keywords: direct-seeded rice; controlled-release blended fertilizer; nitrogen loss; N fertilizer utilization efficiency; yield

水稻是我国主要粮食作物,种植面积广泛^[1]。氮肥的施用是保障水稻高产的基础,我国农业氮肥用量大^[2-3],占全球总量的33%,但是农作物对氮肥的当季利用率仅为30%~40%^[4-5]。氮肥的不合理施用,在提高作物产量的同时,造成大量氮素流失,导致土壤酸化、温室气体排放和水体富营养化等^[6-7]一系列问题,对土壤培育和粮食生产具有长期的不良影响。目前,由于生产成本的提高以及劳动力的日益短缺,直播稻凭借其省时省力、节约成本的优势越来越受到青睐^[8]。在江汉平原地区,直播稻是发展较为迅速的种植模式,播种前会在稻田浅水层状态下施入大量基肥,短期内进行排水播种,保持田间湿润无水层状态(播种到三叶一心期)。若排水晒田不及时或遇降雨,会导致水稻在扎根立苗阶段发生烂种、烂芽,造成缺苗现象^[9],同时造成稻田氮、磷等养分大量流失。因此,在追求水稻高产的同时,还需考虑氮肥施用对环境造成的污染^[10-11]。

径流和氨挥发是稻田氮损失的两个重要途径^[12-13]。薛利红等^[14]研究发现,太湖流域稻田氨挥发约占总施氮量的29%~35%;王桂良等^[15]的研究表明,长江流域单季稻田氮素径流损失量达10.4 kg·hm⁻²,高于氮淋洗和N₂O排放量。诸多研究表明,在农业管理措施中,氮肥类型、施用量及施用时间等均显著影响氮素的径流和氨挥发^[16-19]。曹凑贵等^[20]的研究表明,新型缓效有机肥(脲肽磷复肥)处理下稻田的氨挥发量最小,其次为包膜尿素、复合肥、尿素^[21]。在氮肥施用方式与施用时间的影响方面,水稻生育前期施用氮肥虽有利于水稻的返青和分蘖^[22],但施入大量氮肥作为基肥,会因水稻还未形成庞大的根系群体来吸收大量的养分而加剧氮素损失的风险^[23]。适当降低水稻生育前期的施氮量,增加水稻生育中后期的氮肥施

用比例^[24],可以达到增产或稳产的效果,同时提高氮肥利用率^[25-26]。因此,开展直播稻田施氮类型及氮肥运筹比(基肥比例)对氮素损失和氮素利用的影响研究具有重要科学意义和实践应用价值。

本研究以江汉平原直播稻为研究对象开展田间观测试验,探究不同氮肥条件下稻田径流氮流失与氨挥发的变化特征,以及产量性状和氮肥利用率,以期为该区域直播稻氮肥的合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验在湖北省荆州区长江大学农学院基地(30°21'N, 112°09'E)标准径流小区进行,该区地处江汉平原,试验期(2020年5月26日—9月25日)平均气温26.36℃,降水量为800.20 mm(图1,气象数据来源于湖北省荆州农业气象试验站)。耕作层(0~20 cm)土壤基本性状为:pH值7.47,有机质21.32 g·kg⁻¹,全氮2.13 g·kg⁻¹,全磷0.38 g·kg⁻¹,全钾13.68 g·kg⁻¹,碱解氮113.22 mg·kg⁻¹,有效磷11.90 mg·kg⁻¹,速效钾204.05 mg·kg⁻¹。

1.2 供试材料

直播稻供试品种为鹏优国泰,国审稻20190013,由湖北华昌农业科技有限公司、广东和丰种业科技有限公司选育,属杂交稻,在江汉平原作一季中稻种植,全生育期约123 d,株高约130 cm。

1.3 试验设计

为讨论氮肥种类及施肥方式对稻田氮素损失和氮肥利用率的影响,试验设置7个处理:①CK:不施氮肥的空白对照;②U₄₀:普通复合肥作基肥,尿素作分蘖肥,运筹比为4:6;③U₆₀:普通复合肥作基肥,尿素作分蘖肥,运筹比为6:4;④C₇₀:控释掺混肥作基肥,

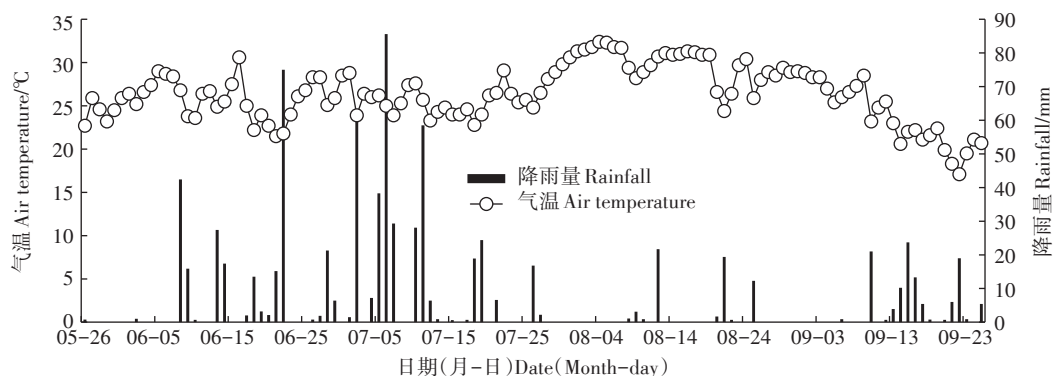


图1 水稻生育期主要气象要素

Figure 1 Main meteorological elements in rice growth period

尿素作分蘖肥,运筹比为7:3;⑤C₁₀₀:控释掺混肥全部基施,运筹比为10:0;⑥H₄₀:海藻多糖尿素作基肥与分蘖肥,运筹比为4:6;⑦H₆₀:海藻多糖尿素作基肥与分蘖肥,运筹比为6:4。每组处理设置3个重复,小区面积均为45 m²。试验中普通复合肥(湖北中化东方肥料有限公司)养分含量为41%(N=18%);控释掺混肥(中化化肥有限公司)养分含量为48%(N=24%);海藻多糖氮肥(中化化肥有限公司)中N≥46%,海藻多糖≥500 mg kg⁻¹。除CK处理外,其他处理施氮肥(以N计)、磷肥(以P₂O₅计)和钾肥(以K₂O计)含量分别为180、75 kg·hm⁻²和105 kg·hm⁻²。各处理中磷肥和钾肥作基肥一次性施入,且氮肥施入后磷肥和钾肥不足部分均用中化化肥有限公司提供的过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和氯化钾(K₂O 60%)进行补充。按照当地耕作习惯,冬至前进行稻田翻耕,水稻栽种前进行旋耕,泡田7 d后耕整。试验于2020年5月26日稻田保持浅水层时撒施基肥并人工耙平,小区中间开沟,整成沟厢模式(厢宽1.5 m,沟宽0.3 m),5月27日进行播种,6月11日撒施分蘖肥,9月25日人工收获。

1.4 测定项目与方法

径流水采集与测定:每次降雨过后,根据直播稻的水分管理措施进行排水,记录径流量,使用径流池收集,将径流水搅拌均匀后,使用聚乙烯塑料瓶采集径流水样。采用Alliance-Futura II连续流动分析仪测定水样中总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量^[27]。

氨挥发采集与测定:稻田氨挥发通量采用通气法测定^[28]。采样频次与测定方法参考乔月等^[29]的方法。

水稻产量和氮素积累量测定:水稻成熟后进行实际测产。将水稻植株样按茎、叶、穗分开收集,随后将各部位器官于105℃杀青30 min,之后80℃烘干至恒质量,粉碎后用H₂SO₄-H₂O₂消化,再用Alliance-Futura

II连续流动分析仪测定各部分氮含量。

1.5 数据分析

利用Excel 2010软件制图,应用DPS 18.1软件进行方差分析,LSD法进行处理间多重比较。

氨挥发通量(X , kg·hm⁻²·d⁻¹)和氨挥发损失率(R ,%)计算如公式(1)和公式(2)所示:

$$X = \frac{C \times V}{B \times t} \times 10^{-5} \quad (1)$$

$$R = \sum (X_N - X_0) / N \quad (2)$$

式中: C 为浸提液中氨氮浓度,mg·L⁻¹; V 为浸提液体积,mL; B 为吸收氨气捕获装置的横截面积,m²; t 为采样时间,d; X_N 为施氮区氨累积挥发量(各测定时期的氨挥发量之和),kg·hm⁻²; X_0 为不施氮区氨累积挥发量,kg·hm⁻²; N 为施氮量,kg·hm⁻²。

按式(3)和式(4)分别计算氮肥表观利用率(E_{NR} ,%)和氮肥农学利用率(E_{NA} ,kg·kg⁻¹)。

$$E_{NR} = (T_N - T_0) / N \times 100\% \quad (3)$$

$$E_{NA} = (Y_N - Y_0) / N \quad (4)$$

式中: T_N 为施氮区植株总吸氮量,kg·hm⁻²; T_0 为对照区植株总吸氮量,kg·hm⁻²; Y_N 为施氮区产量,kg·hm⁻²; Y_0 为对照区产量,kg·hm⁻²。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理下稻田径流氮素流失特征

水稻全生育期共产生4次径流,第1次为5月27日播种排水,另外3次径流均为降雨后排水,平均排水量分别为200、260、1 500 m³·hm⁻²和1 500 m³·hm⁻²。由表1可以看出,5月27日各施氮处理的径流氮流失量为12.87~23.96 kg·hm⁻²,在直播稻全生育期径流氮流失总量的占比最高,为63.46%~75.68%,U₄₀比U₆₀处理显著降低34.27%,C₇₀比C₁₀₀处理显著降低30.15%,H₄₀比H₆₀显著降低36.29%($P < 0.05$);6月8日(施基肥

表1 不同施氮处理下稻田径流总氮流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 1 Total nitrogen runoff loss in paddy fields under different nitrogen application treatments($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	5月27日 May 27	6月8日 June 8	6月22日 June 22	7月9日 July 9
CK	1.70±0.08c	1.47±0.06bc	3.78±0.15a	1.78±0.10a
U ₄₀	15.75±0.82b	1.61±0.17ab	4.79±0.34a	1.80±0.06a
U ₆₀	23.96±0.52a	1.24±0.12c	4.69±0.42a	1.77±0.13a
C ₇₀	15.27±3.33b	1.75±0.14ab	4.48±0.43a	1.79±0.08a
C ₁₀₀	21.86±2.91a	1.81±0.17a	3.85±0.74a	1.85±0.09a
H ₄₀	12.87±1.74b	1.68±0.15ab	4.05±0.04a	1.68±0.03a
H ₆₀	20.20±1.05a	1.23±0.03c	4.31±0.19a	1.67±0.09a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

后第13天)各施氮处理下氮流失量较低,比5月27日降低了86.95%~94.82%;6月22日(施分蘖肥后第12天)与7月9日(施分蘖肥后第29天)各施肥处理间的氮流失量与CK处理相当,但7月9日各施肥处理的氮流失量比6月22日降低了51.95%~62.42%。上述结果表明直播稻排水播种方式对稻田氮素径流损失影响显著。

由表2可知,各施氮处理径流的TN流失量为20.28~31.65 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中 NH_4^+-N 流失量为10.75~15.11 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占TN流失量的47.74%~54.01%;各施氮处理的 NO_3^--N 流失量为0.64~1.22 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与CK处理相当,占TN流失量的2.33%~5.15%。在整个生育期内,与U₆₀处理相比,C₁₀₀、H₆₀、U₄₀、C₇₀和H₄₀处理TN流失量分别减少了7.20%、13.36%、24.30%、26.41%和35.92%;与U₆₀、C₁₀₀和H₆₀处理相比,U₄₀、C₇₀和H₄₀处理的TN流失量分别减少了24.30%、20.70%

表2 不同施氮处理下稻田径流氮素流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 2 Nitrogen loss from rice paddy runoff under different N application treatments($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N
CK	8.73±0.09d	4.86±0.05d	0.88±0.10ab
U ₄₀	23.96±0.75bc	12.86±0.42b	1.22±0.11a
U ₆₀	31.65±0.67a	15.11±0.28a	0.92±0.13ab
C ₇₀	23.29±2.64bc	12.30±0.06b	1.20±0.21a
C ₁₀₀	29.37±2.61a	14.77±0.03a	0.78±0.20ab
H ₄₀	20.28±1.29c	10.75±0.07c	0.82±0.23ab
H ₆₀	27.42±0.76ab	14.81±0.31a	0.64±0.07b

和26.04%($P<0.05$)。这表明氮肥后移可以明显降低稻田氮素径流损失,新型肥料(海藻多糖氮肥与控释掺混肥)相较于普通复合肥料降低了氮素径流损失。

2.2 不同施氮处理下稻田的氨挥发损失

从图2可以看出,基肥施用后,各施氮处理氨挥发通量逐渐上升,第3天达到峰值,为1.05~2.57 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,U₄₀、C₇₀和H₄₀处理的氨挥发峰值较U₆₀、C₁₀₀和H₆₀处理分别降低了38.52%、16.67%和39.42%;第9天,各施氮处理氨挥发通量已降至与CK处理相当。施用分蘖肥后,各施氮处理氨挥发通量急剧上升,第2天达到峰值0.39~3.27 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,各施肥处理氨挥发通量峰值表现为U₄₀>H₄₀>U₆₀>H₆₀>C₇₀>C₁₀₀,第10天已降至与CK处理相当。

由表3可知,在基肥期,U₄₀比U₆₀处理、C₇₀比C₁₀₀处理、H₄₀比H₆₀处理的氨挥发损失量均显著降低($P<0.05$)。U₄₀比U₆₀处理的氨挥发损失量降低47.91%,损失率降低2.17个百分点;C₇₀比C₁₀₀处理的氨挥发损失量降低62.12%;H₄₀比H₆₀处理的氨挥发损失量和损失率分别降低了46.22%和1.66个百分点。

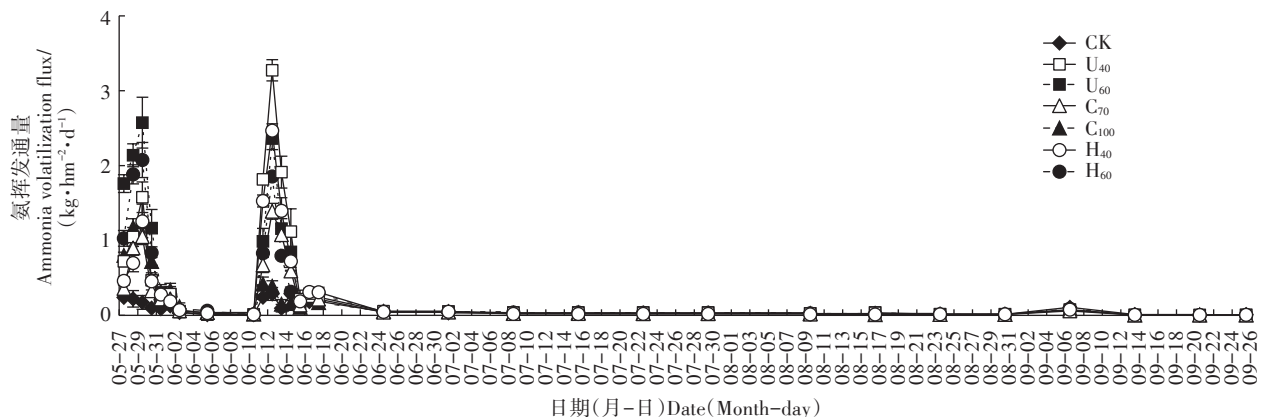


图2 不同施氮处理下稻田的氨挥发通量动态变化

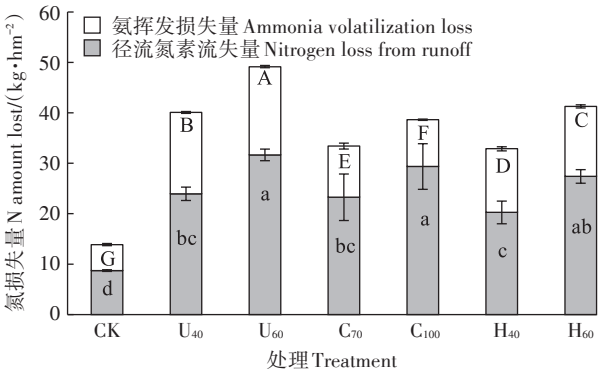
Figure 2 Dynamic change of ammonia volatilization flux in paddy fields under different treatments of nitrogen application

分蘖肥施入后至水稻收获前一天,各施氮处理的氨挥发损失量为4.36~11.75 kg·hm⁻²,与U₆₀处理相比,U₄₀处理的氨挥发损失量增加了28.84%;与C₁₀₀处理相比,C₇₀处理的氨挥发损失量增加了55.28%;与H₆₀处理相比,H₄₀处理的氨挥发损失量增加了25.31%。整个生育期内,与U₆₀处理相比,U₄₀、H₆₀、H₄₀、C₇₀和C₁₀₀处理的稻田氨挥发总量分别显著减少了7.89%、20.81%、27.84%、42.08%和47.00%(*P*<0.05);与C₇₀处理相比,C₁₀₀处理显著降低了8.49%(*P*<0.05);H₄₀比H₆₀处理显著降低了8.88%(*P*<0.05)。上述结果表明在总施氮量相同条件下,不同氮肥之间的氨挥发损失量和损失率均表现为:普通复合肥与尿素配施处理>海藻多糖尿素处理>控释掺混肥与尿素配施处理,说明在直播稻种植过程中,氮肥后移有利于降低氨挥发损失。

由图3可知,U₄₀比U₆₀处理的总氮损失量降低22.58%,C₇₀比C₁₀₀处理的总氮损失量降低15.62%,H₄₀比H₆₀处理的总氮损失量降低25.42%,表明氮肥后移能显著降低氨挥发与径流氮素流失的损失量(*P*<0.05),且C₇₀和H₄₀处理的总氮损失量均较低。

2.3 不同施氮处理对直播稻产量及构成因素的影响

由表4可以看出,不同施氮处理下,直播稻产量范围为7 683.33~9 116.67 kg·hm⁻²,其中C₇₀处理产量最高。与U₆₀处理相比,U₄₀、H₆₀、H₄₀、C₁₀₀和C₇₀处理分别显著增产7.64%、9.59%、12.75%、14.62%和18.66%(*P*<0.05);从产量构成因素上看,各施氮处理的千粒质量无显著变化,与U₆₀处理相比,U₄₀处理的有效穗数、每穗粒数和结实率显著增加7.75%、3.75%和3.44个百分点(*P*<0.05);与C₁₀₀处理相比,C₇₀处理的有效穗数、每穗粒数和结实率分别增加了3.50%、1.28%和



小写字母表示处理间径流氮流失量差异显著(*P*<0.05),大写字母表示处理间氨挥发损失量差异显著(*P*<0.05)。
Lowercase letters indicate significant differences in nitrogen loss from runoff among the treatments (*P*<0.05), and uppercase letters indicate significant differences in ammonia volatilization loss among the treatments (*P*<0.05).

图3 不同施氮处理下直播稻生育期总氮损失量

Figure 3 Total nitrogen loss of direct-seeded rice during growth period under different nitrogen application treatments

2.15个百分点;与H₆₀处理相比,H₄₀处理的有效穗数、每穗粒数和结实率分别增加了2.12%、0.98%和2.30个百分点。这表明海藻多糖尿素与控释掺混肥的施用均有利于直播稻产量的提升。

2.4 不同施氮处理对直播稻地上部氮素吸收及氮肥利用率的影响

水稻产量与水稻植株地上部氮素吸收量有着密切联系,为此本研究进一步分析了不同处理地上部氮素吸收情况,结果如表5所示。在幼苗期-分蘖前期,U₆₀处理地上部氮素吸收显著高于其他处理(*P*<0.05);在分蘖前期-分蘖盛期,氮素吸收量明显升高,是水稻整个生育期中地上部氮素净吸收量最多的时

表3 不同施氮处理下不同时段稻田的氨挥发损失量及损失率

Table 3 Ammonia volatilization and loss rate in rice field in different fertilizer periods under different nitrogen treatments

处理 Treatment	基肥期 Base fertilizer period			分蘖肥期 Tiller fertilizer period			总计 Total	
	施氮量 N application rate/ (kg·hm ⁻²)	损失量 Amount lost/ (kg·hm ⁻²)	损失率 Rate of loss/ %	施氮量 N application rate/ (kg·hm ⁻²)	损失量 Amount lost/ (kg·hm ⁻²)	损失率 Rate of loss/ %	损失量 Amount lost/ (kg·hm ⁻²)	损失率 Rate of loss/ %
CK	0	1.02±0.19e		0	4.12±0.36d		5.13±0.23g	
U ₄₀	72	4.36±0.15c	4.64	108	11.75±0.08a	7.06	16.11±0.18b	6.10
U ₆₀	108	8.37±0.41a	6.81	72	9.12±0.18b	6.94	17.49±0.26a	6.87
C ₇₀	126	1.86±0.39d	2.17	54	6.77±0.25c	4.91	10.13±0.58e	2.78
C ₁₀₀	180	4.91±0.21c	2.16	0	4.36±0.09d		9.27±0.13f	2.30
H ₄₀	72	3.56±0.01d	3.53	108	9.06±0.37b	4.57	12.62±0.38d	4.16
H ₆₀	108	6.62±0.18b	5.19	72	7.23±0.14c	4.32	13.85±0.32c	4.84

注:基肥期为5月26日(基肥施入)至6月10日(分蘖肥施入前一天);分蘖肥期为6月11日(分蘖肥施入)至9月25日(人工收获)。

Note: The base fertilizer period is from May 26th to June 10th, the day before tiller fertilizer application; The tiller fertilizer period is from June 11th to September 25th.

表4 不同施氮处理下直播水稻产量及构成因素

Table 4 Direct-seeded rice yield and component factors under different nitrogen treatments

处理 Treatment	有效穗数 Efficient spike number/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	每穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Filled grain percentage/%	千粒质量 Thousand-seed mass/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
CK	157.33±5.73f	160.86±1.81e	66.42±1.38e	22.25±0.66a	3 781.33±240.72f
U ₄₀	227.00±8.29d	176.81±1.49c	73.86±1.75c	23.42±0.29a	8 270.00±230.88d
U ₆₀	210.67±3.40e	170.42±1.72d	70.42±1.70d	22.88±1.14a	7 683.33±131.23e
C ₇₀	256.67±8.18a	183.85±2.14a	80.83±1.65a	23.81±0.76a	9 116.67±117.85a
C ₁₀₀	248.00±1.63ab	181.53±0.73ab	78.68±1.19ab	22.69±0.95a	8 806.67±114.41ab
H ₄₀	240.33±3.68bc	180.05±2.15bc	76.31±0.83bc	22.95±1.41a	8 663.33±106.56bc
H ₆₀	235.33±2.49cd	178.30±1.53bc	74.01±1.29c	22.22±0.65a	8 420.00±128.32cd

表5 不同施氮处理下直播稻地上部氮素净吸收(kg·hm⁻²)Table 5 The net nitrogen uptake of direct-seeded rice under different nitrogen treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	幼苗期-分蘖前期 Seedling to before tillering	分蘖前期-分蘖盛期 Before tillering to peak tillering	分蘖盛期-拔节期 Peak tillering to jointing	拔节期-孕穗期 Jointing to booting	孕穗期-齐穗期 Booting to full heading	齐穗期-成熟期 Full heading to maturing
CK	0.71±0.04d	14.00±0.72e	8.49±0.60ab	15.87±3.04b	9.68±2.13c	3.59±1.71b
U ₄₀	2.67±0.17bc	36.29±0.37bc	6.04±1.88b	21.36±0.68ab	20.37±4.38ab	22.47±6.01a
U ₆₀	3.98±0.34a	30.77±3.32d	7.77±3.23ab	19.38±3.93ab	18.38±0.82b	23.48±4.39a
C ₇₀	2.75±0.14bc	41.25±0.79a	11.61±1.52ab	24.91±2.57a	26.21±5.38a	22.04±6.59a
C ₁₀₀	3.49±0.28b	40.02±3.38ab	14.01±6.38a	25.02±5.92a	27.30±2.78a	22.00±6.28a
H ₄₀	2.03±0.07c	34.82±2.96cd	13.33±3.72a	20.38±5.20ab	25.69±1.38a	21.01±2.58a
H ₆₀	2.73±0.21bc	34.70±1.16cd	8.28±1.15ab	21.69±4.14ab	25.25±3.96ab	20.32±5.46a

期,各施氮处理的氮素吸收量表现为C₇₀>C₁₀₀>U₄₀>H₄₀>H₆₀>U₆₀,且C₇₀与C₁₀₀处理显著高于其他处理的氮素吸收量($P<0.05$)。然而,在分蘖盛期到成熟期之间,U₄₀与U₆₀、C₇₀与C₁₀₀、H₄₀与H₆₀处理之间的氮素吸收量均无显著差异。

稻田氮肥利用率是衡量施肥方式是否合理的重要指标之一,从表6可知,U₄₀、C₇₀和H₄₀之间及U₆₀、C₁₀₀和H₆₀之间的氮素积累总量、氮肥表观利用率和农学利用率均有显著差异($P<0.05$),不同类型氮肥的利用率表现为:控释掺混肥与尿素配施处理>海藻多糖尿素处理>普通复合肥与尿素配施处理。上述结果表明在直播稻种植过程中控释掺混肥与尿素配施是一种较为合理的施肥方式。进一步对比数据可知,与C₁₀₀处理相比,C₇₀处理水稻氮肥农学利用率增加了6.16%,氮素积累总量与氮素表观利用率略有降低,分别降低了2.74%和2.00个百分点;与H₆₀处理相比,H₄₀处理水稻氮素积累总量、氮肥表观利用率和氮肥农学利用率分别增加了4.98%、3.08个百分点和5.24%;与处理U₆₀相比,U₄₀处理的氮肥农学利用率显著增加15.04%,氮素积累总量与氮肥表观利用率增加了5.22%和3.02个百分点。

3 讨论

3.1 不同施氮处理对直播稻田径流氮素流失量的影响

NH₄⁺-N是稻田田面水氮素的主要形态,施氮后7 d内是防止稻田氮素流失的关键时期^[30],施用缓控释肥能够显著降低稻季农田地表径流总氮质量浓度和总氮流失量^[31]。本研究,播种前田间排水或降雨导致水稻在生育初期径流氮素损失量显著增加,NH₄⁺-N流失量为10.75~15.11 kg·hm⁻²,占径流TN流失量的

表6 不同施氮处理对直播稻氮肥利用率的影响

Table 6 Effects of different nitrogen fertilizer on nitrogen utilization efficiency of direct-seeded rice

处理 Treatment	氮素积累总量 N accumulation/ (kg·hm ⁻²)	氮肥表观利用率 N apparent efficiency/%	氮肥农学利用率 N agronomic efficiency/(kg·kg ⁻¹)
CK	52.34±1.20e	—	—
U ₄₀	109.19±2.71cd	31.59±1.51cd	24.94±1.28d
U ₆₀	103.77±1.91d	28.57±1.06d	21.68±0.73e
C ₇₀	127.91±1.73a	41.99±0.96a	29.64±0.65a
C ₁₀₀	131.52±3.09a	43.99±1.72a	27.92±0.64ab
H ₄₀	117.27±3.22b	36.07±1.79b	27.12±0.59bc
H ₆₀	111.71±4.09bc	32.99±2.27bc	25.77±0.71cd

47.74%~54.01%, NH_4^+-N 为径流氮素流失的主要形态,这与前人研究结果一致^[2]。在排水播种时(5月27日),各施肥处理的氮流失量为12.87~23.96 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全生育期径流氮流失总量的63.46%~75.68%,这可能是当次径流时间与施肥时间较近。与 U_{60} 处理相比, U_{40} 、 C_{70} 和 H_{40} 处理 TN 流失量分别减少了24.30%、26.41%和35.92%,减少较大的原因是基肥中的部分氮肥后移至分蘖期施用; C_{70} 处理效果明显,这可能是由于缓控释肥主要通过包膜以及抑制剂的使用减缓其在水稻生育前期的养分释放速率,进而减少了硝化和反硝化作用引起的氮素损失^[32]; H_{40} 处理效果最为明显,这可能归因于海藻多糖氮肥中的海藻多糖,其作为一种天然土壤调理剂,能增加土壤透气能力和土壤生物活性,增强化肥使用效果^[33]。因此,施用海藻多糖氮肥能提高氮肥利用,减少氮肥损失^[34]。

3.2 不同施氮处理对直播稻田氨挥发的影响

本研究中 U_{40} 、 C_{70} 和 H_{40} 处理的氨挥发峰值较 U_{60} 、 C_{100} 和 H_{60} 处理分别降低了38.52%、16.67%和39.42%,说明基肥氮后移可明显降低稻田氨挥发损失,其中以 C_{70} 处理的效果尤为显著,表明施用缓控释肥可显著减少基肥期氨挥发量,这与俞映惊等^[35]的研究结果相似。分蘖肥施用后第2天, C_{100} 处理与 CK 的氨挥发量相当,是因为 C_{100} 处理氮肥作基肥一次性施用,分蘖期未施肥。相同施氮水平下,不同氮肥之间的氨挥发总损失量和损失率表现为:普通复合肥与尿素配施处理>海藻多糖尿素处理>控释掺混肥与尿素配施处理,主要原因可能是缓控释肥通过减缓养分释放速率,降低土壤中 NH_4^+-N 含量^[36],从而减少氨挥发损失;海藻多糖尿素能减少氨挥发,因为海藻多糖能促进土壤团粒结构形成,增强土壤的生物活性,提高尿素的吸收率^[37],延缓尿素在土壤中的释放和转化。

3.3 不同施氮处理对直播稻产量和氮素利用率的影响

氮肥总量控制、分期调控等养分优化管理措施,可显著提高水稻产量^[38-39],在直播稻种植上协同实现水稻高产和氮肥高效利用。以往研究表明,直播稻前期物质积累量相对偏低,中后期生长对作物养分需求高^[40-41]。缓控释肥可增加水稻的有效穗数、每穗粒数、千粒质量和结实率等,进而提高产量^[42-44]。本研究中, C_{100} 和 C_{70} 处理产量较高,其中 C_{70} 处理最高,且比 C_{100} 处理的有效穗数、每穗粒数和结实率均有所增加。这主要是因为缓控释肥处理能持续缓慢释放养分,加上氮肥后移有利于保证水稻中后期生长对养分的需求,进而积累较多的生物量,同时一次性基施也

能在一定程度上提高产量^[45]。

本研究中分蘖前期到分蘖盛期是水稻吸氮量最高的时期, C_{70} 和 C_{100} 处理的氮素积累量、氮肥表观利用率和农学利用率均较高。这是因为缓控释肥料的包膜或缓溶性物质通过阻隔包膜内外的水分运移,延缓氮素溶出时间,从而控制氮素释放速率,并长时间供水稻吸收利用,进而提高水稻氮素利用率^[46]。本研究中,与普通复合肥和尿素配施处理相比,控释掺混肥与尿素配施处理以及海藻多糖尿素处理促进了水稻对氮素的吸收,提高了氮肥利用率,从而使水稻增产。

水稻产量是决定施肥方式是否具有推广价值的重要指标,因此在首先保证水稻产量的情况下,应综合考虑氮素损失和氮肥利用情况。本研究表明, C_{70} 与 H_{40} 处理在直播稻整个生育期内总氮损失量较低,且无显著差异(图3), C_{70} 处理产量和氮肥利用率均显著高于 H_{40} 处理。因此,在本研究中,控释掺混肥(基肥)与尿素(分蘖肥)按7:3配比施入直播稻田是最优的施肥方式。

4 结论

(1)在180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 相同施氮水平下,直播稻田径流氮素流失主要集中在基肥施入后排水播种期,氮肥适当后移可有效减少氮素流失量。

(2)控释掺混肥与尿素配施(基肥肥配比7:3)的施肥方式既能明显提高氮肥表现利用率(41.99%)和产量(9 116.67 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),又可以有效降低稻田径流总氮流失量(23.29 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和氨挥发损失量(10.13 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),从而减少农田面源污染,有利于农田土壤可持续发展利用,是江汉平原地区直播稻种植中可推广的施氮方式。

参考文献:

- [1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414. ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414.
- [2] 姜利红, 谭力彰, 田昌, 等. 不同施肥对双季稻田径流氮磷流失特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 33-38, 45. JIANG L H, TAN L Z, TIAN C, et al. Effects of fertilizer applications on runoff nitrogen and phosphorus loss in double cropping paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 33-38, 45.
- [3] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 稻田氨挥发损失及减排技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 16-25. XIAO Q L, ZHU J, PENG H, et al. Ammonia volatilization loss and emission reduction measures in

- paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 16–25.
- [4] 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 Y Y, WANG R Q, WANG L L, et al. Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 503–510.
- [5] 颜晓元, 夏龙龙, 逯超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 177–183. YAN X Y, XIA L L, TI C P. Win-win nitrogen management practices for improving crop yield and environmental sustainability[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 177–183.
- [6] WANG J J, YI X, CUI J, et al. Nonlinear effects of increasing nitrogen deposition on rice growth and heavy metal uptake in a red soil ecosystem of southeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 1060–1067.
- [7] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 3051–3058. ZHOU W, LÜ T F, YANG Z P, et al. Research advances on regulating soil nitrogen loss by the type of nitrogen fertilizer and its application strategy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 3051–3058.
- [8] 姚义, 霍中洋, 张洪程, 等. 播期对不同品种直播稻生长特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2131–2138. YAO Y, HUO Z Y, ZHANG H C, et al. Effects of sowing date on the growth characteristics of direct seeding rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2131–2138.
- [9] 王友如, 纪文瑞, 杨兆锋. 直播稻种植存在的问题及对策[J]. *现代农业科技*, 2010(15): 128. WANG Y R, JI W R, YANG Z F. Problem and countermeasures of direct-seeded rice[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010(15): 128.
- [10] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–489.
- [11] HOFMEIER M, ROELCKE M, HAN Y, et al. Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu region: Recommendations based on field experiments and surveys[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 60–73.
- [12] YANG W L, QUE H L, WANG S W, et al. High temporal resolution measurements of ammonia emissions following different nitrogen application rates from a rice field in the Taihu Lake region of China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113489.
- [13] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3292–3302. ZHANG Z L, LIU F, HOU T Y. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3292–3302.
- [14] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 1133–1138. XUE L H, YU Y L, YANG L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1133–1138.
- [15] 王桂良, 崔振岭, 陈新平, 等. 南方稻田活性氮损失途径及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2337–2345. WANG G L, CUI Z L, CHEN X P, et al. Reactive nitrogen loss pathways and their effective factors in paddy field in southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2337–2345.
- [16] 杨国英, 郭智, 刘红江, 等. 稻田氨挥发影响因素及其减排措施研究进展[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1912–1919. YANG G Y, GUO Z, LIU H J, et al. Research progress on factors affecting ammonia volatilization and its mitigation measures in paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9): 1912–1919.
- [17] HUDA A, GAIHRE Y K, ISLAM M R, et al. Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(1): 53–66.
- [18] 李诗豪, 刘天奇, 马玉华, 等. 耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(5): 447–454. LI S H, LIU T Q, MA Y H, et al. Effects of tillage practices and nitrogen sources on NH_3 volatilization, nitrogen use efficiency and yield in paddy fields in central China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 447–454.
- [19] 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.
- [20] 曹凑贵, 李成芳, 寇志奎, 等. 不同类型氮肥和耕作方式对稻田土壤氨挥发的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2010, 32(5): 881–886. CAO C G, LI C F, KOU Z K, et al. Effects of N source and tillage on NH_3 volatilization from paddy soils[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(5): 881–886.
- [21] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5326–5332. HOU P F, XUE L X, YU Y L, et al. Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5326–5332.
- [22] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论: 南方本[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 46–49. YANG W Y, TU N M. Special crop cultivation: Southern text[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 46–49.
- [23] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(1): 161–165. WANG D Z, ZHANG C J, GUO X S. Effects of lower fertilizer on rice growth and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 161–165.
- [24] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制[J]. *作物学报*, 2011, 37(10): 1837–1851. ZHANG H C, WU G C, DAI Q G, et al. Precise postponing nitrogen application and its mechanism in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1837–1851.
- [25] 段小丽, 张富林, 倪承凡, 等. 前氮后移对水稻产量形成和田面水氮素动态变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 255–261. DUAN X L, ZHANG F L, NI C F, et al. Effects of postponing nitrogen application on rice yield formation and nitrogen dynamics in surface water of paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,

- 34(1):255-261.
- [26] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915-924.
- [27] 孔盼,夏苏敬,张海维,等.耕作方式对早稻-再生稻稻田氨挥发的影响[J].生态环境学报,2021,30(8):1627-1633. KONG P, XIA S J, ZHANG H W, et al. Effects of tillage methods on ammonia volatilization of early season rice-ratooning rice fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(8):1627-1633.
- [28] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等.田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):205-209. WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):205-209.
- [29] 乔月,朱建强,吴启侠,等.不同氮肥对不同种植方式稻田径流氮流失与氨挥发的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(2):32-41. QIAO Y, ZHU J Q, WU Q X, et al. Nitrogen loss from surface runoff and ammonia volatilization from paddy field as impacted by different fertilizers and planting methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(2):32-41.
- [30] 李娟,李松昊,郭奇峰,等.不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):23-33. LI J, LI S H, WU Q F, et al. Effects of different fertilization treatments on runoff and leaching losses of nitrogen in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5):23-33.
- [31] 刘红江,郭智,郑建初,等.不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J].江苏农业学报,2018,34(4):783-789. LIU H J, GUO Z, ZHENG J C, et al. Effects of different types of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen loss of surface runoff[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(4):783-789.
- [32] DI H J, CAMERON K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109(3):202-212.
- [33] 谭习羽,程雄,黄淑芬,等.海藻肥在水稻上最新应用进展[J].农学报,2018,8(10):23-27. TAN X Y, CHENG X, HUANG S F, et al. Application of seaweed fertilizer in rice: Recent advances[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(10):23-27.
- [34] 黄继川,彭智平,涂玉婷,等.施用海藻酸复合肥料的双季稻产量和氮磷肥料效应[J].热带作物学报,2020,41(5):859-867. HUANG J C, PENG Z P, TU Y T, et al. Yield, nitrogen and phosphorus nutrient effects of alginate compound fertilizer on double-cropping rice[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(5):859-867.
- [35] 俞映侠,薛利红,杨林章,等.太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1682-1689. YU Y L, XUE L H, YANG L Z, et al. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1682-1689.
- [36] 程金秋,朱盈,魏海燕,等.缓控释肥料在水稻上的应用效果综述[J].江苏农业科学,2017,45(17):11-15. CHENG J Q, ZHU Y, WEI H Y, et al. Summary of application effect of slow and controlled release fertilizer on rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(17):11-15.
- [37] 王明鹏,陈蕾,刘正一,等.海藻生物肥研究进展与展望[J].生物技术进展,2015,5(3):158-163. WANG M P, CHEN L, LIU Z Y, et al. Progress and prospect of seaweed fertilizer[J]. *Current Biotechnology*, 2015, 5(3):158-163.
- [38] 晏军,吴启侠,朱建强,等.适雨灌溉下氮肥运筹对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J].中国水稻科学,2019,33(4):347-356. YAN J, WU Q X, ZHU J Q, et al. Effects of nitrogen application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation under rainfall-adapted water management[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(4):347-356.
- [39] 郭九信,孔亚丽,谢凯柳,等.养分管理对直播稻产量和氮肥利用率的影响[J].作物学报,2016,42(7):1016-1025. GUO J X, KONG Y L, XIE K L, et al. Effects of nutrient management on yield and nitrogen use efficiency of direct seeding rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7):1016-1025.
- [40] 李木英,陈关,石庆华,等.不同早稻品种直播栽培的生育特性研究[J].江西农业大学学报,2011,33(3):399-404. LI M Y, CHEN G, SHI Q H, et al. A study on the growth characteristics of different varieties of early rice as the direct-seeded plant[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(3):399-404.
- [41] 陈贵,鲁晨妮,石艳平,等.不同缓控释肥搭配脲铵对水稻产量、氮素利用效率和土壤养分的影响[J].浙江农业学报,2021,33(1):122-130. CHEN G, LU C N, SHI Y P, et al. Effect of different controlled-release fertilizers with urea ammonium on yield, nitrogen use efficiency and soil nutrients of rice[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(1):122-130.
- [42] 魏海燕,李宏亮,程金秋,等.缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J].作物学报,2017,43(5):730-740. WEI H Y, LI H L, CHENG J Q, et al. Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(5):730-740.
- [43] 马泉,王亚华,王梦尧,等.缓控释肥的发展应用与评价体系研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(18):24-29. MA Q, WANG Y H, WANG M Y, et al. Research progress on development, application and evaluation system of slow and controlled release fertilizer[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(18):24-29.
- [44] HOU P F, XUE L X, ZHOU Y L, et al. Yield and N utilization of transplanted and direct-seeded rice with controlled or slow-release fertilizer[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(3):1208-1217.
- [45] 蔡威威,艾天成,李然,等.控释肥及尿素添加剂对双季稻光合特性及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2018,7(3):54-60. CAI W W, AI T C, LI R, et al. Effect of controlled release fertilizer and urea additive on photosynthetic characteristics and yield of double cropping rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, 7(3):54-60.
- [46] YANG Y, LI N, NI X Y, et al. Combining deep flooding and slow-release urea to reduce ammonia emission from rice fields[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244(2):118745.