

氮肥减施对节水灌溉稻田NH₃与N₂O排放及氮肥利用的影响

李铁成^{1,2} 张忠学^{1,2} 张作合³ 杜思澄^{1,2} 韩羽^{1,2} 薛里^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061)

摘要: 为探究节水灌溉模式下黑土稻田 NH₃、N₂O 排放及氮肥吸收利用对减施氮肥的响应规律,以黑龙江省黑土稻田为研究对象,于 2021 年进行了大田试验,试验设置常规淹灌(F)和控制灌溉(C)2 种灌溉模式,全生育期施氮量设置常规施氮水平(N,110 kg/hm²)、减氮 10% (N1,99 kg/hm²) 和减氮 20% (N2,88 kg/hm²) 3 个水平,并在 F 和 C 灌溉模式下分别设置不施氮肥处理(CK1 和 CK2)作为对照组,共 8 个处理。分析了不同灌溉模式下减施氮肥对水稻全生育期 NH₃ 挥发速率和 N₂O 排放的影响,计算了氮肥气态损失量和损失率,并基于同位素示踪技术进一步估算了水稻对氮肥的吸收利用量及水稻收获后土壤中的氮肥残留量。结果表明:2 种灌溉模式下的氮肥气态损失量及损失率均随着施氮量的减少而降低。控制灌溉模式的应用增加了黑土稻田氮肥气态损失,其各处理的氮肥气态损失量及损失率均高于常规淹灌模式下相同施氮量处理。然而同位素示踪结果表明,采用控制灌溉模式能够增强水稻对氮肥的吸收,同时能够有效降低氮肥损失。控制灌溉模式下各处理水稻对氮肥的吸收利用量和利用率均显著高于常规淹灌模式下相同施氮量处理,且当施氮量相同时,控制灌溉模式下各处理的氮肥损失量和总损失率均显著低于常规淹灌模式($P<0.05$)。综上所述,控制灌溉模式下减施氮肥提高了氮肥吸收利用率,同时降低了氮肥损失,并可稳产甚至能够在一定程度上增加水稻产量。研究结果可为东北地区稻田制定节肥、增效、减排兼容的水肥资源管理策略提供科学依据,对保障东北地区农业可持续发展具有重要意义。

关键词: 稻田; 节水灌溉; 减施氮肥; 气态损失; 吸收利用; 同位素示踪技术

中图分类号: S274; S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0348-08 OSID: 

Effects of Nitrogen Fertilizer Reduction under Water-saving Irrigation on NH₃, N₂O Emissions and Absorption of Nitrogen Fertilizer in Black Soil Paddy Fields

LI Tiecheng^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} ZHANG Zuohe³ DU Sicheng^{1,2} HAN Yu^{1,2} XUE Li^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
3. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China)

Abstract: Field experiment was conducted in black soil paddy fields in Heilongjiang Province to explore the response regularity between NH₃, N₂O emissions and absorption of nitrogen fertilizer under water-saving irrigation and nitrogen fertilizer reduction in 2021. Two irrigation modes were set up: conventional flooding irrigation (F) and controlled irrigation (C). The nitrogen application rate throughout the entire growth period was set at three levels: conventional nitrogen application level (N, 110 kg/hm²), nitrogen reduction 10% (N1, 99 kg/hm²), and nitrogen reduction 20% (N2, 88 kg/hm²). Under F and C irrigation modes, no nitrogen fertilizer treatment (CK1 and CK2) were set as the control, with a total of eight treatments. The effects of nitrogen fertilizer reduction on NH₃ volatilization rate and N₂O emissions fluxes during the entire growth period of rice under different irrigation modes were analyzed, the gaseous loss amount and gaseous loss rate of nitrogen fertilizer were calculated, and the absorption of nitrogen

收稿日期: 2023-07-24 修回日期: 2023-08-22
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079028)
作者简介: 李铁成(1994—),男,博士生,主要从事节水理论与技术研究,E-mail: tiecheng798@163.com
通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

fertilizer by rice and the residual nitrogen fertilizer in the soil after rice harvest were further estimated based on isotope tracing technology. The results showed that the gaseous loss amount and gaseous loss rate of nitrogen fertilizer under both irrigation modes were decreased with the decrease of nitrogen application rate. The application of controlled irrigation mode increased the gaseous loss of nitrogen fertilizer in black soil paddy fields, and the gaseous loss amount and gaseous loss rate of each treatment were higher than those under conventional flooding irrigation mode with the same nitrogen application rate. However, isotope tracing results indicated that controlled irrigation mode can enhance absorption of nitrogen fertilizer by rice and effectively reduce nitrogen fertilizer loss. The absorption and recovery rate of nitrogen fertilizer by rice under controlled irrigation mode were significantly higher than those under conventional flooding mode with the same nitrogen application rate. Moreover, when the nitrogen application rate were the same, the loss amount and total loss rate of nitrogen fertilizer under controlled irrigation mode were significantly lower than those under conventional flooding mode ($P < 0.05$). In total, nitrogen fertilizer reduction under controlled irrigation mode improved recovery rate of nitrogen fertilizer, reduced nitrogen fertilizer loss, and can stabilize or even increase rice yield to a certain extent. The research results can provide scientific basis for formulating water and fertilizer resource management strategies that were compatible with fertilizer conservation, efficiency enhancement, and emission reduction of paddy fields in Northeast China, which were of great significance for ensuring the sustainable development of agriculture in Northeast China.

Key words: paddy field; water-saving irrigation; nitrogen fertilizer reduction; gaseous loss; absorption and utilization; isotope tracing technology

0 引言

在过去的 50 年,氮肥作为农业生产活性氮的主要来源,其被广泛应用于农业生产,以应对人口不断增长带来的粮食需求。尿素由于增产效果明显且容易获取而成为应用最广泛的一种无机氮肥^[1]。然而,过量施用尿素不能显著提高作物产量甚至会导致减产,而且盈余的氮素会以气态形式排放到大气中,对环境造成严重污染。 N_2O 排放和 NH_3 挥发是尿素气态损失的两种重要途径^[2]。 N_2O 作为三大温室气体之一,其年增温潜势是 CO_2 的 298 倍,不仅会加剧全球气候变暖,而且会消耗平流层臭氧,导致臭氧层被破坏。 NH_3 是大气中最丰富的碱性气体,一是能与 SO_2 和 N_xO 反应生成 $\text{PM}_{2.5}$,再结合其他污染物最终形成雾霾,二是会通过大气沉降的方式再次进入陆地生态系统,会增加农田生态系统 N_2O ,导致水生生态系统酸化和富营养化^[3-4]。我国作为一个农业生产大国,稻田气态氮损失(N_2O 排放和 NH_3 挥发)已成为不可忽视的环境问题,其所造成的氮素损失也导致氮肥利用率降低。因此,亟需通过调整农田管理措施来提高氮肥利用率并减少环境污染,这是我国农业高质量发展的现实要求。

近年来,为了缓解农业水资源供需矛盾,节水灌溉已大规模推广应用。之前大量研究证实节水灌溉能够满足水稻基本需水要求,并且能够促进水稻根系生长,在减少灌溉量的同时提高了氮肥吸收利用率^[5]。但节水灌溉对气态氮排放的促进或抑制作用仍不明确。节水灌溉主要通过改变土壤含水率条

件,从而对气态氮排放产生影响。INUBUSHI 等^[6]研究表明,高土壤含水率限制了氧气在土壤中的扩散,反硝化速率增强促进 N_2O 排放,即增加了气态氮排放。BHAGAT 等^[7]研究却认为,高土壤含水率能够抑制土壤氨挥发,从而减少气态氮排放。XU 等^[8]研究也表明,控制灌溉虽然增加了 N_2O 排放,却能有效减少土壤氨挥发,故减少了气体氮排放。与此同时,不合理且过量的氮肥施用是致使气态氮损失增加的另一主要因素。KIM 等^[9]研究发现,当氮肥用量低于作物对氮肥需求量时, N_2O 排放由于缺少底物,故排放通量较低且处于稳定状态;然而,当施氮用量远高于作物需求量时,过量的氮素为土壤微生物提供了充足的底物,致使 N_2O 排放通量快速增加。同时,SMITH 等^[10]研究表明,土壤 NH_3 挥发损失速率和损失量随着氮肥施用量的增加而增大。因此,探究节水灌溉模式下减施氮肥能否有效减少稻田气态氮损失,对于环境保护具有重要意义。

因此,本文通过一年的大田试验,测定整个水稻生长季的 N_2O 排放通量和 NH_3 挥发速率,计算氮肥气态损失量和损失率,并基于¹⁵N 示踪技术估算水稻对氮肥的吸收利用量及水稻收获后氮肥在土壤中的残留量,为实现黑土稻田水肥资源高效利用及增产减排提供数据支撑和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年在黑龙江省水稻灌溉试验站进行,该站($46^\circ 57' 28''\text{N}$, $127^\circ 40' 45''\text{E}$)位于庆安县和

平镇,是典型的寒地黑土分布区。该地多年平均水面蒸发量为 750 mm,作物水热生长期为 156 ~ 171 d,全年无霜期 128 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候。供试土壤为黑土型水稻土,种植水稻 20 a 以上,土壤耕层厚度 11.3 cm,犁底层厚度 10.5 cm,土壤容重 1.10 g/cm³,孔隙度 61.8%。移栽与施肥前土壤基本理化性质为:pH 值 6.40,耕层土壤(0 ~ 20 cm)基础肥力为:有机质质量比 41.4 g/kg、全氮质量比 17.16 g/kg、全磷质量比 15.25 g/kg、全钾质量比 20.22 g/kg、碱解氮质量比 154.36 g/kg、有效磷质量比 25.33 g/kg 和速效钾质量比 157.25 g/kg。

1.2 试验设计

1.2.1 小区试验

采用灌溉模式和施氮量两因素全面试验。灌溉模式设置两种,分别为常规淹灌(F)和控制灌溉(C)。不同灌溉模式的水分管理标准如表 1 所示。施氮量设置 3 个水平,分别为 N(110 kg/hm²,常规

施氮水平)、N1(99 kg/hm²,减氮 10%)、N2(88 kg/hm²,减氮 20%)。并在两种灌溉模式下分别设置不施氮肥处理(CK1 和 CK2)作为对照组,共 8 个处理,每个处理 3 次重复,共计 24 个小区。小区采用随机区组布置,每个小区面积为 100 m²(10 m × 10 m)。为防止各小区之间的水肥交换,四周设置水泥埂作为隔断,埋深至地表以下 40 cm。供试水稻品种为当地推广种植品种“龙庆稻 8”,种植株距为 16.67 cm,行距为 25 cm,种植密度约为 24 穴/m²,每穴种植 3 株。供试的化肥分别为尿素(N 含量为 46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅ 含量为 12%)、硫酸钾(K₂O 含量为 50%)。各处理磷肥和钾肥的用量一致,分别为 P₂O₅ 45 kg/hm²和 K₂O 80 kg/hm²,氮肥按照基肥、蘖肥、穗肥比例为 4.5:2:3.5 分施,磷肥作为基肥一次性施入,钾肥在基肥与水稻 8.5 叶龄分两次施用,施用比例为 1:1。其他田间管理措施与当地高产田保持一致。

表 1 不同灌溉模式的水分管理标准

Tab. 1 Water management standards for different irrigation modes

灌溉模式	土壤含水率	返青期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
常规淹灌	上限	30 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	自然落干
	下限	0 mm	10 mm	10 mm		10 mm	10 mm	10 mm	
控制灌溉	上限	30 mm	30 mm	30 mm	晒田	30 mm	30 mm	0 mm	自然落干
	下限	0 mm	0.7θ _s	0.7θ _s		0.8θ _s	0.8θ _s	0.7θ _s	

注:θ_s表示根层土壤饱和含水率。

1.2.2 微区试验

为明确水稻对基肥、蘖肥和穗肥 3 期肥料的吸收利用及残留情况,在每个小区内设置 1 个微区,即每个处理下设置 3 个分处理,分处理 1(M1)为仅基肥施用¹⁵N-尿素,蘖肥和穗肥施用未标记的普通尿素;分处理 2(M2)为仅蘖肥施用¹⁵N-尿素,基肥和穗肥施用未标记的普通尿素;分处理 3(M3)为仅穗肥施用¹⁵N-尿素,基肥和蘖肥施用未标记的普通尿素。微区为 1 m × 1 m × 0.5 m 无底钢板矩形框,微区埋深为 30 cm,设置单独排灌系统。供试标记肥料为上海化工研究院生产的丰度为 10.22% 的¹⁵N-尿素。每个微区内水稻种植品种、种植密度、肥料用量、灌溉模式及田间管理措施与所在的试验小区保持一致。

1.3 测定项目与方法

NH₃挥发速率使用通气法进行测量。通风室由 PVC 管(内径 15 cm,高 20 cm)和 2 块圆形海绵(直径 16 cm,厚度 2 cm)制成,海绵中浸泡有 15 mL 磷酸盐/甘油溶液(50 mL 分析磷酸盐和 40 mL 的甘油用纯水稀释至 1 000 mL)。通风室布置在每个小区中,埋深为 5 cm。2 块海绵分别插入 PVC 管中,其中上层的海绵与管顶部相平,下层海绵与上层海绵

间隔 1 cm。下雨时,PVC 管的顶部盖上防雨罩。在施用氮肥 7 d 后每天取样,然后每隔 1 ~ 3 d 再取样 7 d,最后每隔 7 d 取样 1 次。将下层海绵浸入 500 mL 塑料瓶中,加 300 mL 1.0 mol/L KCl 溶液,并在恒温空气振荡器中振荡,然后用紫外-可见分光光度计(UV-1780 型,岛津公司,日本)分析提取的溶液。NH₃挥发速率(F_{NH_3} , kg/(hm²·d))计算公式为^[11]

$$F_{NH_3} = \frac{0.01M}{AD}$$

(1)

式中 M——通气法单个装置平均每次测得的氨量,mg
A——捕获装置的横截面积,m²
D——每次连续捕获的时间,d

N₂O 排放通量使用静态室-气相色谱法进行测定,测量频率为 7 d 一次,遇强降雨则推迟测量,测量时间固定在 09:00—11:00。静态室由静态箱和不锈钢底座组成。在移栽前,将不锈钢底座布置在每个小区中,埋深为 30 cm。静态箱由透明有机玻璃板制成,每个静态箱都安装一个空气温度计和电子风扇,采样过程中需将静态箱安置在不锈钢底座上,采样过程外需将静态箱从底座上移走。在采样

过程的 0、10、20、30 min, 分别使用 50 mL E-Switch 气袋通过橡胶管收集 4 个气体样品, 用于测量每次 N₂O 排放通量。N₂O 排放通量 (F_{N_2O} , $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) 计算公式为^[12]

$$F_{N_2O} = \rho h \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + t} \tag{2}$$

式中 ρ ——标准状态下 N₂O 密度, kg/m^3
 h ——静态箱在土壤或地表水上方的有效高度, m
 dc/dt ——室内 N₂O 气体浓度的增加速率, $\text{mL}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$
 t ——取样时静态箱内的平均空气温度, $^{\circ}\text{C}$
NH₃ 累积挥发量 (M_{NH_3} , kg/hm^2) 和 N₂O 累积排放量 (M_{N_2O} , kg/hm^2) 计算公式为^[13]

$$M_{NH_3} = \sum_i^n (E_{NH_3i} D_i) \tag{3}$$

$$M_{N_2O} = \sum_i^n (E_{N_2Oi} D_i) \tag{4}$$

式中 E_{NH_3i} ——第 i 次和第 $i-1$ 次采样的平均 NH₃ 挥发速率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$
 E_{N_2Oi} ——第 i 次和第 $i-1$ 次采样的平均 N₂O 排放通量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
 D_i ——第 i 次和第 $i-1$ 次采样的时间间隔, d
 n ——采样次数
氮肥气态损失率 (G_{NLR} , %) 计算公式为^[14]

$$G_{NLR} = \frac{G_{\text{fertilizer}} - G_{CK}}{F_{N(\text{total})}} \times 100\% \tag{5}$$

其中 $G_{\text{fertilizer}} = M_{NH_3-N} + M_{N_2O-N}$ (6)

$$G_{CK} = M_{NH_3-N} + M_{N_2O-N} \tag{7}$$

式中 $G_{\text{fertilizer}}$ ——施氮处理气态氮损失量, kg/hm^2
 G_{CK} ——不施氮肥处理气态氮损失量, kg/hm^2
 $F_{N(\text{total})}$ ——施氮量, kg/hm^2
 M_{NH_3-N} ——NH₃ 挥发氮损失量, kg/hm^2
 M_{N_2O-N} ——N₂O 排放氮损失量, kg/hm^2

于水稻成熟期在每个小区和微区中分别随机选择 5 株具有代表性的水稻植株。使用镰刀采集水稻植株样品, 并进一步将其分为穗、茎和叶。使用压力水枪清洗穗、茎和叶, 并将其置于干燥箱中 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, 然后在 70 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥至恒定质量并称量。将称量后的样品使用粉碎机粉碎过 100 目筛后混匀装入自封袋备用。同时, 用 100 mL 环刀采集未扰动土壤样品, 分别在 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 层采集土壤样本。将未扰动的土壤样品置于干燥箱中, 在 70 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥至恒定质量, 并称量以获得土壤容重。然后剔除土壤样本中的石头和植物残体, 将土壤样品风干至恒定质量, 并研磨过 100 目筛

装入自封袋备用。于东北农业大学农业农村部水资源高效利用重点实验室使用元素分析仪 (Flash 2000 HT 型, 美国赛默飞世尔科学公司) 和同位素质谱仪 (DELTA V Advantage, 美国赛默飞世尔科技公司) 测量植物样品和土壤样品的 N 含量和丰度。

水稻植株从基肥、蘖肥和穗肥中吸收的¹⁵N 百分比 ($N_{\text{dff}(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})}$, %) 以及基肥、蘖肥和穗肥残留在土壤中的¹⁵N 百分比 ($A_{(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})}$, %) 计算公式为^[15]

$$N_{\text{dff}(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})} = \frac{a - b}{c - d} \times 100\% \tag{8}$$

$$A_{(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})} = \frac{a - b}{c - d} \times 100\% \tag{9}$$

式中 a ——微区内样品¹⁵N 丰度, %
 b ——微区所在小区内样品¹⁵N 丰度, %
 c ——¹⁵N-尿素¹⁵N 丰度, %
 d ——天然¹⁵N 丰度标准值, %
水稻植株从基肥、蘖肥和穗肥中吸收的氮素量 ($N_{(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})}$, kg/hm^2) 为

$$N_{(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})} = P_{NAA} N_{\text{dff}(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})} \tag{10}$$

式中 P_{NAA} ——植株氮素总累积量, kg/hm^2
水稻植株对氮肥的吸收利用率 ($P_{NRE(\text{total})}$, %) 为

$$P_{NRE(\text{total})} = \frac{N_{(\text{total})}}{F_{N(\text{total})}} \times 100\% \tag{11}$$

其中 $N_{(\text{total})} = N_{(\text{basal})} + N_{(\text{tillering})} + N_{(\text{panicle})}$ (12)

式中 $N_{(\text{total})}$ ——水稻植株从基肥、蘖肥和穗肥中吸收的总氮素量, kg/hm^2
 $N_{(\text{basal})}$ ——水稻植株从基肥中吸收的总氮素量, kg/hm^2
 $N_{(\text{tillering})}$ ——水稻植株从蘖肥中吸收的总氮素量, kg/hm^2
 $N_{(\text{panicle})}$ ——水稻植株从穗肥中吸收的总氮素量, kg/hm^2

基肥、蘖肥和穗肥残留在土壤中的氮素量 ($R_{(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})}$, kg/hm^2) 为

$$R_{(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})} = T_s A_{(\text{basal}, \text{tillering}, \text{panicle})} \tag{13}$$

其中 $T_s = YVN_s$ (14)

式中 T_s ——各层土壤氮素量, kg/hm^2
 Y ——各层土壤容重, kg/m^3
 V ——各层土壤体积, m^3
 N_s ——各层土壤氮含量, %

氮肥在土壤中的残留率 ($S_{NFR(\text{total})}$, %) 为

$$S_{NFR(\text{total})} = \frac{R_{(\text{total})}}{F_{N(\text{total})}} \times 100\% \tag{15}$$

其中 $R_{(\text{total})} = R_{(\text{basal})} + R_{(\text{tillering})} + R_{(\text{panicle})}$ (16)

式中 $R_{(total)}$ ——基肥、蘖肥和穗肥在土壤中的总残留量, kg/hm^2

$R_{(basal)}$ ——基肥在土壤中的残留量, kg/hm^2

$R_{(tillering)}$ ——蘖肥在土壤中的残留量, kg/hm^2

$R_{(panicle)}$ ——穗肥在土壤中的残留量, kg/hm^2

氮肥总损失率 ($L_{(total)}$, %) 为^[16]

$$L_{(total)} = 1 - P_{NRE (total)} - S_{NFR (total)} \quad (17)$$

2 结果与分析

2.1 节水灌溉模式下减施氮肥对 NH_3 挥发的影响

不同处理的 NH_3 挥发速率如图 1 所示。结果表明, 2 种灌溉模式下, 施肥处理水稻生育期内均出现 3 次 NH_3 挥发排放峰值, 且均是在施肥后 2 ~ 3 d 内出现排放峰值。两种灌溉模式下, NH_3 挥发排放峰值均随着施氮量的减少而降低。当施氮量相同时, 控制灌溉模式下各施肥处理的 NH_3 挥发排放峰值均高于常规淹灌模式下各处理。CN、CN1 和 CN2 处理的 NH_3 挥发排放峰值分别高于 FN、FN1 和 FN2 处理 9.65% ~ 24.48%、6.44% ~ 19.17% 和 3.96% ~

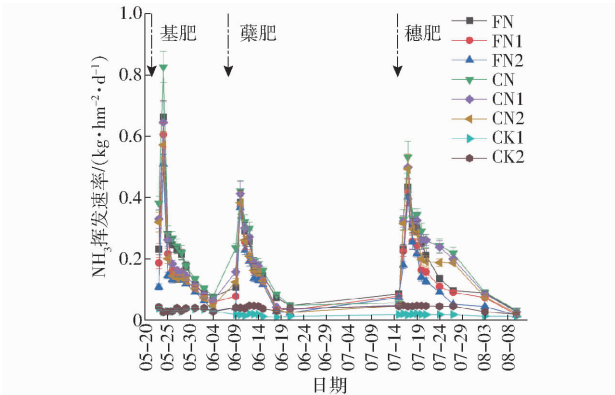


图 1 不同处理的 NH_3 挥发速率变化曲线

Fig.1 Variation curves of NH_3 volatilization rate under different treatments

22.61%, 其中 CN 处理的 NH_3 挥发排放峰值最高为 $0.83 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。不同处理的 NH_3 累积挥发量如表 2 所示。结果表明, 2 种灌溉模式下, NH_3 累积挥发量均随着施氮量的减少而降低。控制灌溉模式下各处理的 NH_3 累积挥发量均显著高于常规淹灌模式下相同施氮量处理 ($P < 0.05$)。

表 2 不同处理的 NH_3 累积挥发量、 NO_2 累积排放量、氮肥气态损失量及损失率						
Tab.2 Accumulate NH_3 volatilization rate, accumulate NO_2 emission fluxes, nitrogen fertilizer gaseous nitrogen loss and loss rate under different treatments						
处理	NH_3 累积挥发量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	NH_3 挥发氮损失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	N_2O 累积排放量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	N_2O 排放氮损失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮肥气态损失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮肥气态损 失率/%
FN	12.36 ^b	10.18 ^b	0.77 ^{ab}	0.49 ^{ab}	10.67 ^b	7.79 ^a
FN1	9.95 ^d	8.20 ^d	0.70 ^{bc}	0.45 ^{bc}	8.64 ^c	6.60 ^{bc}
FN2	8.20 ^e	6.75 ^e	0.49 ^d	0.31 ^d	7.07 ^d	5.63 ^c
CN	14.98 ^a	12.33 ^a	0.85 ^a	0.54 ^a	12.87 ^a	8.35 ^a
CN1	12.91 ^b	10.63 ^b	0.73 ^{abc}	0.46 ^{abc}	11.09 ^b	7.48 ^{ab}
CN2	11.10 ^c	9.14 ^c	0.62 ^{cd}	0.39 ^{cd}	9.54 ^c	6.65 ^{bc}
灌溉模式 (A)	**	**	*	*	**	**
施肥量 (B)	**	**	**	**	**	**
A × B	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: 同列数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); * 表示 0.05 水平上影响显著, ** 表示 0.01 水平上影响显著, ns 表示影响不显著, 下同。

2.2 节水灌溉模式下减施氮肥对 N_2O 排放的影响

不同处理的 N_2O 排放通量如图 2 所示。结果表明, 2 种灌溉模式下, 施肥处理在水稻分蘖期和拔节期分别出现 2 次 N_2O 排放通量峰值。2 种灌溉模式下, N_2O 排放通量峰值均随着施氮量的减少而降低。当施氮量相同时, 控制灌溉模式下各施肥处理的 N_2O 排放通量峰值均高于常规淹灌模式下各处理。CN、CN1 和 CN2 处理的分蘖期 N_2O 排放通量峰值分别高于 FN、FN1 和 FN2 处理 2.92%、5.44% 和 2.00%, CN、CN1 和 CN2 处理的拔节期 N_2O 排放通量峰值分别高于 FN、FN1 和 FN2 处理 1.62%、12.49% 和 4.42%。其中 CN 处理的 N_2O 排放通量

峰值最高为 $191.92 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。不同处理的 N_2O 累积排放量如表 2 所示。结果表明, 两种灌溉模式下, N_2O 累积排放量均随着施氮量的减少而逐渐降低。当施氮量相同时, 控制灌溉模式下各处理的 N_2O 累积排放量高于常规淹灌模式下相同施氮量处理 3.90% ~ 26.29%。

2.3 节水灌溉模式下减施氮肥对氮肥气态损失的影响

不同处理的氮肥气态损失量及损失率如表 2 所示。结果表明, 2 种灌溉模式下氮肥气态损失量及损失率均随着施氮量的减少而降低。FN 处理的氮肥气态损失量及损失率均显著高于 FN1 和 FN2 处

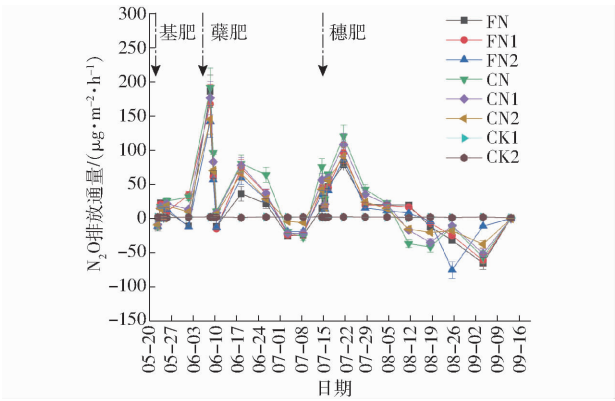


图 2 不同处理的 N₂O 排放通量变化曲线

Fig.2 Variation curves of N₂O emission fluxes under different treatments

理, FN1 处理的氮肥气态损失量及损失率显著高于 FN2 处理 ($P < 0.05$)。CN 处理的氮肥气态损失量及损失率均显著高于 CN1 处理和 CN2 处理, CN1 处理的氮肥气态损失量及损失率显著高于 CN2 处理 ($P < 0.05$)。当施氮量相同时, 控制灌溉模式下各处理的氮肥气态损失量及损失率均高于常规淹灌模式。CN 处理的氮肥气态损失量显著高于 FN 处理 ($P < 0.05$), 但 CN 处理的氮肥气态损失率与 FN 处理无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.4 节水灌溉模式下减施氮肥对水稻产量与氮肥吸收、残留及损失的影响

不同处理的水稻产量与氮肥吸收量、残留量及损失量如表 3 所示。结果表明, 适量减施氮肥能够稳产甚至在一定程度上增加水稻产量, 2 种灌溉模式下水稻产量均随着施氮量的减少先增加后减少。当施氮量相同时, 控制灌溉模式下水稻产量均高于常规淹灌模式。常规淹灌模式下, 水稻植株对氮肥的吸收利用量随着施氮量的降低而降低, 吸收利用率随着施氮量的降低而增加; 控制灌溉模式下, 吸收利用率随着施氮量的降低而升高, CN1 处理的吸收利用量高于 CN 和 CN2 处理。且控制灌溉模式下各处理的吸收利用量和吸收利用率均显著高于常规淹灌模式下相同施氮量处理 ($P < 0.05$)。2 种灌溉模式下, 氮肥在土壤中的残留量随着施氮量的减少而降低, 残留率随着施氮量的降低而增大。当施氮量相同时, 控制灌溉模式下氮肥在土壤中的残留量和残留率均高于常规淹灌模式。2 种灌溉模式下, 氮肥损失量和总损失率均随着施氮量的减少而降低, 且控制灌溉模式下各处理的氮肥损失量和总损失率均显著低于常规淹灌模式下相同施氮量处理 ($P < 0.05$)。

表 3 不同处理的水稻产量与氮肥吸收量、残留量及损失量

Tab.3 Rice yield and nitrogen absorption, residual, and loss under different treatments

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥吸收利用量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥吸收 利用率/%	氮肥残留量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥 残留率/%	氮肥损失量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥 总损失率/%
FN	7 569 ^c	31.39 ^b	28.54 ^e	24.38 ^b	22.16 ^b	54.23 ^a	49.30 ^a
FN1	8 465 ^a	30.08 ^{bc}	30.39 ^{de}	22.69 ^c	22.92 ^b	46.22 ^b	46.69 ^a
FN2	7 856 ^{bc}	28.11 ^c	31.95 ^{cd}	22.12 ^c	25.14 ^a	37.76 ^c	42.91 ^b
CN	7 874 ^{bc}	36.97 ^a	33.61 ^c	26.90 ^a	24.46 ^a	46.13 ^b	41.93 ^b
CN1	8 644 ^a	37.77 ^a	38.15 ^b	24.40 ^b	24.65 ^a	36.83 ^c	37.20 ^c
CN2	8 180 ^{ab}	35.81 ^a	40.69 ^a	22.62 ^c	25.70 ^a	29.57 ^d	33.61 ^d
灌溉模式 (A)	**	**	**	**	**	**	**
施肥量 (B)	*	*	**	**	**	**	**
A × B	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

3 讨论

施入土壤的尿素除被作物吸收及被土壤固定外, 其余主要通过气态氮排放、径流和淋溶等途径损失^[17]。尿素气态氮损失形式主要包括 NH₃ 挥发和 N₂O 排放。尿素施入土壤后经脲酶水解生成 NH₄⁺, NH₃ 挥发是 NH₄⁺ 通过土-水-气界面以 NH₃ 形式逸出; N₂O 排放是 NH₄⁺ 通过微生物硝化和反硝化过程产生并通过植株或土-水-气界面排放^[18-19]。本研究的结果强调了灌溉和施肥是影响稻田气态氮损失的两个重要因素, 这与已有的相关研究一致^[20-21]。

且本研究进一步发现控制灌溉模式下各处理的 NH₃ 累积挥发量均显著高于常规淹灌模式 ($P < 0.05$), 这与 XU 等^[8]的结论正好相反。XU 等^[8]研究表明, 与常规淹灌模式相比, 控制灌溉模式下稻田 NH₃ 累积挥发量减少 18.5% ~ 20.5%。产生差异的原因一方面可能是因为不同地区所采用的控制灌溉水分管理标准不同所导致的, 另一方面可能是因为不同地区的土壤性质、气候等因素存在空间差异^[22-23]。HOU 等^[24]研究表明, 控制灌溉模式下稻田 N₂O 累积排放量相较于常规淹灌模式平均增加 136.9%。这与本研究的研究结论一致。本研究结果表明, 当施氮量相同时, 控制灌溉模式下各处理的

N₂O 累积排放量高于常规淹灌模式 3.90% ~ 26.29%。这可能是因为控制灌溉所提供的干湿交替环境促进了微生物硝化-反硝化反应的进行;田间无水层时土壤氧化还原电位升高,有利于硝化反应的进行;有水层时导致土壤中氧气含量低,为反硝化的进行提供了适宜的环境条件;因此促进了 N₂O 排放^[25]。本研究结果还表明,2 种灌溉模式下,NH₃ 累积挥发量和 N₂O 累积排放量均随着施氮量的减少而降低。这主要是因为氮肥是稻田气态氮排放的主要底物来源,故减少氮肥施用降低了 NH₃ 累积挥发量和 N₂O 累积排放量^[26-27]。

本研究表明,当施氮量相同时,控制灌溉模式下各处理氮肥气态损失量及损失率均高于常规淹灌模式。但同位素示踪结果表明,当施氮量相同时,控制灌溉模式下各处理的氮肥吸收利用量和吸收利用率均显著高于常规淹灌模式,且各处理的氮肥损失量和总损失率均显著低于常规淹灌模式($P < 0.05$)。这可能是因为采用同位素技术计算得到的氮肥损失量不仅包括气态氮损失,同时还包括径流和淋溶等损失,控制灌溉虽然增加了东北地区稻田气态氮损失,但显著较少了径流和淋溶损失,土壤中更多的氮素能被植株吸收利用,故提高了氮肥吸收利用量和吸收利用率。由此可知,推广节水灌溉后,增加的气态氮损失在一定程度上限制了进一步提高氮肥吸收

利用率,故应该搭配合理的氮肥管理措施。本研究还发现,2 种灌溉模式下,气态氮损失量及氮肥气态损失率均随着施氮量的减少而降低。因而推行节水灌溉后可以通过适量减少氮肥施用来减少稻田气态氮损失,从而提高氮肥吸收利用率。但过量减少氮肥施用对于水稻生长是十分不利的,因此在保证水稻产量的前提下,可考虑添加脲酶抑制剂或硝化抑制剂,通过有效减少稻田气态氮损失来进一步提高水稻吸收利用率。

4 结束语

大田试验研究结果表明,2 种灌溉模式下,东北黑土稻田氮肥气态损失量及损失率均随着施氮量的减少而降低。控制灌溉的应用增加了黑土稻田气态氮损失,不同施氮量下其 NH₃ 累积挥发量和 N₂O 累积排放量均高于常规淹灌模式下相同施氮量处理,且控制灌溉模式下各处理的氮肥气态损失量及损失率均高于常规淹灌模式。但与常规淹水灌溉相比,采用控制灌溉模式虽然增加了气态氮损失,但降低了总的氮肥损失,这可能主要归因于控制灌溉模式降低了氮肥其他途径的损失。当施氮量相同时,控制灌溉模式下各处理的氮肥损失量和总损失率均显著低于常规淹灌模式,而且其氮肥吸收利用量和利用率均显著高于常规淹灌模式下各处理($P < 0.05$)。

参 考 文 献

[1] FAN C H, LI B, XIONG Z Q. Nitrification inhibitors mitigated reactive gaseous nitrogen intensity in intensive vegetable soils from China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 480 - 489.

[2] 颌健辉. 氮肥运筹对旱作玉米农田氮素气态损失及氮肥利用效率的影响及机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019. JIE Jianhui. Gaseous nitrogen loss and nitrogen use efficiency of rainfed maize as affected by nitrogen application and its underline mechanisms[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[3] 张星星. 氮肥类型对免耕稻田 NH₃ 挥发与 N₂O 排放及氮肥利用率的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. ZHANG Xingxing. Effects of nitrogen types on NH₃ volatilization and N₂O emissions and nitrogen utilization in no-tillage paddy fields of central China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[4] 尤昆明. 红壤旱坡花生地 NH₃ 挥发与 N₂O 排放规律及影响因素分析[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021. YOU Kunming. Analysis on the law and influencing factors of NH₃ volatilization and N₂O emission in peanut field of red soil arid hillside[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[5] 周胜, 张鲜鲜, 王从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 852 - 862. ZHOU Sheng, ZHANG Xianxian, WANG Cong, et al. Research progress and prospects of water and crop residue managements to mitigate greenhouse gases emissions from paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 852 - 862. (in Chinese)

[6] INUBUSHI K, BARAHONA M A, YAMAKAWA K. Effects of salts and moisture content on N₂O emission and nitrogen dynamics in yellow soil and andosol in model experiments[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29: 401 - 407.

[7] BHAGAT R M, BHUIYAN S I, MOODY K. Water, tillage and weed interactions in low land tropical rice: a review[J]. Agricultural Water Management, 1996, 31(3): 165 - 184.

[8] XU J Z, PENG S Z, HOU H J, et al. Gaseous losses of nitrogen by ammonia volatilization and nitrous oxide emissions from rice paddies with different irrigation management[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5): 983 - 994.

[9] KIM D G, HERNANDEZ-RAMIREZ G, GILTRAP D. Linear and nonlinear dependency of direct nitrous oxide emissions on fertilizer nitrogen input: a Meta-analysis[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2013, 168: 53 - 65.

[10] SMITH K A, CRUTZEN P, MOSIER A R, et al. The global N₂O budget: a reassessment[M]//SMITH K. Nitrous oxide & climate change. London: Earthscan, 2010:63 - 84.

[11] LI J, YANG H, ZHOU F, et al. Effects of maize residue return rate on nitrogen transformations and gaseous losses in an arable soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 132 – 141.

[12] 范长华. 集约化菜地土壤活性气态氮排放强度及减缓措施研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
FAN Changhua. Reactive gaseous nitrogen emission intensity in intensive vegetable soils and mitigation strategy[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[13] SINGH S, SINGH J S, KASHYAP A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(9): 1219 – 1228.

[14] 刘青丽, 李志宏, 陈顺辉, 等. 稻草还田对烟田追肥气态氮损失及相关微生物的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 246 – 253.
LIU Qingli, LI Zhihong, CHEN Shunhui, et al. Effects of rice-straw returning on gaseous nitrogen loss and microorganisms in tobacco field after topdressing[J]. *Transactions of the CASE*, 2020, 36(22): 246 – 253. (in Chinese)

[15] 张作合, 张忠学. 稻作水炭运筹下氮肥吸收转运与分配的¹⁵N 示踪分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 239 – 249.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. ¹⁵N tracer-based analysis of effects of water and biochar management on nitrogen absorption, transport and distribution in rice [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 239 – 249. (in Chinese)

[16] 尹豪杰, 孔丽婷, 王荣荣, 等. 基于¹⁵N 标记的干旱区滴灌肥料氮的去向和效益研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(3): 414 – 426.
YIN Haojie, KONG Liting, WANG Rongrong, et al. Fate and efficiency of fertilizer nitrogen in spring wheat production under drip irrigation based on the ¹⁵N tracing method[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(3): 414 – 426. (in Chinese)

[17] 李鹏飞, 李小坤, 侯文峰, 等. 应用¹⁵N 示踪技术研究控释尿素在稻田中的去向及利用率[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3961 – 3971.
LI Pengfei, LI Xiaokun, HOU Wenfeng, et al. Studying the fate and recovery efficiency of controlled release urea in paddy soil using ¹⁵N tracer technique[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3961 – 3971. (in Chinese)

[18] 上官宇先. 垄沟覆膜下土壤 CO₂ 和 NH₃ 排放研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
SHANGGUAN Yuxian. CO₂ & NH₃ emission in winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)

[19] 郑蕾, 王学东, 郭李萍, 等. 施肥对露地菜地氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4063 – 4070.
ZHENG Lei, WANG Xuedong, GUO Liping, et al. Impact of fertilization on ammonia volatilization and N₂O emissions in an open vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4063 – 4070. (in Chinese)

[20] YAO Z S, YAN G X, WANG R, et al. Drip irrigation or reduced N-fertilizer rate can mitigate the high annual N₂O + NO fluxes from Chinese intensive greenhouse vegetable systems[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 212: 183 – 193.

[21] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N₂O 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): 1781 – 1798.
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): 1781 – 1798. (in Chinese)

[22] 吴媛媛. 灌溉对农田氮素气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
WU Yuanyuan. Effects of irrigation on nitrogen gaseous emissions from farmland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[23] 赵政鑫, 王晓云, 李府阳, 等. 秸秆还田配施稳定性氮肥对麦玉轮作水氮利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 350 – 360.
ZHAO Zhengxin, WANG Xiaoyun, LI Fuyang, et al. Effects of straw returning and application of stable nitrogen fertilizer on water and nitrogen use efficiencies of wheat maize rotation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 350 – 360. (in Chinese)

[24] HOU H J, PENG S Z, XU J Z, et al. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 884 – 892.

[25] KATAYANAGI N, FURUKAWA Y, FUMOTO T, et al. Validation of the DNDC-rice model by using CH₄ and N₂O flux data from rice cultivated in pots under alternate wetting and drying irrigation management [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(3): 360 – 372.

[26] 叶世超, 林忠成, 戴其根, 等. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(1): 71 – 78.
YE Shichao, LIN Zhongcheng, DAI Qigen, et al. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(1): 71 – 78. (in Chinese)

[27] 王海云, 邢光熹. 不同施氮水平对稻麦轮作农田氧化亚氮排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2631 – 2636.
WANG Haiyun, XING Guangxi. Effect of nitrogen fertilizer rates on nitrous oxide emission from paddy field under rice-wheat rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2631 – 2636. (in Chinese)