

树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田氨挥发、氮素径流和渗漏损失及产量的影响

周乾顺, 朱建强, 邹宇傲, 杨泽宇, 何明佳, 吴启侠

引用本文:

周乾顺, 朱建强, 邹宇傲, 杨泽宇, 何明佳, 吴启侠. 树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田氨挥发、氮素径流和渗漏损失及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2016–2026.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1194>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 李运东, 王慎强

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1115–1123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0472>

包膜/抑制剂联合调控对农田土壤N₂O排放和氨挥发的影响

巴闯, 杨明, 邹洪涛, 蒋一飞, 王丹蕾, 陈松岭, 虞娜, 张玉玲

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1291–1299 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1538>

氮掺杂碳纳米子施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响

胡伟, 向建华, 向言词, 周练, 陈燕

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1378–1385 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0520>

化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响

周慧, 史海滨, 徐昭, 郭珈玮, 付小军, 李正中

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1649–1656 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1406>

控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响

宋梓璇, 李虎, 李建政, 尹彩霞, 王迎春, 山楠, 王立刚

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2342–2349 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1762>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周乾顺, 朱建强, 邹宇傲, 等. 树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田氨挥发、氮素径流和渗漏损失及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2016–2026.

ZHOU Q S, ZHU J Q, ZOU Y A, et al. Effects of polymer-coated urea combined with common urea on ammonia volatilization, nitrogen runoff and leakage loss, and yield in direct-seeding paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9): 2016–2026.

树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田氨挥发、氮素径流和渗漏损失及产量的影响

周乾顺, 朱建强, 邹宇傲, 杨泽宇, 何明佳, 吴启侠*

(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)

摘要:为探究树脂包膜尿素与普通尿素配施对直播稻田氮素损失的影响,于2021年开展大田试验,在施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 水平下,设置8个氮肥处理:树脂包膜尿素(基肥):普通尿素(分蘖肥)=4:6(CRF4U6)、6:4(CRF6U4)、8:2(CRF8U2),一次性基施树脂包膜尿素(CRF10U0);普通尿素(基肥):普通尿素(分蘖肥)=4:6(C4U6)、6:4(C6U4)、8:2(C8U2);以不施氮处理为对照(CK)。结果表明:施树脂包膜尿素处理(CRFU系列)基肥期氨挥发通量峰值显著低于施普通尿素处理(U系列),水稻整个生育期氨挥发损失量以CRF10U0最低,CRF8U2次之,其氨挥发损失率分别为7.35%和8.92%。CRFU系列水稻生育期总氮(TN)径流流失率均显著低于U系列,以CRF10U0最低,CRF8U2次之,其流失率仅为1.69%和2.04%,原因是直播稻田径流主要发生在施基肥后,而CRFU系列基肥期(5月22日、5月26日)径流TN浓度显著低于U系列。直播稻田30 cm处渗漏水中氮素以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主,基肥期CRFU系列30 cm处渗漏水中TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度峰值显著低于U系列,水稻整个生育期氮素渗漏损失量CRFU系列显著低于U系列,以CRF10U0最低,CRF8U2次之,其渗漏流失率分别为2.90%、3.18%。CRF8U2与C4U6产量显著高于其他处理(CRF10U0除外),而CRF8U2产投比仅比C4U6低4.90%。综合考虑氮素损失、产量和产投比等多方面因素,CRF8U2施肥模式更加贴合直播稻实际生产。

关键词:直播稻;氨挥发;径流;渗漏;氮素流失;树脂包膜尿素

中图分类号:S143.1;S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)09-2016-11 doi:10.11654/jaes.2022-1194

Effects of polymer-coated urea combined with common urea on ammonia volatilization, nitrogen runoff and leakage loss, and yield in direct-seeding paddy field

ZHOU Qianshun, ZHU Jianqiang, ZOU Yu'ao, YANG Zeyu, HE Mingjia, WU Qixia*

(College of Agriculture, Yangtze University/Engineering Research Center for Wetland Ecology and Agricultural Utilization, Ministry of Education, Jingzhou 434025, China)

Abstract: This study explores the effects of combined application of polymer-coated urea and common urea on nitrogen loss in direct seeding paddy fields. Field trials conducted in 2021 set eight nitrogen treatments under $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen application levels: CRFU series with polymer-coated urea (base fertilizer): common urea (tillering fertilizer) ratios of 4:6 (CRF4U6), 6:4 (CRF6U4), and 8:2 (CRF8U2), and single base application of polymer-coated urea (CRF10U0); U series with common urea (base fertilizer): common urea (tillering fertilizer) ratios of 4:6 (C4U6), 6:4 (C6U4), and 8:2 (C8U2); and no nitrogen treatment as control (CK). The results showed

收稿日期:2022-11-22 录用日期:2023-02-14

作者简介:周乾顺(1998—),男,湖北恩施人,硕士研究生,从事稻田面源污染防治防控研究。E-mail:zhouqianshun2021@163.com

*通信作者:吴启侠 E-mail:qixiawu@yangtzeu.edu.cn

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)

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

that the peak value of ammonia volatiles at the base fertilizer stage in the polymer-coated urea treatment (CRFU series) was significantly lower than that of common urea treatment (U series). The ammonia volatiles loss at the whole growth stage of rice was the lowest in CRF10U0, followed by CRF8U2, with ammonia volatiles loss rates of 7.35% and 8.92%, respectively. The total nitrogen (TN) runoff loss rate of the CRFU series was significantly lower than that of the U series. CRF10U0 had the lowest TN runoff, followed by CRF8U2, with wastage rates of only 1.69% and 2.04%, respectively. This was because the runoff in direct seeding paddy fields mainly occurred after base fertilizer application. However, TN concentration in runoff of the CRFU series was significantly lower than that of U series during the base fertilizer period (May 22 and May 26). Nitrogen percolation at 30 cm depth of the direct seeding paddy field was dominated by $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and the peak concentrations of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ at 30 cm of the CRFU series were significantly lower than those of the U series at base fertilizer stage. Furthermore, nitrogen leakage loss during the whole growth stage of rice was significantly lower than that of the U series, with CRF10U0 being the lowest followed by CRF8U2, with leakage rates of 2.90% and 3.18%, respectively. The yields of CRF8U2 and C4U6 were significantly higher than that of other treatments except CRF10U0, and the production-investment ratio of CRF8U2 was only 4.90% lower than that of C4U6. Therefore, considering nitrogen loss, yield and production-investment ratio, the CRF8U2 fertilization model is most suitable for the actual production of direct seeding rice.

Keywords: direct-seeded rice; ammonia volatilization; runoff; seepage; nitrogen loss; polymer-coated urea

水稻是世界一半以上人口的主食和营养来源^[1],移栽稻是我国当前的主要种植方式^[2],但这种方式需要较多的劳动力用于育秧和移栽。随着我国城市化进程的加快,农村劳动力减弱,劳动力成本不断升高^[3],促使我国水稻种植方式逐渐从移栽转变为直播^[4-5],同时田间杂草管理技术的改进也促进了直播稻面积的扩大^[6-7],据统计湖北省在2008—2015年间直播稻种植面积总体增长10.58%。

氮肥是水稻产量的保障,我国在水稻生产中投入的氮肥占全球水稻氮肥消耗量的37%^[8-9],但我国氮肥利用率仅为30%~35%^[10-11],同时由于不合理的施肥方式和施肥量导致了一系列的农田面源污染问题。作物未吸收的氮素通过氨挥发^[12]、径流^[13]、渗漏^[14]等途径进入环境中,从而造成耕地退化、农产品品质下降、湖泊水域富营养化、酸雨等环境问题。如何提高氮肥利用率和降低氮素损失带来的环境危害是保证农业可持续发展的关键^[15]。前人研究发现,树脂包膜尿素与普通尿素相比能有效降低氨挥发^[16],同时树脂包膜尿素表面具有一层聚合物,其可使氮素的释放得到控制^[17],降低稻田氮素径流和渗漏损失^[18],而普通尿素进入稻田土壤环境中后,迅速溶解于土壤水体中,使水体中铵态氮浓度增高,从而增加了氮素流失的风险。直播稻在播种后需要及时排水以防止种子腐烂不发芽,同时直播稻前期生长缓慢,对氮素要求不高,中后期对氮素需求量较大^[19],因此树脂薄膜尿素与普通尿素配合施用可能更适合直播稻对氮素的需求,且有助于减少氮素流失的风险,降低农田面源污染。为探究缓释氮肥与速效氮肥在直播稻生产上配合施用对氮素流失

的影响,本试验采用“深两优332”为供试材料,设置8个施肥处理研究树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田氨挥发、氮素径流和渗漏损失及水稻产量的影响,以期江汉平原直播稻种植提供理论施肥依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2021年在湖北省荆州市长江大学农学院试验基地(30°21'N, 112°09'E)标准小区内进行。选用“深两优332”为试验水稻材料。试验基地地处江汉平原,土壤为典型潜育型水稻土。土壤(0~20 cm)基本性质:pH为7.19、有机质为29.25 g·kg⁻¹、全氮为2.53 g·kg⁻¹、碱解氮为116.05 mg·kg⁻¹、速效磷为15.89 mg·kg⁻¹、速效钾为223.55 mg·kg⁻¹。树脂包膜尿素由北京市缓控释肥料工程技术研究中心研制(氮素含量43%,包膜率2.69%,静水释放期3~4个月),普通尿素有效养分为46%,磷肥和钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾,有效养分为12%和60%。

1.2 试验设计

试验地耕作模式为轮作模式,上茬作物为小麦。试验采用单因素试验设计,设有8种氮肥管理方式,施肥基追比例参考张祖建等^[20]和柯健等^[21]的基追配比并优化而来,分别为CRFU系列:树脂包膜尿素(基肥):普通氮肥(分蘖肥)=4:6(CRF4U6)、6:4(CRF6U4)、8:2(CRF8U2),一次性基施树脂包膜尿素(CRF10U0);U系列:普通尿素(基肥):普通尿素(分蘖肥)=4:6(C4U6)、6:4(C6U4)、8:2(C8U2);以不施氮处理为对照(CK)。各处理施氮量均为180 kg·hm⁻²,磷肥75

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 钾肥 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷钾肥均作基肥一次施入。每个处理3次重复, 共计24个小区, 小区面积均为 $15 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 45 \text{ m}^2$, 小区之间用高 0.15 m 的土埂隔开, 土埂上覆薄膜, 薄膜插入土壤 20 cm 深处, 防止小区之间串水串肥, 每小区均有独立的灌溉系统和径流池, 径流池用于收集每次径流的产流水样。

田块旋耕后构建小区, 将肥料撒施于表层, 在小区中间开沟用于灌排水, 沟宽 0.2 m 、深 $0.1 \sim 0.2 \text{ m}$ 。播种前排水, 保证小区厢面湿润无水层。于5月22日撒施基肥并人工撒播, 播种量折合干种 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。播种后3 d内化学除草, 播种后至三叶一心期保持田间湿润无水层, 如遇强降水则需进行排水, 在试验期间共排水3次(5月22日、5月26日、7月14日)。2021年6月8日复水, 保持田间 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 浅水层, 之后维持浅水层管理, 6月16日撒施分蘖肥, 10月7日收获。及时防控病虫害, 避免产量损失。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 水样采集及测定

降雨过后, 按照水稻不同生育期的水管理方法进行排水, 在每次降雨产流后统计径流水体积, 并取 100 mL 水样冷冻保存, 用于检测分析。及时清空剩余的径流水, 避免干扰下一次采样。

参照叶玉适等^[22]的方法, 在各小区埋置直径 2 cm 、长 90 cm 的PVC管, 且在距离底部 25 cm 处每隔 1 cm 均匀钻直径 5 mm 的渗水孔, 底部封闭, 渗水部分用纱布包裹, 以防泥沙进入, PVC管埋深 60 cm , 渗水孔距离表层 $25 \sim 30 \text{ cm}$, 收集的渗漏水视为 $30 \text{ cm}^{[22]}$ 处的混合水样。管口高出地表 30 cm , 上部加盖以防雨水进入。在施肥后每隔 2 d 取一次样, 连续2周, 随后每隔 7 d 取一次样。参照晏军等^[23]的测定方法, 每日对田间渗漏量进行监测。

径流水、渗漏水水样中总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定, 氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)浓度使用 Alliance-Futura II 连续流动分析仪测定。

氮素径流流失量=径流水氮素浓度 $\times$ 径流量/小区面积

氮素流失率=(施肥处理氮素流失量-不施肥处理氮素流失量)/施氮量 $\times 100\%$

氮渗漏流失量=小区渗漏水氮浓度 $\times$ 流失体积/小区面积

1.3.2 氨挥发采集及测定

采用通气法^[24]采集挥发的氨, 具体采集方法参照

乔月等^[25]的方法。在每次施肥后第1周每日取样一次, 第2~3周每2~3 d取样一次, 之后取样间隔时间可延长至7~14 d, 直至水稻收获为止。将收集的下层海绵浸泡在 $200 \text{ mL } 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液中, 振荡 1 h , 用靛酚蓝比色法^[26]测定浸提液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 计算氨挥发通量。

氨挥发通量计算公式:

$$F = \frac{m}{A \times t_d} \times 10^{-2}$$

式中: F 为氨挥发通量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; m 为通气法单个装置平均每次测得的氨含量, g ; A 为捕获装置的横切面积, m^2 ; t_d 为每次连续捕获的时间, d 。

氨挥发累积损失量计算公式:

$$A = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \times (T_{i+1} - T_i)$$

式中: A 为氨挥发累积损失量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; i 表示第 i 次氨挥发采样; $T_{i+1} - T_i$ 表示两个相邻测定日期的间隔, d ; n 为累积排放量观测时间内总的测定次数。

氨挥发损失率(L)计算公式:

$$L = A/180 \times 100\%$$

式中: L 为氨挥发损失率, $\%$; 180 为施用纯氮量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3.3 产量及产量构成因素测定

成熟期每小区取 1 m^2 水稻收获, 重复3次, 脱粒晒干风选之后测定实粒质量, 随后换算产量。于成熟期调查大田有效穗数, 每小区调查5株具有代表性的植株有效穗, 并根据有效穗进行取样。选取取回的样品5穗进行脱粒, 随后用水选法将瘪粒和实粒进行分离, 烘干后测定结实率、每穗粒数和千粒质量。

1.4 数据计算与统计分析

采用 Excel 365 和 SPSS 25.0 软件进行数据分析, 处理间差异显著性分析采用最小显著差异法(LSD)。

2 结果与分析

2.1 不同处理下直播稻田氨挥发动态变化

氨挥发是稻田氮素损失的主要途径之一, 从图1可以看出, 施用基肥后氨挥发通量呈现逐渐增加的趋势, CRFU系列与U系列在施基肥后第4天出现峰值, 峰值介于 $0.25 \sim 1.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间, CRFU系列峰值显著低于U系列(表1, $P < 0.05$), 且CRFU系列中各处理间无显著差异, U系列中各处理间差异显著($P < 0.05$)。施用追肥后, CRFU系列在追施尿素后第1天出现峰值, U系列在追施尿素后第2天出现峰值, CRFU系列

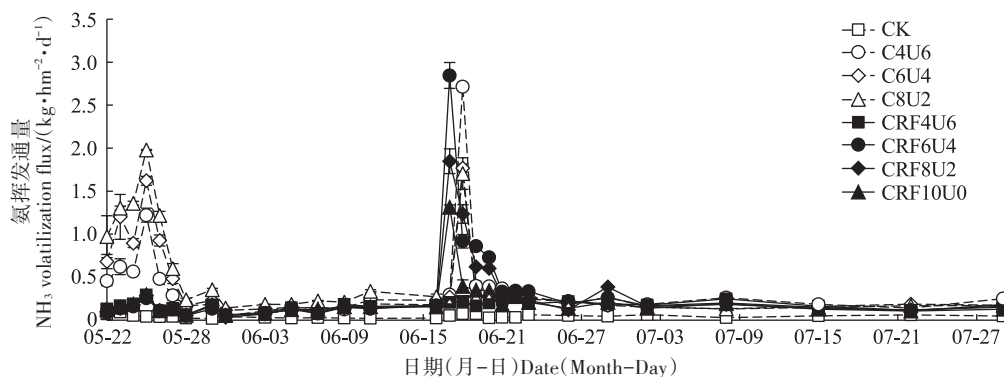


图1 不同氮肥管理方式下直播稻田氨挥发通量动态

Figure 1 Dynamics of ammonia volatile flux in paddy fields under different nitrogen fertilizer management

峰值介于 $1.31\sim 2.85\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间, U 系列介于 $1.71\sim 2.72\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间, 各处理中以 CRF10U0 最低, RF8U2 次之, 且 CRF8U2 显著低于 C8U2 (表 1,

表1 不同氮肥管理方式下直播稻田氨挥发通量峰值
($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

Table 1 Peak ammonia volatile flux in paddy fields under different nitrogen fertilizer management ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

处理 Treatment	基肥期 Basal fertilizer period	追肥期 Topdressing period
CRF4U6	$0.29\pm 0.01\text{d}$	$0.20\pm 0.01\text{d}$
CRF6U4	$0.29\pm 0.01\text{d}$	$1.85\pm 0.14\text{b}$
CRF8U2	$0.29\pm 0.01\text{d}$	$1.31\pm 0.03\text{c}$
CRF10U0	$0.25\pm 0.01\text{d}$	$2.85\pm 0.15\text{a}$
C4U6	$1.22\pm 0.08\text{c}$	$2.72\pm 0.03\text{a}$
C6U4	$1.62\pm 0.05\text{b}$	$1.77\pm 0.05\text{b}$
C8U2	$1.98\pm 0.01\text{a}$	$1.71\pm 0.18\text{b}$

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters after the same column data indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.

$P<0.05$)。

2.2 不同处理对直播稻田氨挥发损失量和损失率的影响

不同氮肥管理方式下直播稻田氨挥发损失量与损失率如表2所示。CRFU 系列基肥期氨挥发损失量显著低于 U 系列 ($P<0.05$), 且 CRFU 系列中 CRBF6U4、CRBF8U2、CRBF10U0 间无显著差异, 但均高于 CRBF4U6, 且 CRBF10U0 显著高于 CRBF4U6 ($P<0.05$), U 系列中各处理间氨挥发损失量差异显著 ($P<0.05$); 追肥期 CRFU 系列中的 CRF4U6、CRF6U4 显著高于 U 系列, 但追肥期氨挥发损失量以 CRF10U0 最低, 与 U 系列平均水平相比树脂包膜尿素基肥一次性施用 (CRF10U0) 可降低追肥期 $4.12\%\sim 17.17\%$ 的氨挥发损失量; CRFU 系列在直播稻整个稻季的氨挥发损失量显著低于 U 系列, 以 CRF10U0 最低, CRF8U2 次之, 与 U 系列相比降低了 $24.57\%\sim 32.89\%$ 、 $13.29\%\sim 22.86\%$ 的氨挥发损失量。且 CRF8U2 与 CRF10U0 的损失率仅为 8.92% 、 7.35% 。

表2 不同氮肥管理方式下氨挥发损失量和损失率

Table 2 Ammonia volatilization loss volume and loss rate under different nitrogen fertilizer managements

处理 Treatment	基肥期 Basal fertilizer period		追肥期 Topdressing period		总量 Total	
	损失量 Loss volume/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	损失率 Loss rate/%	损失量 Loss volume/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	损失率 Loss rate/%	损失量 Loss volume/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	损失率 Loss rate/%
CK	$0.85\pm 0.23\text{f}$	—	$5.05\pm 0.30\text{d}$	—	$5.90\pm 0.28\text{f}$	—
CRF4U6	$3.34\pm 0.04\text{e}$	$1.38\pm 0.02\text{e}$	$19.67\pm 0.97\text{a}$	$8.28\pm 0.54\text{a}$	$23.01\pm 0.95\text{c}$	$9.66\pm 0.53\text{c}$
CRF6U4	$3.42\pm 0.04\text{de}$	$1.43\pm 0.04\text{de}$	$19.91\pm 0.53\text{a}$	$8.42\pm 0.30\text{a}$	$23.33\pm 0.49\text{c}$	$9.84\pm 0.27\text{c}$
CRF8U2	$3.59\pm 0.06\text{de}$	$1.52\pm 0.29\text{de}$	$18.07\pm 0.77\text{b}$	$7.40\pm 0.43\text{b}$	$21.67\pm 0.82\text{d}$	$8.92\pm 0.46\text{d}$
CRF10U0	$3.74\pm 0.05\text{d}$	$1.61\pm 0.02\text{d}$	$15.11\pm 0.72\text{c}$	$5.75\pm 0.40\text{c}$	$18.85\pm 0.77\text{e}$	$7.35\pm 0.43\text{e}$
C4U6	$6.62\pm 0.27\text{c}$	$3.20\pm 0.14\text{c}$	$18.37\pm 0.48\text{b}$	$7.56\pm 0.27\text{b}$	$24.99\pm 0.29\text{b}$	$10.76\pm 0.16\text{b}$
C6U4	$9.44\pm 0.29\text{b}$	$4.77\pm 0.17\text{b}$	$16.06\pm 0.17\text{c}$	$6.28\pm 0.09\text{c}$	$25.49\pm 0.32\text{b}$	$11.04\pm 0.78\text{b}$
C8U2	$12.34\pm 0.35\text{a}$	$6.38\pm 0.20\text{a}$	$15.76\pm 0.18\text{c}$	$6.11\pm 0.10\text{c}$	$28.09\pm 0.46\text{a}$	$12.47\pm 0.25\text{a}$

2.3 不同处理对直播稻田氮素径流损失的影响

整个稻季期间共产生3次径流,分别发生在施用基肥后第1天和第4天(5月22日、5月26日),施用追肥后第28天(7月14日)。CRFU系列在施用基肥后径流TN流失量显著低于U系列(表3, $P<0.05$),其中以CRF10U0处理最低,与C4U6相比显著低65.47%,主要原因是在施用基肥后径流水中的TN浓度显著低于U系列(表4, $P<0.05$)。

2.4 不同处理下直播稻田渗漏水氮素浓度动态变化

不同氮肥管理方式下直播稻田30 cm渗漏水氮素动态变化如图2所示。施基肥后第5天,各施氮处理下TN浓度达到峰值(图2A),峰值介于 $3.53\sim 14.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,CRFU系列峰值显著低于U系列($P<0.05$),以CRF4U6相对较低,U系列中各处理间差异显著($P<0.05$)。施追肥后第3天各处理TN浓度达到峰值,峰值介于 $3.94\sim 13.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中CRF6U4、CRF8U2、CRF10U0均显著低于U系列。 NH_4^+-N 浓度变化趋势与TN浓度变化趋势大致相同(图2B),施基肥后CRFU系列峰值显著低于U系列($P<0.05$),施用追肥后,相同基追比处理间无显著差异,各处理中以CRF10U0最低,CRF8U2次之。 NO_3^--N 浓度变化趋势与TN浓度不同,各施肥处理在施用基肥后2周出现峰值,峰值介于 $1.19\sim 2.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,CRFU系列均显著低于U系列($P<0.05$),追施尿素后1周内出现峰值,峰值介于 $0.94\sim 1.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据上述分析可以看出,CRF10U0和CRF8U2的施肥模式有利于降低直播稻渗漏水中的氮素浓度。

2.5 不同处理对直播稻田氮素渗漏损失量的影响

图3为不同氮肥管理方式下直播稻田TN渗漏损失量,从图中可以看出,CRFU系列在基肥期TN渗漏损失量显著低于U系列,且U系列各处理间的TN流

表4 不同氮肥管理方式下径流水中TN浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 4 TN concentration in runoff water under different nitrogen fertilizer managements ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatment	产流日期(月-日)Date of runoff event(Month-Day)		
	05-22	05-26	07-14
CK	$3.65\pm 1.10\text{f}$	$4.14\pm 0.66\text{f}$	$4.43\pm 0.39\text{f}$
CRF4U6	$8.32\pm 0.33\text{e}$	$6.59\pm 0.48\text{de}$	$15.81\pm 0.31\text{ab}$
CRF6U4	$8.58\pm 0.40\text{e}$	$7.37\pm 0.78\text{d}$	$15.61\pm 0.51\text{bc}$
CRF8U2	$8.84\pm 0.63\text{de}$	$8.74\pm 0.24\text{c}$	$13.32\pm 0.32\text{d}$
CRF10U0	$10.1\pm 0.69\text{d}$	$6.43\pm 0.55\text{e}$	$8.44\pm 0.65\text{e}$
C4U6	$26.01\pm 1.79\text{c}$	$24.59\pm 0.42\text{b}$	$16.42\pm 0.31\text{a}$
C6U4	$29.57\pm 0.87\text{b}$	$26.37\pm 0.24\text{a}$	$15.04\pm 0.50\text{c}$
C8U2	$32.09\pm 0.48\text{a}$	$27.00\pm 0.80\text{a}$	$16.42\pm 0.15\text{a}$

失量差异显著($P<0.05$)。追肥期,两个系列中不同基追处理之间差异显著($P<0.05$),且CRF10U0、CRF6U4、CRF8U2显著低于U系列处理。水稻整个生育期的TN渗漏损失量CRFU系列显著低于U系列,以CRF10U0最低,CRF8U2次之,与U系列相比分别显著降低34.86%~45.62%和30.70%~42.15%。

2.6 不同处理对直播稻产量的影响

施肥显著增加了直播稻的产量(表5),所有施肥处理中以C4U6最高,较CRF4U6相比显著高出18.54%,而与CRF8U2、CRF10U0之间无显著差异,仅高出0.01%、1.93%;CRF6U4、CRF8U2、CRF10U0的产量均高于C6U4、C8U2,并与C8U2之间达到显著差异水平($P<0.05$)。施肥同时增加了各处理的有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量,其中CRF8U2、C4U6的有效穗数、每穗粒数和结实率最高,显著高于CRF10U0、CRF4U6、CRF6U4、C6U4、C8U2($P<0.05$)。

2.7 不同处理对直播稻经济效益的影响

施用氮肥增加了直播稻的产量,从而使产投比得

表3 不同氮肥管理方式下直播稻田径流水TN流失量

Table 3 TN loss of runoff water in paddy field under different nitrogen fertilizer managements

处理 Treatment	产流日期(月-日)Date of runoff event(Month-Day)			NH_4^+-N 流失量 $\text{NH}_4^+-\text{N loss}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	NO_3^--N 流失量 $\text{NO}_3^--\text{N loss}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	TN流失量 $\text{TN loss}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	TN流失率 $\text{TN loss rate}/\%$
	05-22	05-26	07-14				
CK	$1.13\pm 0.09\text{f}$	$0.98\pm 0.10\text{f}$	$0.87\pm 0.23\text{e}$	$2.40\pm 0.31\text{d}$	$0.49\pm 0.14\text{d}$	$2.98\pm 0.32\text{f}$	
CRF4U6	$2.42\pm 0.09\text{d}$	$1.91\pm 0.19\text{d}$	$3.85\pm 0.08\text{b}$	$4.05\pm 0.33\text{c}$	$1.54\pm 0.10\text{c}$	$7.51\pm 0.16\text{d}$	4.17d
CRF6U4	$2.31\pm 0.06\text{d}$	$2.18\pm 0.06\text{c}$	$3.38\pm 0.14\text{c}$	$3.55\pm 0.18\text{cd}$	$1.60\pm 0.10\text{c}$	$8.17\pm 0.21\text{c}$	4.54c
CRF8U2	$2.28\pm 0.13\text{d}$	$1.74\pm 0.12\text{d}$	$1.74\pm 0.13\text{d}$	$4.46\pm 0.61\text{c}$	$1.55\pm 0.07\text{c}$	$7.87\pm 0.18\text{cd}$	4.37cd
CRF10U0	$1.78\pm 0.02\text{e}$	$1.49\pm 0.12\text{e}$	$4.22\pm 0.06\text{a}$	$4.04\pm 0.39\text{c}$	$1.68\pm 0.11\text{bc}$	$5.76\pm 0.22\text{e}$	3.20e
C4U6	$6.24\pm 0.06\text{c}$	$6.12\pm 0.16\text{b}$	$4.32\pm 0.17\text{a}$	$8.35\pm 0.98\text{b}$	$1.86\pm 0.18\text{ab}$	$16.68\pm 0.25\text{b}$	9.27b
C6U4	$7.79\pm 0.48\text{b}$	$6.24\pm 0.20\text{b}$	$4.26\pm 0.10\text{a}$	$12.72\pm 0.12\text{a}$	$1.97\pm 0.13\text{a}$	$18.29\pm 0.55\text{a}$	10.16a
C8U2	$8.24\pm 0.08\text{a}$	$6.75\pm 0.05\text{a}$	$3.56\pm 0.19\text{c}$	$12.90\pm 0.72\text{a}$	$1.91\pm 0.13\text{a}$	$18.54\pm 0.07\text{a}$	10.30a

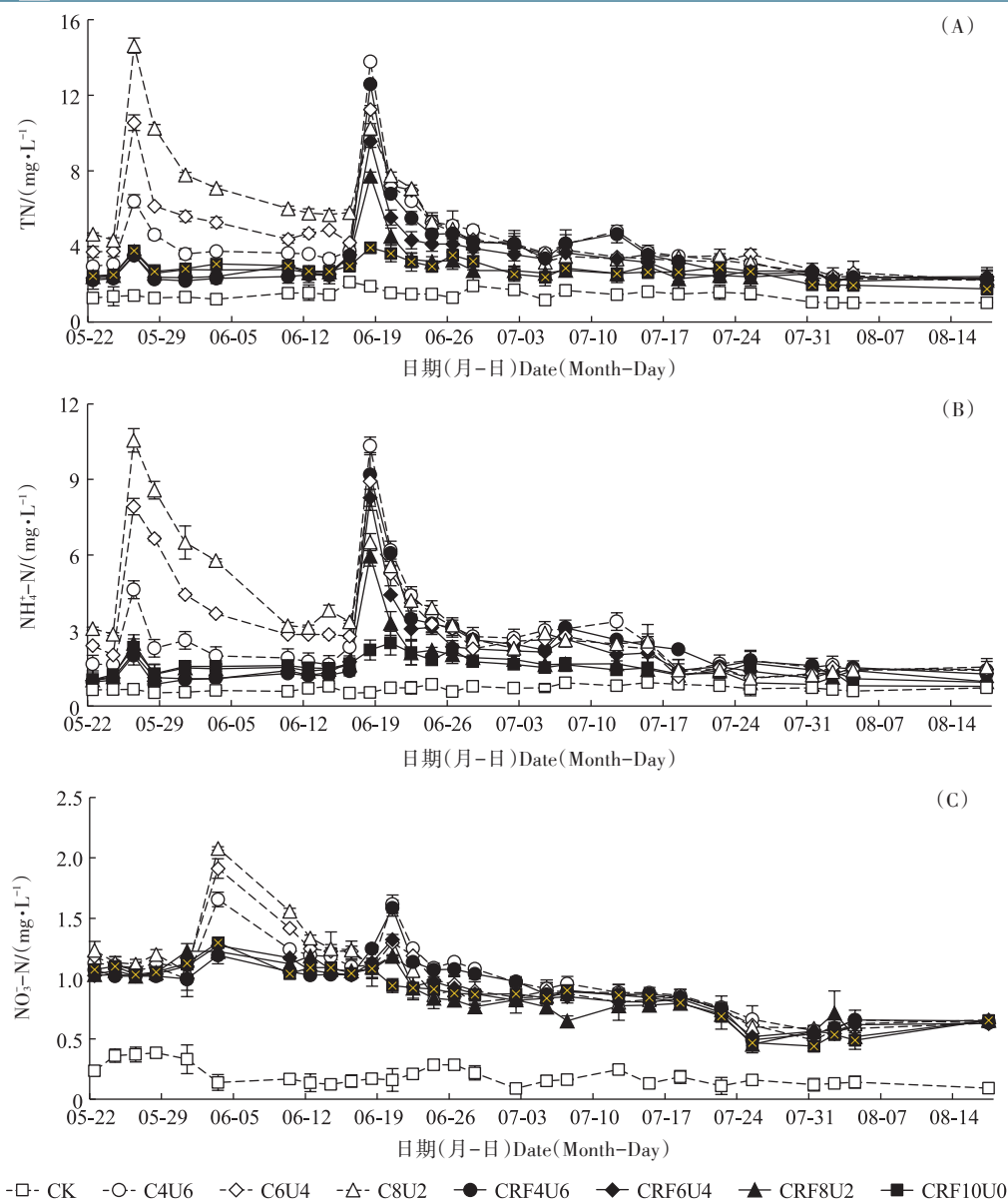
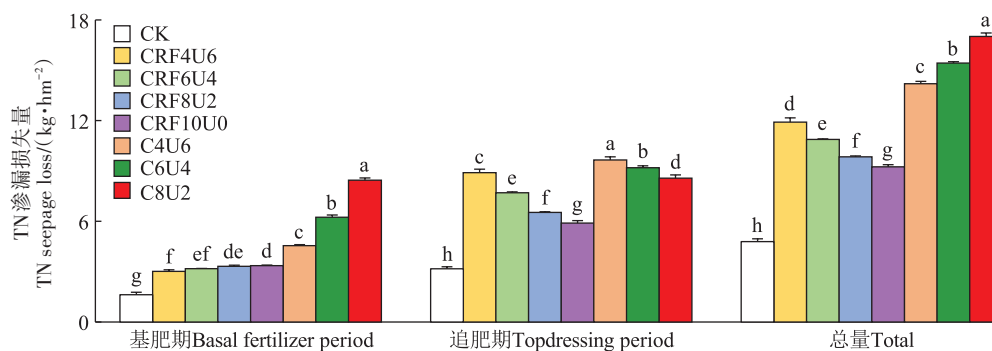


图2 不同氮肥管理方式下直播稻田 30 cm 渗漏水氮素浓度

Figure 2 Leakage nitrogen concentration at 30 cm in direct paddy field under different nitrogen fertilizer managements



图中不同字母表示不同处理间在0.05水平上差异显著。

Different letters indicate significant difference between different treatments at the 0.05 level.

图3 不同氮肥管理方式下直播稻田 30 cm 渗漏水 TN 淋失量

Figure 3 TN loss of 30 cm seepage water leakage in paddy field under different nitrogen fertilizer managements

表5 不同氮肥管理方式下直播稻产量及产量构成因素

Table 5 Yield and yield components of direct seeding rice under different nitrogen fertilizer managements

处理 Treatment	有效穗数 Effective spike/(10 ⁴ 穗·hm ⁻²)	每穗粒数 Spike	结实率 Fruition rate/%	千粒质量 Thousand grain weight/g	产量 Yield/(t·hm ⁻²)
CK	165.95±1.35d	163.54±2.24e	83.12±1.22e	24.19±0.10c	6.11±0.32e
CRF4U6	172.71±1.62c	204.34±2.02d	84.61±0.14de	24.69±0.07bc	8.47±0.03c
CRF6U4	176.66±2.83b	209.19±1.00bc	85.26±0.91cd	24.93±0.05ab	9.77±0.14b
CRF8U2	182.42±1.78a	215.02±1.68a	87.47±1.04ab	25.35±0.05a	10.03±0.07a
CRF10U0	177.73±2.04b	211.13±1.65b	86.79±0.21bc	24.96±0.57ab	9.85±0.07ab
C4U6	182.92±1.25a	217.15±1.03a	89.01±0.83a	25.22±0.11a	10.04±0.01a
C6U4	175.92±1.66b	207.95±1.21c	85.10±0.54d	24.89±0.55ab	9.61±0.10b
C8U2	172.31±1.26c	202.65±0.53d	85.47±1.02cd	24.49±0.20bc	7.77±0.10d

表6 不同氮肥管理方式下直播稻经济效益

Table 6 Economic benefits of direct seeding rice under different nitrogen fertilizer managements

处理 Treatment	产值/(元·hm ⁻²) Value/(yuan·hm ⁻²)	树脂包膜尿素/(元·hm ⁻²) Polymer-coated urea/(yuan·hm ⁻²)	尿素/(元·hm ⁻²) Urea/(yuan·hm ⁻²)	人工/(元·hm ⁻²) Labor/(yuan·hm ⁻²)	其他/(元·hm ⁻²) Other/(yuan·hm ⁻²)	产投比 Production-investment ratio
CK	15 888.28			1 500	9 987.50	1.38
CRF4U6	22 014.26	586.05	422.61	1 500	9 987.50	1.76
CRF6U4	25 395.37	879.07	281.74	1 500	9 987.50	2.01
CRF8U2	26 066.59	1 172.09	140.87	1 500	9 987.50	2.04
CRF10U0	25 596.39	1 465.12		1 200	9 987.50	2.02
C4U6	26 103.96		704.35	1 500	9 987.50	2.14
C6U4	24 978.23		704.35	1 500	9 987.50	2.05
C8U2	20 197.88		704.35	1 500	9 987.50	1.66

注:水稻按2021年国家最低保护价2.6元·kg⁻¹计算;树脂包膜尿素3.5元·kg⁻¹;人工按150元·d⁻¹计算,CRF10U0处理需8个工时·hm⁻²,其他处理需10个工时·hm⁻²;其他包含种子、磷肥、钾肥、机械收割、机械旋耕、农药等投入。

Note: Rice is calculated according to the national minimum protection price of 2.6 yuan·kg⁻¹ in 2021; Resin-coated urea 3.5 yuan·kg⁻¹; Calculated at 150 yuan·d⁻¹, CRF10U0 treatment needs 8 workers·hm⁻², other treatments need 10 workers·hm⁻²; Other inputs include seeds, phosphate fertilizer, potash fertilizer, mechanical harvesting, mechanical rotary tillage, pesticides and so on.

到提升(表6),在CRFU系列中,CRF8U2的产投比最高,CRF10U0次之,同时CRF8U2与CRF10U0相比产量高出1.83%,产投比高出0.99%。U系列中以C4U6产投比最高,C6U4次之,同时C4U6与C6U4相比产量高出4.47%,产投比高出4.39%。两系列之间以C4U6产投比最佳,但仅比CRF8U2高4.90%,由此可见,CRFU系列中的CRF8U2和U系列中的C4U6施肥模式能有效增加直播稻产量,同时提升直播稻田经济效益。

3 讨论

3.1 树脂包膜尿素配施普通尿素对氨挥发的影响

树脂包膜尿素被报道在水稻生产中能有效降低稻田氨的产生和排放,其中树脂包膜尿素的减排效率最高(56.20%)^[27]。Guo等^[28]的研究表明,树脂包膜尿

素与普通尿素相比可使稻田年氨挥发损失量降低64.80%。树脂包膜尿素能有效降低稻田氨的排放^[29]。在本研究中,CRF10U0处理的氨挥发损失量较C4U6、C6U4、C8U2处理显著减少了32.57%~49.02%,这是由于树脂包膜尿素具有一层树脂包裹,肥效释放缓慢,从而使氨挥发通量得到了控制^[30]。另外,本研究还得出,CRFU系列中,氨挥发损失量随树脂包膜尿素基肥施用比例的增加而减少,CRF8U2和CRF10U0在整个稻季的氨挥发损失量显著低于CRF4U6、CRF6U4,主要原因可能是减少了追肥次数和降低了追肥量^[31]。

氮肥基追比例也是造成稻田氨挥发的因子之一,夏文建等^[32]指出,速效氮肥一次性基肥施用是不合理的,不能满足作物全生育期的养分需求,且加剧了氮素损失。直播稻前期生长缓慢对养分需求量较小,应减少基肥期氮肥用量,将氮肥适量后移。本研究结果

表明,在U系列中C4U6的氮挥发损失量最少,显著低于C8U2。Li等^[33]指出,增加树脂包膜尿素基肥占比,能有效降低稻田氨气的产生和排放。本研究同样证实,CRF10U0、CRF8U2在整个稻季的氮挥发损失量显著低于CRF4U6、CRF6U4和U系列。本研究还发现,CRF4U6、CRF6U4在追肥期的氮挥发损失量显著高于CRF10U0、CRF8U2和U系列,这主要是因为树脂包膜尿素释放缓慢,推迟了峰值的出现,使基肥期应当出现的峰值与追肥期叠加^[34]。

3.2 树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田氮素径流损失的影响

施肥初期径流水中的氮素浓度水平较高,该时期是防止氮素流失的关键时期^[35],肥料种类也是防止氮素径流损失的重要因素,树脂包膜尿素具有一层脂溶性聚合物包裹,能有效控制氮素的释放^[36],降低直播稻前期稻田水中的氮素浓度^[34],相较于普通尿素可使氮素流失降低24.5%^[37]。王小治等^[38]在其研究中指出,树脂包膜尿素作为基肥施用处理的径流水中TN浓度始终接近对照水平,而普通尿素作基肥施用在施肥后2 d内径流水中TN浓度达到峰值随后逐渐降低。本研究结果显示,CRFU系列径流TN流失量显著低于U系列,同时不同基追处理之间的TN径流流失差异较大,CRFU系列中基肥施用量越高,TN流失量越低,U系列则相反,其主要原因可能是稻田氮素流失要发生在施肥后1周内^[39],而普通尿素在进入土壤后1周内是释放高峰期^[40],树脂包膜尿素的脂溶性聚合物包裹层降低了尿素直接与水直接接触的可能性^[41],降低了稻田水中的氮素浓度,从而降低了氮素径流损失。

3.3 树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田渗漏水氮素浓度和形态以及渗漏损失的影响

稻田渗漏水30 cm处的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与TN浓度趋势基本一致,施肥后10 d内渗漏水氮素浓度达到峰值^[42],本研究结果与其一致。本试验还发现,CRFU系列基肥期氮素峰值浓度显著低于U系列,初步分析可能是因为树脂包膜尿素具有释放缓慢的特性,其刚进入土壤环境中时,氮素并未析出从而降低了氮素下渗的风险^[43-44],普通尿素进入土壤后迅速溶解于土壤水环境中,增加了土壤水体的氮素浓度从而增加了氮素下渗的风险。本试验还发现下渗的氮素形态以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主,这与叶玉适等^[42]的研究结果一致,其原因可能是直播稻前期生长不完全,根系未发育完整使其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收量较小^[45],导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 下渗,同时在施用

追肥后渗漏水中氮素浓度出现峰值,且峰值随追肥量的增加而增加,其主要原因是直播稻前期保持田面湿润^[46],导致土壤孔隙中水分含量减少,复水之后导致水体下渗,而追肥时间与复水之间相近导致田面水体中氮素下渗从而出现一定峰值。同时本研究还发现,30 cm渗漏水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度维持在较高水平,其主要原因可能为播种前期排水和分蘖期晒田增加了土壤中的氧化还原反应,从而增加了土壤水体中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度^[42]。

本研究中TN渗漏损失率为2.90%~6.47%,在李娟等^[47]报道的稻季渗漏淋失率范围之内。叶玉适等^[42]指出,树脂包膜尿素能降低稻田氮素渗漏损失。本试验结果显示CRFU系列TN、 $\text{NO}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 损失量均显著低于U系列,其中以CRF8U2、CRF10U0处理最为明显,且CRFU系列氮素淋失主要发生在追肥期,追施尿素比例越高的处理(CRF4U6)氮素淋失量越高,而U系列中(C8U2)基肥施用氮素过多是造成氮素淋失的主要原因。

3.4 树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻产量的影响

氮肥是决定水稻产量高低的关键性因素,是水稻产量的保障。树脂包膜尿素与普通氮肥混合施用能有效改善水稻产量构成,有利于形成有效穗,扩充籽粒库等作用,且树脂包膜尿素在降低农业面源污染等方面作用明显^[27-28,37,48]。本试验结果表明CRFU系列下的CRF10U0、CRF6U4、CRF8U2的产量与C6U4、C8U2相比均有所增加,CRF8U2的产量更是显著高于C6U4、C8U2,且CRF10U0、CRF6U4的产量都显著高于C8U2。也有研究表明,树脂包膜尿素施用是否增产取决于水稻品种类型、土壤类型、地力水平^[49],本试验中CRF8U2处理的产量虽然较CRF10U0、CRF4U6、CRF6U4、C6U4、C8U2有显著增加,但与C4U6之间没有显著差异。

4 结论

树脂包膜尿素配施普通尿素能降低直播稻田氮素径流流失量、30 cm处渗漏损失量和氮挥发损失量,且以基肥一次性施用树脂包膜尿素(CRF10U0)和树脂包膜尿素(基肥):普通尿素(分蘖肥)=8:2(CRF8U2)两个处理的效果俱佳。同时,CRF8U2处理的产量与最高产量处理C4U6相当,而CRF8U2的产投比仅比C4U6低4.90%。综合考虑氮素损失、产量和产投比等多方面因素,CRF8U2施肥模式更加贴合直播稻实际生产。

参考文献:

- [1] CHAUHAN B S. Weed ecology and weed management strategies for dry-seeded rice in Asia[J]. *Weed Technology*, 2012, 26(1): 1-13.
- [2] LIU H, HUSSAIN S, ZHENG M, et al. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(1): 285-294.
- [3] MIN S H I, PAUDEL K P, CHEN F B. Mechanization and efficiency in rice production in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(7): 1996-2008.
- [4] OHNO H, BANAYO N P M C, BUENO C, et al. On-farm assessment of a new early-maturing drought-tolerant rice cultivar for dry direct seeding in rainfed lowlands[J]. *Field Crops Research*, 2018, 219: 222-228.
- [5] WANG W, PENG S, LIU H, et al. The possibility of replacing puddled transplanted flooded rice with dry seeded rice in central China: a review [J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 310-320.
- [6] ZHANG C, HU R. Adoption of direct seeding, yield and fertilizer use in rice production: empirical evidence from China[J]. *Agriculture*, 2022, 12(9): 1439.
- [7] TIAN J, LI S, XING Z, et al. Differences in rice yield and biomass accumulation dynamics for different direct seeding methods after wheat straw return[J]. *Food and Energy Security*, 2022, 11(4): e425.
- [8] 剧成欣, 陈尧杰, 赵步洪, 等. 实地氮肥管理对不同氮响应梗稻品种产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(3): 237-246. JU C X, CHEN Y J, ZHAO B H, et al. Effect of site-specific nitrogen management on grain yield and quality of japonica rice varieties differed in response to nitrogen[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(3): 237-246.
- [9] SHI X, HU K, BATCHELOR W D, et al. Exploring optimal nitrogen management strategies to mitigate nitrogen losses from paddy soil in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105877.
- [10] 侯坤, 荣湘民, 韩磊, 等. 速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1923-1934. HOU K, RONG X M, HAN L, et al. Effects of one-time deep application of available nitrogen and slow and controlled-release nitrogen on rice yield, nitrogen use efficiency, and nitrogen loss[J]. *Journal of Agro-Environmental Sciences*, 2021, 40(9): 1923-1934.
- [11] 孙国峰, 王鑫, 盛婧, 等. 长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2521-2527. SUN G F, WANG X, SHENG J, et al. Rice quality and nitrogen efficiency under long-term application of pig manure or biogas slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2521-2527.
- [12] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 265-269. SONG Y S, FAN X H, LIN D X, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Peologica Sinica*, 2004, 41(2): 265-269.
- [13] 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 Z, XIAO M, CHEN L G, et al. The characteristics of surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during rice season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1622-1627.
- [14] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 629-636. HUANG M W, LIU M, LU M, et al. Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4): 629-636.
- [15] 王萌, 杨生光, 耿润哲. 农业面源污染防治的监测问题分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(2): 61-66. WANG M, YANG S G, GENG R Z. Analysis on monitoring and practices of agricultural non-point source pollution control[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(2): 61-66.
- [16] SHAN L, HE Y, CHEN J, et al. Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake basin, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 38: 14-23.
- [17] TRINH T H, KUSHAARI K, SHUIB A S, et al. Modelling the release of nitrogen from controlled release fertiliser: constant and decay release[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 130: 34-42.
- [18] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥科学报, 2019, 25(12): 2102-2112. HUANG S Y, TIAN C, XIE G X, et al. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12): 2102-2112.
- [19] 李木英, 陈关, 潘晓华, 等. 直播稻不同品种茎秆和根系性状与抗倒伏性关系[J]. 中国稻米, 2012, 18(2): 17-21. LI M Y, CHEN G, PAN X H, et al. Relationship between stem and root traits and lodging resistance of different direct-planting rice varieties[J]. *Chinese Rice*, 2012, 18(2): 17-21.
- [20] 张祖建, 谢成林, 谢仁康, 等. 苏中地区直播水稻的群体生产力及氮肥运筹的效应[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 677-685. ZHANG Z J, XIE C L, XIE R K, et al. Population production capacity of direct-seeding rice in central Jiangsu region and effects of nitrogen application[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(4): 677-685.
- [21] 柯健, 陈婷婷, 徐浩聪, 等. 控释氮肥运筹对钵苗移栽籼粳杂交稻甬优 1540 产量及氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(7): 1372-1382. KE J, CHEN T T, XU H C, et al. Effects of different application methods of controlled-release nitrogen fertilizer on grain yield and nitrogen utilization of Indica-japonica hybrid rice in pot-seedling mechanically transplanted[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(7): 1372-1382.
- [22] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1125-1135. YE Y S, LIANG X Q, LI L, et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae Sciences*, 2015, 35(4): 1125-1135.

- [23] 晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 基于稻田控水减排的氮肥运筹试验研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 229–236. YAN J, WU Q X, ZHU J Q, et al. Experimental research on nitrogen management based on emission controlling for paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 229–236.
- [24] 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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2002, 8(2): 205–209.
- [25] 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.
- [26] 詹晓燕, 刘臣辉, 范海燕, 等. 水体中氨氮测定方法的比较: 纳氏试剂光度法, 靛酚蓝比色法[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(11): 132–134. ZHAN X Y, LIU C H, FAN H Y, et al. Comparison between two N-ammoniacal measurements in water: napierian reagent colorimetric method and indophenol-blue colorimetric method[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(11): 132–134.
- [27] BORTOLETTO S R, GUIMARAES G G F, RONCATO J V, et al. Biodegradable oil-based polymeric coatings on urea fertilizer: N release kinetic transformations of urea in soil[J]. *Scientia Agricola*, 2019, 77(1): e20180033.
- [28] GUO C, REN T, LI P, et al. Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow-controlled-release urea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(3): 2569–2579.
- [29] 康兴蓉, 周旋, 彭建伟, 等. 包膜尿素与普通尿素配施对稻田氨挥发影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2539–2551. KANG X R, ZHOU X, PENG J W, et al. Effects of combined application of coated ureas and ordinary ureas on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2539–2551.
- [30] 林海涛, 李彦, 刘兆辉, 等. 水性树脂包膜尿素氮素释放与冬小麦氮素吸收匹配特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3852–3862. LIN H T, LI Y, LIU Z H, et al. The match of the nitrogen uptake in winter wheat and nitrogen release of water borne resin coated urea[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3852–3862.
- [31] 周旋, 吴良欢, 戴锋, 等. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1122–1130. ZHOU X, WU L H, DAI F, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on CH₄ and N₂O emission from yellow clayey field during rice growth season[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(12): 1122–1130.
- [32] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 6–13. XIA W J, ZHOU W, LIANG G Q, et al. Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from paddy field under wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(1): 6–13.
- [33] LI P, LU J, WANG Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 78–87.
- [34] JARIWALA H, SANTOS R M, LAUZON J D, et al. Controlled release fertilizers (CRFs) for climate-smart agriculture practices: a comprehensive review on release mechanism, materials, methods of preparation, and effect on environmental parameters[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(36): 53967–53995.
- [35] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 21–28. TIAN C, ZHOU X, XIE G X, et al. Effects of controlled-release urea application on dynamics and loss of nitrogen in runoff and yield in double-rice cropping field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 21–28.
- [36] 辛志远, 王昌全, 申亚珍, 等. 水基包衣控释掺混肥料一次性施用对单季稻氮素利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 109–114. XIN Z Y, WANG C Q, SHEN Y Z, et al. Effect of single application of water-borne polymer coated controlled-release blend fertilizer on nitrogen utilization in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 109–114.
- [37] 李健陵, 李玉娥, 周守华, 等. 节水灌溉, 树脂包膜尿素和脲酶/硝化抑制剂对双季稻温室气体减排的协同作用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3958–3967. LI J L, LI Y E, ZHOU S H, et al. Synergistic effects of water-saving irrigation, polymer-coated nitrogen fertilizer and urease/nitrification inhibitor on mitigation of greenhouse gas emissions from the double rice cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3958–3967.
- [38] 王小治, 高人, 朱建国, 等. 稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 600–604. WANG X Z, GAO R, ZHU J G, et al. Nitrogen loss via runoff and leaching from employ of different urea bleeds in paddy season[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5): 600–604.
- [39] 文想成, 张泰, 董世杰, 等. 长江中下游平原单季稻田氮素径流损失风险评估[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 24–35. WEN X C, ZHANG T, DONG S J, et al. Risk assessment of nitrogen runoff loss in single cropping paddy field in the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 24–35.
- [40] 邱卫国, 唐浩, 王超. 水稻田面水氮素动态径流流失特性及控制技术[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 740–744. QIU W G, TANG H, WANG C. Rule of lose of nitrogen in the surface water of rice fields and the control technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 740–744.
- [41] 鲁艳红, 纪雄辉, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 490–495. LU Y H, JI X H, ZHENG S X, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on reducing nitrogen runoff loss and increasing nitrogen recovery efficiency of rice plant[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(3): 490–495.

- [42] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 270–279. YE Y S, LIANG X Q, ZHOU K J, et al. Effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application on nitrogen leaching loss of paddy soil in Taihu Lake region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1): 270–279.
- [43] VEJAN P, KHADIRAN T, ABDULLAH R, et al. Controlled release fertilizer: a review on developments, applications and potential in agriculture[J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, 339: 321–334.
- [44] CHANG A Z, SHURONG X, YAN L. Nitrogen release of controlled release coated urea in soil[C]. 2016 International Conference on Smart City and Systems Engineering(ICSCSE), 2016: 122–127.
- [45] 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 seeding rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 651–659.
- [46] 邹应斌, 李克勤, 任泽民. 水稻的直播与免耕直播栽培研究进展[J]. 作物研究, 2003, 17(1): 52–59. ZOU Y B, LI K Q, REN Z M. Research progress of direct seeding and no-tillage direct seeding of rice[J]. *Crop Research*, 2003, 17(1): 52–59.
- [47] 李娟, 李松昊, 邬奇峰, 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): 23–28. 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): 23–28.
- [48] 康兴蓉, 周旋, 彭建伟, 等. 聚氨酯包膜尿素掺混比例对早稻产量及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 119–126. KANG X R, ZHOU X, PENG J W, et al. Effects of blend ratio of polyurethane coated urea on yield and economic benefit of early rice[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021(3): 119–126.
- [49] 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.

(责任编辑: 李丹)