

不同施肥类型对稻田氮素流失的影响

陈子薇¹, 应珊珊¹, 刘银秀², 叶波², 董越勇², 姜培坤¹

(1.浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 2.浙江省农业农村生态与能源总站, 杭州 310012)

摘要: 采用田间试验探究了不同施肥处理对稻田氮素流失的影响, 其中不同施肥包括对照(CK)、常规施肥(CT)、有机肥替代(BS)和炭基肥(CB)4 个处理。结果表明: CB 和 BS 组对降低稻田氮素径流流失的效果显著($p < 0.05$), 其中稻田铵态氮的径流流失总量 CT 组(20.08 kg/hm^2) > BS 组(15.53 kg/hm^2) > CB 组(12.68 kg/hm^2) > CK 组(0.63 kg/hm^2)。通过估算不同深度土壤的铵态氮与硝态氮淋溶流失量可知, BS 和 CB 组对降低稻田氮素淋溶流失的效果有限。CT、BS 和 CB 组中无机氮的表面径流流失总量占施氮量的 $5.30\% \sim 8.30\%$, 淋溶流失总量占施氮量的 $0.21\% \sim 0.27\%$, 说明氮素流失以径流为主。各施肥处理(CT、BS、CB)分别增产 18.3% , 28.4% , 24.9% , 达显著水平($p < 0.05$)。研究结果说明施用炭基肥和有机肥可显著减少稻田的氮素流失。

关键词: 氮素流失; 炭基肥; 稻田; 径流; 淋溶

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0036-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.005

Effects of Different Fertilizer Types on Nitrogen Loss in Paddy Field

CHEN Ziwei¹, YING Shanshan¹, LIU Yinxiu², YE Bo², DONG Yueyong², JIANG Peikun¹

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University,

Hangzhou 311300; 2. Agricultural Rural Ecology and Energy Station of Zhejiang, Hangzhou 310012)

Abstract: This study applied a field experiment to investigate the effects of different fertilizer types on nitrogen loss in a paddy field. The fertilizer types included control (CK), conventional formula fertilizer (CT), partial replacement of organic fertilizers to chemical fertilizers (BS) and carbon-based fertilizer (CB). The results showed that the BS and CB had significant effects on reducing nitrogen runoff loss in the paddy field ($p < 0.05$) and the total runoff loss of ammonium decreased in the following order: CT (20.08 kg/hm^2), BS (15.53 kg/hm^2), CB (12.68 kg/hm^2), CK (0.63 kg/hm^2). The estimated nitrogen leaching loss showed that BS and CB had no significant effects on reducing nitrogen leaching loss from the paddy field. The inorganic nitrogen (ammonium and nitrate) runoff loss under CT, BS and CB accounted for $5.26\% \sim 8.31\%$ of fertilizer application, while leaching loss accounted for $0.21\% \sim 0.27\%$, demonstrating that runoff was the main way of inorganic nitrogen loss in the paddy field in this study. The fertilization treatments of CT, BS and CB increased rice yield by 18.3% , 28.4% , and 24.9% , respectively ($p < 0.05$). In summary, the application of carbon-based fertilizer and organic fertilizer could significantly reduce the nitrogen loss in the paddy field.

Keywords: nitrogen loss; carbon-based fertilizer; paddy field; runoff; leaching

稻田是我国重要的耕地类型, 2018 年全国水稻种植面积占粮食作物耕地面积的 25.79% 。实际水稻生产中所采用的传统施肥方式氮肥利用率较低, 氮素极易随着径流水和淋溶水进入地表、地下水^[1], 从而导致严重的农业面源污染问题。

径流损失是稻田的重要氮素流失途径之一, 农田氮素通过径流流失进入湖泊中的氮量可占总入湖氮量的 $10\% \sim 20\%$ ^[2]。陈小峰^[3]研究发现, 在太湖水体中氮素的径流

流失量对面源污染的贡献率可高达 61.5% ; 王新霞等^[4]在浙江湖州市的研究表明, 在 2017 年水稻生长季铵态氮累计径流流失量为 $2.40 \sim 4.95 \text{ kg/hm}^2$, 硝态氮累计径流流失量为 $1.15 \sim 1.34 \text{ kg/hm}^2$ 。影响稻田径流流失的因素有施肥强度、施肥种类和年降水等。刘琛等^[5]的试验发现, 各施肥处理组径流水中氮素流失量差异显著, 均与年降水量存在明显正相关关系。田昌等^[6]研究了施肥强度对双季稻氮素径流流失的影响发现, 减氮 $10\% \sim$

收稿日期: 2020-08-03

资助项目: 浙江省科学技术厅重点研发项目(2019C03121); 国家自然科学基金项目(41907074)

第一作者: 陈子薇(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业资源利用研究。E-mail: vitachan1030@outlook.com

通信作者: 姜培坤(1963—), 男, 教授, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

30%的控释肥可以显著减少径流水中铵态氮和硝态氮的流失量,其范围分别为 27.8%~40.3%和 25.0%~37.5%。李文兵^[7]研究了不同施肥种类对径流流失的影响表明,相较于常规施肥,在稻田施用有机肥、包膜肥的处理下田面水 TN 浓度分别降低 19.5%,60.7%,从而控制了氮素径流流失风险。

淋溶损失也是农田氮素流失的重要途径,可达施氮量的 8%^[8]。朱兆良等^[9]研究了不同施肥时期的稻季硝酸盐淋溶损失量发现,水稻施基肥后 1 个月的时间内(6 月下旬至 7 月底)的氮素流失量最大,可占到施氮量的 1.0%~1.9%;Li 等^[10]对太湖地区直播水稻田进行了 2 年的试验发现,被作物吸收利用的氮仅占施氮量的 31.5%,60,120 cm 深处土壤的氮素淋溶损失量占总施氮量的 6.8%和 2.7%。

为了应对稻田氮素的大量流失,已有研究^[11]通过采用不同的肥料类型,筛选出可有效削减氮素损失的施肥类型,例如有机肥替代化肥作为一种优化施肥类型,已被证明可在实现作物增产的基础上提高氮素利用效率,减少氮素流失风险。向土壤中施加有机肥,一方面可提高土壤有机质含量,增加还原酶活性,有效抑制硝化反应的进行,从而提高作物的氮素利用效率^[12];另一方面,当有机肥被微生物分解时,有机质的分解产物将矿物质颗粒黏合成微团聚体,大量微团聚体通过胶结作用生成土壤团聚体,从而提高土壤持水保肥能力^[13]。朱文博等^[14]研究表明,相较于单施化肥,有机肥替代部分化肥处理可使稻田 TN 径流损失量降低 1.1%~33.2%;张敏等^[15]研究发现,相较于常规施肥模式,菜籽饼有机肥与化肥混施的处理能减少氮素淋溶和径流损失 21%~24%,并提高水稻产量 28.7%~42.7%。

除有机肥替代化肥这一优化施肥类型,也有研究^[16]认为,生物炭与肥料混合制成的一种新型的长效肥料——炭基肥,也可起到缓释养分、降低养分淋失风险,从而提高氮肥利用率的作用。炭基肥减少氮素流失的机制与施用有机肥料有所不同,施用炭基肥或添加生物质炭改良剂是通过生物炭表面的多孔结构对 NH_4^+ 、 NO_3^- 较强的吸持能力,来减少土壤氮素的流失^[17]。同时生物炭对有机质也具有极高吸附亲和力,通过吸附作用固定限制有机质的运动,从而有效抑制了有机氮的矿化,以达到缓释养分的效果^[18]。乔志刚等^[19]研究证明,生物质炭肥配合尿素的施用,相较于常规施肥,可以提高氮素利用率 37.4%;陈琳等^[20]研究发现,不同种类炭基复混肥的氮素偏生产力较对照均有显著提高。但国内外关于炭基肥在减少稻田氮素流失的应用论文记载仍较少,仅有的研究多局限在对水稻产量及氮素利用率^[21]、土壤性质改良^[22]等方面的影响,没有具体分析炭基肥的施用对

氮素流失途径以及流失量的影响。

因此,本研究将采用炭基肥、有机肥替代等优化施肥类型与常规施肥类型,分析比较不同施肥类型下稻田中氮的地表径流流失与淋溶流失特征,探究炭基肥的施用对控制稻田氮素流失作用,为水稻的科学施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设置在桐乡市屠甸镇(30°28′—30°47′N, 120°17′—120°39′E),位于浙江省北部杭嘉湖平原。试验区土壤为青紫泥水稻土,基本理化性质为:pH 为 6.22,有机质含量 14.50 g/kg,全氮含量 1.17 g/kg,全磷含量 0.56 g/kg,有效磷含量 4.90 mg/kg,速效钾含量 119.00 mg/kg。

1.2 试验设计

本研究采用田间小区试验,每小区面积为 32 m²。设 4 组处理,3 次重复,共 12 个小区(图 1)。为防止发生测渗和串灌,各小区之间均用水泥浇灌了宽 20 cm、深 30 cm 的水泥田埂。每个小区均配备 1 个单独的排水口和田间径流池以采集径流水。本研究假设田间最高积水深度为 8 cm,超过 8 cm 便会产生表面径流。每个小区均在 15,30,60 cm 深度安装有负压式陶土头土壤溶液采集器,用于原位提取土壤淋溶水。

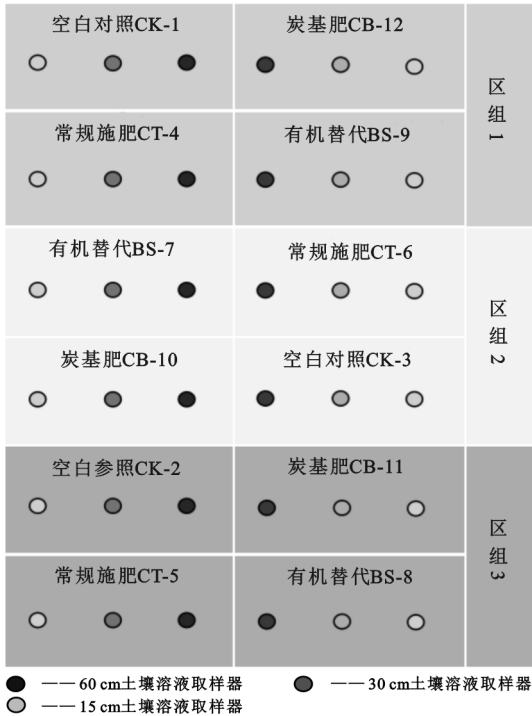


图 1 不同深度土壤溶液取样器布设示意

不同施肥类型的配施为:(1)对照(CK),不施肥;(2)常规施肥(CT);(3)有机肥替代(BS),等氮素含量,有机肥(菜籽饼)替代 50%化肥;(4)施用炭基肥(CB),等氮量炭基肥替代化肥。本研究参照当地经验化肥施用量:氮肥为 270 kg/hm²(以 N 计),磷肥

75 kg/hm² (以 P₂O₅ 计), 钾肥 150 kg/hm² (以 K₂O 计)。常规施肥与有机肥替代分二次施入: 50% 作为基肥, 50% 作为追肥; 其中有机肥替代中, 有机肥作为基肥施入, 化肥用作追肥。炭基肥作为基肥一次性施入。化肥和有机肥投入后氮磷钾养分不足部分依次用尿素、钙镁磷肥和氯化钾补充, 保证各处理组之间氮磷钾的施入量相等。

试验水稻品种为“浙优 18”, 2019 年 6 月 14 日施基肥, 6 月 16 日移栽插秧, 6 月 27 日施追肥, 并于 2019 年 11 月 4 日收获。由图 2 可知, 水稻生长期间共进行 4 次灌溉, 分别为 6 月 14 日、8 月 4 日、9 月 28 日和 10 月 12 日, 并记录每次灌溉水量; 烤田时间为 7 月 27 日至 8 月 3 日。

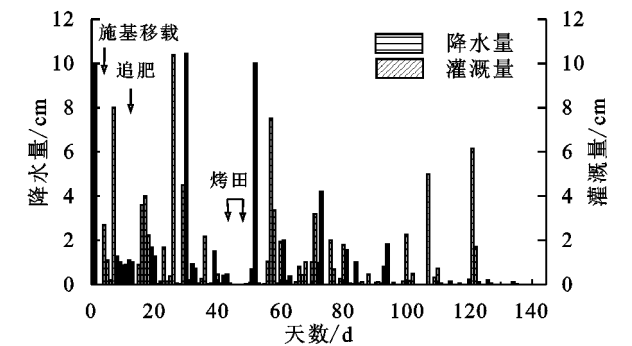


图 2 水稻生长季日降水量及灌溉量

1.3 测定项目与方法

采集表层 0—15 cm 的新鲜土样, 风干过筛后用于测定土壤基本理化性质。土壤 pH 采用酸度计法测定 (土: 水=1: 2.5), 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定, 全氮采用 Elementar 公司 VarioEL cube 高精度元素分析仪测定, 有效磷用碳酸氢钠浸提—钼酸铵比色法测定, 速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法^[23]测定。

施基肥前与水稻收割后分别采集 0—20, 20—40, 40—60 cm 的新鲜土样, 采用称重法测定土壤初始与末期含水量。若产生表面径流, 降雨停止后记录池内径流水体积, 采集水样测定铵态氮和硝态氮含量。铵态氮、硝态氮的测定分别采用纳氏试剂光度法和紫外分光光度法在 AMS 公司 Smartchem 200 全自动间断化学分析仪完成。每隔 7~10 天通过土壤溶液取样器抽取 15, 30, 60 cm 的土壤淋溶水, 测定水样中铵态氮、硝态氮浓度, 测定方法同上。气象数据来源于国家气候中心 (<http://date.cma.cn>)。

1.4 数据处理

使用 Excel 软件进行数据的处理与分析, 使用 SPSS 和 Origin 软件进行统计分析 & 绘图, Duncan 法进行多重比较。

本研究通过第 i 次径流量 R_i 与对应径流中铵态氮 $C_{R-NH_4^+ i}$ 、硝态氮浓度 $C_{R-NO_3^- i}$ 相乘, 计算获得整个水稻生长季内铵态氮 $L_{R-NH_4^+}$ 硝态氮径流流失

量 $L_{R-NO_3^-}$, 计算公式为:

$$L_{R-NH_4^+} = \sum_{i=1}^n C_{R-NH_4^+ i} \times R_i \quad (1)$$

$$L_{R-NO_3^-} = \sum_{i=1}^n C_{R-NO_3^- i} \times R_i \quad (2)$$

本研究利用 Hydrus-1D 模型估算土壤淋溶量。已知降雨数据、灌溉数据、径流数据, 水稻生长系数与稻季初始、末期土壤含水量, 并利用彭曼公式估计潜在作物蒸散量^[24], 作物参数与叶面积参数参照 Li 等^[25]文献资料, 计算获得水稻生长期的蒸散量, 代入 Hydrus-1D 模型中, 模拟获得土壤淋溶量。再通过第 j 次所采集淋溶水中铵态氮 $C_{L60-NH_4^+ j}$ 与硝态氮浓度 $C_{L60-NO_3^- j}$ 与对应时间段的淋溶总量 Le_j 相乘, 计算获得铵态氮 $L_{LeL60-NH_4^+}$ 、硝态氮淋溶流失总量 $L_{LeL60-NO_3^-}$, 公式为:

$$L_{LeL60-NH_4^+} = \sum_{j=1}^k C_{L-NH_4^+ j} \times Le_j \quad (3)$$

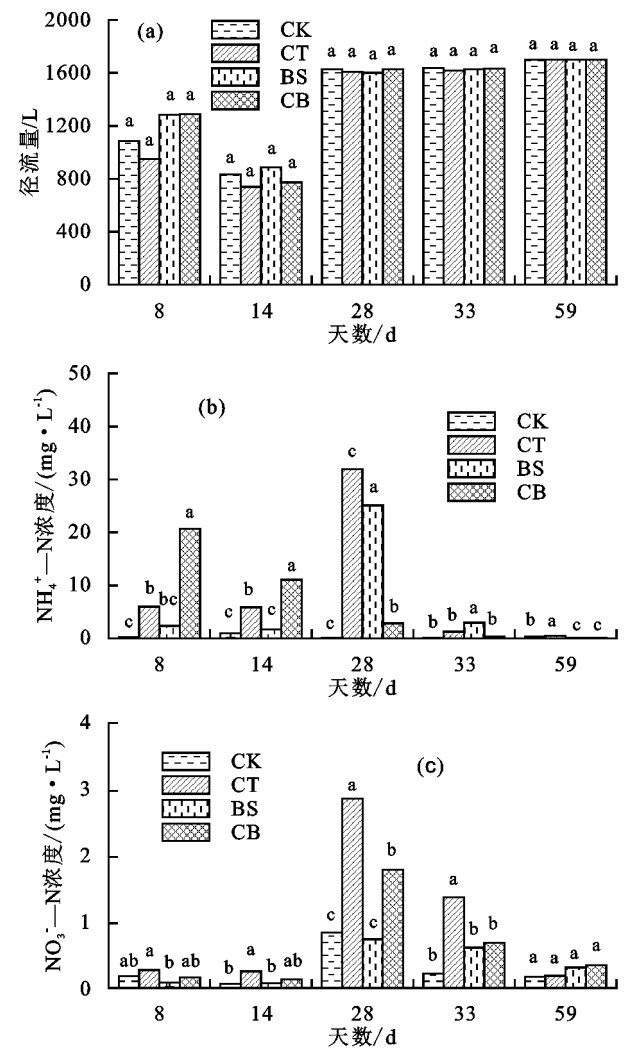
$$L_{LeL60-NO_3^-} = \sum_{j=1}^k C_{L-NO_3^- j} \times Le_j \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 稻田氮素径流流失

本研究在水稻生长季共产生 5 次径流, 各处理组径流量见图 3a, 可知不同施肥类型下稻田所产生的径流量无显著差异。各处理组径流水中铵态氮、硝态氮浓度见图 3b 和图 3c。CT、BS 组的铵态氮浓度均呈先上升后下降的趋势, 且峰值出现在第 28 天, 分别达到 31.9, 25.1 mg/L, 显著高于 CK、CB 组。CB 组在第 1 次径流时 (第 8 天) 的铵态氮浓度最高, 为 20.7 mg/L, 显著高于其他 3 组 ($p < 0.05$)。各组处理径流水中硝态氮的浓度变化均呈先上升后下降趋势, 峰值均出现在第 28 天, 且存在显著性差异, 分别为 CT 组 (2.9 mg/L) > CB 组 (1.8 mg/L) > CK 组 (0.84 mg/L) > BS 组 (0.73 mg/L)。

CT 组产生的径流水中铵态氮浓度呈先上升后下降的趋势, 可能因为 CT 组施入土壤的是尿素形态的氮肥, 早期易见光分解以气态形式逃逸, 导致第 1, 2 次径流水中铵态氮浓度低, 随着尿素逐渐转化出铵态氮, 径流水中铵态氮浓度逐渐上升, 在追肥后达到峰值, 随着铵态氮的持续流失与迁移转化, 后期径流水中铵态氮呈下降趋势。不同于 CT 组, 由于有机肥的缓释作用, BS 组在前期铵态氮浓度较低, 在追施尿素后径流水中铵态氮浓度逐渐升高至峰值。CB 组径流水中铵态氮浓度峰值出现在第 1 次径流的原因可能为: CB 组施用的炭基肥质量较轻, 且疏水性较强^[26], 在插秧扰动下有部分颗粒悬浮于田面水中, 导致炭基肥的肥料提前释放, 并且一次性施肥的炭基肥因早期施氮量高于其他处理, 所以流失风险更高。



注:图柱上方不同小写字母表示相同采样时间不同处理间差异显著($p<0.01$)。

图 3 不同施肥类型下稻田径流量、铵态氮、硝态氮浓度

各处理组径流水中硝态氮浓度呈现先升后降趋势,且峰值同时出现,由此推测径流水中硝态氮主要来源于土壤本底和肥料中铵态氮的转化。随着硝化作用的进行,土壤硝态氮浓度不断增加,并在第 3 次径流中达到峰值,之后随着反硝化作用、硝态氮淋溶及径流流失的进行,土壤中硝态氮浓度相应减少。此外,CT 组的径流水硝态氮含量显著高于其他组,其原因可能是与常规施肥相比,其他施肥处理(炭基肥、有机肥)的氮肥具有良好的缓释或抑制硝化作用的效果^[11]。

2.2 稻田氮素淋溶流失

根据本研究水稻季降水量、灌溉量、平均径流总量、作物潜在蒸散量和稻季初始土壤含水量、末期土壤含水量,利用 Hydrus-1D 模型估算土壤淋溶水量,分析水量平衡(表 1)。

图 4 为不同土层淋溶水中铵态氮和硝态氮浓度随时间的变化。各组处理不同土层铵态氮浓度均呈先增加后下降的趋势,硝态氮均呈先下降再增长后下降趋势,各施肥处理组与 CK 组之间没有显著性差

异,说明淋溶水中氮素主要来自土壤本底或有机氮的矿化。铵态氮在施肥 0~60 天内波动变化后逐渐趋于平稳,硝态氮浓度在施肥后 0~20 天趋于平稳。

表 1 水量平衡分析						
指标	降雨量与 灌溉量	径流总量	实际蒸 散发量	水稻根系 吸水量	土壤储水 变化量	土壤淋溶 水量
水量/cm	+134.7	-23.8	-49.6	-55.0	+1.4	-8.5

注: + 表示水量输入; - 表示输出。

浅层土壤铵态氮浓度(图 4a)呈现单一峰值,而深层土壤铵态氮浓度(图 4c)呈现双峰波动趋势。各施肥处理与 CK 无差别,且各深度土壤淋溶水铵态氮浓度第 1 个峰值同时出现,是由于随着淹水环境的营造,有机氮不断进行矿化,土层中铵态氮不断升高。之后矿化速率逐渐减小至低于硝化速率,导致土壤铵态氮浓度降低。30, 60 cm 土壤淋溶水铵态氮浓度出现第 2 个峰的原因可能是:烤田等干湿交替增加了矿化作用所产生的土壤铵态氮含量,从而增大铵态氮淋失量。烤田时田块出现大孔隙重新灌溉发生的优势流导致表土铵态氮被淋洗至 30—60 cm 土层。随后的淹水环境导致 30, 60 cm 深处土壤发生硝化反硝化作用或向下淋溶迁移,从而使得 30—60 cm 深处土壤铵态氮含量迅速下降。因此,在施肥后 0~27 天稻田浅层铵态氮淋溶流失风险更大,而深层铵态氮在烤田前后的淋溶流失风险更大。

各处理组不同深度的土壤硝态氮含量先下降后上升(图 4d~f),其原因可能是长期淹水通气性差的水稻田有助于反硝化作用的进行^[27],导致土壤硝态氮含量下降;但随着氮肥释放出大量铵态氮,并发生硝化作用,使得表层土壤硝态氮升高,带负电荷的硝态氮极易随水分迁移^[28],导致不同深度土壤淋溶水中的硝态氮浓度增加。因此,施肥后 0~20 天是防控硝态氮淋溶流失的关键时期。

2.3 不同施肥类型的水稻产量

不同施肥类型的水稻产量从高到低依次为 BS (11 302.08 kg/hm²)>CB(10 989.58 kg/hm²)>CT (10 416.67 kg/hm²)>CK(8 802.08 kg/hm²)。各施氮处理(CT、BS、CB)的产量分别比不施氮处理(CK)提高 18.34%, 28.40%, 24.85% ($p<0.05$),说明各组施氮处理可显著提高水稻产量,而施用化肥、菜籽饼有机肥或者炭基肥处理对产量的影响不具显著性差异。

3 讨论

3.1 不同施肥类型处理下稻田氮素径流流失规律

根据公式(1)和公式(2)计算可得各处理组不同时期的铵态氮和硝态氮径流流失量、流失总量、不同时期流失量占流失总量的比例,以及径流水中铵态氮与硝态氮的流失比例。从表 2 可以看出,各处理组铵态氮径流流失总量存在显著性差异,其大小的依次为

CT 组(20.1 kg/hm^2)>BS 组(15.5 kg/hm^2)>CB 组(12.7 kg/hm^2)>CK 组(0.6 kg/hm^2)。各处理组硝态氮径流流失总量差异显著,其大小依次为 CT 组

(2.4 kg/hm^2)>CB 组(1.5 kg/hm^2)>BS 组(0.9 kg/hm^2)>CK 组(0.7 kg/hm^2),说明施用有机肥和炭基肥可以显著减少铵态氮和硝态氮的径流流失量。

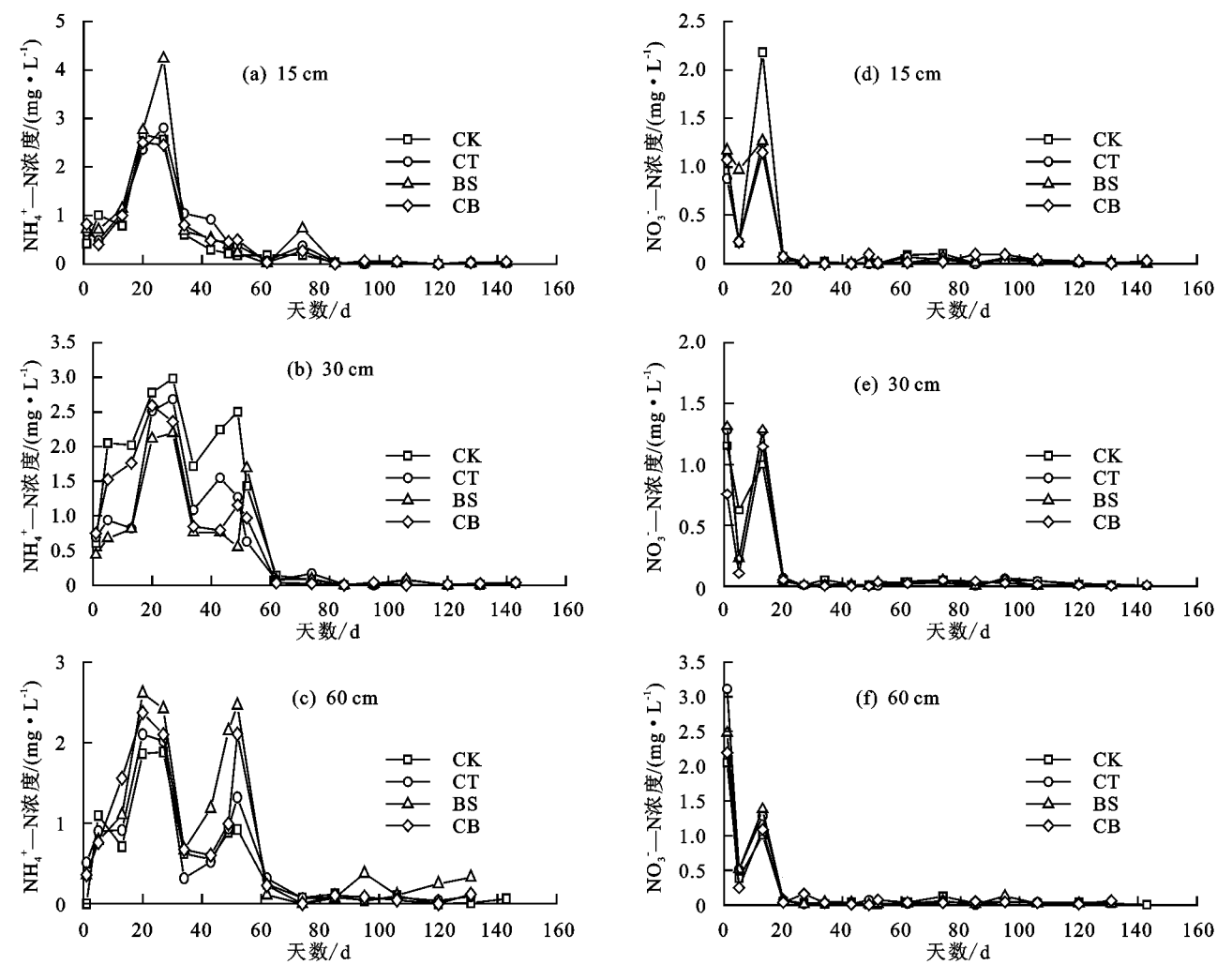


图 4 不同施肥类型下稻田不同深度土壤淋溶水中铵态氮和硝态氮浓度

CB 组在第 28 天之前径流水铵态氮流失量占总量的 86.8%,并显著高于其他组;28 天之后 CT 组铵态氮流失量占总量的 84.4%,BS 组铵态氮流失量占总量的 90.8%,说明炭基肥施肥处理的氮素径流流失风险在前期更大,常规施肥和有机肥替代处理的氮素径流流失风险在中期更大。

各施肥处理组(CT、BS、CB)径流流失量中铵态氮与硝态氮的比例范围为 8.29~17.65(表 2),说明氮素径流流失形态以铵态氮为主,其原因是试验稻田耕作年限长、土壤致密,通气性不佳,强烈的还原环境抑制了硝化作用,导致氮素大多以铵态氮形式流失。

本研究收集了 2002—2017 年所发表的关于中国稻田氮素径流流失的文献数据^[5-6,10,15,29-36]。由图 5a 可知,对比本研究中各形态氮素径流流失总量发现,本研究的施氮量与氮素径流流失量均处于中高水平。影响土壤氮素损失的因子除施氮种类外,还包括施氮量、施氮时期和施氮方式^[37]。由于本研究施氮量高

于大部分研究,导致与全国氮素径流流失的文献数据相比,本研究中的优化施肥类型下的氮素径流流失量高于大部分地区。剔除所收集文献数据中的空白组发现,55 组数据中,65.45%的处理氮素径流流失形态以铵态氮为主,这与本研究结论一致。

3.2 不同施肥类型处理下稻田氮素淋溶流失规律

根据公式(3)和公式(4)计算获得土壤界面铵态氮、硝态氮淋溶流失量(表 3)。由表 3 可知,本研究中各处理组铵态氮淋溶流失量大小依次为 BS 组(0.56 kg/hm^2)>CB 组(0.47 kg/hm^2)>CT 组(0.39 kg/hm^2)>CK 组(0.36 kg/hm^2),说明施用有机肥或炭基肥不能显著减少铵态氮淋溶流失量。硝态氮淋溶流失量范围为 $0.14\sim0.17\text{ kg/hm}^2$,各组的硝态氮流失量无显著差异。施肥处理组淋溶流失量铵态氮和硝态氮比例范围为 2.61%~3.43%,说明本研究氮素淋溶流失形态以铵态氮为主。综上,施肥处理对稻田氮素淋溶流失控制减少效果不明显。

表 2 不同施肥类型氮素径流流失量

径流产生 时间	处理组	N 素径流流失量/ (kg · hm ⁻²)		铵态氮/ 硝态氮	流失量占比/%	
		铵态氮	硝态氮		铵态氮	硝态氮
第 1 次 径流	CK	0.07c	0.06ab	1.17	10.89	8.30
	CT	1.78b	0.08a	22.25	8.87	3.32
	BS	0.951bc	0.03b	31.67	6.12	3.15
	CB	8.32a	0.07ab	118.86	65.67	4.26
第 2 次 径流	CK	0.26c	0.02b	13.00	40.94	2.26
	CT	1.36b	0.06a	22.67	6.76	2.34
	BS	0.48c	0.02b	24.00	3.09	2.26
	CB	2.68a	0.03ab	89.33	21.13	1.92
第 3 次 径流	CK	0.05c	0.43c	0.12	8.28	60.98
	CT	16.03a	1.43a	11.21	79.84	60.83
	BS	12.56b	0.36c	34.89	80.85	40.39
	CB	1.44c	0.91b	1.58	11.38	59.29
第 4 次 径流	CK	0.06b	0.11b	0.55	8.87	15.79
	CT	0.65b	0.69a	0.94	3.24	29.36
	BS	1.51a	0.31b	4.87	9.70	35.59
	CB	0.19b	0.35b	0.54	1.50	22.57
第 5 次 径流	CK	0.20b	0.09a	2.22	31.01	12.68
	CT	0.26a	0.10a	2.60	1.29	4.15
	BS	0.04c	0.16a	0.25	0.24	18.60
	CB	0.04c	0.18a	0.22	0.32	1.96
总量	CK	0.63c	0.71c	0.89	100.00	100.00
	CT	20.08a	2.36a	8.51	100.00	100.00
	BS	15.53b	0.88c	17.65	100.00	100.00
	CB	12.68b	1.53b	8.29	100.00	100.00

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

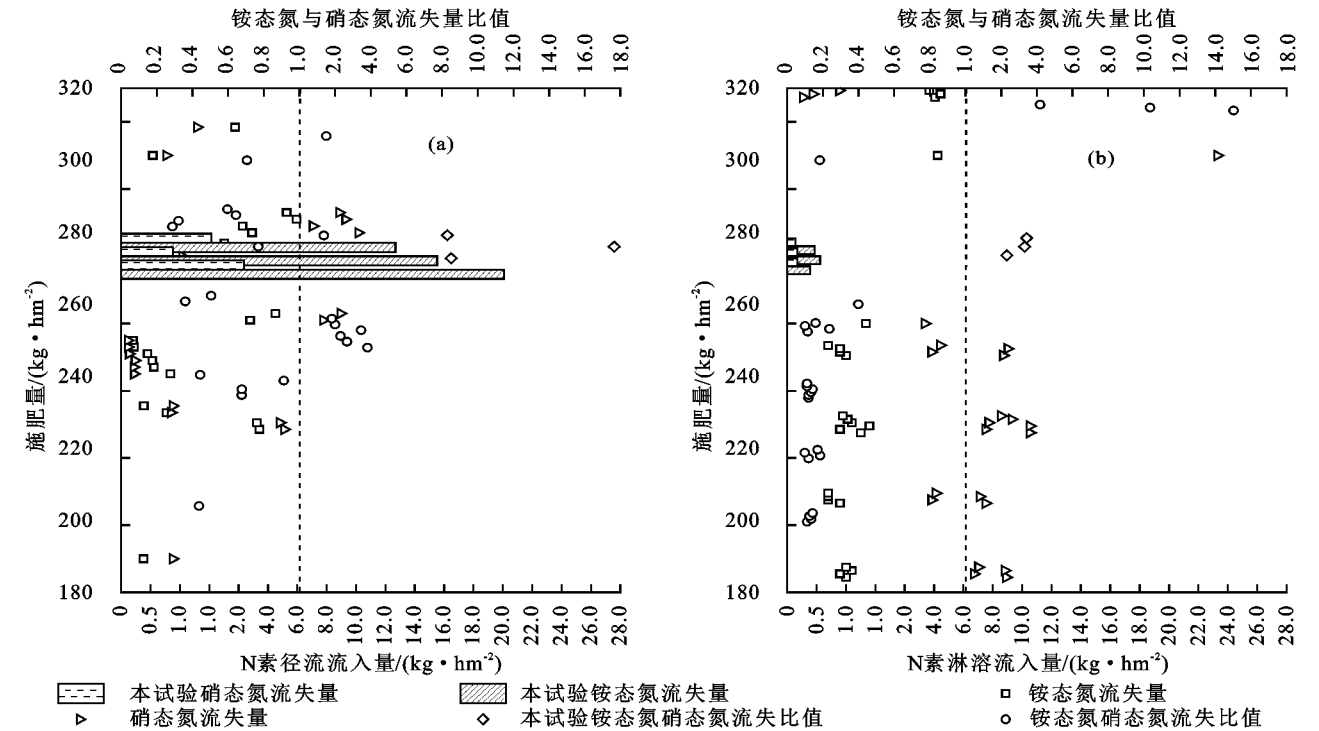
本文收集了 1992—2017 年所发表的关于中国稻田氮素淋溶流失的文献数据^[10,38-45],由图 5b 所示,对比本研究中各形态氮素淋溶流失总量发现,氮素淋溶流失量处于较低水平,其可能原因是本试验稻田土壤

质地较黏且存在犁底层,土壤保水性好,且本试验田地势较低、地下水位高,导致土壤淋溶量小,氮素不易通过淋溶途径流失。

剔除空白组,38 组数据中 31.58%的处理氮素淋溶流失形态以铵态氮为主,这与本研究结论一致。还有 68.42%的结果表明,氮素淋溶流失形态以硝态氮为主,这些数据来源于北方降雨量较小地区的稻田试验或较为干旱年份的稻田试验,造成氮素淋溶流失的主要形态与本研究结果存在差异的原因可能是:由于降雨量小,稻田种植干湿交替且落干时间较长,硝化作用强烈导致土壤中硝态氮含量高^[41],导致氮素易以硝态氮形态淋失。

3.3 不同施肥类型处理下稻田氮素流失特征分析

由表 4 可知,本研究中稻田无机氮(铵态氮和硝态氮)径流流失总量 CT 组(22.45 ± 0.63 kg/hm²)>(BS 组 16.42 ± 2.60 kg/hm²)>CB 组(14.21 ± 1.08 kg/hm²)>CK 组(1.34 ± 0.35 kg/hm²),施肥组(CT、BS、CB)中无机氮径流流失总量占施氮量范围为 5.26~8.31;稻田无机氮淋溶流失总量 BS 组(0.73 ± 1.05 kg/hm²)>CB 组(0.61 ± 0.67 kg/hm²)>CT 组(0.56 ± 0.63 kg/hm²)>CK 组(0.49 kg/hm²),施肥组无机氮淋溶流失总量占施氮量比例范围为 0.21~0.27;施肥稻田无机氮径流流失总量与淋溶流失总量比例范围为 22.63~40.35(>1),不施肥稻田无机氮径流流失总量与淋溶流失总量比例为 2.72,说明本研究中施肥稻田无机氮流失方式以径流为主,氮肥的施用明显增加了稻田无机氮径流流失的风险。



注:图中虚线表示铵态氮与硝态氮流失量比例为 1 : 1,铵态氮与硝态氮流失量比例高于虚线说明此试验氮素流失形态以铵态氮为主,反之则说明以硝态氮为主。

图 5 本研究径流流失总量、淋溶流失总量与历年文献中的对比

表 3 不同施肥类型氮素淋溶流失量

处理组	氮素淋溶流失量/(kg·hm ⁻²)		铵态氮/ 硝态氮
	铵态氮	硝态氮	
CK	0.36a	0.14a	2.61
CT	0.39a	0.17a	2.31
BS	0.56a	0.17a	3.31
CB	0.47a	0.14a	3.43

表 4 稻田无机氮不同流失方式占比

处理组	无机氮流失量/ (kg·hm ⁻²)		径流/淋溶	占施氮量比例/%	
	径流	淋溶		径流	淋溶
CK	1.34c	0.49a	2.72	—	—
CT	22.45a	0.56a	40.35	8.31	0.21
BS	16.42b	0.70a	22.63	6.08	0.27
CB	14.21b	0.61a	23.20	5.26	0.23

赵峥^[46]的定位试验研究发现,氮素径流与淋溶流失负荷比例在 1.72~4.85(>1),与本研究结论一致;而李旭等^[33]的研究试验发现,无机氮径流损失范围为 7.68~11.59 kg/hm²,淋溶损失范围为 10.67~43.49 kg/hm²,径流与淋溶流失比例为 0.27~0.72,无机氮损失方式以淋溶为主。造成氮素损失途径不同的原因可能是李旭等^[33]试验为双季稻,4 月施基肥时尚未进入雨季,施肥前期径流量小;同时积水环境增加氮素淋溶风险,而稻季后期产生的径流因为土壤表层氮素已明显下降,径流流失有限。

4 结论

(1)施用炭基肥和有机肥替代部分化肥对控制稻田氮素径流流失效果显著;其中,CB 组的铵态氮径流流失量集中在稻季前期,而 CT 组和 BS 组主要分布在稻季中期。

(2)各组铵态氮、硝态氮淋溶流失量没有显著差异。

(3)施肥稻田无机氮流失方式以径流为主,且铵态氮是稻田氮素流失的主要形态。

综上,本研究中施用炭基肥和有机肥可以显著减少稻田氮素流失,其中对减少氮素径流流失效果显著,对氮素淋溶流失的控制效果有限。此外,施加炭基肥需注意因田间活动扰动使得部分炭基肥漂浮于田面水而造成的径流损失,在未来的研究中,仍需寻找更为合理的炭基肥施用方式,并在不同减氮量施肥条件下探究施用炭基肥以及有机肥对减少稻田氮素流失的作用。

参考文献:

[1] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等.滴灌施氮对春玉米氮素吸收、土壤无机氮含量及氮素平衡的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):238-245.

[2] 徐谦.我国化肥和农药非点源污染状况综述[J].农村生

态环境,1996(2):39-43.

[3] 陈小锋.我国湖泊富营养化区域差异性调查及氮素循环研究[D].南京:南京大学,2012.

[4] 王新霞,左婷,王肖君,等.稻—麦轮作条件下 2 种施肥模式作物产量和农田氮磷径流流失比较[J].水土保持学报,2020,34(3):20-27.

[5] 刘琛,张莉,林义成,等.不同施肥模型下苕溪流域水稻田和蔬菜地氮磷流失规律[J].浙江农业学报,2019,31(2):297-306.

[6] 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.

[7] 李文兵.长期不同施肥处理对直播稻田生态系统中氮磷影响研究[D].杭州:浙江大学,2008.

[8] Burkitt L L. A review of nitrogen losses due to leaching and surface runoff under intensive pasture management in Australia [J].Soil Research,2014,52(7):621-636.

[9] 朱兆良,范晓晖,孙永红,等.太湖地区水稻土上稻季氮素循环及其环境效应[J].作物研究,2004(4):187-191.

[10] Li Y, Šimůnek J, Zhang Z T, et al. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D [J]. Agricultural Water Management,2015,148:213-222.

[11] 陈香碧,胡亚军,秦红灵,等.稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J].应用生态学报,2020,31(3):1033-1042.

[12] 王苏平,辉建春,林立金,等.施肥制度对川中丘陵区玉米不同生育期土壤反硝化酶活性的影响[J].水土保持研究,2012,19(3):274-277,283.

[13] Li W, Chen H, Cao C F, et al. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen dynamics in a vertisol in eastern China [J].Open Journal of Soil Science,2018,8(3):99-117.

[14] 朱文博,刘鸣达,肖珣,等.化肥配施有机肥对早稻产量及稻田氮素归趋的影响[J].沈阳农业大学学报,2019,50(6):728-733.

[15] 张敏,赵森,田玉华,等.太湖地区高产高效措施下水稻氮淋溶和径流损失的研究[J].土壤,2018,50(1):35-42.

[16] Khan M A, Kim K W, Wang M Z, et al. Nutrient-impregnated charcoal: An environmentally friendly slow-release fertilizer [J].The Environmentalist,2008,28:231-235.

[17] 刘宁.生物炭的理化性质及其在农业中应用的基础研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2014.

[18] Jien S H, Wang C C, Lee C H, et al. Stabilization of organic matter by biochar application in compost-amended soils with contrasting pH values and textures [J].Sustainability,2015,7(10):13317-13333.

[19] 乔志刚,陈琳,李恋卿,等.生物质炭基肥对水稻生长及

- 氮素利用率的影响[J].中国农学通报,2014,30(5):175-180.
- [20] 陈琳,乔志刚,李恋卿,等.施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J].生态与农村环境学报,2013,29(5):671-675.
- [21] 杨武娟,高文川,徐芦,等.炭基肥及不同施肥方式对甘薯产量影响的研究[J].安徽农学通报,2018,24(21):104-105.
- [22] 刘善良,常春丽,蒲加军,等.生物炭基肥料在水稻上的应用效果研究[J].现代农业科技,2019(15):5-6.
- [23] 南京农学院.土壤农化分析[M].北京:农业出版社,1982.
- [24] 徐森雄,宋义达.从气象资料估算蒸发量[J].中华水土保持学报,1987,18(2):83-89.
- [25] Li Y, Šimůnek J, Jing L F, et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D[J]. Agricultural Water Management, 2014, 142: 38-46.
- [26] Lee C H, Wang C C, Jien S H, et al. In-situ biochar application conserves nutrients while simultaneously mitigating runoff and erosion of an Fe-oxide-enriched tropical soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 665-671.
- [27] Chowdary V M, Rao N H, Sarma P B S. A coupled soil water and nitrogen balance model for flooded rice fields in India[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 103(3): 425-441.
- [28] 段玉环,郑西来,辛佳,等.土壤中新型肥料氮素淋失特征研究[J].安徽农学通报,2016,22(8):16-20.
- [29] 朱新开,盛海君,夏小燕,等.稻麦轮作田氮素径流流失特征初步研究[J].生态与农村环境学报,2006,22(1):38-41.
- [30] 田发祥,纪雄辉,石丽红,等.不同缓控释肥料减氮对洞庭湖区双季稻田氮流失与作物吸收的影响[J].农业现代化研究,2010,31(2):220-223.
- [31] 叶玉适,梁新强,金熠,等.节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):105-112.
- [32] 陈淑峰,孟凡乔,吴文良,等.东北典型稻区不同种植模式下稻田氮素径流损失特征研究[J].中国生态农业学报,2012,20(6):728-733.
- [33] 李旭,谢桂先,刘强,等.控释尿素减量施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):70-74.
- [34] 斯圆丽,朱少威,王季丰,等.施用包膜尿素对水稻生长和氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):48-53.
- [35] Yang R, Tong J X, Hu B X, et al. Simulating water and nitrogen loss from an irrigated paddy field under continuously flooded condition with Hydrus-1D model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 15089-15106.
- [36] Ji X H, Zhang S X, Lu Y H, et al. Study of dynamics of floodwater nitrogen and regulation of its runoff loss in paddy field-based two-cropping rice with urea and controlled release nitrogen fertilizer application [J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(2): 189-199.
- [37] 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.
- [38] 汪军,王德建,张刚,等.秸秆还田条件下氮肥用量对稻田氮素淋失的影响[J].中国环境科学,2010,30(12):1650-1657.
- [39] 尹海峰,焦加国,孙震,等.不同水肥管理模式对太湖地区稻田土壤氮素渗漏淋溶的影响[J].土壤,2013,45(2):1199-1206.
- [40] 和玉璞,张展羽,徐俊增,等.控制地下水位减少节水灌溉稻田氮素淋失[J].农业工程学报,2014,30(23):121-127.
- [41] 吴蕴玉,张展羽,郝树荣,等.不同灌溉模式稻田氮素淋失特征[J].节水灌溉,2019(3):71-75.
- [42] 高俊莲,王永生,张爱平,等.生物质炭对稻田氮素淋失和氧化亚氮排放的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(6):87-94.
- [43] 崔远来,李远华,吕国安,等.不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J].水科学进展,2004,15(3):280-285.
- [44] 张美良,吴建富,郭成志,等.应用¹⁵N对稻田生态系中氮素淋失和去向的研究[J].江西农业大学学报,1998,20(2):153-157.
- [45] 王家玉,王胜佳,陈义,等.稻田土壤中氮素淋失的研究[J].土壤学报,1996,33(1):28-36.
- [46] 赵峥.基于DNDC模型的稻田氮素流失及温室气体排放研究[D].上海:上海交通大学,2016.