

长江中下游地区排水对稻麦轮作系统 N₂O 排放以及产量的影响

何昊¹, 李丹丹¹, 吴泽¹, 张天成¹, 潘非凡¹, 杨书运^{1,2*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 农业农村部合肥农业环境科学观测实验站, 合肥 230036)

摘要: 为探究适用于中国东部低地圩区的稻麦两熟制农田温室气体减排增效技术, 以巢湖圩区稻麦轮作农田为研究对象, 设置浅沟 (CQ)、深沟 (CS) 两种麦季开沟排水处理, 并以常规耕作为对照 (CG), 采用“密闭箱-气相色谱法”, 对整个稻麦轮作周期的氧化亚氮 (N₂O) 排放进行持续监测, 并测定产量以及分析相关土壤理化性质。结果表明: (1) 与 CG 相比, CQ、CS 处理在水稻季分别减少了 32.4% 和 42.40% 的 N₂O 累积排放量, 小麦季分别减少 8.10% 与 9.67% 的排放量。(2) 开沟排水处理实现了稻麦的稳产以及增产, 与 CG 相比, CQ 和 CS 处理的水稻产量分别提高了 1.67% 和 2.31%, 小麦产量分别提高了 5.17% 和 1.02%; 水稻季 GHGI 分别显著下降了 33.52% 和 43.70%, 小麦季分别显著下降了 12.62% 和 10.59% ($P < 0.05$)。 (3) 开沟排水明显降低水稻生育中后期 5 cm 地温, 提高麦田土壤 pH 值, 降低土壤含水量和有机质。(4) 排水处理降低了小麦季土壤硝态氮、铵态氮以及全氮含量, 并且土壤氮素水平变化更为稳定。综合来看, 各处理均确保了作物产量且实现了温室气体的减排, 其中以 CS 效果更佳, 研究结果对于指导稻麦低碳种植提供一定的参考意义。

关键词: 长江中下游; 稻麦轮作; 氧化亚氮; 土壤理化性质

中图分类号: S344.13; S276

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)04-0652-07

Effects of drainage on N₂O emission and yield of rice-wheat rotation system in the middle and lower reaches of the Yangtze River

HE Hao¹, LI Dandan¹, WU Ze¹, ZHANG Tiancheng¹, PAN Feifan¹, YANG Shuyun^{1,2}

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2. Hefei Agricultural Environmental Science Observation and Experimental Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei 230036)

Abstract: In order to explore the greenhouse gas emission reduction and efficiency technologies for the rice-wheat double-cropping farmland in the lowland polder area of eastern China, two types of shallow ditch (CQ) and deep ditch (CS) for drainage in the wheat season treatments were set up in the rice-wheat rotation farmland in polder area of Chaohu Lake, and conventional tillage was used as the control (CG). The N₂O emissions were continuously monitored throughout the whole rice-wheat rotation cycle by closed box-gas chromatography method, and the yields were measured and the related soil physicochemical properties were analyzed. The results showed that: (1) Compared with CG, the CQ and CS treatments reduced the cumulative N₂O emissions by 32.41% and 42.40% in the rice season, and 8.10% and 9.67% in the wheat season, respectively. (2) Drainage treatment achieved stable as well as increased yields of rice and wheat, with 1.67% and 2.31% increase in rice yield and 5.17% and 1.02% increase in wheat yield in CQ and CS treatments, respectively, compared to CG; GHGI significantly decreased by 33.52% and 43.70% in the rice season and 12.62% and 10.59% in the wheat season, respectively ($P < 0.05$). (3) Drainage treatment significantly reduced the 5 cm ground temperature during the middle and late stages of rice fertility, increased soil pH, and reduced the soil water content and organic matter in wheat fields. (4) Drainage treatments reduced soil nitrate and ammonium nitrogen as well as total nitrogen content in the wheat season, and soil nitrogen levels changed more stably. All treatments ensured crop yield and achieved greenhouse gas emission reduction, with CS being more effective. The study results could provide some references for guiding low-carbon rice and wheat cultivation. The results of the study provide some reference significance for guiding low-carbon cultivation of rice and wheat.

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0301301) 资助。

作者简介: 何昊, 硕士研究生。E-mail: 657209538@qq.com.com

* 通信作者: 杨书运, 博士, 教授。E-mail: yangshy@ahau.edu.cn

Key words: the middle and lower reaches of the Yangtze River; rice-wheat rotation; nitrous oxide; soil physical and chemical properties

氧化亚氮 (N₂O) 是温室气体的重要来源之一, 在 20 年和 100 年的时间尺度上, 其持续全球变暖潜势分别为 CO₂ 当量的 250 倍和 270 倍^[1-2]。大气中约 60% 的 N₂O 来源于农业活动, 农田土壤的排放在其中占据主要的地位^[3]。水稻和小麦是主要的粮食作物, 二者生产总量占中国粮食总产量的 56.74%^[4], 在农业生产中, 稻麦轮作作为一种典型的水旱轮作模式, 在东亚、南亚等水稻产区被广泛应用^[5-6]。然而水稻种植过程中常伴随着干湿交替, 并且施肥、降雨影响麦地土壤氮素水平, 刺激土壤中硝化与反硝化细菌的活性, 进而产生大量 N₂O 的排放, 因此研究稻麦轮作农田土壤 N₂O 排放的潜在影响因素至关重要^[7-8]。

长江中下游地区水热资源丰富, 是中国稻麦主产区, 冬小麦在冬闲季节种植, 通过轮作, 充分利用冬季农田的最大效益, 此地区采用稻麦轮作种植模式面积约为 1 300 万 hm²^[9]。其中, 巢湖地区地处北半球亚热带核心位置, 同时是中国南北气候区的过渡带与分水岭代表地区之一^[10]。圩区是指在平原河堤网或一些低洼地区四周筑堤, 防止外水流入的区域, 主要分布在长江流域, 特点是河网密布、土壤耕作层较浅、地下水水位较高, 易发生洪涝灾害^[11-12]。中国东部亚热带地区广布低地圩区, 水热资源丰富, 是传统农业生产聚集区, 大面积低地圩区广泛用于稻麦轮作的种植, 然而, 这种模式包括灌溉稻田和旱地麦田, 对于整个轮作系统的温室气体排放量难以计算。

研究表明, 在整个稻麦轮作系统中, 水稻季前 (小麦季) 的水分管理会影响整个轮作系统温室气体的排放量^[13]。淹水水稻土是全球 CH₄ 的重要来源, 农业生产中主要通过水和残留物来控制 CH₄ 排

放量, 然而使用季中排水来减少 CH₄ 排放时, N₂O 的排放量往往会增加^[14-16]; 杨小兵等研究表明, 在冬小麦生育期内, 农田排干控水措施可显著增加 N₂O 排放量^[17]; 此外, Cai 等研究表明, 稻田 N₂O 的排放通量在淹水时很低, 但在淹水消退初期达到峰值, 在中国西南地区冬季涝田采用控水方法, 可有效降低稻田土壤 N₂O 的排放量^[18]; Hadi 等研究间歇性排水对于稻田温室气体排放的影响, 证实了排水可有效降低日本以及印度尼西亚稻田全球增温潜能 (GWP), 平均减少比例约为 37%^[19]。关于排水对温室气体影响的研究多局限于单一的稻田或麦地, 对于整个稻麦轮作系统 N₂O 排放缺乏相关的研究, 并且由于圩区农业种植区特殊的地势, 有必要对于农田土壤 N₂O 排放机制进行深入的探讨。为探索稻麦轮作模式下降低 GWP 的可行方案, 本试验以巢湖圩区稻麦两熟农田为研究对象, 对 N₂O 排放量进行持续监测。设计了两个易于实施的冬小麦开沟处理和一个控制处理, 此外, 主要分析了土壤含水量、5 cm 地温和土壤理化性质等对 N₂O 排放的影响以及排放机制, 探索适用于中国东部稻麦轮作的减排增效技术。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区域位于安徽省巢湖市烔炀镇唐嘴村 (31°39'57" N, 117°40'48" E), 海拔 17 m, 属亚热带湿润性季风气候区。年平均降雨量 1 358.3 mm, 平均气温 16.8 °C, 全年无霜期为 247 d, 日照时数 2 106 h, 土壤有机质含量为 23.64 g·kg⁻¹, pH 值为 6.18, 全氮含量为 1.30 g·kg⁻¹。

表 1 稻季和麦季施肥方案

		Table 1 Fertilization measures in rice- winter wheat growing seasons							(kg·hm ⁻²)	
稻季	基肥			分蘖肥		穗肥		总量		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	N	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	67.5	67.5	67.5	67.5	45	0	180	67.5	67.5	
麦季	基肥			腊肥	返青肥		总量			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	N	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	72	72	72	69	69	0	210	72	72	

1.2 试验设计

试验于 2019—2020 年进行, 采用稻麦轮作种植模式, 供试水稻和冬小麦品种分别为徽良优 996 和扬麦 16。设置 3 个麦季处理: 常规处理 (CG)、浅

沟排水处理 (CQ, 田内畦沟、腰沟、田边沟深度分别为 20、25 和 35 cm) 和深沟排水处理 (CS, 田内畦沟、腰沟、田边沟深度分别为 30 cm、40 cm、45 cm)。每个处理 3 个重复, 共计 9 个小区, 每个小

区面积为 30 m² (4 m × 7.5 m)。田外大沟深 60 ~ 80 cm, 畦沟间隔 3 m, 小区内沟与沟相通, 横沟与田外沟渠相通。在生育期定期进行病虫害防治并清除杂草, 确保稻麦正常生长。

尿素、过磷酸钙和氯化钾分别作为 N 肥、P 肥和 K 肥, 稻麦两季施肥方式相同, 而施肥量有所不同, 具体施肥方式及施肥量见表 1。

1.3 温室气体的采集以及测定

采用“密闭静态箱-气相色谱”法进行温室气体的监测, 箱体均由透明有机玻璃(厚度为 5 mm)制成, 规格分别为 50 cm × 50 cm × 60 cm 和 50 cm × 50 cm × 120 cm, 前者有顶盖, 后者上下贯通, 作物植株高度不足 60 cm 采用前一种箱体, 高度超过 60 cm 时使用两层箱, 箱体之间有水槽, 采样时注入一定量的水以保持箱体内密封。常规气体采样于每日上午 9:00—12:00 进行, 共采集 4 次采集间隔时长 10 min, 每次取样 60 mL。小麦季的采样频率为每周 1 次; 水稻生长期间根据天气情况进行调整, 施肥、追肥、烤田时进行每 2 天一次的加密采集, 平均采样频率为每 3 天一次。

采集的气体样品在 24 h 内用气相色谱仪 (Bruker450-GC) 对 N₂O 浓度进行测定。利用 NI63ECD 检测器, 检测条件为: 检测器温度 300 °C, 氮气流量 300 mL·min⁻¹。N₂O 排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times V \cdot A^{-1} \times dc \cdot dt^{-1} \times 273 \cdot (273 + T)^{-1}$$

式中: F 代表排放通量, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 代表标准状态下 N₂O 的密度, 单位为 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 代表箱内有效体积, 单位为 m^3 ; A 代表采样箱覆盖面积, 单位 m^2 ; $dc \cdot dt^{-1}$ 指单位时间内采样箱内 N₂O 浓度变化, 单位为 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为箱内温度, 单位为 K。

1.4 温室气体排放强度的测定

为分析不同耕作方式和麦季不同深度挖沟排水方式对作物产量的实际影响效果, 在作物成熟之后进行了小区测产工作, 取 3 组重复小区经济产量的平均值 (yield, Y)。

本研究中, 根据 IPCC 2013 报告计算方法^[20], 以 298 作为 N₂O 在 100 年时间尺度上的全球增温潜势 (global warming potential, GWP), 计算 N₂O 在一定时间内的 CO₂ 排放当量 (carbon dioxide equivalent, CDE, 单位: kg, 以 CO₂ 计); 根据温室气体排放强度 (greenhouse gas intensity, GHGI) 定义, 计算 GHGI, 单位 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (CO₂-Eq)。计算方法如以下公式所示:

综合温室效能 (global warming potential,

GWP) = N₂O 累积排放量 × 298

温室气体排放强度 (greenhouse gas intensity, GHGI) = GWP · Y⁻¹

1.5 土壤理化性质的测定

采用 HW 型土壤温度自动记录仪测量 5 cm 土壤地温。此外, 参照《土壤农化分析》的方法进行土壤理化性质的测定与分析^[21], 采取的土样深度为 0~20 cm, 其中: 土壤 pH 采用电位法进行测定; 土壤含水量的测定采用铝盒烘干法; 土壤有机质测定采用重铬酸钾-硫酸氧化法; 铵态氮和硝态氮的测定采用流动注射仪; 全氮含量采用凯氏定氮法进行测定。

1.6 数据处理与分析

利用 Excel 2016 软件进行数据处理, Origin 2017 软件进行作图, 采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对 N₂O 排放的影响

由图 1 可知, 与 CG 相比, CQ 与 CS 处理的 N₂O 排放通量季节变化大致相同。在冬小麦生育中后期存在多个峰值, 且均出现在施肥后, 而在水稻种植中期存在较高 N₂O 的排放量。在小麦季, CG、CQ 和 CS 的 N₂O 累积排放量为 0.91、0.83 和 0.82 kg·hm⁻², CQ 与 CS 处理存在显著减排效果, 但在某些时期, CQ 和 CS 的 N₂O 通量高于 CG。相比之下, 在水稻季, 开沟排水有效地减少 N₂O 的排放, CG、CQ 和 CS 的 N₂O 累积排放量为 1.37、0.93 和 0.79 kg·hm⁻², CQ 和 CS 的 N₂O 通量显著降低 32.41% 与 42.40% ($P < 0.05$)。

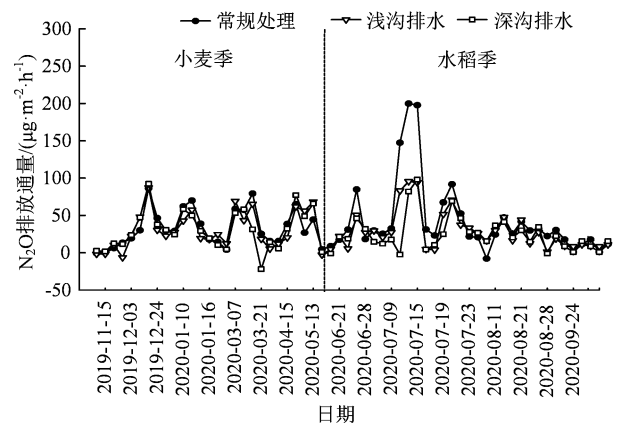


图 1 不同处理对稻麦轮作系统 N₂O 排放量的影响
Figure 1 Effects of different treatments on N₂O emissions from rice-wheat rotation system

2.2 不同处理对 N₂O 温室气体排放强度的影响

在稻麦轮作种植系统中, 稻田土壤 N₂O 排放量

总体上高于麦地(表2),冬小麦季开沟控水可显著降低稻麦两季 N₂O 累积排放量。CG 处理下的水稻土是 GWP 的主要来源,占整个稻麦轮作系统 GWP 的 60.13%; 相比 CG, 水稻季 CQ、CS 处理每公顷分别减少 132.31 和 173.08 kg 的 CO₂ 当量, 小麦季则分别减少 21.93 和 26.18 kg 的 CO₂ 当量。

排水试验提高了水稻和小麦的经济产量, 但差

异并不显著。与 CG 相比, CQ 和 CS 处理的水稻产量分别提高了 1.67% 和 2.31%, 小麦产量分别提高了 5.17% 和 1.02%。此外, GHGI 可以反映不同处理对作物产量和温室气体排放的综合影响, 在水稻季节, CQ 和 CS 的 GHGI 分别显著下降了 33.52% 和 43.70%; 在小麦季, GHGI 则分别显著下降了 12.62% 和 10.59% ($P < 0.05$)。

表 2 各处理对稻麦两季平均产量和相应的 GWP

Table 2 Effects of each treatment on the yield (kg·hm⁻²) and GWP (kg·kg⁻¹) (CO₂-Eq) of rice-wheat rotation system

处理		N ₂ O 累积排放量/ (kg·hm ⁻²)	综合温室效应(CO ₂ -Eq)/ (kg·kg ⁻¹)	作物产量/ (kg·hm ⁻²)	温室气体排放强度/ (g·kg ⁻¹)
小麦季	CG	0.91±0.11 ^a	270.70±32.78 ^a	4 232.38 ^a	0.064 ^a
	CQ	0.83±0.10 ^b	248.77±29.80 ^b	4 451.21 ^a	0.056 ^b
	CS	0.82±0.12 ^b	244.52±35.76 ^b	4 275.64 ^a	0.057 ^b
水稻季	CG	1.37±0.21 ^a	408.20±62.58 ^a	7 889.21 ^a	0.052 ^a
	CQ	0.93±0.10 ^b	275.89±29.80 ^b	8 021.12 ^a	0.034 ^b
	CS	0.79±0.09 ^c	235.12±26.82 ^c	8 071.39 ^a	0.029 ^b

注: 同列数据(平均值±标准差)后不同字母表示在 5% 水平上差异显著($n=3$, 最小差异显著法)。

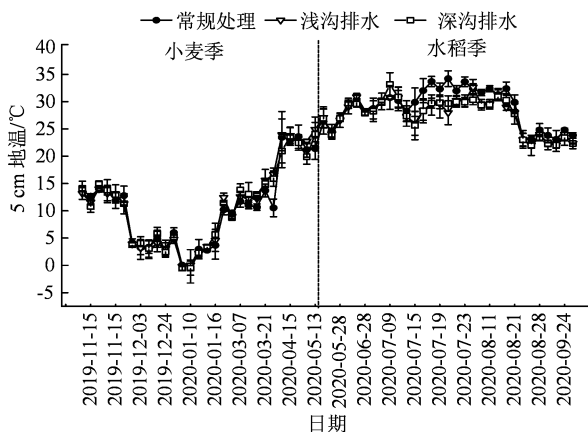


图 2 不同处理对稻麦轮作系统 5 cm 地温的影响

Figure 2 Effects of different treatments on 5 cm soil temperature in rice-wheat rotation system

2.3 不同处理对 5 cm 地温以及相关土壤理化性质的影响

在稻麦轮作种植系统中, 水稻季的 5 cm 地温明显高于小麦季, 各处理 5 cm 地温变化趋势大致相同(图 2)。其中, 开沟控水对小麦季 5 cm 地温影响并不显著, CG、CS 和 CQ 的温度累积分别为 316.25、324.65 和 335.17 °C; 然而在水稻生育中后期, 开沟排水降低土壤温度效果最为明显, 与 CG 相比, CS 和 CQ 的降幅分别为 10.40%~18.21% 与 11.14%~13.13%。

由图 3 可得, 在小麦季, 控水处理可提高土壤 pH 值, 并且降低土壤含水量和有机质含量。各处理变化趋势大致相同, CS 和 CQ 处理可使土壤 pH 上升, 而有机质含量则为下降, 土壤含水量变化较复

杂但总体呈下降趋势。其中, CG、CS 和 CQ 处理的土壤 pH 值变化范围分别为 5.89~6.18、5.97~6.27 和 5.95~6.19, 土壤含水量分别为 22.13%~27.21%、19.92%~23.68% 和 17.24%~25.87%, 土壤有机质含量分别为 28.15~32.12 g·kg⁻¹、19.98~28.57 g·kg⁻¹ 和 19.85~28.32 g·kg⁻¹。

2.4 不同处理对土壤氮素含量的影响

开沟控水处理明显降低了小麦季土壤硝态氮、铵态氮以及全氮含量, 各处理土壤氮素水平变化幅度较大并且趋势大致相同(图 4)。纵观冬小麦全生育期, 土壤氮素含量峰值较为明显, 均出现于施肥后。CG、CQ 和 CS 处理的土壤硝态氮含量平均值分别为 (1.82±0.12)、(1.44±0.18) 和 (1.45±0.15) mg·kg⁻¹, 土壤铵态氮平均值分别为 (36.12±12.43)、(28.61±8.73) 和 (28.84±9.03) mg·kg⁻¹, 土壤全氮平均值分别为 (1.82±0.12)、(1.44±0.18) 和 (1.45±0.15) g·kg⁻¹, 总体上看, CQ 和 CS 减少土壤氮素含量均达显著水平, 而 CQ 和 CS 之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5 土壤理化性质与 N₂O 排放量的相关性分析

由表 3 可得, 各处理中, 5 cm 地温、土壤含水量以及土壤氮素水平均与土壤 N₂O 排放量均呈显著或极显著相关关系, 而 CQ 与 CS 处理中土壤 pH 值与 N₂O 排放量呈现负相关且无显著相关性。总体上看, 各处理中, 土壤含水量与 N₂O 排放量相关性最高 (0.498~0.537); 其次为土壤全氮含量 (0.479~0.541)、土壤铵态氮含量 (0.436~0.512) 和土壤硝态氮含量 (0.373~0.407)。

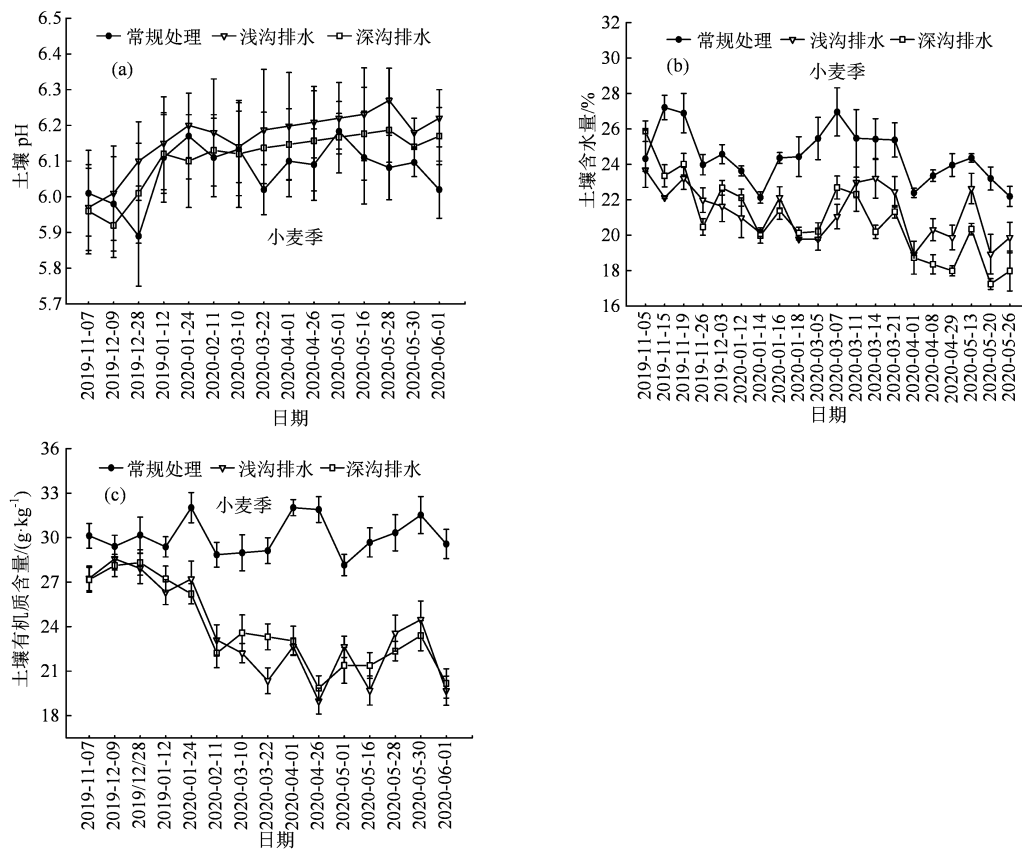


图 3 不同处理对小麦季土壤 pH、含水量和有机质含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on soil pH, water content and organic matter content in wheat season

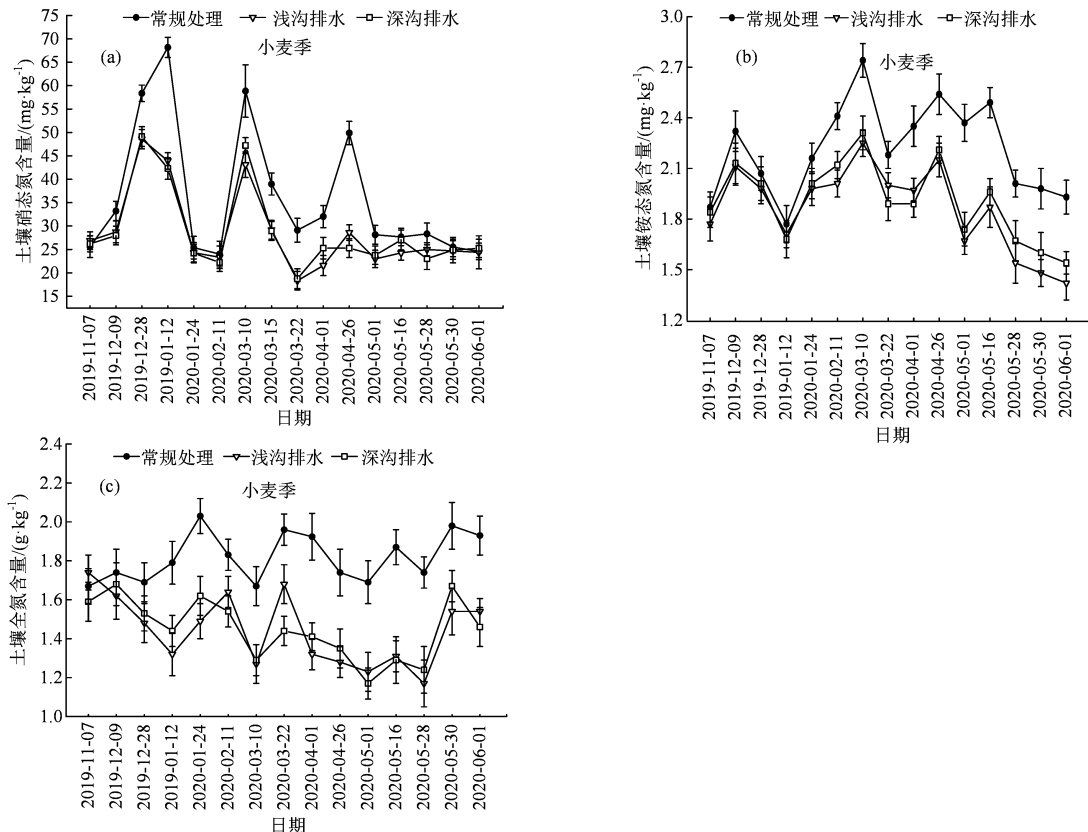


图 4 不同处理对小麦季土壤培养期间和硝态氮、铵态氮和全氮含量的影响

Figure 4 Effects of different treatments on the contents of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and total nitrogen during the soil culture period of wheat season

表 3 土壤因素与土壤 N₂O 排放通量的相关性分析Table 3 Correlation coefficients between soil physical and chemical properties and N₂O emission

处理	土壤理化指标						
	5 cm 地温	土壤含水量	土壤 pH	土壤有机质	土壤硝态氮	土壤铵态氮	土壤全氮
CG	0.391**	0.498**	-0.226**	0.351**	0.407**	0.436**	0.479**
CQ	0.277**	0.537**	-0.172	0.395**	0.373**	0.475**	0.525**
CS	0.298**	0.511**	-0.184	0.410**	0.397**	0.512**	0.541**

注: *和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上呈现显著。

3 讨论与结论

巢湖流域地处长江中下游核心区域, 本研究对稻麦轮作 N₂O 排放通量进行持续监测, 分析不同麦季排水对于长江中下游低地圩区稻麦轮作农田温室气体排放以及产量的影响, 所得结果对该地区稻麦两熟制种植区具有参考价值。结果表明开沟排水能够实现稻麦轮作农田 GWP 的减少, 并且保证了水稻和小麦的产量, 因此温室气体排放强度有所降低。

本研究中, 麦季开沟排水能够有效增加土壤 pH 值, CQ 和 CS 的分别由 5.97、5.93 提升至 6.22 和 6.17, 进而降低土壤 N₂O 排放量, 土壤 pH 与 N₂O 排放量呈正相关, 这与相关研究结果一致^[22-23]。巢湖圩区土壤偏酸性, 增加土壤 pH 会提高土壤反硝化速率, 反硝化主要产物为 N₂, 并促进 N₂O 还原为 N₂, N₂O 产生与排放量较低^[23]。农业土壤的水分含量多在田间持水量以下, 研究发现 N₂O 排放量与土壤水分含量成正相关^[22,24-25]。由于低地圩区地下水位较高, 土壤含水量较大, 利用麦季开沟排水措施可显著降低麦地土壤含水量, 促进 O₂ 向土壤中扩散, 厌氧条件逐渐削弱并抑制反硝化作用, N₂ 的比例逐渐增加因此 N₂O 的排放量降低。郑欠等利用同位素示踪法研究得出, 高含水量土壤排放到外界环境的 N₂O 绝对量也越高, 这与本研究结果一致, 表明控制土壤水分可有效减缓 N₂O 排放^[26]。

土壤有机质为土壤的呼吸作用提供反应基质, 造成土壤缺氧条件, 利于反硝化过程产生 N₂O^[27]。开沟排水显著影响有机质含量, 且浅沟和深沟处理趋势大致相同, N₂O 排放量也随有机质含量的降低而降低。与 CG 相比, 在稻麦生长季内, CQ 和 CS 处理在一些时期提高了 N₂O 排放量, 这是由于开沟排水影响土壤中的氧气含量, 加速了有机质的分解与矿化过程, 在土壤形成部分厌氧区域, 当土壤在好氧和厌氧交替状态下, 其适度的 O₂ 浓度尤其利于硝化反硝化过程中产生 N₂O^[27-28]。此外, 硝化作用微生物活动的适宜温度范围为 25~35 °C, 反硝化微生物所要求的适宜温度为 30~67 °C; 总体而言,

土壤 N₂O 的排放速率随土壤温度升高而增加, 并且在 20~40 °C 之间 N₂O 这种相关性更为强烈^[29-30]。本研究发现, 麦季开沟控水处理在冬小麦生长前期可降低 5 cm 地温, 这是由于土壤孔隙度的增加, 氧气易进入, 促进了水分的蒸发; 然而在冬小麦中后期能够升高土地 5 cm 的地温, 是由于开沟控水降低土壤含水量, 削弱了水分蒸发作用, 有利于土壤的保温, 适宜的温度有利于硝化以及反硝化细菌的活性, 因此促进 N₂O 的排放^[31-32]。

土壤氮素水平被认作是影响土壤 N₂O 排放的关键因素, 通常 N₂O 排放通量与土壤硝态氮和铵态氮含量均呈现正相关关系^[22]。巢湖圩区地下水位较高, 开沟排水改善了土壤的通气状况, 减低土壤含水量, 显著降低了麦田土壤氮素水平, 且土壤氮素变化较为稳定。研究认为, 由于铵态氮的氧化速率快于矿化速度, 如果此时存在一定的 O₂ 供应, 可促进亚硝酸态氮氧化成硝态氮, 进而降低 N₂O 生成量^[33-34]; Stevens 等研究表明, 尽管土壤硝态氮含量对反硝化速率影响较小, 但仍显著增加 N₂O 排放量, 提高土壤 pH 和控制硝态氮含量可有效减少 N₂O 排放, 这与本研究结果相同^[35]。麦田 N₂O 排放与土壤中全氮含量规律相一致, 进一步说明了 0~20 cm 土层是低地稻麦轮作田氮素转化过程的重要区域。但由于后期土壤 N₂O 排放的绝对量较低, 氮素水平对其贡献有限, 需要更进一步的持续监测以阐述 N₂O 排放的机制。降雨对于农田土壤氮素流失也存在一定的影响^[36]。发生降雨后, 旱地麦田土壤含水量得以调节, 促进了干湿交替进程; 此外, 土壤水分作为溶质载体可改变土壤铵态氮和硝态氮含量, 以上过程均可进而影响 N₂O 排放量^[37]。

麦季开沟排水可显著降低稻麦两季 N₂O 累积排放量, 保证水稻和小麦的经济产量的稳产增产, 稻麦两季的温室气体排放强度下显著下降 ($P < 0.05$)。

排水处理对小麦季 5 cm 地温影响并不显著, 然而在水稻生育中后期, 开沟排水降低土壤温度效果最为明显。在小麦季, 控水处理可提高土壤 pH 值, 并且降低土壤含水量和有机质。

开沟排水降低了小麦季土壤硝态氮、铵态氮以及全氮含量,并且土壤氮素水平变化趋势更为稳定。

参考文献:

- [1] WHITE S A, SANTOS I R, CONRAD S R, et al. Large aquatic nitrous oxide emissions downstream of intensive horticulture driven by rain events[J]. *J Hydrol*, 2021, 596: 126066.
- [2] THOMPSON R L, LASSALETTA L, PATRA P K, et al. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion[J]. *Nat Clim Change*, 2019, 9(12): 993-998.
- [3] LI S H, GUO L J, CAO C G, et al. Effects of straw returning levels on carbon footprint and net ecosystem economic benefits from rice-wheat rotation in central China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2021, 28(5): 5742-5754.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国第三产业统计年鉴-2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [5] 刘明月, 张凯鸣, 毛伟, 等. 有机肥长期等氮替代无机肥对稻麦产量及土壤肥力的影响[J]. *华北农学报*, 2021, 36(3): 133-141.
- [6] 谢立勇, 许婧, 郭李萍, 等. 水肥管理对稻田 CH₄ 排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 958-967.
- [7] 宋雅琦, 王玲, 李昆, 等. 土壤微生物还原 N₂O 机制及其研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(9): 82-90.
- [8] 卢雯, 丁辉, 邱雷, 等. 密度调控对女贞人工林土壤 N₂O 排放的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2015, 42(2): 186-191.
- [9] 朱利群, 王春杰, 陈利根, 等. 长江下游稻麦轮作农田不同施肥措施的固碳潜力分析[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(7): 1249-1261.
- [10] 杜祥备, 刁敏, 孔令聪, 等. 江淮地区稻-麦周年产量差及其与资源利用关系[J]. *作物学报*, 2021, 47(2): 351-358.
- [11] 江波, 杨书运, 马友华, 等. 耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(2): 241-247.
- [12] 王天宇, 樊迪, 宋开付, 等. 巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(8): 1829-1838.
- [13] WELLER S, KRAUS D, AYAG K R P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems[J]. *Nutr Cycl Agroecosystems*, 2015, 101(1): 37-53.
- [14] 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]. *J Soil Sci Plant Nutr*, 2020, 20(4): 2617-2630.
- [15] LY P, DUONG VU Q, JENSEN L S, et al. Effects of rice straw, biochar and mineral fertiliser on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions from rice (*Oryza sativa* L.) grown in a rain-fed lowland rice soil of Cambodia: a pot experiment[J]. *Paddy Water Environ*, 2015, 13(4): 465-475.
- [16] LINQUIST B, VAN GROENIGEN K J, ADVIENTO-BORBE M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Glob Change Biol*, 2012, 18(1): 194-209.
- [17] 杨小兵, 江波, 殷寒旭, 等. 冬小麦田间控水对土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2): 471-476.
- [18] CAI Z C, XING G X, YAN X Y, et al. Methane and nitrous oxide from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7-14.
- [19] HADI A, INUBUSHI K, YAGI K. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia[J]. *Paddy Water Environ*, 2010, 8(4): 319-324.
- [20] 王从, 李舒清, 刘树伟, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对稻麦轮作生态系统 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2535-2550.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 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.
- [23] CUHEL J, SIMEK M, LAUGHLIN R J, et al. Insights into the effect of soil pH on N₂O and N₂ emissions and denitrifier community size and activity[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2010, 76(6): 1870-1878.
- [24] RUSSENE A L, KORSAETH A, BAKKEN L R, et al. Spatial variation in soil pH controls off-season N₂O emission in an agricultural soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2016, 99: 36-46.
- [25] 王冬雪, 王平, 高永恒, 等. 高寒草甸土壤温室气体释放对水分变化的响应[J]. *土壤通报*, 2016, 47(2): 443-449.
- [26] 郑欠, 丁军军, 李玉中, 等. 土壤含水量对硝化和反硝化过程 N₂O 排放及同位素特征值的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(24): 4747-4758.
- [27] WU H H, XU X K, CHENG W G, et al. Dissolved organic matter and inorganic N jointly regulate greenhouse gases fluxes from forest soils with different moistures during a freeze-thaw period[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2020, 66(1): 163-176.
- [28] WANG L, LI K, SONG Y Q, et al. Potential effect of nitrate applied during flood period on N₂O emissions during subsequent drainage in a paddy soil[J]. *Eur J Soil Biol*, 2021, 103: 103293.
- [29] 韩雪, 陈宝明. 增温对土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响与微生物机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3906-3914.
- [30] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(4): 457-466.
- [31] 闫宗正, 陈素英, 张喜英, 等. 秸秆覆盖时间和覆盖量对冬小麦田温度效应及地上地下生长的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1779-1791.
- [32] NAIR D, ABALOS D, PHILIPPOT L, et al. Soil and temperature effects on nitrification and denitrification modified N₂O mitigation by 3, 4-dimethylpyrazole phosphate[J]. *Soil Biol Biochem*, 2021, 157: 108224.
- [33] 阎宏亮, 张璇, 谢立勇, 等. 菜地土壤施用铵态氮肥后 N₂O 排放来源及其动态[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(2): 141-148.
- [34] 颜青, 赖睿特, 张克强, 等. 土壤化学反硝化及 N₂O 产生机理研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 736-743.
- [35] STEVENS R J, LAUGHLIN R J. Measurement of nitrous oxide and di-nitrogen emissions from agricultural soils[J]. *Nutr Cycl Agroecosystems*, 1998, 52(2/3): 131-139.
- [36] QIN H L, WANG D, XING X Y, et al. A few key nirK- and nosZ-denitrifier taxa play a dominant role in moisture-enhanced N₂O emissions in acidic paddy soil[J]. *Geoderma*, 2021, 385: 114917.
- [37] 殷金玉, 孟祥瑞, 赵世民, 等. 有机无机氮肥配施下洛阳烟田土壤 N₂O 排放特点及其控制因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 330-337.