

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

乔月, 朱建强*, 吴启侠*, 谢春娇, 李明辉, 黄思情
(湖北省涝渍灾害与湿地农业重点实验室, 湖北 荆州 434025)

摘 要:【目的】减少稻田氮径流流失和氨挥发。【方法】设置当地常规施肥(FFP)、缓控肥与尿素配施(CRF)、海藻多糖氮肥替代(HTN)及不施肥对照(CK)共 4 个氮肥管理措施, 观察不同种植方式(机插稻、直播稻)下稻田径流水中氮的流失量及氨挥发特征。【结果】直播稻稻田径流氮素损失以铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)为主, 播种前排水导致的氮素径流流失占总氮径流损失量的 52%左右; 不同氮肥方案下径流氮总流失量呈现为 FFP 处理>HTN 处理>CRF 处理, 机插稻、直播稻全生育期氨挥发损失量、损失率和氨挥发强度也有同样趋势; 与 FFP 处理相比, CRF 处理和 HTN 处理的机插稻全生育期氨挥发损失率分别降低了 12.5%和 4.3%, 氨挥发强度分别降低了 43.1%和 17.8%, 直播稻氨挥发损失率分别降低了 23.2%和 12.2%, 氨挥发强度分别降低了 53.3%和 26.8%; 与 FFP 相比, 在 CRF、HTN 处理下机插稻分别增产 9.31%和 4.70%, 直播稻分别增产 9.25%和 4.91%。【结论】在水稻全生育期内, 直播稻的氨挥发通量、损失率和氨挥发强度均大于机插稻, 在施肥总量控制和磷、钾肥施用相同的情况下, 选择适当种类的氮肥进行基肥、分蘖肥合理配施, 既能减少氮素田间损失、提高氮素利用率, 还可以增加水稻产量。

关 键 词: 径流氮流失; 田面水; 氨挥发; 机插稻; 直播稻

中图分类号: S19; S365

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggpps.2020145

OSID:



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 Yue, ZHU Jianqiang, WU Qixia, 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.

0 引 言

【研究意义】目前, 农田生态系统中氮素流失所造成的农业面源污染问题已成为国内外研究者关注的热点^[1-2]。氮肥损失主要受土壤、作物、氮肥种类、施肥习惯等因素影响, 其流失的方式主要有氨挥发损失、径流损失等^[3]。前人研究结果表明^[4], 施入稻田中的氮肥会有 50%的氮素以气态损失的形式进入大气^[5], 氨挥发在稻田生态系统中是氮肥最为主要的气态损失途径, 占氮施入量 9%~42%^[6]。太湖中有 48%的总氮来自农业径流产生的污染^[7]; 曹志洪等^[8]研究发现, 稻田氮素径流损失量占施氮量的 1.4%~6.3%; Zhao 等^[9]研究发现, 太湖流域稻季径流总氮流失量分

别为 2.7~21.8 kg/hm²。通过改变肥料种类, 可以有效减少稻田氮素损失^[10]。因此, 控制大量氮素养分的流失已成为农业生产中迫切需要解决的问题。【研究进展】目前, 关于氮肥管理的研究大部分集中在增产效果及提高养分利用率等方面, 而且主要针对传统的人工移栽稻和机插稻, 但是基于直播稻田的氮素损失研究较少。直播稻是适应当前农村精壮劳动力缺乏、生产成本低而出现的一种水稻轻简化栽培方式, 已成江汉平原及我国华中稻作地区水稻栽培的主要方式之一。【切入点】直播稻在播种前和播种后一段时间田间需要维持湿润无水层状态, 以确保种子正常萌发成苗和促进根系生长。这就要求在遇到中大雨时必须及时排除田间积水, 因此土壤氮磷等养分流失几乎不可避免。这不仅降低了土壤肥力及氮肥利用效率, 还会造成不同程度的农业面源污染。为减少氮素损失, 针对水稻不同种植方式中水管理特点合理选肥施肥对稻田氮磷流失防控十分重要。【拟解决的关键问题】为此, 根据江汉平原的降雨及直播稻的生长特点, 开展机插稻与直播稻施用等量氮的田间试验, 旨在揭示

收稿日期: 2020-02-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800500); 公益性行业(农业)专项(201203032)

作者简介: 乔月(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事水土环境与农业。E-mail: 1328474975@qq.com

通信作者: 朱建强(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土环境与涝渍灾害防控。E-mail: zyjb@sina.com

吴启侠(1982-), 高级实验师, 博士, 主要从事作物生产的水土环境调控研究。E-mail: qixiawu@yangtzeu.edu.cn

不同肥源氮及其不同基施、追施量对稻田径流氮及氨挥发损失的影响，以便为水稻不同播栽方式科学施肥和有效减少稻田氮素损失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在长江大学农学院基地标准径流小区进行，2019 年水稻生育期（5 月 29 日—9 月 24 日）平

均气温 27.5 ℃，降水量为 333.5 mm（图 1），日照时间 719.8 h。耕作层（0~20 cm）土壤基本性状为：pH 值 7.15、有机质量 28.25 g/kg、全氮量 2.13 g/kg、全磷量 1.15 g/kg、全钾量 15.41 g/kg、碱解氮量 113.05 mg/kg、速效磷量 12.89 mg/kg 和速效钾量 219.65 mg/kg。供试品种为深两优 332，属杂交稻，在湖北省作一季中稻栽培，全生育期 114 d 左右，株高 126 cm 左右，5 月 30 日播种，8 月下旬孕穗，9 月中下旬成熟。

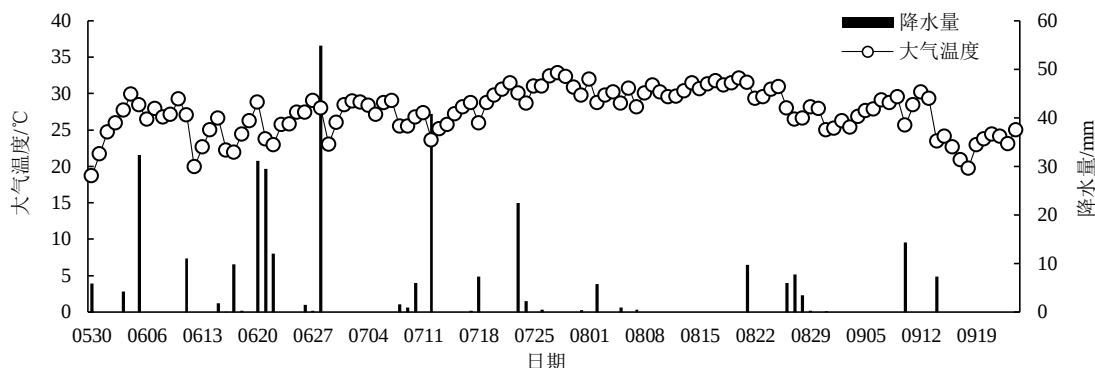


图 1 水稻生育期主要气象要素

Fig.1 Main meteorological elements in rice growth period

1.2 试验设计

试验采用裂区设计，主区为不同种植方式水稻（直播稻、机插稻），副区为 4 种氮肥管理：不施氮肥的空白对照（CK）、当地常规施肥（FFP）、缓控肥与尿素配施（CRF）和海藻多糖氮肥替代（HTN），具体施肥方案如表 1。试验共计 8 个处理，每处理 3 个重复，共 24 个试验小区。小区面积均为 50 m²，小区之间用薄膜和土埂隔开，防止小区之间窜水窜肥，每小区均有独立的灌溉系统和径流池。按照当地稻田耕作习惯，冬前进行翻耕，在水稻栽种前进行旋耕、泡田。机插稻于 5 月 29 日撒施基肥，施基肥后人工耙平，将工厂化育秧秧苗（秧龄 20 d）人工移栽到试验小区，种植密度为 25 cm×25 cm，每穴 3 苗，撒

肥-耙平-移栽-施分蘖肥前保持田间 2~3 cm 浅水层，6 月 9 日撒施分蘖肥，施肥后正常水位管理。直播稻于 5 月 30 日浅水层撒施基肥，施基肥后人工耙平，并将小区整成沟厢模式（小区中间开沟），厢宽 1.5 m，沟宽 0.3 m，沟深 0.1~0.2 m。播种前进行田间排水，保证田间湿润无水层，播种时进行人工划行均匀播种，播种量折干种为 22.5 kg/hm²，播种前需对种子进行浸泡和催芽，在芽长为 3 mm 左右时，适当摊开晾干。播种后 3 d 内进行化学除草，播种-三叶一心期采用厢面无水厢沟有水的水分管理模式，如遇强降水田面积水就要及时排水，6 月 11 日复水至田面 2~3 cm 浅水层，6 月 13 日撒施分蘖肥，之后水分管理与机插稻一致。

表 1 施肥方案

种植方式	处理	全生育期施肥量/(kg hm ²)			氮肥施用比例 (m _{基肥} :m _{分蘖肥})	提供基肥氮素 选用肥料	提供分蘖肥氮素 选用肥料
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O			
机插稻	CK	0	75	105	-	-	-
	FFP	180	75	105	7:3	普通复合肥	尿素
	CRF	0	75	105	7:3	控释掺混肥	尿素
	HTN	180	75	105	7:3	海藻多糖尿素	海藻多糖尿素
直播稻	CK	0	75	105	-	-	-
	FFP	180	75	105	4:6 ^[11]	普通复合肥	尿素
	CRF	0	75	105	7:3	控释掺混肥	尿素
	HTN	180	75	105	4:6	海藻多糖尿素	海藻多糖尿素

注 普通复合肥：N、P₂O₅、K₂O 质量比为 18:8:15；控释掺混肥：N、P₂O₅、K₂O 质量比为 24:12:12，氮素采用包膜技术控制养分释放，耕作层平均地温 25 ℃时养分释放期为 60 d；海藻多糖尿素：含 N 量≥46%，海藻多糖含量≥500 mg/kg。各处理磷肥、钾肥不够部分分别用过磷酸钙（含 P₂O₅ 量≥12%）和氯化钾（含 K₂O 量≥60%）补充，磷肥和钾肥均作基肥施入。

1.3 样品采集与测定

氨挥发采集与测定: 氨挥发通量采用通气法测定^[12]。通气法装置由无底 PVC 管制成, 外径 20 cm, 内径 19 cm, 高 50 cm, 上部接 1 个弯头, 防止雨水对氨挥发气体收集的影响。测定过程中分别将 2 块厚度均为 2 cm、直径为 20 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液后, 将 2 层海绵置于 PVC 管中, 下层的海绵距地面 15 cm, 上层的海绵与管顶部相平。下层海绵用于吸收土壤挥发出的氨气, 上层海绵用于防止空气中的氨气和灰尘等进入。土壤氨挥发的捕获于施肥后当天开始, 在各小区的不同位置, 分别放置 2 个捕获装置, 次日 10:00 取样。取样时, 将通气装置下层的海绵取出, 迅速装入密封袋中保存; 同时换上另一块刚浸过磷酸甘油的海绵。上层的海绵视干湿情况 3~7 d 更换 1 次。变动摆放位置后, 将装置重新放好, 开始下 1 次田间吸收。施肥后 1 周, 每天取样 1 次; 第 2 周, 每隔 3 d 取样 1 次; 第 3 周, 视测到的氨挥发数量多少, 每隔 3~5 d 取样 1 次, 以后取样间隔可延长到 7~10 d, 直至监测不到氨挥发时为止。把取下的海绵带回实验室, 分别放入 500 mL 塑料瓶中, 加 1 mol/L 氯化钾溶液 200 mL, 将海绵完全浸于其中, 振荡 1 h, 用 Alliance-Futura II 连续流动分析仪测定浸提液的铵态氮量。

田面水采集与测定: 水稻田面水采集与氨挥发采集时间一致, 多点取得田面水样品进行混合装入聚乙烯塑料瓶中, 带回实验室经真空泵抽滤后分析测定铵态氮。

径流水采集与测定: 根据直播稻的特点, 播种后应保持田间湿润无水层, 其余时间机插稻和直播稻在降雨过后, 按照水稻不同生育期的水管理方法进行排水, 各小区径流量通过带盖溢流桶收集, 量取径流量, 将径流水搅拌均匀后取混合样装入聚乙烯塑料瓶中带回实验室。直播稻分别于 5 月 30 日和 6 月 6 日产生径流, 机插稻全生育期无径流。采用 Alliance-Futura II 连续流动分析仪测定总氮、氨态氮和硝态氮量。

产量及产量构成因素测定: 于成熟期每小区选定约 3 m² 收获, 记录实际测产面积。脱粒并晒干, 风选清除杂质和瘪粒, 称量风干实粒总质量。在成熟期调查大田有效穗数求出每小区平均有效穗数, 并根据平均有效穗数进行取样, 在每个小区取样 5 蔸。记录每蔸有效穗数和茎蘖数。籽粒脱粒后采用水选法将实粒和瘪粒分开, 分开的样品用烘箱烘干 (无须完全脱水), 然后置于空气中放置至吸湿平衡 (相当于室内陈干样品的含水率)。称量实粒、瘪粒的风干总质量, 并从实粒中取 3 份 30.0 g 小样, 瘪粒中取 3 份 2.0 g 小样, 记录每份小样的粒数。所有小样置于烘箱中

80 °C 烘干至恒质量后称其干质量。完成产量构成因素 (每株穗数、穗长、结实率、千粒质量、生物量和收获指数) 的计算。

1.4 数据分析

应用 DPS 进行方差分析, LSD 法进行处理间多重比较, 利用 Excel 作图。

采用以下公式分别计算氮素径流流失量 (P , kg/hm²)、氮素流失率 (Y , %)、氨挥发通量 (X , kg/(hm² d))、氨挥发损失率 (R , %) 和氨挥发排放强度 (Q , kg/t)。

$$P=(A \times H \times 10^3 / 10^6) \times 10^4 / S, \quad (1)$$

$$Y=(P_N - P_0) / N \times 100\%, \quad (2)$$

$$X=B \times 10^{-6} / (J \times D \times 10^{-4}), \quad (3)$$

$$R=\sum(X_N - X_0) / N, \quad (4)$$

$$Q=\sum X \times C, \quad (5)$$

式中: A 为小区径流水氮素质量浓度 (mg/L); H 为流失体积 (m³); S 为小区面积 (m²); P_N 为施氮区氮素流失量 (kg/hm²); P_0 为不施氮区氮素流失量 (kg/hm²); N 为施氮量 (kg/hm²); B 为通气法单个装置每次测得的铵态氮量 (mg); J 为捕获装置的横截面积 (m²); D 为每次连续捕获的时间 (d); X_N 为施氮区累积氨挥发量 (累积氨挥发量是各测定时期的氨挥发通量之和^[13]) (kg/(hm² d)); X_0 为不施氮区氨累积挥发量 (kg/(hm² d)); C 为水稻产量 (t/hm²)。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理下田间氮素径流流失特征

直播稻全生育期共产生 2 次径流, 分别是 5 月 30 日排水播种, 6 月 6 日降水后 (降水量为 32.3 mm) 利于发芽而排水, 平均排水量分别为 655、211 m³/hm², 机插稻全生育期无径流产生。不同施氮处理下直播稻田氮素径流流失质量浓度及流失量见表 2, 由表 2 可以看出, 5 月 30 日、6 月 6 日不同施肥处理下总氮流失量分别为 7.76~25.55、0.15~0.32 kg/hm², 5 月 30 日氮素径流量占绝大部分, 主要是由于直播稻在 5 月 29 日刚施入基肥, 而 6 月 5 日为施肥 1 周后遇大雨排水。对江汉平原而言, 在基肥施入后 1 周遭遇强降水, 往往会造成稻田氮素随径流严重损失, 且直播稻田氮素径流流失量大于机插稻田。在整个生育期中, 不施肥的总氮流失量较低, 各施肥处理的径流总氮流失量呈现 FFP 处理 > HTN 处理 > CRF 处理, CRF 和 HTN 处理的氮素流失率分别比 FFP 处理降低了 3.0% 和 1.8%, 主要原因是 FFP 处理径流中总氮质量浓度显著高于其他 2 个施肥处理。CK、FFP、CRF、HTN

处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 Org-N 分别占总氮流失量的比例不同, CK 为 78.9%、1.9%和 19.1%, FFP 处理为 52.7%、1.5%和 45.7%, CRF 处理为 52.1%、1.4%, HTN 处理 46.4%, 52.8%、1.4%和 45.8%。可见, 水稻在整个生育期内径流水氮素形态以铵态氮为主, 无

机态氮中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流损失量远大于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 是由于尿素施入水田后在脲酶的作用下施入水田的尿素水解为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 从而使径流水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度增大, 从而导致流失量也增大。

表 2 不同施氮处理下直播稻田氮素径流流失量

Table 2 Nitrogen loss from surface runoff in the paddy fields for direct seeding rice under different nitrogen application

径流 产生时间	处理	流失质量浓度/(mg L^{-1})			流失量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)			
		TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	Org-N
5 月 30 日	CK	11.38c	9.78b	0.21c	7.76 c	6.33 c	0.13 c	1.30 b
	FFP	56.75a	21.47a	0.48a	25.55 a	13.60 a	0.34 a	11.61 a
	CRF	30.74b	18.35a	0.44a	20.39 b	10.66 b	0.24 b	9.47 a
	HTN	35.45b	20.72a	0.36b	22.46 b	11.96 b	0.25 b	10.25 a
6 月 6 日	CK	2.09a	0.30a	0.12c	0.30 a	0.03 a	0.02 d	0.24 a
	FFP	1.57b	0.36a	0.24b	0.32 a	0.05 a	0.06 b	0.21 a
	CRF	0.94d	0.12b	0.19b	0.15 b	0.04 a	0.04 c	0.07 b
	HTN	1.28c	0.18b	0.45a	0.27 a	0.04 a	0.07 a	0.16 ab

注 一种种植方式同列数值后不同字母表示不同处理间在 5%水平上差异显著, 下同。

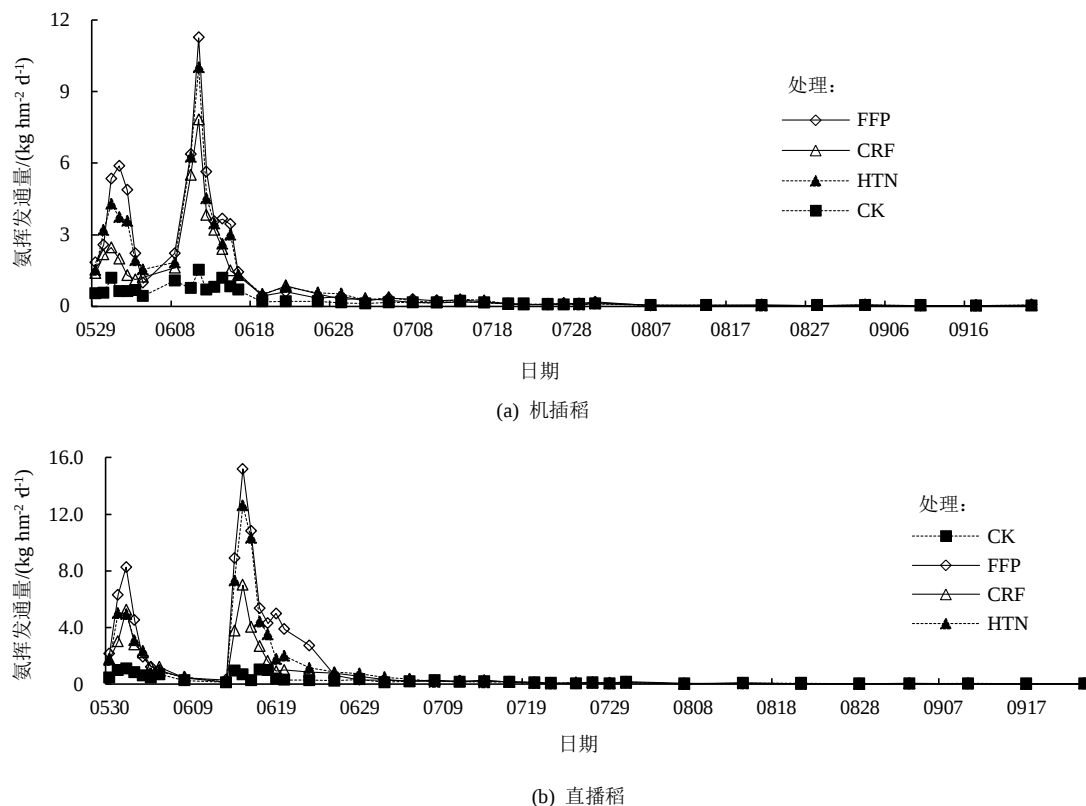


图 2 不同施氮处理下稻田的氨挥发通量动态过程

Fig.2 Dynamic process of ammonia volatilization flux in paddy fields under different treatments of nitrogen application

2.2 不同施氮处理下稻田的氨挥发通量

图 2 给出了不同施氮处理下稻田氨挥发通量, 从图 2 可以看出, 机插稻、直播稻施入基肥后稻田氨挥发迅速升高, 在基肥施入后 3 d 达到峰值, 峰值分别为 1.18~5.34 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ d})$ (机插稻)、1.10~8.27 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ d})$

(直播稻), 氨挥发通量达到峰值后迅速降低, 各处理氨挥发通量在基肥施入后第 10 天已降至无明显差异, 0.26~0.53 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ d})$ (机插稻), 0.2~0.51 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ d})$ (直播稻)。施入基肥后 2 d, 氨挥发通量峰值机插稻为 FFP 处理 > HTN 处理 > CRF 处理, 而直播稻为 FFP

处理>CRF 处理>HTN 处理,这是由于直播稻 CRF 处理基肥施氮量大于 HTN 处理,说明降低氮肥基施比例有助于降低稻田氮挥发。施入分蘖肥后,机插稻、直播稻氮挥发通量均在追肥后 2 d 达到峰值,峰值分别为 1.51~11.25 kg/(hm² d) (机插稻)、0.69~15.18 kg/(hm² d) (直播稻),随后逐渐降低趋于平缓,各处理氮挥发通量降至分蘖肥施入后第 10 天已至无明显差异。田间观察表明,氮挥发通量主要集中在施肥后 1 周,不施肥的氮挥发通量都处于较低水平状态,施肥处理的氮挥发通量表现为 FFP 处理>HTN 处理>CRF 处理。即相比普通施氮 FFP 处理,CRF 处理和 HTN 处理均可降低氮挥发通量。

2.3 不同施氮处理下稻田的氮挥发损失量及损失率

表 3 为不同施氮处理下不同时段稻田的氮挥发损失量及损失率。由表 3 可知,氮肥种类及施用量直接影响氮挥发损失。基肥施入后至分蘖肥施入前、分蘖肥施入后以及水稻全生育期,各处理的氮挥发损失量和损失率均为 FFP 处理>HTN 处理>CRF 处理。与 FFP 处理相比,在基肥施入后至分蘖肥施入前、分蘖肥施入后以及水稻全生育期,机插稻 CRF 处理的氮挥发损失率分别降低 10.1%、18.3%和 12.5%,机插稻 HTN 处理的氮挥发损失率分别降低 3.4%、6.7%和 4.3%,直播稻 CRF 处理的氮挥发损失率分别降低

25.5%、14.7%和 23.2%,直播稻 HTN 处理的氮挥发损失率分别降低 16.2%、3.4%和 12.2%。即施用缓控释肥和海藻多糖尿素能显著降低稻田氮挥发损失量。3 种施氮处理直播稻氮挥发损失率均大于机插稻,主要原因是基肥施入后分蘖肥施入前直播稻氮挥发损失率大于机插稻,FFP、CRF、HTN 处理基肥-分蘖肥期直播稻氮挥发损失率分别比机插稻高 19.5%、4.1%、6.7% (表 3)。直播稻 FFP、HTN 处理的氮肥基施量只有机插稻的 57.14%,而氮挥发损失量与机插稻相当;在相同的 CRF 处理下,基肥施入后至分蘖肥施入前直播稻的氮挥发损失量是机插稻的 1.37 倍,原因可能有 3 点:一是直播稻从施基肥到施分蘖肥的时间跨度要比机插稻长,机插稻为 12 d,直播稻为 15 d;二是直播稻施基肥后氮挥发通量峰值比机插稻高,直播稻施肥后 3 d 出现的氮挥发通量峰值是机插稻的 1.15~2.13 倍 (图 2);三是直播稻此时间段氮素利用率低,基肥施入后至分蘖肥施入前这段时间是直播稻从种子萌发至三叶一心的生育期,对氮素的需求量相对比较小,氮素利用率低于机插稻。

分析得出,将直播稻氮肥基施比例降到 40%,仍然有较高的氮挥发损失。所以,从降低氮挥发考虑,宜将直播稻氮肥基施比例降到 40%以下。

表 3 不同施氮处理下不同时段稻田的氮挥发损失量及损失率

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

种植方式	处理	总施氮量/ (kg hm ⁻²)	基肥-分蘖肥			分蘖肥后			总计	
			施氮量/ (kg hm ⁻²)	损失量/ (kg hm ⁻²)	损失率/%	施氮量/ (kg hm ⁻²)	损失量/ (kg hm ⁻²)	损失率/%	损失量/ (kg hm ⁻²)	损失率/%
机插稻	CK	0	0	5.78±0.56c	-	0.0	9.19±0.49d	-	14.97±1.04c	-
	FFP	180	126	25.88±2.59a	16.0	54.0	36.16±0.90a	49.9	62.04±2.04a	26.2
	CRF	180	126	14.24±2.33b	6.7	54.0	32.48±1.36b	43.1	46.7±3.69b	17.6
	HTN	180	126	21.62±2.32a	12.6	54.0	24.70±1.00c	28.7	46.32±2.82b	17.4
直播稻	CK	0	0	5.52±0.21c	-	0.0	7.57±0.84d	-	13.1±0.87d	-
	FFP	180	72	26.10±1.5a	35.5	108.0	56.27±4.12a	45.1	82.37±3.19a	38.4
	CRF	180	126	18.11±2.35b	10.0	54.0	17.73±2.27c	18.8	35.84±0.39c	12.6
	HTN	180	72	19.44±1.88b	19.3	108.0	47.09±1.86b	36.6	62.97±8.37b	27.7

2.4 氮挥发通量与田面水铵态氮浓度相关性分析

不同施氮处理下田面水 NH₄⁺-N 质量浓度如图 3。首先从铵态氮质量浓度总体的变化趋势看,机插稻整个生长期 CK 田面水铵态氮一直处于较低的水平,其他施肥处理在施用基肥后,铵态氮量均在施肥后第 2 天达到最大值,不同施肥处理的铵态氮质量浓度为 1.77~23.13 mg/L,第 3 天田面水铵态氮量迅速下降,分蘖肥各处理田面水铵态氮的变化与基肥相似,第 2 天田面水铵态氮量达到峰值,FFP、CRF 处理和 HTN

处理质量浓度大小分别为 30.45、25.28 和 25.02 mg/L,到了第 10 天逐渐趋近于 CK。直播稻在 5 月 29 日施入基肥,由于直播稻在三叶一心期前应保持田间湿润无水层状态,前面未能监测到田面水铵态氮量的变化。6 月 13 日施入分蘖肥 (施肥前田面水铵态氮量已与对 CK 相近),田面水 NH₄⁺-N 质量浓度在施入分蘖肥后第 2 天达到峰值,FFP、CRF 处理和 HTN 处理质量浓度大小分别为 57.08、34.04 和 68.01 mg/L。由此可以得出,直播稻的田面水 NH₄⁺-N 质量浓度高于机插稻。

机插稻氨挥发通量与田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度呈线性正相关，直播稻氨挥发通量与田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度呈二次曲线正相关（图 4，X、Y 分别表示田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度、氨挥发通量；**表示 1% 水平显著。）。机插稻决定系数 (R^2) 由大到小依次为 CRF

处理 > HTN 处理 > FFP 处理；直播稻的决定系数大小分别为 CRF 处理 > FFP 处理 > HTN 处理。由此可以得出 CRF 处理的田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度与氨挥发通量相关性最高，表明在 CRF 处理条件下，氨挥发通量受田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度的影响最大。

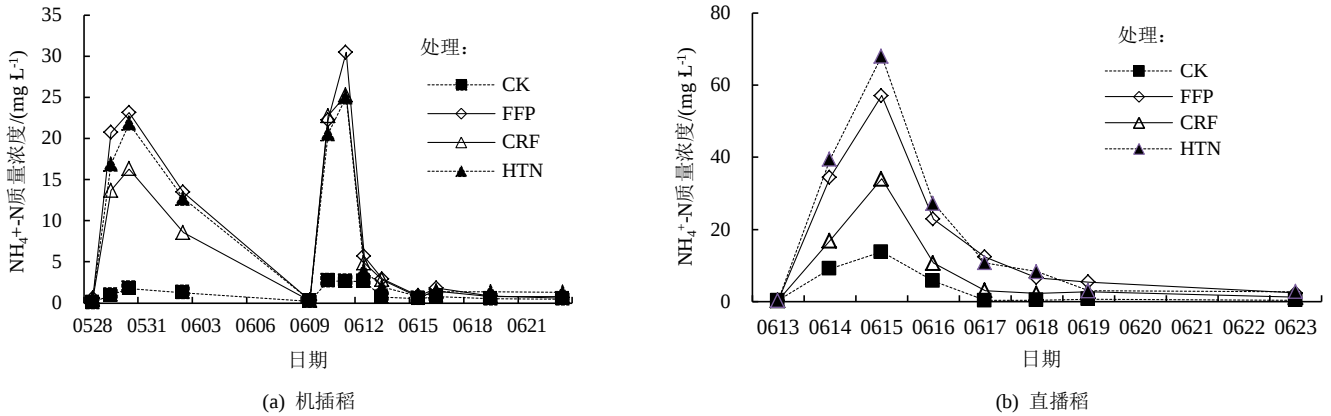


图 3 分蘖肥后稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度动态变化

Fig.3 Dynamic changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water after tiller in

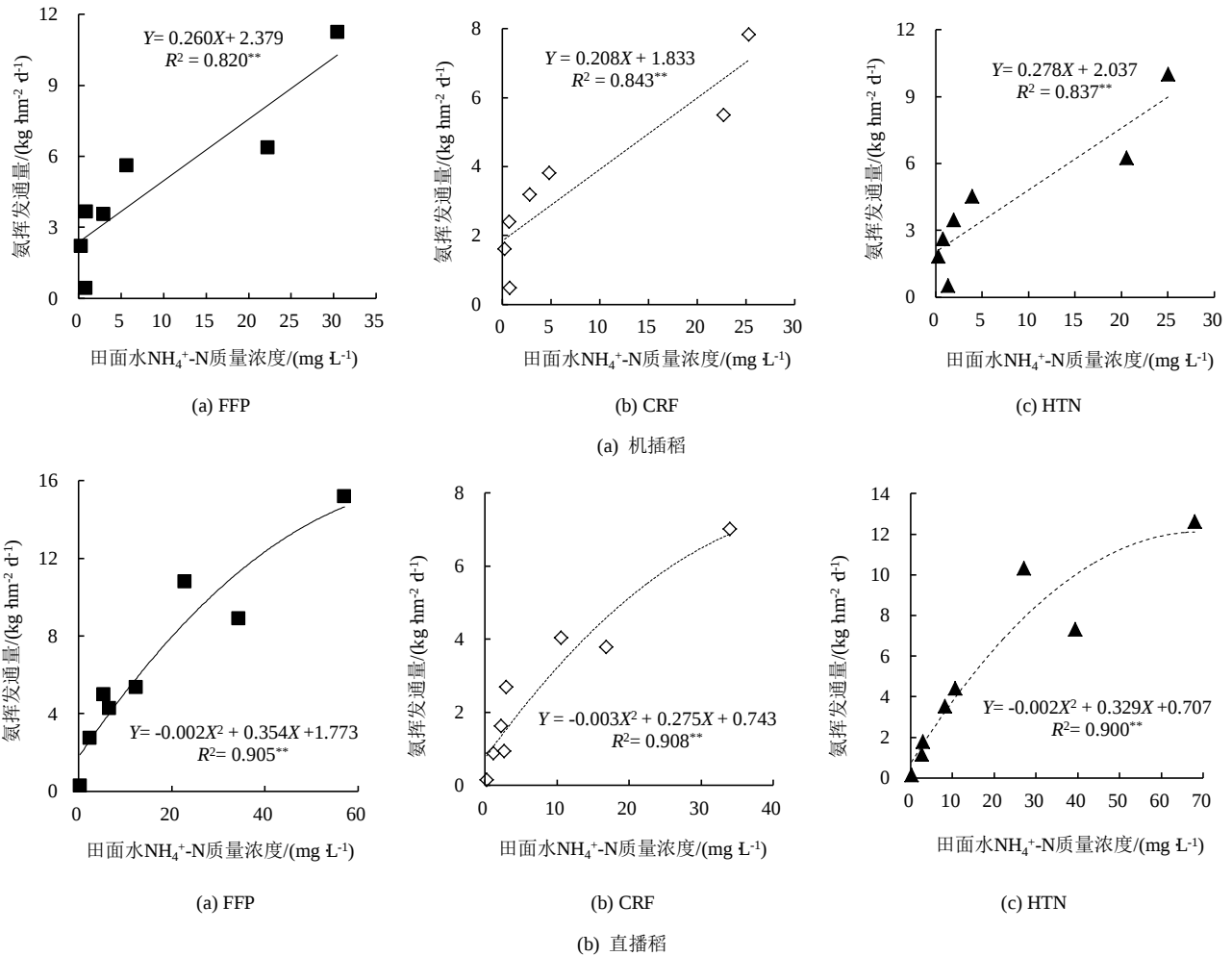


图 4 分蘖肥后稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度与氨挥发通量关系

Fig.4 Relationship between $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water and ammonia volatilization flux after rice tillering fertilizer applied

2.5 不同施氮处理下水稻的产量性状

不同施氮处理下 2 种植方式水稻产量及其构成因素影响见表 4。比较 CK、CRF 处理下机插稻与

直播稻的产量，可以看出在氮种类及其基施、追施完全相同的情况下，机插稻的产量高于直播稻，其主要原因是机插稻的结实率大于直播稻。从不同施肥处理

下水稻产量看，无论直播稻还是机插稻，均为 CRF 处理>HTN 处理>FFP 处理。与 FFP 处理相比，机插稻在 CRF、HTN 处理下分别增产 9.31%和 4.70%，直播稻分别增产 9.25%和 4.91%。从产量构成因素看，与 FFP 处理相比，CRF、HTN 处理增产的原因是这 2 种施氮处理能够增加每穗粒数和结实率。

表 4 不同施氮处理下水稻的产量性状

Table 4 Yield components under different nitrogen application

种植模式	处理	每穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	实际产量/(kg hm ⁻²)
直播稻	CK	160.62±0.6d	66.42±1.38c	22.78±0.38b	4128±132c
	FFP	175.14±1.24c	74.86±2.59b	23.42±0.29ab	8817±201c
	CRF	184.62±0.61a	80.88±0.92a	23.63±0.28a	9633±154.6a
	HTN	180.54±0.96b	78.80±0.41a	23.17±0.07b	9250±187b
机插稻	CK	161.95±1.32d	69.42±0.78c	21.39±0.22b	4295±120.55c
	FFP	176.83±0.83c	77.76±1.32b	22.20±0.15b	9026±265.4b
	CRF	184.25±0.45a	81.56±0.73a	23.73±0.98a	9866±85a
	HTN	180.76±0.0.66b	79.69±0.83ab	22.39±0.18b	9450±216ab

2.6 不同施氮处理下稻田的氨挥发排放强度

氨挥发排放强度是单位籽粒产量的氨挥发量，可以作为环境效应的判定指标，机插稻、直播稻的氨挥发强度见表 5。机插稻、直播稻氨挥发强度大小均为 FFP 处理>HTN 处理>CRF 处理，同时直播稻的氨挥发排放强度较高于机插稻。与 FFP 处理相比，机插稻 CRF 和 HTN 处理的氨挥发强度分别降低 43.1%和 17.8%，直播稻分别降低了 53.3%和 26.8%。总结得出，机插稻的籽粒产量高于直播稻，机插稻的氨挥发排放强度较低于直播稻，机插稻的氨挥发损失低于直播稻。在机插稻和直播稻中均以 CRF 处理的氨挥发排放强度最低。由此可见，通过缓释尿素与普通尿素配施可降低稻田氨挥发排放强度，从而减少氨挥发带来的环境污染，进而增加水稻产量。

表 5 不同施氮处理下稻田的氨挥发排放强度

Table 5 Ammonia volatilization emission intensity in paddy fields under different nitrogen application

种植模式	处理	氨挥发排放强度/(kg t ⁻¹)
机插稻	CK	3.34±0.29c
	FFP	7.07±0.51a
	CRF	4.02±0.31b
	HTN	5.81±0.24b
直播稻	CK	3.18±0.33c
	FFP	10.46±0.62a
	CRF	4.29±0.24a
	HTN	7.61±0.62b

3 讨论

3.1 施氮对径流水氮素浓度及流失量的影响

研究表明，不施肥处理的氮素质量浓度较低，施肥处理的氮素质量浓度明显升高，TN 径流损失量

较大，直播稻 5 月 29 日施入基肥，5 月 30 日播种前排水，TN 的径流损失量较大，FFP、CRF 处理和 HTN 处理分别为 25.55、20.39 kg/hm² 和 22.46 kg/hm²，6 月 6 日遇降雨排水，TN 的径流损失量较低，FFP、CRF 处理和 HTN 处理分别为 0.32、0.15 kg/hm² 和 0.27 kg/hm²，说明施肥和降雨时间间隔是影响稻田养分径流流失的主要因素之一^[13]。关于缓控释氮肥对稻田氮素流失的影响，纪雄辉等^[14]研究表明，控释氮肥能够显著降低施肥后 15 d 内稻田田面水和径流的氮质量浓度，显著减轻水稻生育前期的总氮径流损失。研究表明，FFP 处理径流总氮流失量平均为 25.87 kg/hm²，通过缓控释肥的使用均能够降低稻田径流总氮质量浓度和总氮流失量。这主要是因为与普通复合肥比较，缓控释肥通过包膜以及抑制剂的使用，减缓了尿素的水解速度，控制了水稻生育前期的土壤氮素养分释放速率，减少硝化反硝化作用引起氮素损失的同时，减轻了水稻生育前期田间氮素径流流失风险^[15]。无机氮是稻田氮素的主要形态^[16]，且铵态氮是径流水氮素损失主要形态，本研究结果与前人研究的结果一致^[16]。与不施肥处理相比，施肥处理的铵态氮损失量明显增加，且 FFP 处理>CRF 处理>HTN 处理，说明铵态氮又与氮肥类型有关。因此，本研究不同类型缓控释肥料均能有效减少稻田氮素径流损失。

3.2 施氮对稻田氨挥发的影响

本试验表明，直播稻和机插稻的氨挥发第 3 天达到峰值，施分蘖肥后第 2 天出现峰值，施肥后氨挥发的持续时间 10 d 左右；相关研究报道，普通尿素在土壤脲酶的作用下迅速水解，造成田面水 NH₄⁺-N 质量浓度急剧升高，易在短时间（1~2 d）内产生氨挥发；控释尿素延缓尿素的溶解和释放，故在前几天氨挥发通量相对较小^[15, 17-18]，研究表明，在基肥和分

蘖肥后,直播稻和机插稻氨挥发通量的峰值均为 FFP 处理>HTN 处理>CRF 处理。目前,控释尿素是一种降低氨挥发损失、提高氮肥利用率的有效措施^[19]。本研究表明,机插稻中不同施氮处理的稻田氨挥发损失量占总施氮量的比例为 15.5%~28.0%,直播稻中不同施氮处理的稻田氨挥发损失量占总施氮量的比例为 17.0%~40.2%,直播稻的氨挥发损失量均大于机插稻,主要是因为直播稻前期的水管理不同,根据本研究结果结合直播稻的水管理特征,建议基肥期适当减少氮肥施用量,适当的氮肥后移能够减少氨挥发的损失量。本研究结果与前人研究的结果一致^[19]。播稻和机插稻均在施肥 1~3 d 达到峰值,随后逐渐下降。与施常规氮肥尿素相比,缓控释氮肥能够降低氨挥发损失量。

3.3 施氮对水稻产量的影响

本研究结果表明,与施常规普通尿素相比较,在施氮总量相同、磷钾肥完全相同的条件下,通过基施适量控释尿素和普通尿素、分蘖肥追施普通尿素(即 CRF 处理)能够保证水稻产量,在每穗粒数、结实率和产量上都比 FFP 处理高,对于直播稻分别增加 4.8%、8.0%和 9.3%,对于机插稻分别增加 4.2%、4.9%和 9.3%,这与一些研究得出的施用缓控释肥能提高水稻产量的结论基本一致^[20-24]。

4 结 论

1) 在基肥施入田间后 1 周遭遇强降水,造成稻田氮素随径流严重损失,且流失风险直播稻大于机插稻,径流氮素损失以铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)为主。在水稻全生育期,径流氮总流失量呈 FFP 处理>HTN 处理>CRF 处理。

2) 稻田氨挥发通量的峰值出现在施肥 2~3 d,氨挥发主要集中在施肥后 1 周。全生育期内,氨挥发通量、损失率和氨挥发强度,以不施肥处理的最低。

3) 不同种植方式下,不同施氮处理的氨挥发损失与氨挥发强度不同。在施肥总量控制和磷、钾肥施用完全相同的情况下,选择适当种类的氮肥进行基肥、分蘖肥合理配施,既能减少氮素田间损失、提高氮素利用率,还可以增加水稻产量。

参考文献:

- [1] EGHBALL B, GILLEY J E, KRAMMERL A, et al. Narrow grass hedge effects on phosphorus and nitrogen in runoff following manure and fertilizer application [J]. Soil Water Conservation, 2000, 55(2): 172-176.
- [2] 袁久芹,梁音,曹龙熹,等.红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J].土壤,2015,47(2): 400-407.

- YUAN Jiuqin, LIANG Yin, CAO Longxi, et al. Comparison of flow and sediment reduction benefits of different hedgerow allocation modes in red soil sloping farmland[J]. Soil, 2015, 47(2): 400-407.
- [3] 黄益宗,冯宗炜,张福珠.农田氮损失及其阻控对策研究[J].中国科学院研究生院学报,2000,17(2): 49-58.
- HUANG Yizong, FENG Zongwei, ZHANG Fuzhu. Nitrogen loss in farmland and its prevention and control countermeasures[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2000, 17(2): 49-58.
- [4] 苏成国,尹斌,朱兆良,等.稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J].应用生态学报,2003,14(11): 1 884 -1 888.
- SU Chengguo, YIN Bin, ZHU Zhaoliang, et al. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer in rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice season[J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1 884 -1 888.
- [5] 宋勇生,范晓晖.稻田氨挥发研究进展[J].生态环境,2003,12(2): 240 -244.
- SONG Yongsheng, FAN Xiaohui. Research progress on ammonia volatilization in rice fields[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2): 240-244.
- [6] GUO H Y, WANG X R, ZHU J G. Quantification and index of nonpoint source pollution in Taihu Lake region with GIS [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2/3): 147-156.
- [7] 赵冬,颜廷梅,乔俊,等.太湖地区稻田氮素损失特征及环境效应分析[J].生态环境学报,2012,21(6): 1 149-1 154.
- ZHAO Dong, YAN Tingmei, QIAO Jun, et al. Analysis of nitrogen loss characteristics and environmental effects in paddy fields in Taihu lake region[J]. Journal of Ecological Environment, 2012, 21(6): 1 149-1 154.
- [8] 曹志洪,林先贵,杨林章,等.“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义[J].土壤学报,2006,43(2): 256-260.
- CAO Zhihong, LIN Xiangui, YANG Linzhang, et al. The function of “paddy circle” in protecting the urban and rural ecological environment II. The accumulation and migration of nitrogen nutrients in paddy soil and its ecological environmental significance[J]. Acta Pedologica Sinica 2006, 43(2): 256- 260.
- [9] ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake Region of China[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2012, 156(1): 1-11.
- [10] 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): 23-28, 33.
- LI Juan, LI Songhao, WU Qifeng, et al. Effects of different fertilization treatments on nitrogen runoff and leakage losses in paddy fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 23-28, 33.
- [11] 侯文峰,李小坤,李云春,等.氮肥运筹对鄂南直播稻生长、产量及氮素吸收的影响[J].中国稻米,2014,20(5): 22-26.

- HOU Wenfeng, LI Xiaokun, LI Yunchun, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on the growth, yield and nitrogen absorption of direct seeding rice in southern Hubei[J]. China Rice, 2014, 20(5): 22-26.
- [12] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 7(2): 205-209.
- WANG Chaohui, LIU Xuejun, JU Xiaotang, et al. In-situ Determination of Ammonia Volatilization in Field Soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2002, 7(2): 205-209.
- [13] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氮挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2 102-2 112.
- HUANG Siyi, TIAN Chang, XIE Guixian, et al. The main mechanism and appropriate dosage of controlled release urea for reducing ammonia volatilization in double-cropping rice fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(12): 2 102-2 112.
- [14] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 施用尿素和控释肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2 521- 2 530.
- JI Xionghui, ZHENG Shengxian, LU Yanhong, et al. Nitrogen dynamics in surface water of double cropping rice fields with urea and controlled release fertilizers and their runoff loss laws[J]. China Agricultural Science, 2006, 39(12): 2 521-2 530.
- [15] DI HJ CAMERON K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures[J]. Agric Ecosyst Environ, 2005, 109(3): 202-212.
- [16] 吴俊, 樊剑波, 何园, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1 561-1 566.
- WU Jun, FAN Jianbo, HE Yuan, et al. Study on Dynamic Changes of Nitrogen and Runoff Loss in Paddy Field Surface Water under Different Decreasing Fertilization Conditions[J]. Journal of Ecological Environment, 2012, 21(9): 1 561-1 566.
- [17] 杨越超, 耿毓清, 张民, 等. 膜特性对包膜控释肥养分控释性能的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 23-30.
- YANG Yuechao, GENG Yuqing, ZHANG Min, et al. Effect of Film Characteristics on Nutrient Controlled Release Performance of Coated Controlled Release Fertilizers[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 23-30.
- [18] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氮挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1 449-1 457.
- ZHOU Liping, YANG Liping, BAI Youlu, et al. Effects of Different Slow Release Nitrogen Fertilizer Treatments on Ammonia Volatilization and Nitrogen Use in Summer Maize Fields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1 449-1 457.
- [19] 刘汝亮, 王芳, 王开军, 等. 不同类型肥料对东北地区稻田氮磷损失和水稻产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 63-68.
- LIU Ruliang, WANG Fang, WANG Kaijun, et al. Effects of different types of fertilizers on the loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields and rice yield in Northeast China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 63-68.
- [20] TRINH Y H, KUSHAARI K, SHUIB A S, et al. Modeling the re-lease of nitrogen from controlled release fertilizer: Constant and de-cay release[J]. Biosystems Engineering, 2015, 130: 34-42.
- [21] 张木, 唐栓虎, 黄巧义, 等. 缓释尿素配施普通尿素对双季稻养分的供应特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3 985-3 995.
- ZHANG Mu, TANG Shuanhu, HUANG Qiaoyi, et al. Nutrient supply characteristics of double cropping rice with slow release urea combined with common urea[J]. China Agricultural Sciences, 2018, 51(20): 3 985-3 995.
- [22] 王玉红, 王长松, 陈莉萍, 等. 树脂包膜尿素在水稻上的应用效果[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 126-128.
- WANG Yuhong, WANG Changsong, CHEN Liping, et al. Application effect of resin coated urea on rice[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(9): 126-128.
- [23] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 307-316.
- XU Xianju, MA Hongbo, NING Yunwang, et al. Effects of slow release nitrogen application on annual crop yield and nitrogen use efficiency of rice-wheat rotation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2): 307-316.
- [24] 陈建生, 徐培智, 唐栓虎, 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, 1(10): 1 868-1 871.
- CHEN Jiansheng, XU Peizhi, TANG Shuanhu, et al. Nutrient utilization rate and yield increase effect of one-time base application of controlled release fertilizer on rice[J]. Journal of Applied Ecology, 2005, 1(10): 1 868-1 871.

Nitrogen Loss from Surface Runoff and Ammonia Volatilization from Paddy Field as Impacted by Different Fertilizers and Planting Methods

QIAO Yue, ZHU Jiangqiang*, WU Qixia*, XIE Chunjiao, LI Minghui, HUANG Siqing

(Hubei Key Laboratory of Waterlogging Disaster and Agricultural Use of Wetland, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: 【Objectives】 Nitrogen loss from agricultural soils is an environmental concern worldwide and the purpose of this paper is to investigate the impact of the types of nitrogen fertilizers and planting methods on reducing nitrogen loss from surface runoff and ammonia volatilization from paddy field. 【Method】 The experiment was conducted in a field with the rice established either from machine transplanting (MTR) or direct drill (DSR). Added to these were four nitrogen fertilizations: conventional fertilization (FFP), slow-controlled fertilizer combined with urea (CRF) and seaweed polysaccharide nitrogen fertilizer (HTN), with no nitrogen application as control (CK). In each treatment, we measured nitrogen loss from the surface runoff and ammonia volatilization. 【Result】 Nitrogen lost from surface runoff was dominated by ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), with the loss from the drainage prior to the planting accounted for approximately 52% of the total nitrogen loss from the surface runoff. The impact of fertilizers on total nitrogen loss from the surface runoff was ranked in the order of $\text{FFP} > \text{HTN} > \text{CRF}$, the same as the loss rate and intensity of ammonia volatilization (AV) for both MTR and DSR. Compared with FFP, CRF and HTN each in combination with MTR reduced the AV loss during the whole growth season by 12.5% and 4.3% respectively, with their associated AV intensity reduced by 43.1% and 17.8% respectively; when combining each with DSR, they reduced AV loss rate by 23.2% and 12.2% respectively, with their associated AV intensity reduced by 53.3% and 26.8% respectively. Compared with FFP, CRF and HTN increased the yield by 9.31% and 4.70%, respectively, for rice planted using MRT, and 9.25% and 4.91%, respectively, for rice planted using DSR. 【Conclusion】 During the whole growth season, planting rice using DSR increased the AV flux, nitrogen loss rate and AV intensity than planting with MTR. The impact of fertilizers on nitrogen loss from the surface runoff was ranked in the order of $\text{FFP} > \text{HTN} > \text{CRF}$. When the amounts of all applied nutrients were the same, selecting an appropriate nitrogen fertilizer with a rational combination with basal fertilization and tillering-stage dressing can not only reduce nitrogen loss, but also improve nitrogen use efficiency and ultimate yield.

Key words: nitrogen loss; surface runoff; ammonia volatilization; machine-transplanting; direct drill

责任编辑：赵宇龙

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部