

# 不同耕作施氮处理对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量和 田面水中无机氮的影响

吴庆峰, 郑佳舜, 肖未, 李伏生\*  
(广西大学 农学院, 南宁 530004)

**摘要:**【目的】探索不同耕作施氮处理对稻田氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )通量和田面水中无机氮质量浓度的影响。【方法】设置4种耕作方式(免耕T、微耕C、旋耕R和粉垄S)以及2个施氮量(常规施氮  $225 \text{ kg/hm}^2$  (N1)和减量施氮  $150 \text{ kg/hm}^2$  (N2))的双季水稻田间试验,测定不同时期施用氮肥后稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量以及田面水中无机氮质量浓度,分析不同时期施用氮肥后1、3、5 d稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与田面水中无机氮质量浓度之间的关系。【结果】①不同时期施用氮肥后田面水中的铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )质量浓度较高,施用氮肥后1 d田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  快速上升到峰值后迅速下降。分蘖期和孕穗期施用氮肥后, TN1(免耕常规施氮)处理田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  较其他处理提高4.7%~532.6%。氮肥作基肥以及在分蘖期和孕穗期施用后,所有处理田面水中的硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )和亚硝态氮( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ )质量浓度较低,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度在  $0.08\sim 0.20 \mu\text{g/mL}$  之间,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度低于  $0.12 \mu\text{g/mL}$ 。②氮肥作基肥以及在分蘖期和孕穗期施用后, TN2 处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量较其他处理低。③稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与不同时期施用氮肥后1~5 d田面水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度显著负相关,相关系数为  $-0.509\sim -0.300$ 。【结论】施用氮肥后  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  是田面水中无机氮的主要形态,施用氮肥后1~5 d田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度显著影响稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量。

**关键词:** 耕作方式; 施氮量; 无机氮;  $\text{N}_2\text{O}$  排放; 稻田

中图分类号: S1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022657

OSID: 

吴庆峰, 郑佳舜, 肖未, 等. 不同耕作施氮处理对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量和田面水中无机氮的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 25-32.

WU Qingfeng, ZHENG Jiashun, XIAO Wei, et al. Effects of Different Tillage and Nitrogen Applications on  $\text{N}_2\text{O}$  Emission and Mineral Nitrogen in Surface Water of Paddy Field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 25-32.

## 0 引言

【研究意义】氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )是仅次于二氧化碳和甲烷的主要温室气体<sup>[1]</sup>。稻田生态系统是  $\text{N}_2\text{O}$  排放源之一<sup>[2]</sup>,施用氮肥主要是通过影响稻田土壤与水中无机氮质量浓度等进而影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[3]</sup>,耕作方式通过影响稻田土壤温湿度、土壤养分状况和水中无机氮的迁移等影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[4]</sup>,因此,研究不同耕作施氮处理下不同生育期施用氮肥对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放和田面水中无机氮的影响以及稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与田面水中无机氮质量浓度之间的关系,对指导不同耕作方式下水稻施用氮肥有重要作用。【研究进展】尿素施用后田面水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度在施用氮肥后约50 h内随时间呈指数增加,最高可增至  $40.50 \mu\text{g/mL}$ ,之后又随时间呈指数递减的趋势,尿素施用量越高,同一时

期内  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度越高<sup>[5]</sup>。吕耀<sup>[6]</sup>研究发现,随着施氮量的增加,稻田渗漏液和田面水中的硝态氮质量浓度增加。马永跃<sup>[7]</sup>研究发现,在水稻移栽初期,氮肥作基肥施用增加土壤及水中的无机氮质量浓度,导致稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量上升,最高由  $15.50 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ h})$  上升至  $82.50 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ h})$ ,并出现排放峰;但秦晓波等<sup>[8]</sup>认为晚稻氮肥作基肥施用及追施氮肥均会导致稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放降低。耕作方式对田面水无机氮和稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放影响的研究发现,免耕处理稻田田面水中无机氮质量浓度始终比旋耕处理高,氮素流失的风险更高<sup>[9]</sup>,粉垄整地配施绿肥和化肥对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  减排有积极作用<sup>[10]</sup>,而免耕和秸秆覆盖还田对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放有显著的促进作用<sup>[11]</sup>。【切入点】目前,不同耕作方式和施氮对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放和水中无机氮的影响已有研究,而不同耕作方式下不同时期施用氮肥对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放和田面水中无机氮的影响以及田面水中无机氮质量浓度对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量的影响尚不清楚。

【拟解决的关键问题】因此,开展不同耕作方式和施氮量的双季水稻田间试验,分析不同时期施用氮肥对田面水中无机氮质量浓度的影响,揭示不同时期施用

收稿日期: 2022-11-21 修回日期: 2023-02-01 网络出版日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42167035)

作者简介: 吴庆峰(1998-),男,广西南宁人。硕士研究生,主要从事水土资源利用与环境方面的研究。E-mail: 541651868@qq.com

通信作者: 李伏生(1963-),男,湖南邵阳人。教授,博士,主要从事水肥资源利用与环境方面的研究。E-mail: 19880066@gxu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

氮肥后田面水中无机氮质量浓度对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量的影响,为稻田温室气体排放研究以及广西水稻生产管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况和供试材料

双季水稻大田试验于 2021 年 3—11 月在南宁市灌溉试验站(N 22°52'58.33", E 108°17'38.36")进行。试验所用土壤为水稻土,土壤体积质量为  $1.55 \text{ g/cm}^3$ ,有机质量为  $26.02 \text{ g/kg}$ , pH 值为 6.61,速效磷量为  $52.25 \text{ mg/kg}$ ,速效钾量为  $69.95 \text{ mg/kg}$ ,碱解氮量为  $87.73 \text{ mg/kg}$ 。试验期间月降水量和月均温度见图 1,试验水稻品种“甬优 4949”,为优良籼粳型三系杂交水稻品种。

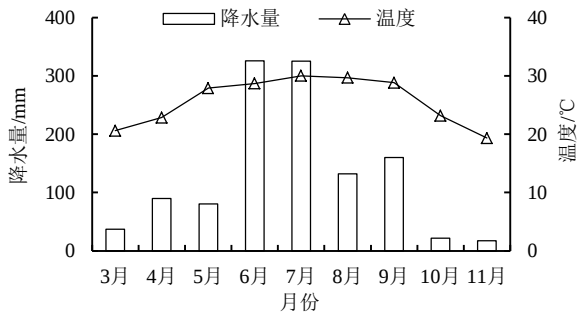


图 1 试验期间温度和降水量

Fig.1 Temperature and precipitation during the experiment

### 1.2 试验方法

试验共设 4 种耕作方式和 2 个施氮量,4 种耕作方式分为免耕(T)、微耕(C)、旋耕(R)、粉垄(S),免耕指泡田插秧前不进行耕作处理,其他 3 种耕作方式使用机器分别为微耕机(正月 1WG-6.3-105FC-Z)、旋耕机(柳州金禾 1WGH-5.7)和轮式粉垄机(雷沃欧豹 M2004-Q),耕作土层深度分别为 7~15、15~20、30~50 cm;2 种施氮量分别为常规施氮  $\text{N1: } 225 \text{ kg/hm}^2$ 、减量施氮  $\text{N2: } 150 \text{ kg/hm}^2$ 。采用完全随机试验设计,共 8 个处理,每个处理 3 次重复,共 24 个小区,小区面积为  $25 \text{ m}^2 (5 \text{ m} \times 5 \text{ m})$ ,小区之间用 25~26 cm 厚、1 m 深的水泥墙隔开,以防小区之间水分相互侧渗,各小区独立灌水及排水。

供试肥料包括尿素(N 46.2%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  16%)、氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  60%),所有施氮处理  $\text{P}_2\text{O}_5$  用量为  $75 \text{ kg/hm}^2$ , $\text{K}_2\text{O}$  用量为  $150 \text{ kg/hm}^2$ ,各处理 45%氮肥、100%磷肥作基肥,在插秧前 2 d 直接施入土壤中。余下 55%氮肥在分蘖期和抽穗期各追肥 40%和 15%。钾肥在分蘖期和抽穗期各追肥 60%和 40%。

早稻于 3 月 9 日育秧,3 月 30 日氮肥作基肥施用(以下简称基肥),4 月 1 日选取长势良好且均匀的秧苗插秧,株行距均为 20 cm,每穴 2 苗。当每丛茎

蘖数达到 14 个时排水晒田 8 d,促进根系下扎。4 月 9 日分蘖期施用氮肥(以下简称蘖肥),5 月 17 日晒田,5 月 24 日复水至浅水层,5 月 25 日孕穗期施用氮肥(以下穗肥),7 月 11 日收获水稻,早稻全生育期为 100 d。

晚稻于 7 月 7 日育秧,8 月 2 日施用基肥,8 月 4 日选取长势良好且均匀的秧苗插秧,株行距均为 20 cm,每穴 2 苗。当每丛茎蘖数达到 14 个时排水晒田 8 d。8 月 20 日施用蘖肥,9 月 19 日晒田,9 月 26 日复水至浅水层,9 月 27 日施用穗肥,11 月 9 日收获水稻,晚稻全生育期为 97 d。

两季水稻各小区田间水分管理一致,水稻移栽返青期保持 20 mm 水层,分蘖期到乳熟期田间均保持 30 mm 水层,分蘖末期落水晒田 1 周,水稻黄熟期自然落干。

### 1.3 样品采集和测定

#### 1.3.1 水样采集及无机氮的测定

稻田田面水样于每次施氮后的 1、3、5 d 采集。3 月 30 日早稻施用基肥,3 月 31 日、4 月 2、4 月 4 日采样测定。4 月 9 日施用蘖肥,4 月 10、12、14 日采样测定。5 月 25 日施用穗肥,5 月 26、28、30 日采样测定。8 月 2 日晚稻施用基肥,8 月 3、5、7 日采样测定。8 月 20 日施用蘖肥,8 月 21、23、25 日采样测定。9 月 27 日施用穗肥,9 月 28、30 日、10 月 2 日采样测定。稻田田面水根据 5 点取样法,用 20 mL 注射器吸取稻田表层水分并转移至取样瓶中,每瓶样品量为 100 mL。过滤后的渗漏液和田间水通过德国 Bran+Luebbe 连续化学流动分析仪 AA3 测定亚硝态氮、硝态氮、铵态氮质量浓度。

#### 1.3.2 稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 气体采集及测定

在采集田面水样同时,用静态封闭箱法采集稻田(包括植株和土壤) $\text{N}_2\text{O}$  气体。静态箱箱体由厚 5 mm 的透明亚克力材料制成,箱体为直径 25 cm、高 100 cm 的无底圆柱体,四周和顶部封闭,底部开口并带有锯齿状,箱内安装风扇。取样时静态箱垂直插入土壤中,以防箱子和地面的接触处漏气,保证箱内气体与大气不进行交换。采样前将箱内风扇打开,以保持气体均匀混合,采气孔位于采样箱顶部。采样时刻为 09:00—11:00,同时记录箱温和气箱有效高度。每个采样点在盖箱后 10、20、30、40 min 时用注射器采样,每次样品量为 20 mL。

各处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  浓度使用美国 Aglient7890A 气相色谱仪中的电子捕获检测器(ECD)测定。以单位时间内通过单位面积的  $\text{N}_2\text{O}$  质量浓度变化计算  $\text{N}_2\text{O}$  通量,计算方法参照刘靖雯等<sup>[12]</sup>的方法进行。

## 1.4 数据分析和处理

利用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理、作图；使用 SPSS Statistics 20.0 进行数据分析：用 Duncan 法进行多重比较 ( $P < 0.05$ )，比较各处理指标之间的差异是否显著；用 Pearson 法分析稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与水中无机氮质量浓度之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量

图 2 为不同耕作施氮处理下双季稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量的变化，图中 BV 为试验开始前  $\text{N}_2\text{O}$  通量，BF 表示基肥，TF 表示蘖肥，EF 表示穗肥，下同。3 次施肥后的 5 d 内，所有耕作方式下稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量峰值均是  $\text{N}_1$  水平  $>$   $\text{N}_2$  水平。早稻季施用基肥后 1 d，所有处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量均降低。施用基肥 5 d 内，CN1

处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量呈逐渐降低趋势，最低值为  $-56.40 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$ 。施用蘖肥后，免耕 (T)、微耕 (C) 耕作方式  $\text{N}_2\text{O}$  通量呈先增加后降低的趋势。施用蘖肥后 1 d 时，各处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量较低，除 TN1 处理外均为负值， $\text{N}_2\text{O}$  通量呈吸收状态；施用蘖肥后 3 d 时，各处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量大幅增加，免耕耕作方式稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量提高较快，2 个施氮量下，免耕耕作方式分别较微耕、旋耕 (R)、粉垄 (S) 耕作方式分别提高 31.8%~200.4%、76.6%~697.1% 和 47.0%~218.6%；施用蘖肥后 5 d 时，TN2 处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量最低，为  $-24.13 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$ ，RN2 处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量始终为负值。施用穗肥后，免耕、微耕耕作方式稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量呈逐渐下降趋势，粉垄耕作方式呈先增加后降低的趋势。施用穗肥后 5 d 时，各处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量在  $18.00 \sim 32.00 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$  之间。

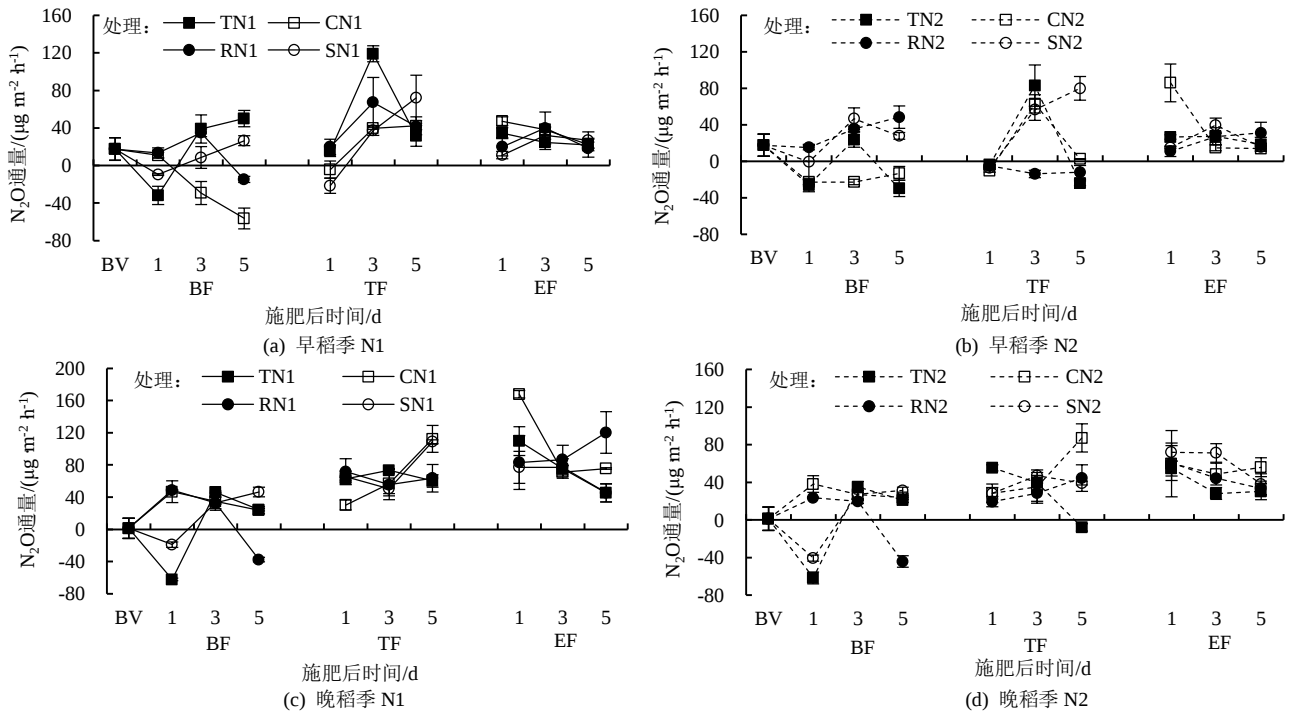


图 2 不同处理下双季稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量

Fig.2  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from double-cropping rice field under different treatments

晚稻季施用氮肥后所有耕作方式下稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量都是  $\text{N}_1$  水平  $>$   $\text{N}_2$  水平。施用基肥后 1 d，微耕、旋耕耕作方式稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量大幅增加。施用基肥后 5 d 内 TN2 处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量最低 ( $-61.71 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$ )。施用蘖肥后，免耕耕作方式稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量呈逐渐降低趋势，微耕、粉垄耕作方式呈逐渐上升趋势。施用蘖肥后 1 d 时， $\text{N}_1$  水平免耕、微耕、旋耕、粉垄耕作方式下稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量分别较  $\text{N}_2$  水平对应耕作方式提高 13.0%、6.1%、270.3%、132.1%。施用蘖肥后 5 d 时，TN2 处理  $\text{N}_2\text{O}$  通量逐渐降低，最低值为  $-7.89 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$ 。施用穗肥后，除 RN1 处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量逐渐上升外，其他处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量都呈逐渐降低的趋势。施用穗肥后 1 d 时，各处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量出

现峰值， $\text{N}_1$  水平下，微耕耕作方式稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量较免耕、旋耕、粉垄耕作方式分别提高 53.3%、102.2% 和 118.3%。施用穗肥后 TN2 处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量逐渐降低，最低值为  $28.13 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$ 。

### 2.2 铵态氮质量浓度

图 3 为不同耕作施氮处理下双季稻田田面水中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度。早稻季施用基肥后 1 d 时，各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度都较试验开始前提高 221.4%~545.1%；施用基肥后 3 d 时，各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度下降 34.3%~96.2%。施用蘖肥后 1 d 时，各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度均达到峰值，各耕作方式下  $\text{N}_1$  水平稻田田面水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度均大于  $\text{N}_2$  水平。 $\text{N}_1$ 、 $\text{N}_2$  水平下，

免耕耕作方式田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度最高, 分别较微耕、旋耕、粉垄耕作方式提高 4.7%~12.5%、34.7%~74.3%和 298.1%~506.6%。施用氮肥后 3 d 时,

各处理田面水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度快速下降。施用穗肥后 3~5 d, 田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度趋于稳定。

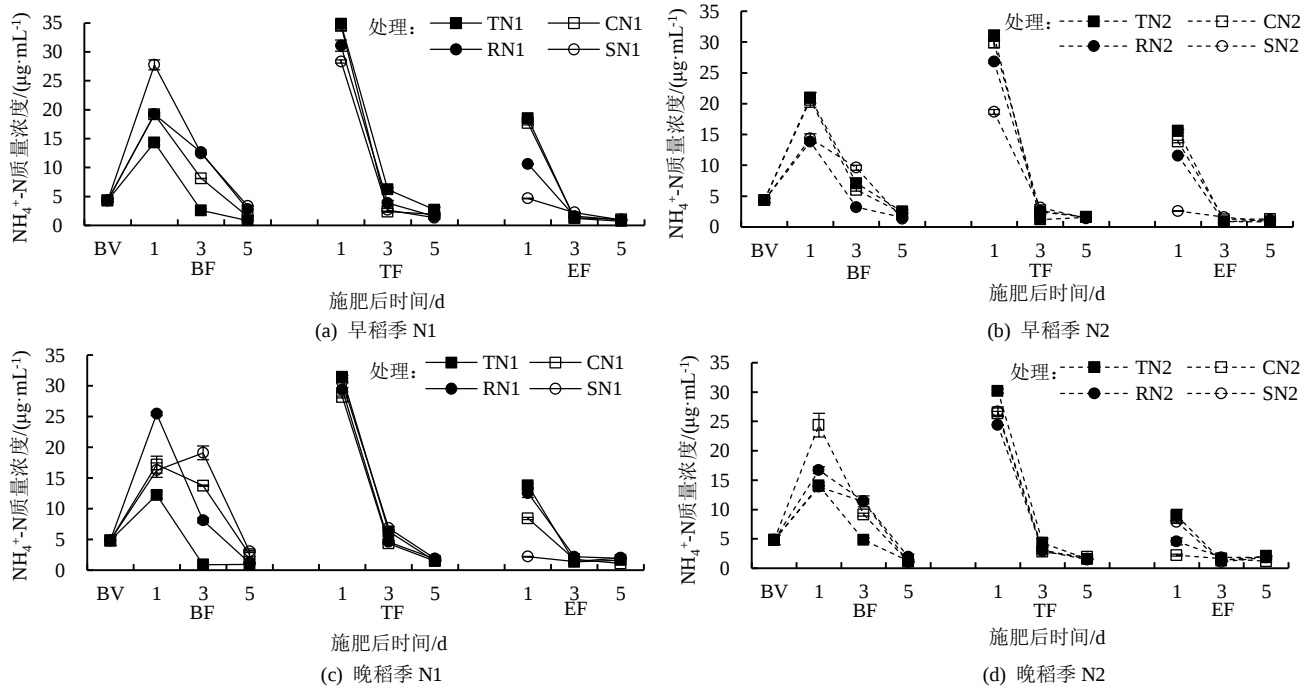


图 3 不同处理下双季稻田田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度

Fig.3 Ammonium nitrogen mass concentration in surface water of double-cropping rice field under different treatment

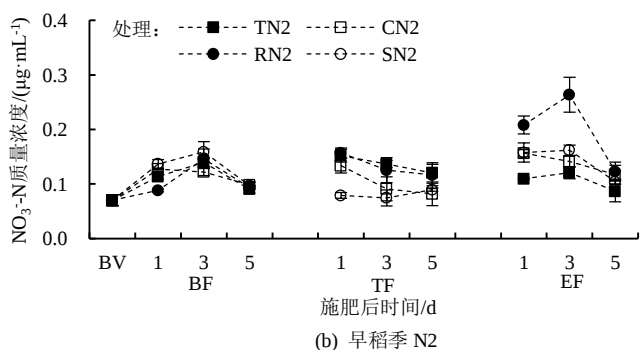
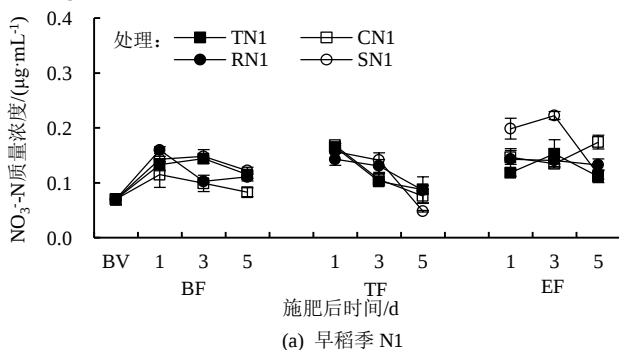
由图 3 可知, 晚稻季施用基肥后 1 d 时, 各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度较试验开始前提高 153.5%~427.8%。施用基肥后 3 d 时, 各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度下降 31.6%~91.6%。施用穗肥后 1 d 时, 各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  达到峰值。N1、N2 水平下, 免耕耕作方式田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度均最高; 施用穗肥后 3 d 时, 各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度快速下降, 稳定在 1.4~2.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。施用穗肥后 1 d, 免耕耕作方式下, N1 水平田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度比 N2 水平高 54.3%。N1、N2 水平下, 免耕耕作方式田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度分别较微耕、旋耕、粉垄耕作方式高 64.0%~302.7%、10.0%~95.2%、13.3%~532.6%。施用穗肥后 3~5 d 时, 各处理田面水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度趋于稳定。

### 2.3 硝态氮质量浓度

图 4 为不同耕作施氮处理下双季稻田田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度变化。早稻季施用基肥后 1 d 时,

各处理田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度较试验开始前小幅增加。施用氮肥后各处理田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度都呈逐渐下降趋势, 施用氮肥后 5 d 时, 各处理田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度稳定在 0.08~0.12  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。施用穗肥后, 随施氮后时间增加, 各处理田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度呈先增加后降低的趋势。

由图 4 可知, 晚稻季施用基肥后 1 d, 各处理田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度较试验开始前小幅增加; 施用基肥后 5 d 时, 各处理田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度趋于稳定。施用穗肥后, N1 水平下除粉垄耕作方式稻田田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度呈先降低后上升趋势外, 其他耕作方式呈逐渐下降的趋势, N2 水平下各耕作方式田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度都呈先下降后上升的趋势。施用穗肥后, 随施氮后时间增加, 除 CN1 处理田面水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度呈逐渐下降趋势外, 其他处理呈先增加后降低的趋势。



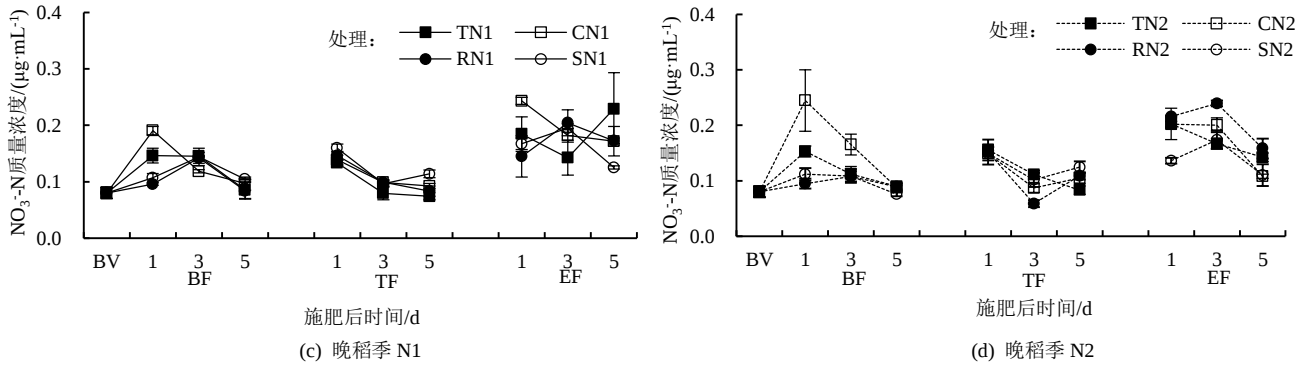


图 4 不同处理下双季稻田田面水  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度

Fig.4 Nitrate nitrogen mass concentration in surface water of double-cropping rice field under different treatments

## 2.4 亚硝态氮质量浓度

图 5 为不同耕作施氮处理下双季稻田田面水亚硝态氮 ( $\text{NO}_2^-$ -N) 质量浓度的变化。早稻季氮肥作基肥以及在分蘖期和孕穗期施用后,田面水中的  $\text{NO}_2^-$ -N

质量浓度较低,在  $0.01\sim 0.12\ \mu\text{g}/\text{mL}$  之间。晚稻季氮肥作基肥以及在分蘖期和孕穗期施用后,田面水中的  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度也较低,在  $0.01\sim 0.08\ \mu\text{g}/\text{mL}$  之间。

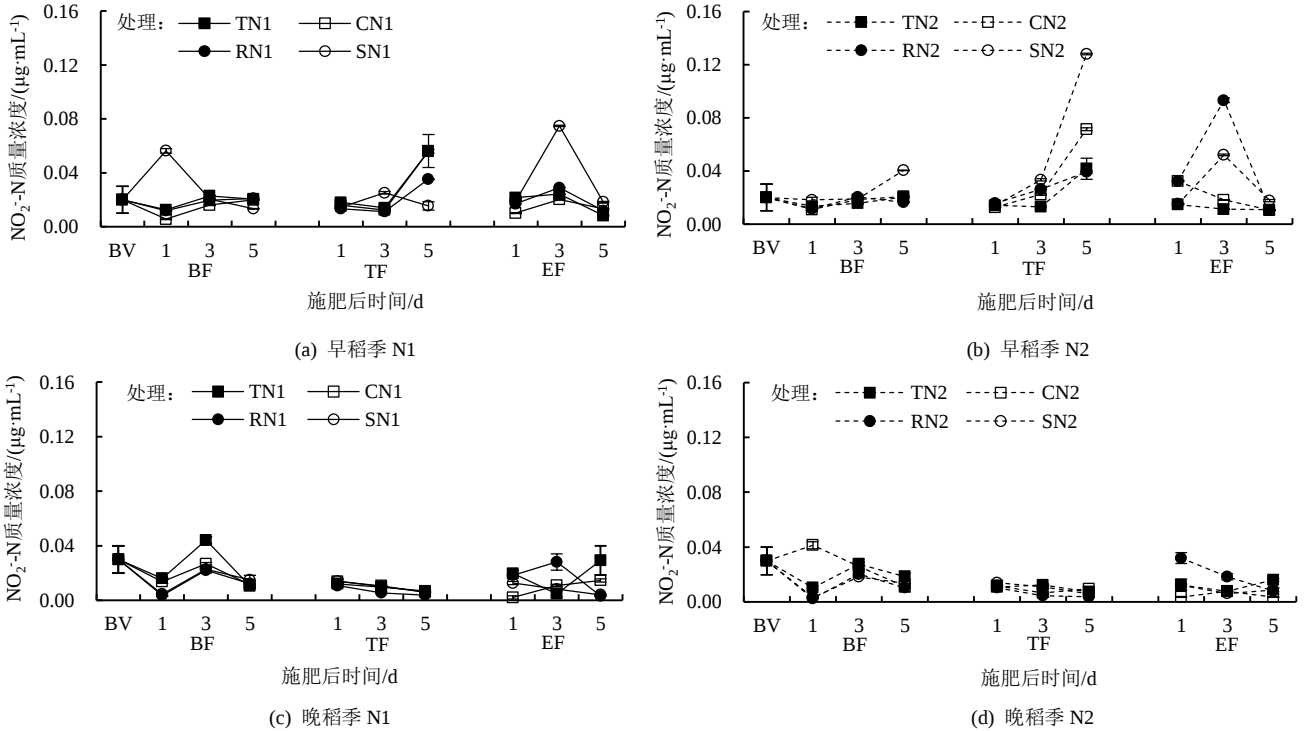


图 5 不同处理下双季稻田田面水  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度

Fig.5 Nitrous nitrogen mass concentration in surface water of double-cropping rice field under different treatments

## 2.5 稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量与田面水中无机氮质量浓度的相关性

由表 1 可知,早稻季不同时期施用氮肥后 1 d 时,稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与田面水中的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度极显著负相关,相关系数为-0.314,与田面水中的  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度显著正相关,相关系数为 0.216;施用氮肥后 3 d 时,稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与田面水中的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度极显著负相关,相关系数为-0.336;施用氮肥后 5 d 时,稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与田面水中的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度显著负相关,相关系数为-0.300。

表 1 稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与田面水中无机氮质量浓度的相关性

Table 1 Correlation between  $\text{N}_2\text{O}$  flux in paddy field and inorganic nitrogen mass concentration in field surface water

| 稻季 | 施氮后时间/d | $\text{NH}_4^+$ -N | $\text{NO}_3^-$ -N | $\text{NO}_2^-$ -N |
|----|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 早稻 | 1       | -0.314**           | 0.216*             | 0.033              |
|    | 3       | -0.336**           | 0.081              | 0.055              |
|    | 5       | -0.300*            | 0.036              | 0.086              |
| 晚稻 | 1       | -0.509**           | 0.152              | 0.108              |
|    | 3       | -0.488**           | 0.307**            | -0.040             |
|    | 5       | -0.457**           | 0.277*             | -0.053             |

注 \*和\*\*分别表示相关性达到  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平,  $n=72$ 。

晚稻不同时期施用氮肥后 1 d 时,稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与田面水中的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度极显著负相关,相关系

数为-0.509;施用氮肥后3 d时,稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量与田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度极显著负相关,相关系数为-0.488,与田面水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度显著正相关,相关系数为0.307;施用氮肥后5 d时,稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量与田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度极显著负相关,相关系数为-0.457,与田面水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度显著正相关,相关系数为0.277。说明不同时期施用氮肥后1~5 d田面水中的铵态氮质量浓度会影响稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放。

### 3 讨论

施用氮肥后稻田田面水中的无机氮质量浓度均发生显著变化<sup>[13]</sup>。本研究表明,施用基肥后,田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度都较试验前提高153.5%~545.1%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度也有不同程度的提高,这与潘圣刚等<sup>[14]</sup>的研究结果相似。施用氮肥后1 d时,田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度达到峰值,主要是尿素水解形成的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不会立即被土壤吸附,而会在水中暂时滞留<sup>[15]</sup>。施用氮肥后3~5 d时,由于植物吸收和土壤胶体对铵态氮的吸附等原因,因而田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度大幅降低,施用氮肥后的5 d时,田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度较施用氮肥后1 d时下降74.6%~94.8%。耕作方式主要通过影响土壤孔隙度、透气性等影响重力水的下渗,从而影响田面水中无机氮的变化<sup>[16]</sup>。此外,4种耕作方式下N1水平田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度均大于N2水平,这表明高施氮量显著增加田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度,这与前人<sup>[17]</sup>研究相似。本研究施用氮肥后的所有处理田面水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度都较低。稻田田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度在0.08~0.20  $\mu\text{g/mL}$ ,其由尿素水解产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经硝化作用形成,淹水时硝化作用较弱,经水稻吸收、反硝化作用和氮素淋失等,田面水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度较低<sup>[18]</sup>。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度不高于0.12  $\mu\text{g/mL}$ ,原因可能是 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的速率比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的速率快,且 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在水中不稳定<sup>[19]</sup>。本研究表明,施用蘖肥和穗肥后,TN1处理田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 较其他处理高4.7%~532.6%,这可能是耕作土层深度较深有利于土壤胶体对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附<sup>[20]</sup>,从而导致微耕、旋耕、粉垄耕作方式下田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度较免耕耕作方式低,同时免耕耕作方式下土壤透气性低,重力水的下渗较为缓慢,影响田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向下迁移。同时,N1处理田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度高。

本研究中氮肥作基肥施用后稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量都较低,各处理 $\text{N}_2\text{O}$ 排放主要集中在施用蘖肥和穗肥后3 d。这主要是因为施入蘖肥,水稻分蘖增加,植株对养分的需要更多,根系微生物生长活跃,促进反硝

化作用,导致 $\text{N}_2\text{O}$ 排放增加<sup>[21]</sup>。施用穗肥前进行晒田,使得土壤水分条件对硝化细菌和反硝化细菌的生长繁殖较为有利,促进了稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放,裴自伟等<sup>[22]</sup>也得到类似结果。施氮量越高, $\text{N}_2\text{O}$ 排放量越高<sup>[23]</sup>,本研究表明,3次施肥后的5 d内,各耕作方式下稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量峰值均是N1水平>N2水平,晚稻季施氮后所有耕作方式下稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量都是N1水平>N2水平,这主要是因为施用较高氮肥为土壤微生物活动产生 $\text{N}_2\text{O}$ 的过程提供较多的反应基质<sup>[24]</sup>,而减施氮肥可以减少硝化和反硝化作用的发生,所以减施氮肥更具有减排优势。耕作方式主要通过影响土壤温湿度、土壤性质和土壤养分状况等对 $\text{N}_2\text{O}$ 排放产生影响。耕作方式改善了土壤理化性状<sup>[25]</sup>,增大土壤孔隙度,降低土壤温度并增加土壤湿度、水稳性团聚体,使得参与硝化作用的微生物数量增加<sup>[26]</sup>,与微耕耕作方式相比,粉垄耕作方式能在一定程度上降低 $\text{N}_2\text{O}$ 排放。微耕耕作方式扰动表层土壤,虽然有利于土壤和大气之间的气体交换,但是会促进土壤有机质降解和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放<sup>[27]</sup>。本研究发现,在施用基肥、蘖肥、穗肥后,TN2处理稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量较其他处理低,这可能是因为免耕表层土壤不受扰动,土壤水分迁移和氧气条件较其他耕作处理差,土壤中 $\text{O}_2$ 有效性和硝化作用降低<sup>[28]</sup>,使得 $\text{N}_2\text{O}$ 排放有效减少,且减施氮肥有助于降低 $\text{N}_2\text{O}$ 排放,这与赵国胜等<sup>[29]</sup>研究结果一致。

田面水中的无机氮也影响 $\text{N}_2\text{O}$ 通量<sup>[30]</sup>。水体表面高质量浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 共同通过富氮水环境的硝化作用和反硝化作用增加 $\text{N}_2\text{O}$ 的产生<sup>[31-32]</sup>。本研究中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均是不同时期施用氮肥后田面水中无机氮的主要形态,稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量与不同时期施用氮肥后1~5 d田面水中的铵态氮质量浓度显著负相关,且田面水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度较低,这说明不同时期施用氮肥后并不会增加稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量。

### 4 结论

1)  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是不同时期施用氮肥后田面水中无机氮的主要形态。施氮后田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度达到峰值后迅速下降。分蘖期和孕穗期施用氮肥后,免耕常规施氮处理田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度增加最快。在各施氮时期,田面水中的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度一直较低。

2) 不同时期施肥后,免耕减氮处理稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量较低。

3) 不同时期施用氮肥后1~5 d的田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度影响稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献：

- [1] LI L B, LI F S, DONG Y F. Greenhouse gas emissions and global warming potential in double-cropping rice fields as influenced by two water-saving irrigation modes in South China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(4): 2 617-2 630.
- [2] HIGHTON M P, BAKKEN L R, DÖRSCH P, et al. Soil N<sub>2</sub>O emission potential falls along a denitrification phenotype gradient linked to differences in microbiome, rainfall and carbon availability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 150: 108 004.
- [3] 赵子健, 李广瑜, 顾海英. 低碳农业发展的途径、潜力和间接减排效应[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2018, 36(1): 68-75, 80. ZHAO Zijian, LI Guangyu, GU Haiying. Abatement approach, potential and indirect effect in low carbon agriculture development[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science)*, 2018, 36(1): 68-75, 80.
- [4] 杨通, 吴俊男, 鲍婷, 等. 耕作方式对双季稻田土壤剖面 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 分布特征的影响[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(1): 78-88. YANG Tong, WU Junnan, BAO Ting, et al. Effects of tillage methods on distribution characteristics of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in soil profile of double-cropping paddy field[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(1): 78-88.
- [5] 王小治, 朱建国, 宝川靖和, 等. 施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 852-856. WANG Xiaozhi, ZHU Jianguo, HOSEN Yasukazu, et al. Dynamic changes and modeling of nitrogen in paddy field surface water after application with different doses of urea[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(5): 852-856.
- [6] 吕耀. 苏南太湖地区水稻土中硝态氮淋溶的定位研究[J]. *土壤通报*, 1999, 30(3): 113-114, 117. LYU Yao. Study on the location of nitrate leaching in paddy soil in southern Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(3): 113-114, 117.
- [7] 马永跃. 品系、施肥和栽培方式对福州平原稻田甲烷和氧化亚氮通量的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2013. MA Yongyue. Effects of varieties, fertilization and cultivation mode on methane and nitrous oxide fluxes in rice paddy in Fuzhou plain[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013.
- [8] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 143-148. QIN Xiaobo, LI Yu'e, LIU Keying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 143-148.
- [9] 杨谢. 保护性耕作下水稻田氮素动态变化研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008. YANG Xie. Study on the dynamic variation of nitrogen of rice paddy soil under conservation tillage[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008.
- [10] 郑佳舜, 胡钧铭, 韦翔华, 等. 绿肥压青粉垄保护性耕作对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(1): 15-24. ZHENG Jiashun, HU Junming, WEI Xianghua, et al. Effect of conservation tillage with smash ridging under green manure condition on the emission of greenhouse gas in the rice field soil[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(1): 15-24.
- [11] HU N J, CHEN Q, ZHU L Q. The responses of soil N<sub>2</sub>O emissions to residue returning systems: A meta-analysis[J]. *Sustainability*, 2019, 11(3): 748.
- [12] 刘靖雯, 李伏生, 董艳芳, 等. 不同灌溉模式和施氮处理下稻田氨氧化细菌及无机氮对 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2017, 36(4): 7-14. LIU Jingwen, LI Fusheng, DONG Yanfang, et al. Effects of ammonia-oxidizing bacteria and inorganic nitrogen on N<sub>2</sub>O emission from paddy soil under different irrigation modes and nitrogen treatments[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2017, 36(4): 7-14.
- [13] 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 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(12): 1 122-1 130. ZHOU Xuan, WU Lianghuan, DAI Feng, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from yellow clayey field during rice growth season[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(12): 1 122-1 130.
- [14] 潘圣刚, 黄胜奇, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对稻田田面水氮素动态变化及氮素吸收利用效率影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 1 000-1 005. PAN Shenggang, HUANG Shengqi, CAO Cougui, et al. Effects of nitrogen management on dynamics of nitrogen in surface water from rice field and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 1 000-1 005.
- [15] 唐浩, 邱卫国, 周翊, 等. 稻麦轮作条件下氮素流失特性及控制对策研究[J]. *人民黄河*, 2010, 32(6): 64-66, 68. TANG Hao, QIU Weiguo, ZHOU Xuan, et al. Study on nitrogen loss characteristics and control countermeasures under rice-wheat rotation[J]. *Yellow River*, 2010, 32(6): 64-66, 68.
- [16] 李景润, 谢军红, 李玲玲, 等. 耕作措施与施氮量对旱作玉米产量及土壤水氮利用效率的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(7): 1 000-1 009. LI Jingrun, XIE Junhong, LI Lingling, et al. Effects of tillage measures and nitrogen fertilizer application on yield and soil water and nitrogen use efficiency of dryland maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2021, 30(7): 1 000-1 009.
- [17] 侯云鹏, 孔丽丽, 杨建, 等. 氮肥运筹对春玉米产量、养分吸收和转运的影响[J]. *玉米科学*, 2016, 24(4): 137-143. HOU Yunpeng, KONG Lili, YANG Jian, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on yield, nutrient absorption and translocation of spring maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(4): 137-143.
- [18] 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 Xiaozhi, GAO Ren, ZHU Jianguo, 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.
- [19] 戴沈艳. 酸性森林土壤亚硝态氮转化及其主要影响因素[D]. 南京: 南京师范大学, 2018. DAI Shenyang. Transformation of nitrous nitrogen in acid forest soil and its main influencing factors[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.
- [20] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 6-10. ZHU Liquan, XIA Xiaojian, HU Qingyu, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 6-10.
- [21] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的关键过程及影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1 781-1 798. CAO Wenchao, SONG He, WANG Yajing, et al. Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1 781-1 798.
- [22] 裴自伟, 陈意超, 李伏生, 等. 不同灌水模式和施氮处理下稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量及其与硝化-反硝化细菌数量的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12): 2 561-2 568. PEI Ziwei, CHEN Yichao, LI Fusheng, et al. The relationship between N<sub>2</sub>O emission flux from paddy fields and nitrifying-denitrifying bacteria under different irrigation methods and nitrogen treatments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2 561-2 568.
- [23] GUZMAN-BUSTAMANTE I, WINKLER T, SCHULZ R, et al. N<sub>2</sub>O emissions from a loamy soil cropped with winter wheat as affected by N-fertilizer amount and nitrification inhibitor[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 114(3): 173-191.
- [24] 邵继海, 陈杰锋, 胡婷. 林氏念珠藻对酸化稻田水稻产量和土壤细菌群落结构与功能的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2022,

- 50(6): 22-28.  
SHAO Jihai, CHEN Jiefeng, HU Ting. Effects of *Nostoc linckia* on rice grain yield and the structure and functions of bacterial community in acidified paddy soil[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 22-28.
- [25] 杨博, 屈忠义, 孙慧慧, 等. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 52-59.  
YANG Bo, QU Zhongyi, SUN Huihui, et al. The effect of smash-ridging cultivation on properties of saline-alkali soil in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 52-59.
- [26] 刘江汉, 何文寿. 粉垄耕作对土壤性质及马铃薯产量的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(2): 20-25.  
LIU Jianghan, HE Wenshou. Effects of smash-ridging technology on soil properties and potato yield[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(2): 20-25.
- [27] 谭月臣. 氮肥、耕作和秸秆还田对作物生产和温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.  
TAN Yuechen. Crop production and greenhouse gas emission as affected by fertilization, tillage and straw management[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [28] 秦川. 稻田垄作免耕提高土壤氮素肥力的作用机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.  
QIN Chuan. Study on the mechanism of improving soil nitrogen fertility by combination ridge with No-tillage in paddy field[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [29] 赵国胜, 韦至激, 李伏生. 不同灌溉模式和施氮处理下双季稻田  $\text{N}_2\text{O}$  通量与土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 611-619.  
ZHAO Guosheng, WEI Zhiji, LI Fusheng. Relationship between nitrous oxide fluxes and soil enzyme activities in double-cropping rice field under different irrigation modes and nitrogen treatments[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 611-619.
- [30] XIAO Q T, HU Z H, FU C S, et al. Surface nitrous oxide concentrations and fluxes from water bodies of the agricultural watershed in Eastern China[J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 185-192.
- [31] JURADO A, BORGES A V, BROUÏÈRE S. Dynamics and emissions of  $\text{N}_2\text{O}$  in groundwater: A review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584/585: 207-218.
- [32] HU M P, CHEN D J, DAHLGREN R A. Modeling nitrous oxide emission from rivers: A global assessment[J]. Global Change Biology, 2016, 22(11): 3 566-3 582.

## Effects of Different Tillage and Nitrogen Applications on $\text{N}_2\text{O}$ Emission and Mineral Nitrogen in Surface Water of Paddy Field

WU Qingfeng, ZHENG Jiashun, XIAO Wei, LI Fusheng\*  
(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** 【Objective】 Rice in southern China is traditionally grown in paddy fields and improving its fertilizer use efficiency and reducing greenhouse emissions is critical to helping achieve the mandatory goal of zero-increase in agrochemical application without compromising crop yield. This paper presents the findings of an experimental study on combined effect of tillage and nitrogen application on  $\text{N}_2\text{O}$  emission and mineral N concentrations in surface water of the paddy fields. 【Method】 The experiment was conducted in a double-cropping rice field and involved four tillage treatments: zero tillage (T), micro tillage (C), rotary tillage (R), and smash ridging tillage (S). For each tillage treatment, there were two N fertilizations: conventional N application at  $1\ 225\ \text{kg}/\text{hm}^2$  (N1) and reducing N application to  $150\ \text{kg}/\text{hm}^2$  (N2).  $\text{N}_2\text{O}$  emission and mineral N concentration in the surface water in each treatment were measured 1, 3, and 5 days after N fertilization at different growth stages of the rice. 【Result】 ① One day after N fertilization, ammonium concentration in the surface water increased rapidly to a peak one and then declined quickly. In the conventional fertilization (N1) where N was applied at both tillering and booting stage, zero-tillage increased ammonium concentration in the surface water by 4.7%~532.6%, compared to other treatments. Overall, nitrate and nitrite concentrations in the surface water of all treatments were in the range 0.08~0.20  $\mu\text{g}/\text{mL}$  and less than 0.12  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , respectively. ② Reducing N application and applying it as basal fertilization and topdressing at tillering and booting stages, TN2 reduced  $\text{N}_2\text{O}$  emission more than other tillage treatments. ③  $\text{N}_2\text{O}$  emission was negatively correlated to ammonium concentration in the surface water 1~5 days after N fertilization, with the correlation coefficient varying from -0.509~-0.300, depending on the timing of the fertilization. 【Conclusion】 After N fertilization, ammonium became the primary inorganic nitrogen in the surface water. Ammonium concentration of the surface water 1~5 days after the fertilization impacted  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, irrespective of the timing of the fertilization.

**Key words:** tillage method; nitrogen rate; inorganic nitrogen;  $\text{N}_2\text{O}$  emission; paddy soil

责任编辑: 白芳芳