

节水灌溉下秸秆还田形式对黑土区稻田 N₂O 排放与产量的影响

薛里^{1,2} 张忠学^{1,2} 齐智娟^{1,2} 韩羽^{1,2} 徐丹^{2,3} 张作合⁴ 周欣^{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. 东北农业大学文理学院, 哈尔滨 150030; 4. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061)

摘要: 为探寻不同灌溉模式下秸秆还田形式对黑土区稻田 N₂O 排放与产量的影响, 于 2023 年进行大田试验, 设置常规灌溉(F)与控制灌溉(C)两种灌溉模式, 同时设置秸秆还田(S)、秸秆炭化为生物炭还田(B)、秸秆过牛腹为有机肥还田(O)3种还田形式, 以及秸秆不还田(N)作为对照组, 共计 8 个处理。分析不同灌溉模式下秸秆还田形式对稻田 N₂O 排放通量与水稻产量的影响, 测定了水稻各生育期稻田土壤铵态氮含量、硝态氮含量、微生物氮含量、pH 值, 并分析了 N₂O 排放总量和水稻产量与土壤环境因子之间的关系。结果表明: 除返青期外, 与秸秆不还田处理相比, 秸秆还田与有机肥还田处理土壤铵态氮含量、硝态氮含量、微生物氮含量均表现为增加。相同秸秆还田形式下, 控制灌溉模式下各处理生育期内土壤平均铵态氮含量、硝态氮含量较常规灌溉模式高 36.23% ~ 60.82%、14.16% ~ 19.61%。同时, 秸秆还田与生物炭还田能提高稻田土壤 pH 值。相同灌溉模式下, 与秸秆不还田处理相比较, 秸秆还田与有机肥还田处理 N₂O 排放总量分别增加 14.44% ~ 24.09%、8.22% ~ 14.44%, 生物炭还田处理 N₂O 排放总量降低 14.31% ~ 23.90%。生物炭还田与有机肥还田各处理水稻产量提高 3.28% ~ 13.07%, 其中控制灌溉模式下生物炭还田处理产量最高。综上所述, 控制灌溉下生物炭还田可以实现节水、增产、减排的目的。

关键词: 水稻产量; N₂O 排放; 黑土区稻田; 灌溉模式; 秸秆还田形式

中图分类号: S511.4⁺1; S365

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)04-0280-10

OSID:



Effects of Straw Returning on N₂O Emission and Yield under Water-saving Irrigation in Black Soil Paddy Field

XUE Li^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} HAN Yu^{1,2} XU Dan^{2,3} ZHANG Zuohe⁴ ZHOU Xin^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. College of Arts and Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

4. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different irrigation modes of straw return form on N₂O emission and yield of paddy field in black soil area, a field experiment was conducted in 2023, which was set up with two irrigation modes, conventional irrigation (F) and controlled irrigation (C), and three types of straw return forms, namely, straw return to the field (S), straw charred to biochar return to the field (B), and straw return to the field through cow's belly as organic fertilizer (O), and straw not returning (N) as a control group, with a total of eight treatments. The effects of straw return on N₂O emission flux and rice yield under different irrigation modes were analyzed. The contents of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, microbial nitrogen and pH value in paddy soil at different growth stages were determined, and the relationship between N₂O emission, rice yield and soil environmental factors was

收稿日期: 2023-12-25 修回日期: 2024-01-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079028)

作者简介: 薛里(1999—), 男, 硕士生, 主要从事农业节水灌溉理论与技术研究, E-mail: al3134552959@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

analyzed. The results showed that except for the regreening period, the soil ammonium nitrogen content, nitrate nitrogen content and microbial nitrogen content of straw return and organic fertilizer return treatments were increased compared with that of straw non-return treatment. Under the same form of straw return, the average soil ammonium nitrogen content and nitrate nitrogen content during the fertility period of treatments under the controlled irrigation mode were 36.23% ~ 60.82% and 14.16% ~ 19.61% higher than those under the conventional irrigation mode. At the same time, straw return and biochar return can improve the pH value of paddy soil. Under the same irrigation mode, compared with the straw non-return treatment, the total N₂O emissions of straw return and organic fertilizer return treatments were increased by 14.44% ~ 24.09% and 8.22% ~ 14.44%, respectively, and the total N₂O emissions of biochar return treatment were decreased by 14.31% ~ 23.90%. Biochar return and organic fertilizer return increased rice yield by 3.28% ~ 13.07%, and the yield of biochar return treatment under controlled irrigation mode was the highest. In summary, CB treatment was the ultimate goal of water saving, yield increase and emission reduction.

Key words: rice yield; N₂O emissions; paddy fields in black soil area; irrigation mode; straw returning form

0 引言

氧化亚氮(N₂O)是一种主要的温室气体,在100年时间尺度上,其全球变暖潜力是CO₂的298倍^[1],对全球气候变化产生重要影响。大气中N₂O质量浓度从工业时代的270 μg/L增加到2019年的328 μg/L,且预计随着气候变化将进一步增加^[2]。稻田作为N₂O重要排放源,据统计,仅2020年,稻田的N₂O排放量已达到9.3 × 10⁴ t^[3]。因此,对稻田N₂O的减排研究具有重要意义。

土壤N₂O主要由微生物硝化与反硝化过程产生,影响其排放的首要因子是氮底物浓度^[4]。目前,农户通过施用大量化学氮肥来追求作物高产,过量氮肥投入引起N₂O排放增加,并造成氮肥利用率低,同时对环境造成污染^[5]。随着我国粮食生产减肥策略的实施^[6],氮肥减量施用已成必然。有研究表明^[7],N₂O排放量虽会随着氮肥施用量的减少而减少,但长期不合理的减氮,会造成土壤氮库得不到补充,导致水稻严重减产。而将秸秆或秸秆衍生物(生物炭、有机肥)作为有机氮肥还田并替代化学氮肥,既能将秸秆资源合理利用又能减少化学氮肥投入,还能通过增加土壤有机质含量,改良土壤团聚体结构,促进土壤水肥气热平衡,提高水稻产量与品质^[8]。然而,由于不同地区土壤类型、环境及基础肥力等因素的影响,关于秸秆的不同还田形式对稻田N₂O排放的影响研究结论并未一致^[9-12],尤其是在高肥力的寒地黑土区稻田还有待进一步研究。

近年来,农业农村部提出“一控两减三基本”的农业可持续发展战略。因此,节水灌溉稻田已在黑龙江省大面积推广,推广面积达2 × 10⁶ hm²^[13]。与常规淹水灌溉模式相比较,节水灌溉虽能提高水稻

水分利用效率,增加水稻对土壤中氮素吸收与利用,减少稻田土壤氮素淋溶损失^[14],但节水灌溉也会改变稻田土壤根层通气状态,促进氧气在土壤中扩散,增强微生物活性,提高硝化速率^[7],进而增加N₂O排放。因此,通过探寻适宜的秸秆还田形式来减少黑土区节水灌溉稻田N₂O排放,对环境保护具有重要意义。

本文通过2023年田间试验,测定整个水稻生长季的N₂O排放通量,结合土壤铵态氮含量、硝态氮含量、微生物氮含量和土壤pH值的变化,对N₂O排放规律进行分析,以期为黑土区稻田增产、节水、减排的水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023年5—9月在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站进行,该试验站位于黑龙江省绥化市庆安县平安镇(46°57'28"N,127°40'45"E),是典型的寒地黑土分布区。试验地多年平均降水量550 mm,多年平均水面蒸发量750 mm,无霜期128 d,有效积温2 532℃,作物水热生长期为110~130 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候,水稻自移栽后气温和降雨量变化如图1所示。土壤pH值为6.40,土

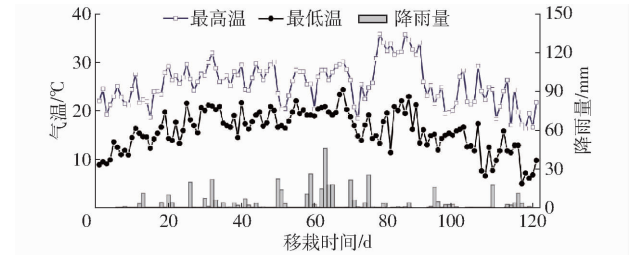


图1 水稻生育期内气温和降雨量日变化曲线
Fig.1 Daily variation curves of air temperature and rainfall during rice growth period

壤基本理化性质为:有机质质量比 44.9 g/kg、全氮质量比 1.52 g/kg、全磷质量比 147.26 g/kg、全钾质量比 18.86 g/kg、碱解氮质量比 148.28 g/kg、速效磷质量比 24.21 g/kg、速效钾质量比 156.10 mg/kg。

1.2 供试材料

供试水稻品种为当地主栽品种“绥粳 18”,种植密度为 24 穴/m²。供试水稻秸秆全碳质量比 389.12 g/kg,全氮质量比 5.22 g/kg,纤维素质量比 501.25 g/kg,半纤维素质量比 150.21 g/kg,木质素质量比 188.83 g/kg。秸秆炭化是在 600℃ 高温条件下裂解制备而成,6 t 稻草秸秆可制成约 2 t 秸秆生物炭。生物炭基本理化性质为:pH 值 8.6、全碳质量比 521.74 g/kg、全氮质量比 7.6 g/kg、填充密度 0.13 g/cm³、比表面积 81.56 m²/g、总孔容积 0.081 cm³/g、阳离子交换量 44.74 cmol/kg。秸秆有机肥是指将稻草秸秆作为牛饲料,并将其粪便经发酵等流程制成有机肥料,6 t 稻草秸秆可制成约 2.5 t 有机肥。有机肥基本理化性质为:全碳质量比 410.0 g/kg、全氮质量比 13.2 g/kg、木质素质量比 5.58 g/kg、纤维素质量比 16.22 g/kg。

1.3 试验设计

本试验采用灌溉模式和秸秆不同还田形式二因

素全面试验,分别为常规淹灌(F)和控制灌溉(C)2种灌溉模式,不同灌溉模式水分管理见表1。设置3种还田形式,分别为秸秆还田(S,6 t/hm²)、秸秆炭化为生物炭还田(B,2 t/hm²)、秸秆过牛腹为有机肥还田(O,2.5 t/hm²),并设置秸秆不还田处理(N)作为对照组。共计8个处理,每个处理3次重复,共计24个试验小区,每个小区面积为100 m²(10 m×10 m),采用随机抽取的方式布置试验小区。各小区之间田埂向地下内嵌深40 cm的塑料板,以防止各小区水肥交换。当田面无水层后,控制灌溉模式各小区采用土壤水分测定仪(TPIME-PICO64/32型)测定土壤含水率,当小区土壤含水率低于灌水下限时,开始灌水至水量上限,同时记录灌水量。钾肥(K₂O)施入量80 kg/hm²,在水稻移栽前与水稻8.5叶龄分2次施入,比例为1:1;磷肥(P₂O₅)施入量45 kg/hm²,作为基肥一次性施入。同时鉴于国内外长期有机物料还田试验的肥料管理措施,各有机物料作为有机氮肥替代化学氮肥,在水稻移栽前一次性施入,本试验按照等氮量原则,各处理总氮输入量为110 kg/hm²,见表2。水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理与当地农作习惯相同。

表 1 不同灌溉模式水分管理标准

Tab. 1 Water management standards for different irrigation modes

灌溉模式	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0.7 θ_s ~ 30 mm	晒田	0.8 θ_s ~ 30 mm	0.8 θ_s ~ 40 mm	0.7 θ_s ~ 30 mm	落干
常规淹灌	0 ~ 30 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	晒田	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	落干

注: θ_s 为根层土壤饱和含水率;“~”前数据为水分控制下限,“~”后数据为水分控制上限。

表 2 各处理氮肥施用量

Tab. 2 Nitrogen fertilizer application rate of each treatment

灌溉模式	物料名称	处理	有机氮肥输入量/ (kg·hm ⁻²)	各期无机氮肥施用量/(kg·hm ⁻²)			总氮输入量/ (kg·hm ⁻²)
				基肥	蘖肥	穗肥	
常规淹灌	秸秆还田	FS	31.3	18.2	22	38.5	110
	有机肥	FO	33.0	16.5	22	38.5	110
	秸秆不还田	FN	0	49.5	22	38.5	110
	生物炭	FB	15.2	34.3	22	38.5	110
控制灌溉	秸秆还田	CS	31.3	18.2	22	38.5	110
	有机肥	CO	33.0	16.5	22	38.5	110
	秸秆不还田	CN	0	49.5	22	38.5	110
	生物炭	CB	15.2	34.3	22	38.5	110

1.4 N₂O 采集与测定

使用静态室-气相色谱法测定 N₂O 排放量。静态室由有机玻璃制成的密闭性无底箱体和不锈钢底座组成,透明有机玻璃箱体外包裹一层铝箔,以减小太阳照射引起箱内温度变化,箱体内配备空气温度计

和电风扇。在水稻移栽前,将不锈钢底座布置在每个小区中,顶部留有密封槽。进行测量时,注入水密封凹槽,以避免箱体内气体和外部空气交换,气体采集时间为10:00—12:00,每隔10 min(0、10、20、30 min)用注射器抽取箱内气体,分别使用50 mL E-Switch

气袋通过橡胶管收集 4 个气体样品,并且记录箱内温度变化。水稻生育前期静态箱高度为 1 m,根据水稻的生长情况,生育后期将箱体高度增加至 1.1 m。水稻自移栽后每 7 d 采集 1 次,在水稻生长旺盛期进行加测,如遇降雨天气延后进行样本采集,随后带回实验室用气相色谱仪(GC-2010PLUS 型,岛津公司,日本)检测分析 N₂O 浓度变化。

N₂O 排放通量计算公式为

$$F = \rho h \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + T} \tag{1}$$

式中 F ——N₂O 排放通量,μg/(m²·h)
 ρ ——标准状态 N₂O 密度,取 1.964 kg/m³
 h ——静态箱内有效高度,m
 dc/dt ——气体浓度变化率,mL/(m³·h)
 T ——采样时静态箱内平均空气温度,℃
N₂O 排放总量计算公式为

$$E = 0.24 \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (D_{i+1} - D_i) \tag{2}$$

式中 E ——N₂O 排放总量,g/hm²
 F_i ——第 i 次采样时 N₂O 排放通量,μg/(m²·h)
 F_{i+1} ——第 $i + 1$ 次采样时 N₂O 排放通量,μg/(m²·h)
 D_i ——第 i 次采样时间,d
 D_{i+1} ——第 $i + 1$ 次采样时间,d

1.5 土壤铵态氮、硝态氮、微生物氮含量和 pH 值测定
于水稻各个生育期末,使用稻田专用土钻(PSS5030 型),并采用“Z”字法取 5 处深度 0 ~ 20 cm 土层田间土样,并充分混匀后带回实验室。新鲜土壤样品采用紫外-可见分光光度计(UV-1780 型,岛津公司,日本)测定土壤铵态氮、硝态氮含量。使用 pH 检测器(QX6530 型智能便携氧化还原电位仪)对土壤 pH 值进行测定。采用氯仿熏蒸法测定土壤微生物氮含量^[15]。

土壤微生物氮含量(MBN)计算公式为

$$MBN = E_c / K_c \tag{3}$$

式中 E_c ——熏蒸与未熏蒸浸提液中氮含量(质量比)之差,mg/kg
 K_c ——转换系数,取 0.45

1.6 产量

水稻成熟期在每个小区选取 10 穴具有代表性的植株,风干后考种,并取 2 m²实收计产。

1.7 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据处理,Origin 9.0 软件进行作图,并利用 SPSS 17.0 进行统计分析,采用 Duncan 法进行多组样本间差异显著性分析,统计显著性假设为 $P = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式下秸秆还田形式对 N₂O 排放通量的影响

不同灌溉模式下秸秆还田形式对稻田 N₂O 排放通量的影响如图 2 所示,试验结果表明,在水稻本田生长期各处理 N₂O 排放通量呈现多个峰值,其中主要峰值分别出现在分蘖期、拔节孕穗期和黄熟期。随着氮肥的施入,各处理 N₂O 排放通量出现第 1 个峰值,其中 CS 处理 N₂O 排放通量最高,且 CS、CO、CN、CB 处理 N₂O 排放通量较 FS、FO、FN、FB 处理分别高 27.42%、28.68%、30.97%、17.66%。在拔节孕穗期,各处理 N₂O 排放通量峰值在穗肥施入后出现,其中 CS、CO、CN、CB 处理 N₂O 排放通量较 FS、FO、FN、FB 处理分别高 18.19%、15.68%、30.80%、2.07%。进入黄熟期,随着稻田自然落干,土壤含水率下降,各处理 N₂O 排放通量出现最后一个峰值,其中 CS、CO、CN、CB 处理 N₂O 排放通量较 FS、FO、FN、FB 处理分别高 13.42%、16.66%、33.02%、43.36%。与常规灌溉模式相比较,在水稻本田生长期控制灌溉模式下各处理 N₂O 排放通量波动更为频繁,产生规律波动不同原因可能为控制灌溉模式下稻田频繁的排水与复水,影响土壤含水率与田面水层深度等。

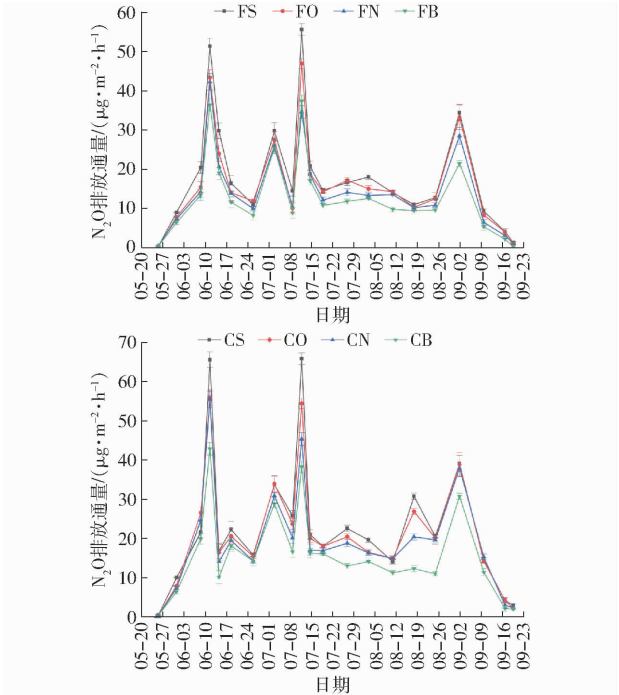


图 2 水稻生育期内不同处理 N₂O 排放通量变化曲线
Fig. 2 Curves of N₂O emission flux under different treatments during rice growth period

2.2 不同灌溉模式下秸秆还田形式对 N₂O 排放总量与产量的影响

不同灌溉模式下秸秆还田形式对稻田 N₂O 排

放总量与产量的影响如表 3 所示。结果表明,CB 处理产量显著高于其他处理($P < 0.05$)。相同灌溉模式下,与秸秆不还田处理相比较,有机肥还田与生物炭还田处理水稻产量提高 3.28% ~ 13.07%,其中生物炭还田对水稻产量的增幅效果最为明显,而秸秆还田处理水稻产量降低 1.46% ~ 3.30%。相同秸秆还田形式下,控制灌溉模式下各处理水稻产量较常规灌溉模式高 1.61% ~ 10.80%。在相同灌溉模式下,与秸秆不还田相比较,秸秆还田与有机肥还田均提高 N_2O 排放总量,而生物炭还田降低 N_2O 排放总量,其中 CS、CO 处理 N_2O 排放总量较 CN 处理增加 14.44%、8.22%;FS、FO 处理 N_2O 排放总量较 FN 处理增加 24.09%、12.09%;CB 处理 N_2O 排放总量较 CN 处理减小 23.90%;FB 处理 N_2O 排放总量较 FN 处理减小 14.31%。相同秸秆还田形式下,与常规灌溉模式相比,控制灌溉模式下各处理 N_2O 排放总量提高 27.51% ~ 38.26%。不同生育期 N_2O 排放量占排放总量百分比如图 3 所示。各处理分蘖期 N_2O 排放量占生育期排放总量比例最大,返青期占比最小,占比范围分别为 32.13% ~ 34.97%、6.05% ~ 6.82%。

表 3 不同处理产量和 N_2O 排放总量

Tab.3 Yield and total N_2O emission under different treatments

处理	产量/($kg \cdot hm^{-2}$)	N_2O 排放总量/($g \cdot hm^{-2}$)
FS	7 548.46 ^c	514.11 ^{cd}
FO	8 211.65 ^b	464.40 ^{de}
FN	7 659.00 ^c	414.31 ^{ef}
FB	8 245.56 ^b	362.45 ^f
CS	7 821.45 ^b	655.54 ^a
CO	8 344.12 ^b	619.90 ^{ab}
CN	8 079.45 ^c	572.82 ^{bc}
CB	9 135.69 ^a	462.33 ^{de}

注:同列数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 不同灌溉模式下秸秆还田形式对土壤 pH 值、铵态氮、硝态氮、微生物氮的影响

2.3.1 生育期内土壤 pH 值变化特征

不同灌溉模式下秸秆还田形式对生育期内稻田土壤 pH 值的影响如图 4 所示。结果表明,在返青期,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田与生物炭还田处理的土壤 pH 值均表现为增加,其中 FS、FB 处理土壤 pH 值较 FN 处理高 6.82%、16.12%;CS、CB 处理土壤 pH 值较 CN 处理高 7.02%、15.42%,并持续到黄熟期,生物炭还田与秸秆还田处理土壤 pH 值均表现为增加。FS、FB 处理生育期内平均土壤 pH 值较 FN 高 6.74%、10.87%;CS、CB 处理生育期

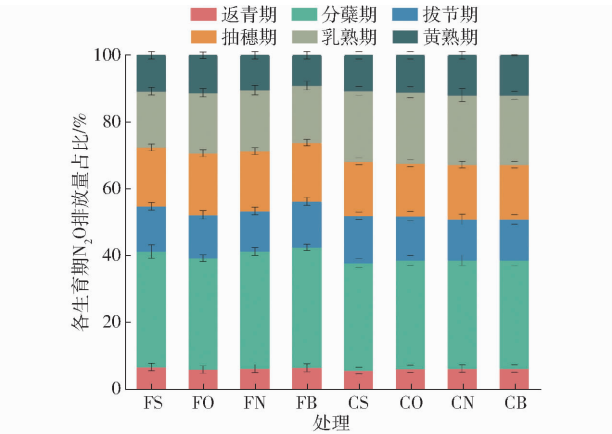


图 3 不同处理各生育期 N_2O 排放量占比

Fig.3 Proportion of N_2O emissions in different treatments at each growth stage

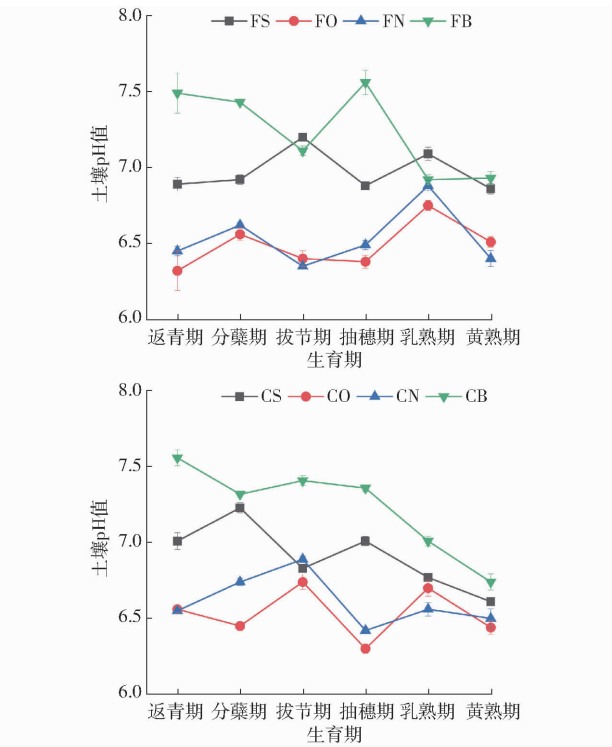


图 4 不同处理各生育期土壤 pH 值变化曲线

Fig.4 Soil pH value variation curves of different treatments at different growth stages

内平均土壤 pH 值较 CN 高 4.54%、9.38%，表明生物炭还田对土壤 pH 值的提升作用高于秸秆还田。由于不同的灌溉模式会影响土壤通气性等因素,所以各处理土壤 pH 值并未呈现相同的变化规律。总之,生物炭还田与秸秆还田对水稻生育期内稻田土壤 pH 值具有提高作用。

2.3.2 生育期内土壤铵态氮含量变化特征

不同灌溉模式下秸秆还田形式对土壤铵态氮含量影响如图 5(图中不同小写字母表示相同生育期不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示。试验结果表明,控制灌溉模式下,除返青期外,CS、CO、

CB 处理土壤铵态氮含量均高于 CN 处理,且 CS 处理土壤铵态氮含量高于 CO、CB 处理。在生育期内,控制灌溉模式下各处理土壤铵态氮含量呈现先增加后减小再增加又减小的变化趋势,其中随着蘖肥的施入,分蘖期 CS、CO、CB 处理土壤铵态氮含量较返青期分别增长 107.68%、33.86%、58.65%。施加穗肥后,抽穗期 CS、CO、CB、CN 处理土壤铵态氮含量较拔节期分别增长 80.48%、117.72%、69.05%、142.33%。常规灌溉模式下各处理生育期内土壤铵态氮含量与控制灌溉模式呈现相同的变化规律,但在相同生育期下,控制灌溉模式下各处理的土壤铵态氮含量均高于常规灌溉模式,其中分蘖期 CS、CO、CB、CN 处理土壤铵态氮含量较 FS、FO、FB、FN 处理分别增加 55.88%、44.87%、57.21%、48.63%;抽穗期 CS、CO、CB、CN 处理土壤铵态氮含量较 FS、FO、FB、FN 处理分别增加 51.76%、58.56%、35.41%、5.92%。

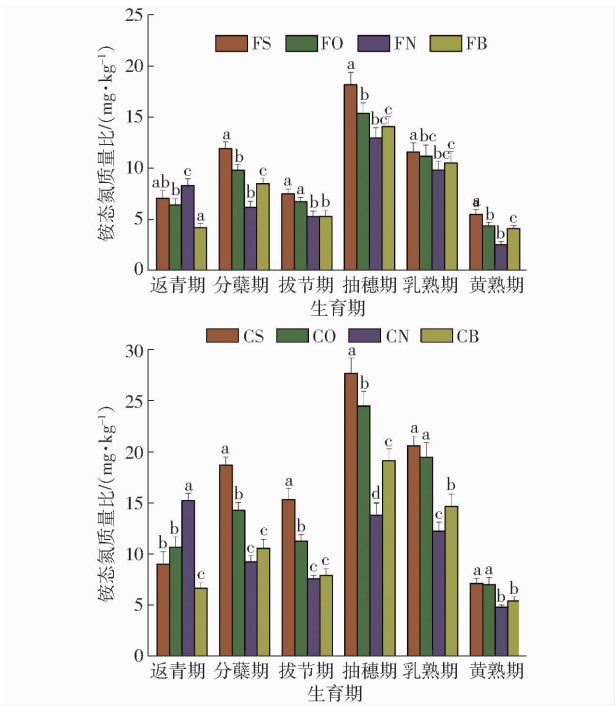


图 5 不同处理各生育期土壤铵态氮含量
Fig. 5 Changes of soil ammonium nitrogen content in different treatments at different growth stages

2.3.3 生育期内土壤硝态氮含量变化特征

不同灌溉模式下秸秆还田形式对土壤硝态氮含量影响如图 6 所示。试验结果表明,控制灌溉模式下,除返青期外,CS、CO 处理土壤硝态氮含量均高于 CN 处理,且 CS 处理土壤硝态氮含量高于 CO 处理,而 CB 处理土壤硝态氮含量均低于 CN 处理。在水稻本田生长期,控制灌溉模式下各处理土壤硝态氮含量呈先减小再增加后减小又增加的变化趋势。常规灌溉模式下各处理生育期内土壤硝态氮含

量与控制灌溉模式呈现相似变化,但在相同生育期下,控制灌溉模式与常规灌溉模式相比提高了各处理土壤硝态氮含量,其中分蘖期 CS、CO、CB、CN 处理土壤硝态氮含量较 FS、FO、FB、FN 处理分别增加 8.13%、21.09%、48.69%、39.70%;抽穗期 CS、CO、CB、CN 处理土壤硝态氮含量较 FS、FO、FB、FN 处理分别增加 23.20%、20.12%、27.53%、20.84%。

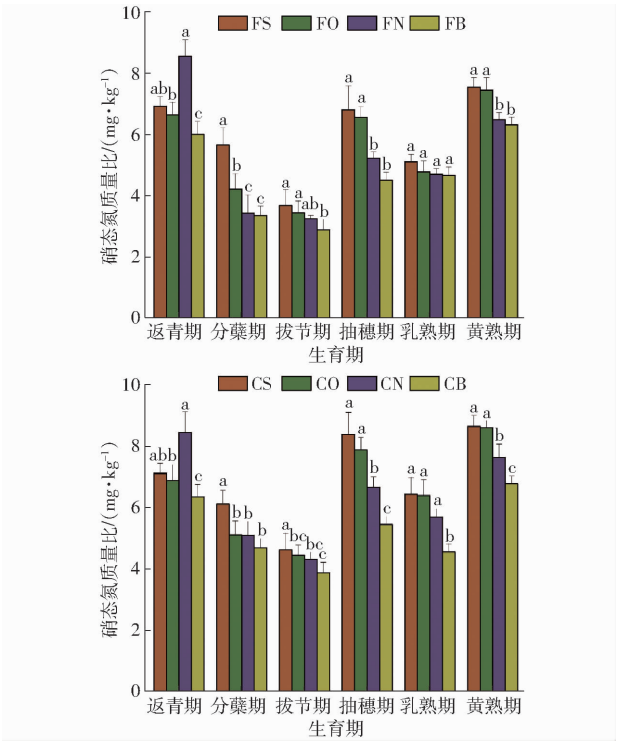


图 6 不同处理各生育期土壤硝态氮含量
Fig. 6 Changes of soil nitrate nitrogen content in different treatments at different growth stages

2.3.4 生育期内土壤微生物氮含量变化特征

不同灌溉模式下秸秆还田形式对土壤微生物氮含量影响如图 7 所示。试验结果表明,在控制灌溉模式下各处理土壤微生物氮含量呈现先增加后减小的变化趋势,并均在抽穗期达到最大值。除返青期外,CS、CO、CB 处理土壤微生物氮含量均高于 CN 处理,且 CS、CO 处理土壤微生物氮含量均大于 CB 处理。除返青期外,控制灌溉模式下各处理土壤微生物氮含量均高于常规灌溉模式,其中分蘖期 CS、CO、CB、CN 处理土壤微生物氮含量较 FS、FO、FB、FN 处理分别增加 6.27%、3.44%、22.24%、6.63%;抽穗期 CS、CO、CB、CN 处理土壤微生物氮含量较 FS、FO、FB、FN 处理分别增加 32.45%、14.22%、33.13%、24.77%。

2.4 N₂O 排放量、水稻产量与土壤环境因子相关性分析

N₂O 排放量、水稻产量与环境因子相关性分析如图 8(图中 * 表示 0.05 水平显著, ** 表示 0.01

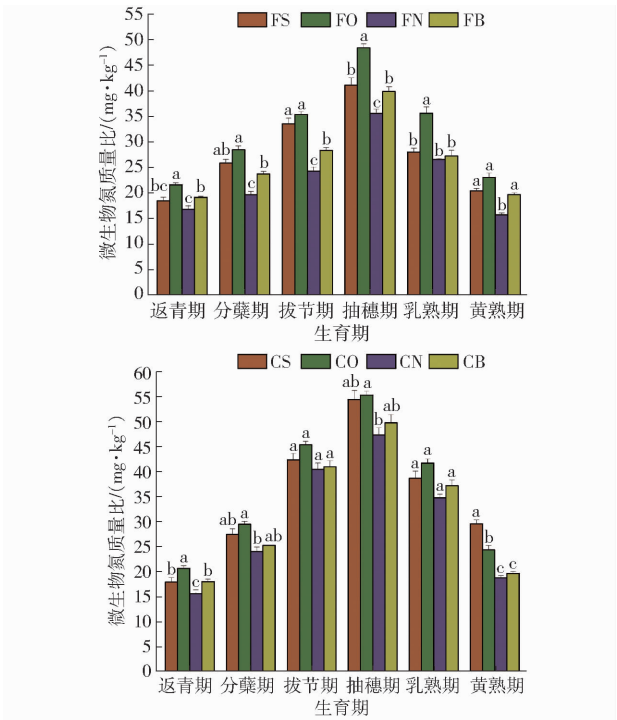


图7 不同处理各生育期土壤微生物氮含量
Fig.7 Changes of soil microbial nitrogen content in different treatments at different growth stages

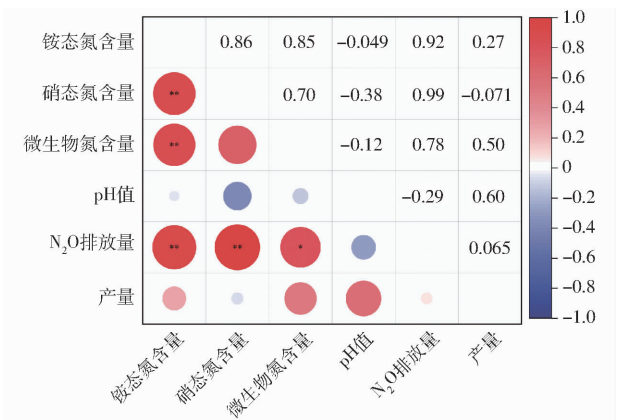


图8 N₂O排放量、水稻产量与环境因子相关性分析
Fig.8 Correlation analysis of N₂O emissions, rice yield and environmental factors

水平显著)所示。各处理水稻产量与土壤铵态氮含量、微生物氮含量、pH值、N₂O排放总量呈正相关,与硝态氮含量呈负相关,其中水稻产量与土壤pH值相关系数最高,表明土壤pH值对产量影响最大。N₂O排放量与土壤微生物氮含量呈显著正相关($P < 0.05$),与铵态氮含量和硝态氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),而与土壤pH值呈负相关,这表明土壤微生物氮、铵态氮、硝态氮是促进稻田N₂O排放的主导因素,pH值是抑制N₂O排放的因素。

3 讨论

氮素是水稻生长发育所必需的重要营养元素之一^[16]。土壤铵态氮、硝态氮和微生物氮作为土壤氮

素转化过程中的主要氮素形态,其含量变化会对N₂O的产生和排放产生影响^[17]。本研究结果表明,相同灌溉模式下,除返青期外,与秸秆不还田处理相比较,秸秆还田与有机肥还田处理的土壤铵态氮含量、硝态氮含量和微生物氮含量均不同程度提高。通过相关性分析发现,N₂O排放量与土壤铵态氮含量和硝态氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),即土壤铵态氮含量、硝态氮含量越高,N₂O排放量越多。因此,本研究中两种灌溉模式下,秸秆还田与有机肥还田处理N₂O排放总量表现为提高,而生物炭还田提高了土壤铵态氮含量,但生物炭还田并未增加N₂O排放,反而降低了N₂O排放总量,这是因为,生物炭还田降低了土壤硝态氮含量,减少了反硝化细菌的反应底物,同时,生物炭还田使土壤pH值在一定范围内提高,会使反硝化过程进行得更加彻底,使更多的N₂O转化为N₂,进而减少N₂O排放^[18]。而秸秆还田也提高了土壤pH值,却并未表现出抑制N₂O排放,这是因为秸秆腐解过程为微生物释放出大量养分,且在腐解过程会消耗氧气,有利于土壤形成厌氧环境,促进土壤微生物反硝化作用^[19],进而增强了N₂O排放。与FB处理相比较,CB处理对N₂O排放的抑制效果尤为明显,这是因为控制灌溉模式相较于常规灌溉模式使土壤长期处于有氧环境中,而在有氧环境中N₂O的产生以硝化过程为主^[20],同时生物炭会释放毒害氨氧化细菌等化合物,抑制土壤中的硝化作用^[21],进而使得N₂O减排效果明显。

稻田土壤N₂O排放包括产生、传输和扩散3个主要阶段^[22],而不同灌溉模式会影响土壤含水率与田面水层深度,改变土壤的通气状态等,从而影响土壤N₂O的产生途径及在土壤中的迁移与扩散^[23]。本研究结果表明,相同秸秆还田形式下,控制灌溉模式下各处理N₂O排放总量均较常规灌溉模式高,这是因为,本研究控制灌溉模式在水稻生长期内并没有长期建立田面水层,土壤含水率控制在70%~100%之间,根据HAN等^[24]研究表明,水稻土壤含水率介于70%~90%有利于N₂O排放。此外,控制灌溉模式与秸秆和有机肥之间的交互作用也会进一步促进N₂O排放,因为秸秆与有机肥在分解过程中会消耗大量氧气^[25],控制灌溉模式增加土壤通气能力^[26],有利于秸秆与有机肥分解,进而增加土壤细菌活性,促进N₂O排放。在本研究中,在分蘖期各处理N₂O排放量占排放总量比例最大,占生育期内排放总量的32.13%~34.97%,返青期N₂O排放量仅占生育期内排放总量6.05%~6.82%,这是因为在水稻返青期,土壤温度较低,土壤酶活性与硝化-

反硝化细菌活性均较弱,同时,本研究将秸秆、有机肥和生物炭作为有机氮肥对化学氮肥进行替代,而有机氮肥与化学氮肥相比养分释放周期较长,前期养分释放量少^[27],使得返青期 N₂O 排放量较低,随着粪肥施入后,温度也逐渐升高,施入稻田土壤的各类有机物料开始快速分解,为硝化-反硝化细菌提供了丰富的底物,进而提高了稻田土壤 N₂O 排放通量,最终使得分蘖期的 N₂O 排放量占排放总量比例最大。

在本研究中,有机肥与生物炭作为有机氮肥还田使得各处理水稻产量提高 3.28% ~ 13.07%,而秸秆作为有机氮肥还田却降低了水稻产量。这是因为,有机氮肥在适量范围内对化学氮肥进行替代对水稻具有增产的效果^[28],而大量高碳氮比秸秆替代基肥后,其在腐解过程中会引起微生物与水稻争氮的现象,影响水稻在苗期的生长,进而导致水稻产量降低^[29]。同时,因控制灌溉模式与常规灌溉模式相比,其能提高根区溶解氧含量,维持水稻根系活力,促进水稻对养分的吸收与利用^[30],使得控制灌溉模式下有机肥还田与生物炭还田处理的水稻产量增幅更加明显。因此,综合水稻产量与 N₂O 排放量,符合该研究区水稻节水、高产和减排的技术措施为控制灌溉模式下生物炭还田。

4 结论

(1)相同秸秆还田形式下,控制灌溉模式较常规灌溉模式 N₂O 排放通量波动更加频繁。相同灌溉模式下,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田与有机肥还田处理 N₂O 排放总量分别增加 14.44% ~ 24.09%、8.22% ~ 14.44%,生物炭还田处理 N₂O 排放总量降低 14.31% ~ 23.90%。

(2)两种灌溉下各处理分蘖期 N₂O 排放量占排放总量的 32.13% ~ 34.97%,返青期 N₂O 排放量仅占排放总量的 6.05% ~ 6.82%。

(3)相同秸秆还田形式下,控制灌溉模式下各处理生育期平均土壤铵态氮含量、硝态氮含量较常规灌溉模式高。相同灌溉模式下,除返青期外,秸秆还田与有机肥还田处理土壤铵态氮含量、硝态氮含量、微生物氮含量均表现为增加。

(4)N₂O 排放量与土壤微生物氮含量呈显著正相关($P < 0.05$),与铵态氮含量和硝态氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),而与土壤 pH 值呈负相关。

(5)控制灌溉模式下生物炭还田对产量的增幅效果更加明显,满足增产的同时达到节水和减排的目的,研究区适宜水肥管理模式为控制灌溉模式下生物炭还田。

参 考 文 献

[1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group to the fourth assessment report of the intergovernment panel on climate change[R]. Cambrige University Press,2008:33 - 34.

[2] LIU Guangyuan, ZHENG Junlin, CHEN Taotao, et al. Zeolite mitigates N₂O emissions in paddy fields under alternate wetting and drying irrigation[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2022,339:108145.

[3] 张子娴,刘婷,秦树平,等. 铁膜促进水稻 N₂O 排放的根际微域反硝化微生物机制解析[J]. 环境科学学报,2023,43(6): 437 - 447.

ZHANG Zixian, LIU Ting, QIN Shuping, et al. Study on iron plaque promoting N₂O emission based on rhizosphere denitrification functional microbial community from paddy soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(6):437 - 447. (in Chinese)

[4] HOU A X, CHEN G X, WANG Z P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6):2180 - 2186.

[5] 项剑,孙禧,王成,等. 生物炭对滨海盐碱土氮素转化和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报,2023,34(11):2969 - 2977.

XIANG Jian, SUN Xi, WANG Cheng, et al. Effects of biochar on nitrogen transformation and N₂O emission in coastal saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(11):2969 - 2977. (in Chinese)

[6] 袁龙江. 深入贯彻落实藏粮于地藏粮于技战略[J]. 红旗文稿,2023(18):34 - 36.

YUAN Longjiang. In-depth implementation of the strategy of storing grain in land and storing grain in technology[J]. Red Flag Manuscript,2023(18):34 - 36. (in Chinese)

[7] 李铁成,张忠学,张作合,等. 氮肥减施对节水灌溉稻田 NH₃ 与 N₂O 排放及氮肥利用的影响[J]. 农业机械学报,2023, 54(10):348 - 355.

LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, ZHANG Zuohe, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction on NH₃ and N₂O emissions and nitrogen use efficiency in paddy fields under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 348 - 355. (in Chinese)

[8] HAO He, LI Dandan, WU Zhurong, et al. Assessment of the straw and biochar application on greenhouse gas emissions and yield in paddy fields under intermittent and controlled irrigation patterns[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2024, 359:108745.

[9] CAO Yansheng, SHAN Ying, WU Peicong, et al. Mitigating the global warming potential of rice paddy fields by straw and straw-derived biochar amendments[J]. *Geoderma*, 2021,396:115081.

[10] 胡天怡,车佳珩,胡煜杰,等. 秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1692 – 1701.
HU Tianyi, CHE Jiayue, HU Yujie, et al. Effects of straw returning and biochar addition on greenhouse gas emissions from high nitrate nitrogen soil after flooding in rice-vegetable rotation system in tropical[J]. *China Environmental Science*, 2024, 45(3): 1692 – 1701. (in Chinese)

[11] 徐越,侯会静,韩正砥,等. 控制灌溉稻田 N₂O 排放对生物有机肥和土壤水分的响应[J]. *节水灌溉*,2020(11):78 – 82,86.
XU Yue, HOU Huijing, HAN Zhengdi, et al. Response of N₂O emission from controlled irrigation paddy fields to bio-organic fertilizer and soil moisture[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(11):78 – 82,86. (in Chinese)

[12] WOLSING M,PRIEME A. Observation of high seasonal variation in community structure of denitrifying bacteria in arable soil receiving artificial fertilizer and cattle manure by determining T-RFLP of nir gene fragments[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004,48:261 – 271.

[13] 黑龙江省人民政府. 龙江要闻黑龙江省水稻控灌面积达 3000 万亩超过全省水稻灌溉面积的一半 [EB/OL]. [2021 – 10 – 10]. <https://www.hlj.gov.cn/n200/2020/0824/c35-11006642.html>.

[14] 张忠学,陈鹏,聂堂哲,等. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J]. *农业机械学报*,2018,49(11): 210 – 219.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, NIE Tangzhe, et al. Effects of different water and nitrogen regulation modes on nitrogen distribution and availability in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(11): 210 – 219. (in Chinese)

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

[16] 张作合,张忠学,李铁成,等. 水炭运筹对黑土稻田 N₂O 排放与氮肥利用的影响[J]. *农业机械学报*,2021,52(11):323 – 332.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. Effects of water-charcoal management on N₂O emission and nitrogen use efficiency in black paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(11):323 – 332. (in Chinese)

[17] 刘丽君,朱启林,何秋香,等. 添加秸秆和生物炭土壤 N₂O 排放对温度的响应[J]. *生态学杂志*,2022,41(8): 1501 – 1508.
LIU Lijun, ZHU Qilin, HE Qiuxiang, et al. Response of N₂O emission to temperature in soil with straw and biochar addition [J]. *Chinese Journal of Ecology*,2022,41(8):1501 – 1508. (in Chinese)

[18] 王梦洁,蒋文婷,徐有祥,等. 长期生物炭添加对稻田土壤细菌和真菌反硝化 N₂O 排放的影响[J/OL]. *环境科学*:1 – 13 [2023 – 12 – 19]. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202309176>.
WANG Mengjie, JIANG Wenting, XU Youxiang, et al. Effects of long-term biochar addition on N₂O emission from bacterial and fungal denitrification in paddy soil [J/OL]. *Environmental Science*:1 – 13[2023 – 12 – 19]. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202309176>. (in Chinese)

[19] 刘涛,张萱,沈阿林,等. 生物反硝化抑制剂原花青素对土壤氮转化及植物生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2023, 29(8):1556 – 1562.
LIU Tao, ZHANG Xuan, SHEN Alin, et al. Effects of biological denitrification inhibitor procyanidin on soil nitrogen transformation and plant growth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertiliser*,2023,29(8):1556 – 1562. (in Chinese)

[20] 李思宇,陈云,李婷婷,等. 水分养分管理对稻田温室气体排放影响的研究进展[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*,2019,40(6):16 – 23.
LI Siyu, CHEN Yun, LI Tingting, et al. Research progress on the effects of water and nutrient management on greenhouse gas emissions from paddy fields[J]. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition)*,2019,40(6):16 – 23. (in Chinese)

[21] SHI R Y, NI N, N KOH J N, et al. Beneficial dual role of biochars in inhibiting soil acidification resulting from nitrification [J]. *Chemosphere*,2019,234:43 – 51.

[22] 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. Effects of biochar addition on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region[J]. *Environmental Science*,2015,36(9):3393 – 3400. (in Chinese)

[23] 王长明,张忠学,吕纯波,等. 不同灌溉模式寒地稻田 CH₄ 和 N₂O 排放特征及增温潜势分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(1): 14 – 20,68.
WANG Changming, ZHANG Zhongxue, LÜ Chunbo, et al. Analysis of CH₄ and N₂O emission characteristics and warming potential of paddy fields under different irrigation modes in cold region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2019,38(1): 14 – 20,68. (in Chinese)

[24] HAN Yu, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. Straw return alleviates the greenhouse effect of paddy fields by increasing soil organic carbon sequestration under water-saving irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2023,287:108434.

[25] 张学林,吴梅,何堂庆,等. 秸秆分解对两种类型土壤无机氮和氧化亚氮排放的影响[J]. *中国农业科学*,2022,55(4):

729 – 742.

ZHANG Xuelin, WU Mei, HE Tangqing, et al. Effects of straw decomposition on inorganic nitrogen and nitrous oxide emissions from two types of soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022,55(4):729 – 742. (in Chinese)

[26] 俞湾青,杨士红,祁苏婷. 水碳联合管理对稻田浅层土壤 N₂O 浓度剖面分布规律的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021,49(4):335 – 341.

YU Wanqing, YANG Shihong, QI Suting. Effects of combined water and carbon management on the profile distribution of N₂O concentration in shallow soil of paddy field[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2021,49(4):335 – 341. (in Chinese)

[27] 杜二小,李焕春,任永峰,等. 减氮结合不同肥料配施对农田土壤温室气体排放强度及马铃薯产量的影响[J]. *中国马铃薯*, 2023,37(5):440 – 451.

DU Erxiao, LI Huanchun, REN Yongfeng, et al. Effects of nitrogen reduction combined with different fertilizers on greenhouse gas emission intensity of farmland soil and potato yield[J]. *Chinese Potato Journal*, 2023,37(5):440 – 451. (in Chinese)

[28] 谢雪,鲁艳红,廖育林,等. 紫云英与稻草还田替代部分化肥对双季稻产量和土壤活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2023,56(18):3585 – 3598.

XIE Xue, LU Yanhong, LIAO Yulin, et al. Effects of returning Chinese milk vetch and rice straw to replace partial fertilizers on double season rice yield and soil labile organic carbon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023,56(18):3585 – 3598. (in Chinese)

[29] EAGLE A J, BIRD J A, HORWATH W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6):1096 – 1103.

[30] 秦子元,张忠学,孙迪,等. 水氮耦合对黑土稻作产量与氮素吸收利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2021,52(12):324 – 335,357.

QIN Ziyuan, ZHANG Zhongxue, SUN Di, et al. Effects of water and nitrogen coupling on rice yield and nitrogen absorption and utilization in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(12):324 – 335, 357. (in Chinese)

(上接第 164 页)

[14] 鲍文霞,谢文杰,胡根生,等. 基于 TPH – YOLO 的无人机图像麦穗计数方法[J]. *农业工程学报*, 2023,39(1):155 – 161.

BAO Wenxia, XIE Wenjie, HU Gensheng, et al. Estimation and counting of wheat ears density in field based on deep convolutional neural network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(1):155 – 161. (in Chinese)

[15] 高娴燕,孙义,李葆春. 基于无人机 RGB 影像估测田间小麦穗数[J]. *中国农业科技导报*, 2022,24(3):103 – 110.

GAO Yinyan, SUN Yi, LI Baochun. Estimating of wheat ears number in field based on RGB images using unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022,24(3):103 – 110. (in Chinese)

[16] MA J, LI Y, LIU H, et al. Towards improved accuracy of UAV-based wheat ears counting: a transfer learning method of the ground-based fully convolutional network[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021,191:116226.

[17] 孙俊,杨锴锋,罗元秋,等. 基于无人机图像的多尺度感知麦穗计数方法[J]. *农业工程学报*, 2021,37(23):136 – 144.

SUN Jun, YANG Kaifeng, LUO Yuanqiu, et al. Method for the multiscale perceptual counting of wheat ears based on UAV images[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021,37(23):136 – 144. (in Chinese)

[18] YANG B, PAN M, GAO Z, et al. Cross-platform wheat ear counting model using deep learning for UAV and ground systems [J]. *Agronomy*, 2023, 13(7):1792.

[19] SONG Q, WANG C, JIANG Z, et al. Rethinking counting and localization in crowds: a purely point-based framework[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021:3345 – 3354.

[20] MISRA D, NALAMADA T, ARASANIPALAI A U, et al. Rotate to attend: convolutional triplet attention module[C] // *Proceedings of the IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2021:3138 – 3147.

[21] JIE H, LI S, GANG S. Squeeze-and-excitation networks[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018:7132 – 7141.

[22] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017:2999 – 3007.

[23] LANGIN C. Introduction to data mining[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 2006.

[24] WU J, YANG J, HAN L, et al. Automatic counting of in situ rice seedlings from UAV images based on a deep fully convolutional neural network[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6):691 – 710.

[25] ZHANG Y, ZHOU D, CHEN S, et al. Single-image crowd counting via multi-column convolutional neural network[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2016:589 – 597.

[26] LI Y, ZHANG X, CHEN D. CSRNet: dilated convolutional neural networks for understanding the highly congested scenes[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018:1091 – 1100.