

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.035

水炭运筹对黑土稻田 N₂O 排放与氮肥利用的影响

张作合^{1,2} 张忠学^{2,3} 李铁成^{2,3} 齐智娟^{2,3} 郑美玉¹ 郑丽颖¹

(1. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
3. 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)

摘要: 为揭示水炭运筹下稻田 N₂O 排放规律,以及各阶段施入氮肥的利用和损失对 N₂O 排放的影响,设置两种水分管理模式(浅湿干灌溉、常规淹灌)和4个秸秆生物炭施用量水平(0、2.5、12.5、25 t/hm²),采用田间小区和¹⁵N示踪微区结合的方法,研究不同水炭运筹下稻田 N₂O 排放规律,以及基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率和损失率,并分析了 N₂O 排放量与各阶段施入氮肥的利用率和损失率之间的关系。结果表明:两种灌溉模式水稻本田生长期 N₂O 排放规律不同,浅湿干灌溉模式 N₂O 累积排放量显著高于常规淹灌模式($P < 0.05$),施加生物炭能够有效地减少水稻本田生长期 N₂O 排放总量。两种灌溉模式在分蘖期和拔节孕穗期 N₂O 累积排放量较大,浅湿干灌溉模式的各生育期 N₂O 累积排放量均高于常规淹灌,施加生物炭降低了 N₂O 各生育期累积排放量。浅湿干灌溉模式水稻植株对基肥的吸收利用率低于常规淹灌模式,而对蘖肥和穗肥的吸收利用率显著高于常规淹灌($P < 0.05$),施加适量的生物炭能够增加各阶段施入氮肥的吸收利用率。相关性分析表明,浅湿干灌溉模式下 N₂O 排放总量与蘖肥、穗肥吸收利用率呈显著负相关($P < 0.05$),与基肥吸收利用率呈极显著负相关($P < 0.01$),常规淹灌模式下 N₂O 排放总量与基肥、蘖肥和穗肥吸收利用率均呈极显著负相关($P < 0.01$);两种灌溉模式 N₂O 排放总量与基肥和蘖肥损失率均达到显著正相关($P < 0.05$)。

关键词: 稻田; 水炭运筹; 氧化亚氮; 排放; 同位素示踪技术

中图分类号: S511; S14-3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0323-10 OSID: 

Effects of Water and Biochar Management on N₂O Emission and Nitrogen Use Efficiency in Black Soil Paddy Field

ZHANG Zuohe^{1,2} ZHANG Zhongxue^{2,3} LI Tiecheng^{2,3} QI Zhijuan^{2,3} ZHENG Meiyu¹ ZHENG Liying¹

(1. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to reveal the rule of N₂O emission from paddy fields under water and biochar management and the effects of nitrogen use and loss in different stages on N₂O emission, two water management modes (dry-wet-shallow, conventional flooding irrigation) and four straw biochar application levels (0 t/hm², 2.5 t/hm², 12.5 t/hm² and 25 t/hm²) were set up. The N₂O emission from paddy fields, as well as the absorption and utilization efficiency and loss rate of basal fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer, were studied by combining field plot and ¹⁵N tracer micro plot. The relationship between N₂O emission and the use and loss of nitrogen fertilizer in each stage was analyzed. The results showed that the N₂O emission patterns of the two irrigation modes were different. The cumulative N₂O emissions of the dry-wet-shallow irrigation mode were significantly higher than that of the conventional flooding irrigation mode ($P < 0.05$). The cumulative N₂O emissions of the two irrigation modes were larger at tillering stage and jointing booting stage. The cumulative N₂O emission of dry-wet-shallow

收稿日期: 2020-11-26 修回日期: 2021-01-13
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021E118)、国家自然科学基金面上项目(52079028)和黑龙江省省属高等学校基本科研业务费基础研究项目(YWK10236200143)
作者简介: 张作合(1988—),男,讲师,东北农业大学博士生,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: zhangzuohe@126.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

irrigation mode was higher than that of conventional flooding irrigation. The application of biochar reduced the cumulative N_2O emission in each growth stage. The absorption and utilization efficiency of basic fertilizer was lower in dry-wet-shallow irrigation mode than that in conventional flooding irrigation mode, but the absorption and utilization efficiency of tiller and panicle fertilizer was significantly higher than that of conventional flooding irrigation ($P < 0.05$). The application of appropriate amount of biochar could increase the absorption and utilization efficiency of nitrogen fertilizer applied in each stage. The correlation analysis showed that the total N_2O emission was significantly and negatively correlated with the absorption and utilization efficiency of tiller and panicle fertilizer ($P < 0.05$), and significantly and negatively correlated with the absorption and utilization rate of base fertilizer ($P < 0.01$), and significantly and negatively correlated with the absorption and utilization efficiency of base fertilizer, tiller fertilizer and ear fertilizer under the conventional flooding irrigation mode ($P < 0.01$); the total N_2O emission under the two irrigation modes was significantly and negatively correlated with the loss of base fertilizer and tiller fertilizer. The loss rates were significantly and positively correlated ($P < 0.05$).

Key words: paddy field; water and biochar management; nitrous oxide; emissions; isotope trace technology

0 引言

全球气候变暖已经成为世界各国关注的焦点问题,人类生产活动是导致全球气候变暖的主要原因之一^[1],因此,减少人类活动向大气中排放温室气体是解决该问题的主要途径^[2]。农业是温室气体排放的途径之一,其中稻田是温室气体 N_2O 的主要排放源^[3]。据统计,每年稻田排放 N_2O 占总排放量的 12.0% ~ 17.9%^[4-5], N_2O 在大气中的浓度虽远低于 CO_2 ,但在 100 年尺度上 N_2O 的全球增温潜势是 CO_2 的 265 倍^[6-8],对温室效应的贡献率超过 5%^[6],且对臭氧层有间接破坏作用^[9]。近些年,农民通过施入高量化学氮肥来提高水稻产量,导致稻田 N_2O 排放激增。为了达到减施氮肥和 N_2O 减排的目的,实现稻田水土资源的可持续利用,先进碳管理技术得到了广泛的应用。生物炭施入稻田后能够改善土壤理化性质,提高氮肥利用率^[10-12],增加水稻产量^[13],同时减少 N_2O 排放^[14-15]。

生物炭对稻田 N_2O 排放的影响已成为研究热点^[16-22]。王欣欣等^[17]通过水稻盆栽试验发现,施用竹炭处理的 N_2O 季节累积排放量比常规施肥处理降低了 72.3% ~ 93.9%。刘玉学等^[18]通过水稻种植田间试验,发现秸秆炭化后还田可显著降低稻田 N_2O 的累积排放量,降幅为 16.3% ~ 18.4%。王妙莹等^[19]研究显示,早、晚稻的拔节期,施加生物炭显著降低了 N_2O 的排放通量。而廖萍等^[20]研究发现,在南方双季稻区施用生物炭对 N_2O 累积排放通量无显著影响。祁乐等^[9]通过盆栽试验研究生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响,发现生物炭施用对 N_2O 排放的抑制作用不明显。孟梦等^[21]研究生物炭添加对华南早稻田 N_2O 排放的影

响,发现 N_2O 排放通量和季节排放总量均随着生物炭施加量的增加而增加,但仍小于对照处理。蓝兴福等^[22]在稻田中施加生物炭,也发现 N_2O 的排放通量增加了 84.23%。总的来看,前人对生物炭能否减少稻田 N_2O 排放的研究结论不一致,且受气候特征和土壤类型及肥力等因素的影响,存在不确定性。特别是在高肥力的寒地黑土区,关于不同水炭运筹下氮肥利用对 N_2O 排放的影响研究较少。

本文以常规淹灌作为对照,采用田间小区试验与 ^{15}N 示踪微区结合的方法,研究不同水炭运筹下水稻本田生长期 N_2O 排放规律,以及各阶段施入氮肥的利用和损失对 N_2O 排放的影响,以期水炭运筹下寒地黑土稻田 N_2O 排放研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5 月 19 日—9 月 21 日,在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站进行。试验站(46°57'28"N,127°40'45"E)位于呼兰河流域中上游,属于寒地黑土区。气候特征属寒温带大陆性季风气候,第三积温带,作物水热生长期一般为 156 ~ 171 d,多年平均降水量 500 ~ 600 mm,多年平均水面蒸发量 700 ~ 800 mm,平均气温 2 ~ 3℃,平均日照时数为 2 600 h。庆安县是黑龙江省典型的水稻生产区,为国家绿色食品水稻生产基地(A 级)。

1.2 试验材料

水稻秸秆生物炭,由辽宁金和福农业开发有限公司生产,在 450℃ 高温无氧条件下裂解制备而成,每公顷稻草可制成直径 2 mm 颗粒形式的秸秆生物炭约 2.5 t, pH 值 8.86,含碳质量分数为 42.72%,含氮质量分数为 1.26%,填充密度 0.13 g/cm³,比表面积 81.85 m²/g,总孔容积 0.080 cm³/g,阳离子交

换量 (CEC) 为 44.7 cmol/kg。供试土壤为黑土,在泡田之前,对试验小区 0~20 cm 土层进行 5 点对角取样后混合,分析主要的土壤理化性质:pH 值 6.40,有机质质量比 41.80 g/kg,全氮质量比 1.51 g/kg,全磷质量比 15.61 g/kg,全钾质量比 19.86 g/kg,碱解氮质量比 148.27 mg/kg,速效磷质量比 24.22 mg/kg,速效钾质量比 156.13 mg/kg。供试水稻品种为研究区大面积推广种植的绥粳 18,插秧密度为 25 穴/m²。

1.3 试验设计

采用灌水方式和生物炭施用量 2 因素全面试验,设置浅湿干灌溉 (Dry-wet-shallow irrigation, D) 和常规淹灌 (Flooding irrigation, F) 两种水分管理模式 (表 1)。生物炭施用量设 4 个水平,即 0 t/hm² (B0)、2.5 t/hm² (B1)、12.5 t/hm² (B2)、25 t/hm²

(B3)。共计 8 个处理,每个处理 3 次重复,共 24 个试验小区,方形小区面积 100 m²,采用随机区组排列,各小区之间田埂向地下内嵌 40 cm 深的塑料板。秸秆生物炭在泡田之前施入,按当地施肥标准施纯氮 110 kg/hm²,基肥、蘖肥、穗肥按 5:2:3 分施;K₂O 施入量 80 kg/hm²,基肥、穗肥按 1:1 分施;P₂O₅ 施入量 45 kg/hm²,作为基肥一次性施入。供试肥料选择尿素 (含 N 质量分数 46.4%)、过磷酸钙 (含 P₂O₅ 质量分数 12%)、硫酸钾 (含 K₂O 质量分数 52%),并换算成实际化肥施入量。2018 年 5 月 5 日施基肥,5 月 19 日移栽水稻幼苗,6 月 6 日施蘖肥,7 月 14 日施穗肥,9 月 21 日收获,各生育阶段划分见表 2,严格按照生育时段划分计算各生育期排放量。水稻生长期注意田间管理,严格控制病虫害。

表 1 稻田各生育期水分管理

Tab.1 Water management during each growth period of rice field

灌溉模式	控制指标	返青期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
浅湿干灌溉 (D)	蓄雨上限	50 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	落干
	灌水上限	30 mm	30 mm	30 mm	晒田	30 mm	30 mm	30 mm	落干
	灌水下限	θ_s	$0.85\theta_s$	$0.85\theta_s$	晒田	$0.85\theta_s$	$0.85\theta_s$	$0.7\theta_s$	落干
常规淹灌 (F)	蓄雨上限	50 mm	100 mm	100 mm	晒田	100 mm	100 mm	100 mm	落干
	灌水上限	30 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	落干
	灌水下限	0	0	0	晒田	0	0	0	落干

注: θ_s 为根层土壤饱和含水量。

表 2 水稻各生育时段划分

Tab.2 Division of rice growth period

生育时期	返青期	分蘖期			拔节孕穗期	抽穗开花期	灌浆期	成熟期
		前期	中期	后期				
日期	5 月 19— 28 日	5 月 29 日— 6 月 16 日	6 月 17 日— 7 月 1 日	7 月 2— 11 日	7 月 12— 30 日	7 月 31 日— 8 月 14 日	8 月 15 日— 9 月 1 日	9 月 2— 21 日
时间/d	10	19	15	10	19	15	18	20

在上述试验小区内设置¹⁵N 示踪微区,稻田整地后立即在每个小区内预埋 2 m×2 m×0.5 m 的无底钢制矩形框,将微区埋 30 cm 深,施用上海化工研究院生产的丰度为 10.22% 的¹⁵N 标记尿素,深度与试验小区相同。微区内单独设置小型排灌系统,水稻的田间管理与所在试验小区相同。

1.4 样品采集与测定

根据文献[23-24]的方法分别计算基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率和损失率。

基肥 (b)、蘖肥 (t)、穗肥 (p) 吸收利用率为

$$F_{NRE(b,t,p)} = \frac{N_{(b,t,p)}}{N_{F(b,t,p)}} \times 100\%$$

(1)

式中 $F_{NRE(b,t,p)}$ ——基肥、蘖肥、穗肥吸收利用率, %

$N_{(b,t,p)}$ ——基肥、蘖肥、穗肥吸收量,kg/hm²

$N_{F(b,t,p)}$ ——基肥、蘖肥、穗肥施入量,kg/hm²

基肥、蘖肥、穗肥损失率为

$$F_{NL(b,t,p)} = 1 - F_{NRE(b,t,p)} - S_{FNR(b,t,p)}$$

(2)

式中 $F_{NL(b,t,p)}$ ——稻田基肥、蘖肥、穗肥损失率, %

$S_{FNR(b,t,p)}$ ——稻田土壤中的基肥、蘖肥、穗肥残留率, %

N₂O 样品采集:采用人工静态暗箱—气象色谱法定位观测 N₂O 的排放通量。如图 1 所示,静态箱由箱体 (箱体尺寸包括 25 cm×25 cm×60 cm 和 25 cm×25 cm×120 cm 两种规格) 和不锈钢底座两部分组成,箱体由透明有机玻璃 (厚 5 mm) 制成。底座顶端设置宽 20 mm、深 50 mm 的密封槽,采气时用水或土密封箱体。顶箱内部安装 2 台微型电风扇,开孔插

入温度传感器探头,以校正采气过程中由于箱内温度升高而引起的误差。采气管从侧面插入箱内 20 cm,末端与三通阀连接,三通阀连接注射器(60 mL)和采气袋。为达到绝热目的,箱体外层用锡纸覆盖,以减少太阳辐射所导致的箱内 N₂O 的温度变化。采样时,箱密封放置后静止 2~3 min,使箱内 N₂O 混合均匀。相同处理 3 次重复进行平行采样,每个处理在 0~30 min 每隔 10 min 采样 1 次,前后连续抽取气体的两个气袋作为一个气体样品,采样同时记录田面水层深度、箱内温度、地温和气温。气体采样时间选择在每天 10:00—14:00 之间,因为这段时间最能代表当日气体排放平均水平^[25]。每隔 7~10 d 在水稻关键生育期进行采样,水稻生长旺盛时期和异常气温(极高温或极低温)加测,如遇强降雨天气则推迟取样时间。根据水稻株高的变化,采用不同高度的箱体(60 cm 和 120 cm)。

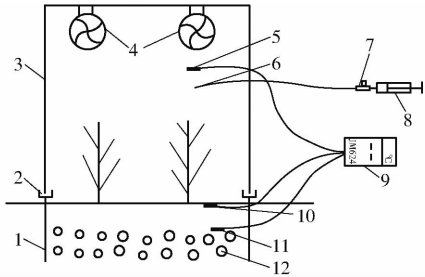


图 1 静态箱结构示意图

Fig. 1 Static box structure diagram

1. 底座 2. 密封水槽 3. 顶箱 4. 风扇 5. 箱内温度传感器
6. 采气管 7. 三通阀 8. 注射器 9. 测温表 10. 地表温度传感器
器 11. 10 cm 土壤温度传感器 12. 通水通气孔

气体样品测定:N₂O 样品及时带回实验室进行化验,在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采用气相色谱仪(岛津 GC-17A 型,日本)检测 N₂O 浓度。标准气体由大连大特气体有限公司生产,各项气象色谱条件为:检测器 ECD,检测温度 250℃,柱温 60℃,载气为 99.99% 氩/甲烷气(95% 氩气+5% 甲烷),流速 30 mL/min。

稻田 N₂O 排放通量计算公式为

$$F = \rho H \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + T} \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

式中 F ——N₂O 排放通量,μg/(m²·h)

ρ ——标准状态下 N₂O 的密度,1.964 g/m³

H ——箱体有效高度,m

dc/dt ——采样过程中采样箱内 N₂O 浓度变化率,mL/(m³·h)

T ——采样箱内的平均温度,℃

P_0 ——标准大气压

P ——采样箱内气压,取 $P = P_0$

N₂O 累积排放量 E_c (kg/hm²) 计算公式为^[26]

$$E_c = 0.01 \times 24 \times \left[\frac{F_1 + F_n}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (4)$$

式中 n ——生育期观测次数

F_i ——第 i 次采样时 N₂O 排放通量,mg/(m²·h)

F_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时 N₂O 排放通量,mg/(m²·h)

其中, $t_{i+1} - t_i$ 为第 i 次到第 $i+1$ 次采样的时间间隔,d。

产量:水稻成熟期进行产量测算,各处理随机选 10 穴水稻用于考种,干燥后用手持水分测试仪(John Deere, Moline IL,美国)测定谷物含水率,计算含水率为 14.5% 时的经济产量。

气象数据:由 DZZ2 型自动气象站自动记录。

1.5 数据统计分析

采用 WPS 2019、SPSS 分析和处理数据,用 Duncan 进行处理间的多重比较,用 WPS 2019 和 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水炭运筹下稻田 N₂O 排放规律

如图 2 所示,水炭运筹下相同灌溉模式不同处理的 N₂O 排放通量具有相似的季节变化规律。水炭运筹下浅湿干灌溉模式水稻本田生长期 N₂O 排放出现多个峰值,且波动较大,其中最高峰值出现在拔节孕穗期。稻作浅湿干灌溉模式下,N₂O 的第 1 个和第 2 个排放通量峰值分别出现在水稻移栽后第 20 天和第 30 天,第 3 个排放通量峰值出现在水稻移栽后第 65 天,DB0 处理排放峰值最大。随着水稻移栽时间的增加,浅湿干灌溉模式不同处理的 N₂O 排放分别第 77、98、120 天出现峰值,成熟期峰值变小。浅湿干灌溉模式施加生物炭对稻田 N₂O 的排放具有削峰作用,表现出显著的抑制效应。水炭运筹下常规淹灌模式水稻本田生长期 N₂O 排放出现多个峰值,后期波动较小,其中最高峰值出现在分蘖末期(晒田期)。稻作常规淹灌模式下,N₂O 的第 1 个排放通量峰值出现在水稻移栽后第 50 天,FB0 处理排放峰值最大。随着水稻移栽时间的增加,常规淹灌模式不同处理的 N₂O 排放分别第 65、77、91、126 天出现峰值。常规淹灌模式施加生物炭同样对稻田 N₂O 的排放具有削峰作用,适量的生物炭削峰效果明显。

比较两种灌溉模式下水稻本田生长期 N₂O 排放通量的变化规律发现,浅湿干灌溉模式 N₂O 排放通量在水稻本田生长期波动较大,而常规灌溉模式

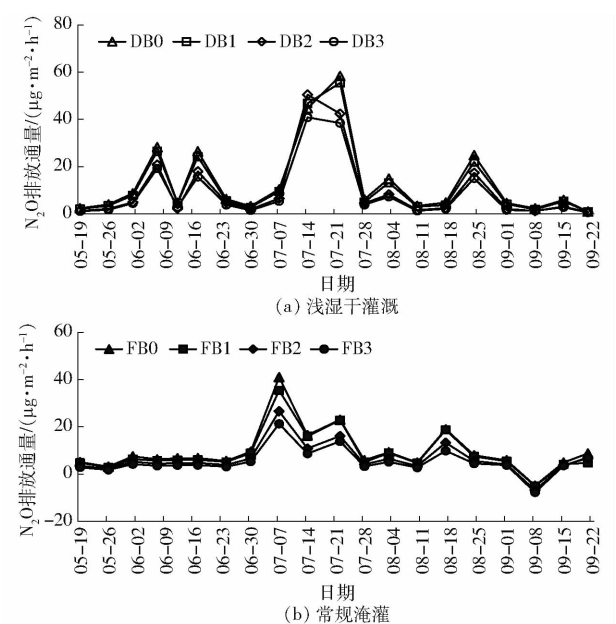


图 2 水稻本田生长期各处理 N₂O 排放通量变化曲线

Fig. 2 Change curves of N₂O emission fluxes of different treatments during rice growth period

下水稻生长后期波动较小。产生波动规律差异可能是由田面水层深度和土壤含水率的变化等所导致。两种灌溉模式的排放通量最高峰值出现时间和大小有所不同,常规淹灌模式 N₂O 的排放通量最高峰值出现在晒田期,而浅湿干灌溉模式 N₂O 的排放通量最高峰值则出现在拔节孕穗期。

2.2 不同水炭运筹下稻田 N₂O 排放总量及各生育期累积排放量

不同水炭氮运筹下水稻本田生长期 N₂O 排放总量及单位产量 N₂O 排放量如表 3 所示。浅湿干

灌溉和常规淹灌模式水稻本田生长期 N₂O 排放通量最大值的处理为 DB0 和 FB0, 分别为 58.37、41.03 μg/(m²·h), 而 N₂O 排放通量最小值的处理为 DB3 和 FB3, 分别为 0.62、-7.75 μg/(m²·h)。相同生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式各处理 N₂O 的排放通量均显著高于常规淹灌 ($P < 0.05$)。其中 DB0 处理水稻本田生长期 N₂O 的排放通量变化量最大, 达 57.35 μg/(m²·h)。比较两种灌溉模式之间水稻本田生长期 N₂O 的累积排放量可知, 稻作浅湿干灌溉模式 N₂O 累积排放量显著高于常规淹灌模式 ($P < 0.05$), 相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式的 N₂O 累积排放量较常规淹灌分别增加 41.93%、45.18%、60.03% 和 73.48%。施加生物炭能够有效地减少水稻本田生长期 N₂O 的排放量, 稻作浅湿干灌溉模式下施加生物炭处理的 N₂O 累积排放量较不施加生物炭处理分别降低 6.34%、24.67%、34.85%, 常规淹灌模式下施加生物炭处理的 N₂O 累积排放量较不施加生物炭处理分别降低 8.45%、33.19%、46.70%。相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式单位产量 N₂O 排放量显著高于常规淹灌模式 ($P < 0.05$), 分别增加 40.54%、45.45%、52.17% 和 83.33%。施加生物炭能够有效地减少单位产量 N₂O 排放量, 稻作常规淹灌模式下施加生物炭处理的单位产量 N₂O 排放量较不施加生物炭处理分别降低 10.81%、37.84%、51.35%, 浅湿干灌溉模式下施加生物炭处理的单位产量 N₂O 排放量较不施加生物炭处理分别降低 7.69%、32.69%、36.54%, DB3 处理与 DB2 处理之

表 3 水稻本田生长期各处理的 N ₂ O 排放总量及单位产量 N ₂ O 排放量						
Tab. 3 Total N ₂ O emission and N ₂ O emission per unit yield of different treatments during rice growing period						
处理	N ₂ O 排放通量/(μg·m ⁻² ·h ⁻¹)			全生育期排放总量/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	单位产量 N ₂ O 排放量/(g·kg ⁻¹)
	最大值	最小值	平均值			
DB0	58.37 ^a	1.02 ^a	13.29 ^a	0.43 ^a	8 196.30 ^d	0.052 ^a
DB1	55.43 ^b	0.92 ^b	12.42 ^b	0.40 ^a	8 277.64 ^d	0.048 ^b
DB2	50.47 ^c	0.71 ^c	9.88 ^c	0.32 ^b	9 265.87 ^a	0.035 ^d
DB3	40.86 ^d	0.62 ^d	8.58 ^d	0.28 ^{bc}	8 468.38 ^c	0.033 ^d
FB0	41.03 ^d	-4.88 ^e	9.62 ^c	0.30 ^b	8 086.22 ^e	0.037 ^c
FB1	35.45 ^e	-5.02 ^f	8.71 ^d	0.27 ^c	8 134.80 ^e	0.033 ^d
FB2	26.61 ^f	-6.82 ^g	6.47 ^e	0.20 ^d	8 730.77 ^b	0.023 ^e
FB3	21.29 ^g	-7.75 ^h	5.21 ^f	0.16 ^e	8 811.43 ^b	0.018 ^f

注:同列数字后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

间差异不显著 ($P > 0.05$)。

水稻本田生长期浅湿干灌溉模式和常规灌溉模式下不同处理各生育期的 N₂O 累积排放量如图 3 (图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)) 所示。浅湿干灌溉模式下 N₂O 的排放主要集中在分蘖期和拔节孕穗期, 分别占全生育期的

33.28% ~ 33.71% 和 40.00% ~ 45.68%。分蘖期, 稻作浅湿干灌溉模式下施加生物炭处理的 N₂O 累积排放量较不施加生物炭处理分别降低 6.27%、25.58%、35.23%。拔节孕穗期, 稻作浅湿干灌溉模式下施加生物炭处理的 N₂O 累积排放量较不施加生物炭处理分别降低 2.38%、13.98%、26.06%。

常规灌溉模式下 N_2O 的排放主要集中在分蘖期和拔节孕穗期,分别占全生育期的 39.56% ~ 41.22% 和 27.67% ~ 29.26%。分蘖期,稻作常规淹灌模式下施加生物炭处理的 N_2O 累积排放量较不施加生物炭处理分别降低 10.96%、32.55%、45.99%。拔节孕穗期,稻作常规淹灌模式下施加生物炭处理的 N_2O 累积排放量较不施加生物炭处理分别降低 4.42%、32.03%、43.64%。综合来看,两种灌溉模式在分蘖期和拔节孕穗期 N_2O 累积排放量较大,而其他生育期 N_2O 累积排放量较小,浅湿干灌溉模式各生育期的 N_2O 累积排放量均高于常规淹灌。

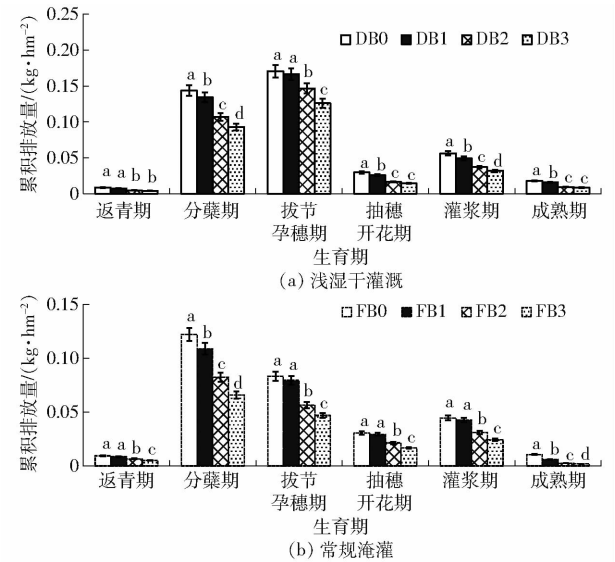


图3 水稻各生育期 N_2O 累积排放量

Fig.3 Cumulative N_2O emission in different growth stages of rice

2.3 不同水炭运筹下稻田基肥、蘖肥、穗肥的利用率和损失率

由表 4 可知,水炭运筹下常规淹灌模式水稻植株对基肥吸收利用率随着生物炭施入量的增加而增大,有 17.11% ~ 23.31% 的基肥- ^{15}N 被水稻植株吸收利用。浅湿干灌溉模式稻作基肥吸收利用率低于常规淹灌模式,适量的施加生物炭能够增加水稻植株对基肥的吸收利用率,而过量则会产生负效应。水炭运筹下常规淹灌模式水稻植株对蘖肥吸收利用率随着生物炭施入量的增加而增大,浅湿干灌溉模式适量施加生物炭能够增加水稻植株对蘖肥的吸收利用率。相同生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻植株对蘖肥的吸收利用率显著高于常规淹灌($P < 0.05$),分别提高了 13.92%、18.12%、19.32% 和 2.08%。水炭运筹下常规淹灌模式水稻植株对穗肥的吸收利用率随着生物炭施入量的增加而增大,两种灌溉模式之间的穗肥吸收利用率差异显著($P < 0.05$),相同生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式较

常规淹灌分别提高了 9.81%、15.82%、17.86% 和 2.99%,施加适量的生物炭能够增加水稻植株对穗肥的吸收利用率。水炭运筹下施加适量的生物炭能够降低基肥、蘖肥和穗肥的损失率,相同生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式基肥和穗肥的损失率均低于常规淹灌模式,当生物炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm² 时,相同生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式蘖肥损失率也低于常规淹灌模式。研究结果表明,水炭运筹下施加适量的生物炭能够增加水稻植株对基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率,同时降低基肥、蘖肥和穗肥的损失率。

表 4 不同处理各阶段施加氮肥的吸收利用率和损失率
Tab.4 Absorption and utilization efficiency and loss rate of nitrogen fertilizer applied in different stages

处理	吸收利用率			损失率		
	基肥	蘖肥	穗肥	基肥	蘖肥	穗肥
DB0	15.55 ^f	36.09 ^e	53.61 ^f	56.93 ^b	29.59 ^c	21.27 ^d
DB1	16.22 ^f	37.64 ^d	57.70 ^e	54.22 ^c	26.27 ^d	16.64 ^e
DB2	20.45 ^c	44.91 ^a	71.18 ^a	38.20 ^f	11.59 ^b	12.00 ^f
DB3	19.56 ^d	42.45 ^b	65.82 ^b	41.22 ^e	19.64 ^f	22.61 ^c
FB0	17.11 ^e	31.68 ^f	48.82 ^g	59.47 ^a	38.23 ^a	27.73 ^a
FB1	17.33 ^e	31.86 ^f	49.82 ^g	58.84 ^a	35.77 ^b	27.61 ^a
FB2	21.56 ^b	37.64 ^d	60.39 ^d	45.95 ^d	23.64 ^e	24.36 ^b
FB3	23.31 ^a	41.59 ^c	63.91 ^c	39.36 ^f	15.55 ^g	23.09 ^c

2.4 稻田 N_2O 排放量与各期氮肥利用率和损失率的相关分析

两种灌溉模式水稻本田生长期 N_2O 排放总量与氮肥利用率和损失率之间的相关性如表 5 所示。浅湿干灌溉模式下 N_2O 排放总量与蘖肥、穗肥吸收利用率呈显著负相关($P < 0.05$),与基肥吸收利用率呈极显著负相关($P < 0.01$); N_2O 排放总量与基肥损失率呈极显著正相关($P < 0.01$),与蘖肥损失率呈显著正相关($P < 0.05$),而与穗肥损失率相关性不显著($P > 0.05$)。常规淹灌模式下 N_2O 排放总量与基肥、蘖肥和穗肥吸收利用率均呈极显著负相关($P < 0.01$); N_2O 排放总量与基肥和蘖肥损失率呈极显著正相关($P < 0.01$),与穗肥损失率呈显著正相关($P < 0.05$)。

3 讨论

随着生物炭还田技术研究的增多,生物炭能够降低稻田 N_2O 排放的观点,已被多数研究者所认可^[16-20]。孟梦等^[21]研究发现,随着生物炭施入量增加,稻田 N_2O 排放量逐渐增加,但均高于不施生物炭处理。这与本研究结果完全相反,可能是由土壤类型及肥力差异和施加的生物炭类型不同引起

表 5 N₂O 排放总量与氮肥利用率和损失率的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficient between total N ₂ O emission and nitrogen use and loss rate							
灌溉模式		吸收利用率			损失率		
		基肥	蘖肥	穗肥	基肥	蘖肥	穗肥
NO ₂ 排放总量	浅湿干灌溉	-0.915 **	-0.874 *	-0.856 *	0.922 **	0.773 *	0.020
	常规淹灌	-0.991 **	-0.986 **	-0.982 **	0.991 **	0.996 **	0.990 *

注：**表示差异极显著($P < 0.01$), *表示差异显著($P < 0.05$)。

的。生物炭可能影响 N₂O 排放机制的原因主要包括:生物炭提高土壤通气性及 pH 值、影响微生物所需碳氮源和对土壤中营养物质的吸附。稻田 N₂O 的排放与土壤性质和土壤环境密切相关,生物炭可通过调节土壤通气状况而影响 N₂O 排放。ZHANG 等^[27]研究发现,施加生物炭可调节土壤通气状况,土壤含 O₂ 增加,抑制反硝化作用产生 N₂O,从而使土壤 N₂O 排放减少。土壤 pH 值的提高,促进反硝化反应彻底进行,使 N₂O/N₂ 生成比率降低。生物炭中大量可利用碳能够增加土壤微生物活性,导致土壤中 O₂ 的加速消耗,可能会抑制土壤硝化作用,最终降低 N₂O 排放。生物炭吸附土壤溶液中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,导致氮源减少,降低了硝化和反硝化作用的强度^[28],与此同时,其多孔结构大量吸附土壤活性有机质^[29],导致反硝化菌的碳源减少。同时,生物炭能将 N₂O 吸附在表面附近,延长 N₂O 在土壤中滞留时间,增加 N₂O 被还原成 N₂ 的概率;其本身含有或施入土壤后吸附大量的还原性物质,可将 N₂O 不经酶催化直接还原为 N₂,通过降低 N₂O 迁移扩散速率和提高还原性达到减排目的^[30]。

本研究中浅湿干灌溉模式水稻本田生长期各处理 N₂O 排放出现多个峰值,且波动较大,最高峰值出现在拔节孕穗期;而常规淹灌模式不同处理的 N₂O 排放通量后期波动较小,最高峰值出现在分蘖末期(晒田期)。稻田生态系统中 N₂O 的排放包括产生、传输及扩散 3 个阶段,其中硝化作用和反硝化作用是稻田土壤 N₂O 产生的主要过程^[31]。不同的灌溉模式会导致土壤水分状况产生差异性,改变土壤通气性,进而影响硝化与反硝化过程和 N₂O 在土壤中的迁移扩散,因此灌溉模式是影响稻田 N₂O 排放的重要因素。与浅湿干灌溉模式相比,常规淹灌稻田长期处于淹水状态,水稻生长季内 N₂O 的排放较少^[32-33],但会造成农业用水浪费。为了发展节水高效农业,节水灌溉技术被广泛应用,但同时该技术的应用会引起土壤频繁的干湿交替,影响稻田 N₂O 的排放。稻田干湿交替频繁改变了土壤的通气性,使土壤的有效 O₂ 增加,以利于硝化和反硝化作用进行,从而增加 N₂O 的产生^[34]。稻田 N₂O 的释放不仅受硝化作用速率的影响,还与土壤中 N₂O 的迁移

扩散及反硝化作用的速率有关。常规淹灌模式能够减少稻田 N₂O 的排放^[35],其原因可能是由于持续淹水状态虽然能提高反硝化过程的速率,降低了迁移扩散速率,增加 N₂O 被还原为 N₂ 的机率;同时由于稻田土壤长期处于厌氧状态,硝化反应很弱,反硝化作用底物得不到补充,最终使反硝化作用速率也很低;而在水稻晒田期土壤通气状况得到改善^[36],出现 N₂O 集中排放现象,因而导致两种灌溉模式排放规律不一致。

氮肥是保证水稻优质高产的基础,同时也是影响稻田 N₂O 排放的重要因素^[37-38]。水稻返青期气温和稻田土壤温度均较低,土壤酶活性和硝化反硝化细菌活性不高,虽然有基肥的施入,但并未引起 N₂O 集中排放,故在返青期两种灌溉模式 N₂O 排放量均较少。6 月 6 日施加蘖肥后,常规淹灌模式 N₂O 在分蘖期(晒田期)出现集中排放,且分蘖期在各生育期中 N₂O 排放量最高,可能是由于晒田期稻田土壤温度较高,同时土壤通气性得到改善,增加了土壤有效 O₂,有利于硝化和反硝化作用进行,从而促进 N₂O 排放;而晒田对浅湿干灌溉模式 N₂O 排放影响不大。7 月 14 日施加穗肥后,浅湿干灌溉 N₂O 出现排放峰,在各生育期中拔节孕穗期 N₂O 排放量最高,可能是由于施加的穗肥为硝化和反硝化作用提供了充足氮源,且浅湿干灌溉模式的土壤环境有利于硝化和反硝化作用的进行,导致 N₂O 集中排放;而常规淹灌模式晒田结束后进行灌水,拔节孕穗期处于淹水状态,N₂O 排放量逐渐减少。拔节孕穗期以后不再施肥,后期 N₂O 排放量均较低。本研究中,施加分蘖肥和穗肥后 N₂O 的排放均出现峰值,说明在水稻本田生长期施加氮肥能增加 N₂O 的排放量。当氮肥施用量超过水稻需求时,残留在稻田土壤中的氮素为 N₂O 的产生提供了反应底物,促进了稻田 N₂O 的排放。因此,提高氮肥利用率,减量施用氮肥成为减少稻田 N₂O 排放量的有效途径。水炭运筹下两种灌溉模式施加适量的生物炭均增加了水稻植株对基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率,使稻田 N₂O 排放量减少,所以分析水稻本田生长期 N₂O 排放总量与氮肥利用关系十分重要。本文相关性分析结果表明,浅湿干灌溉模式下 N₂O 排放总量与蘖

肥、穗肥吸收利用率呈显著负相关($P < 0.05$),与基肥吸收利用率呈极显著负相关($P < 0.01$);常规淹灌模式下 N_2O 排放总量与基肥、蘖肥和穗肥吸收利用率均呈极显著负相关($P < 0.01$)。两种灌溉模式水稻本田生长期 N_2O 排放总量均与基肥吸收利用率呈极显著负相关($P < 0.01$),水炭运筹下如何提高基肥的利用率将是今后研究的重点方向。

本试验基于 ^{15}N 示踪技术研究了水炭运筹对水稻本田生长期 N_2O 排放的影响,及 N_2O 排放与各阶段施入的氮肥利用和损失之间的关系,但其长期效应还有待进一步验证,并缺乏系统的研究和深入的探讨。

4 结 论

(1)水炭运筹下浅湿干灌溉模式水稻本田生长期 N_2O 排放出现多个峰值,且波动较大,其中最高峰值出现在拔节孕穗期;而常规淹灌模式水稻本田生长期 N_2O 排放也出现多个峰值,但后期波动较小,其中最高峰值出现在分蘖末期(晒田期)。相同生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式各处理 N_2O 的排放通量均显著高于常规淹灌($P < 0.05$)。稻作浅湿干灌溉模式 N_2O 累积排放量显著高于常规淹灌模式($P < 0.05$)。施加生物炭能够有效地减少水稻本田生长期 N_2O 的排放总量。相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式单位产量 N_2O 排放量显著高于常规淹灌模式($P < 0.05$)。施加生物炭能够有效地减少单位产量 N_2O 排放量。两种灌溉模式

在分蘖期和拔节孕穗期 N_2O 累积排放量较大,而其他生育期 N_2O 累积排放量较小,浅湿干灌溉模式的各生育期 N_2O 累积排放量均高于常规淹灌,施加生物炭降低了 N_2O 各生育期累积排放量。

(2)水炭运筹下浅湿干灌溉模式稻作基肥吸收利用率低于常规淹灌模式,施加适量生物炭能够增加水稻植株对基肥的吸收利用率,而过量则会产生负效应;浅湿干灌溉模式施加适量生物炭能够增加水稻植株对蘖肥的吸收利用率。相同生物炭施用水水平下浅湿干灌溉模式水稻植株对蘖肥吸收利用率显著高于常规淹灌($P < 0.05$),分别提高了 13.92%、18.12%、19.32% 和 2.08%;两种灌溉模式之间的穗肥吸收利用率差异显著($P < 0.05$),相同生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式较常规淹灌分别提高了 9.81%、15.82%、17.86% 和 2.99%,施加适量的生物炭能够增加水稻植株对穗肥的吸收利用率。

(3)浅湿干灌溉模式下 N_2O 排放总量与蘖肥、穗肥吸收利用率呈显著负相关($P < 0.05$),与基肥吸收利用率呈极显著负相关($P < 0.01$); N_2O 排放总量与基肥损失率呈极显著正相关($P < 0.01$),与蘖肥损失率呈显著正相关($P < 0.05$),而与穗肥损失率相关性不显著($P > 0.05$)。常规淹灌模式下 N_2O 排放总量与基肥、蘖肥和穗肥吸收利用率均呈极显著负相关($P < 0.01$); N_2O 排放总量与基肥和蘖肥损失率呈极显著正相关($P < 0.01$),与穗肥损失率呈显著正相关($P < 0.05$)。

参 考 文 献

[1] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(4):966-975.
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4):966-975. (in Chinese)

[2] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报,2008,24(10):269-273.
DONG Hongmin, LI Yu'e, TAO Xiuping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10):269-273. (in Chinese)

[3] YAN Xiaoyuan, AKIYAMA H, YAGI K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 intergovernmental panel on climate change guidelines[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2):112-118.

[4] ZOU J W, HUANG Y, QIN Y M, et al. Changes in fertilizer-induced direct N_2O emissions from paddy fields during rice-growing season in China between 1950s and 1960s[J]. Global Change Biology, 2009, 15(21):229-242.

[5] 吴家梅,纪雄辉,彭华,等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(4):162-169.
WU Jiamei, JI Xionghui, PENG Hua, et al. Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):162-169. (in Chinese)

[6] IPCC. Special report on emissions scenarios, working group III, intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[7] NAKICC E N, ALCAMO J, GRUBLER A, et al. Special report on emissions scenarios: a special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[8] 马艳芹,钱晨晨,孙丹平,等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):128-134.
MA Yanqin, QIAN Chenchen, SUN Danping, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2):128-134. (in Chinese)

[9] 祁乐,高明,郭晓敏,等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. 环境科学,2018, 39(5):2351-2359.
QI Le, GAO Ming, GUO Xiaomin, et al. Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil

- [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5):2351–2359. (in Chinese)
- [10] GENESIO L, MIGLIETTA F, BARONTI S, et al. Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: results from a four years field experiment in Tuscany[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 201: 20–25.
- [11] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 443–449.
- [12] VERHEIJEN F, JEFFERY S, BASTOS A C, et al. Biochar application to soils [C] // Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, 2010.
- [13] MOHAN D, ABHISHEK K, SARSWAT A, et al. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration—a sustainable solution to crop-residue burning in India [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(1):508–520.
- [14] PEAKE L R, REID B J, TANG X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils[J]. *Geoderma*, 2014, 235:182–190.
- [15] THANGARAJAN R, BOLAN N S, KUNHIKRISHNAN A, et al. The potential value of biochar in the mitigation of gaseous emission of nitrogen [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 257–268.
- [16] 李松, 李海丽, 方晓波, 等. 生物质炭输入减少稻田痕量温室气体排放[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21):234–240.
LI Song, LI Haili, FANG Xiaobo, et al. Biochar input to reduce trace greenhouse gas emission in paddy field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(21):234–240. (in Chinese)
- [17] 王欣欣, 邹平, 符建荣, 等. 不同竹炭施用量对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1): 198–204.
WANG Xinxin, ZOU Ping, FU Jianrong, et al. Effects of bamboo biochar amendments on methane and nitrous oxide emission from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):198–204. (in Chinese)
- [18] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8):2166–2172.
LIU Yuxue, WANG Yaofeng, LÜ Haohao, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8):2166–2172. (in Chinese)
- [19] 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田温室气体排放及其相关微生物影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(3):1046–1056.
WANG Miaoying, XU Xuping, WANG Weiqi, et al. Effect of slag and biochar amendment on greenhouse gases emissions and related microorganisms in paddy fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(3):1046–1056. (in Chinese)
- [20] 廖萍, 睦锋, 汤军, 等. 施用生物炭对双季稻田综合温室效应和温室气体排放强度的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(9): 1821–1830.
LIAO Ping, SUI Feng, TANG Jun, et al. Effects of biochar amendment on the global warming potential and greenhouse gas intensity in a double rice-cropping system[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2018, 32(9):1821–1830. (in Chinese)
- [21] 孟梦, 吕成文, 李玉娥, 等. 添加生物炭对华南早稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2013, 34(4):396–402.
MENG Meng, LÜ Chengwen, LI Yu'e, et al. Effect of biochar on CH_4 and N_2O emissions from early rice field in South China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(4):396–402. (in Chinese)
- [22] 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 等. 炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(1):489–498.
LAN Xingfu, WANG Xiaotong, ZHOU Yaxin, et al. Subsequent effects of slag and biochar application on greenhouse gas emissions from paddy fields in the Fuzhou Plain[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1):489–498. (in Chinese)
- [23] 张作合, 张忠学. 稻作水炭运筹下氮肥吸收转运与分配的 ^{15}N 示踪分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(11):239–249.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. ^{15}N tracer-based analysis of effects of water and biochar management on nitrogen absorption, transport and distribution in rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11):239–249. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191127&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.027. (in Chinese)
- [24] 张作合, 张忠学. 水炭运筹对寒地黑土区稻田土壤肥料氮素残留的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(1):284–294.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. Effects of water and biochar management on nitrogen fertilizer residue in paddy fields of cold and black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1):284–294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200131&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.031. (in Chinese)
- [25] 王孟雪, 张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N_2O 排放增加水稻产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15):72–79.
WANG Mengxue, ZHANG Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N_2O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(15):72–79. (in Chinese)
- [26] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜能的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(8):3120–3127.
WANG Cong, SHEN Jianlin, ZHENG Liang, et al. Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8):3120–3127. (in Chinese)
- [27] ZHANG A F, CUI L Q, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4):469–475.
- [28] ZWIETEN L V, SINGH B P, KIMBER S W L, et al. An incubation study investigating the mechanisms that impact N_2O flux from soil following biochar application [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191:53–62.

[29] GUNDALE M J, DELUCA T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fircharcoal[J]. Forest Ecology and Management,2006, 231(1-3):86-93.

[30] XU Y P, XIE Z B. The effect of biochar oldification on N₂O emission on paddy soil and red soil[C] // Biochar Research Development & Application, Nanjing, 2011:54.

[31] 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,等.生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J].环境科学,2015,36(9):3393-3400. GUO Yanliang, WANG Dandan, ZHENG Jiyong, et al. Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region [J]. Environmental Science, 2015, 36(9):3393-3400. (in Chinese)

[32] 李香兰,徐华,曹金留,等.水分管理对水稻生长期 N₂O 排放的影响[J].土壤,2006,38(6):703-707. LI Xianglan, XU Hua, CAO Jinliu, et al. Effect of water management on N₂O emission in rice-growing season[J]. Soils, 2006, 38(6):703-707. (in Chinese)

[33] 徐华,邢光熹,蔡祖聪,等.土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响[J].土壤学报,2000,37(4):499-505. XU Hua, XING Guangxi, CAI Zucong, et al. Effect of soil water regime and soil texture on N₂O emission from rice paddy field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4):499-505. (in Chinese)

[34] HUANG S H, PANT H K, LU J. Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils[J]. Ecological Engineering, 2007, 31(1):9-15.

[35] 彭世彰,杨士红,徐俊增.控制灌溉对稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放及温室效应的影响[J].水科学进展,2010,21(2):235-240. PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng. Influence of controlled irrigation on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2):235-240. (in Chinese)

[36] LI Xianglan, YUAN Wenping, XU Hua, et al. Effect of timing and duration of midseason aeration on CH₄ and N₂O emissions from irrigated lowland rice paddies in China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2011, 91(3):293-305.

[37] 屈忠义,高利华,李昌见,等.秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J/OL].农业机械学报,2016,47(12):111-118. QU Zhongyi, GAO Lihua, LI Changjian, et al. Impacts of straw biochar on emission of greenhouse gas in maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):111-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.015. (in Chinese)

[38] 高大伟,任树梅,杨培岭,等.再生水滴灌夏玉米配施不同氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J/OL].农业机械学报,2014, 45(增刊):168-174. GAO Dawei, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Impact of reclaimed water drip irrigation with different nitrogen fertilizers on CO₂ and N₂O emissions in summer maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (Supp.):168-174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s127&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.027. (in Chinese)

(上接第 209 页)

[38] 杭小帅,王火焰,周健民.长江三角洲地区土壤重金属污染的防治与调控[J].土壤通报,2013,44(1):245-251. HANG Xiaoshuai, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin. Prenention and regulation countermeasures of soil heavy metal contamination in Yangtze River Delta[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1):245-251. (in Chinese)

[39] 邵学新,黄标,赵永存,等.长江三角洲典型地区土壤中重金属的污染评价[J].环境化学,2008(2):218-221. SHAO Xuexin, HUANG Biao, ZHAO Yongcun, et al. Pollution assessment of soil heavy metals in a representative area of the Yangtze River Delta region[J]. Environmental Chemistry, 2008(2):218-221. (in Chinese)

[40] 钟晓兰,周生路,赵其国.长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以江苏太仓市为例[J].地理科学,2007(3):395-400. ZHONG Xiaolan, ZHOU Shenglu, ZHAO Qiguo. Spatial characteristics and pollution ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—a case study of Taicang City, Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007(3):395-400. (in Chinese)

[41] 马成玲,王火焰,周健民,等.长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J].农业环境科学学报, 2006, 25(3):751-755. MA Chengling, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, et al. Investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland of a typical county in Yangtze River Delta[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(3):751-755. (in Chinese)

[42] 马成玲,周健民,王火焰,等.农田土壤重金属污染评价方法研究——以长江三角洲典型县级市常熟市为例[J].生态与农村环境学报,2006,22(1):48-53. MA Chengling, ZHOU Jianmin, WANG Huoyan, et al. Methods for assessment of heavy metal pollution in cropland soils—a case study of Changshu[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(1):48-53. (in Chinese)