

不同灌溉模式寒区稻田温室气体排放与土壤矿质氮特征

曹晓强¹ 魏永霞^{1,2} 吴昱³ 冀俊超⁴ 刘慧⁵ 刘继龙¹

(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. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 100050; 4. 海南大学热带作物学院, 海口 570228;

5. 东北农业大学文理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究东北黑土区不同灌溉模式下稻田温室气体排放和土壤矿质氮特征,于2019年在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站测坑内进行了试验观测,按照不同的灌溉模式设置了控制灌溉(KG)、间歇灌溉(JG)和湿润灌溉(CI)3个试验处理,以当地常规的插秧淹灌(CK)为对照,研究了不同处理的稻田温室气体甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放量、全球增温潜势值、以产量为基准的全球变暖潜势值及0~60 cm土壤NH₄⁺-N含量和NO₃⁻-N含量的变化过程,以及0~20 cm土层土壤温度和矿质氮含量与CH₄和N₂O排放量的相关关系。结果表明,随着水稻生长发育进程的推进,各处理稻田土壤各土层温度均呈先升高后降低的变化趋势;各处理CH₄和N₂O排放量均呈先增加后减少的倒“V”形变化趋势,CH₄和N₂O的排放峰值分别出现在拔节孕穗期和抽穗开花期。从时间上来看,CK、JG、CI处理的稻田土壤NH₄⁺-N含量拐点在分蘖中期和抽穗开花期,KG处理拐点在拔节孕穗期和乳熟期,而所有处理的土壤NO₃⁻-N含量最大值均出现在分蘖前期;从空间上来看,不同处理稻田土壤NH₄⁺-N平均含量随着土层深度增加而逐渐减少,而NO₃⁻-N平均含量CK处理随土层深度逐步增加,其余各处理为先减少再增加变化趋势。土壤温度与CH₄排放量有显著相关性,而与N₂O排放量相关性不显著;各处理土壤NH₄⁺-N含量与CH₄和N₂O排放量呈正相关,而土壤NO₃⁻-N含量与CH₄和N₂O排放量呈负相关。各处理稻田CH₄累积排放量由大到小依次为CK、JG、KG、CI,N₂O累积排放量由大到小依次为CI、KG、JG、CK,各处理CH₄和N₂O累积排放量均与CK处理差异显著(*P* < 0.05),从单位产量温室效应(GWP_y)来看,KG、JG、CI处理分别较CK处理降低24.98%、27.69%和24.06%。研究结果可为东北黑土区稻田减排和提高土壤矿质氮利用率提供理论依据和技术支撑。

关键词: 东北黑土区; 稻田; 灌溉模式; 气体排放; 增温潜势; 土壤矿质氮

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0305-09 **OSID:** 

Effects of Different Irrigation Methods on Greenhouse Gas Emission and Mineral Nitrogen Characteristics of Paddy Field in Cold Region

CAO Xiaoqiang¹ WEI Yongxia^{1,2} WU Yu³ JI Junchao⁴ LIU Hui⁵ LIU Jilong¹

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

2. Key Laboratory of High Effective Utilization of Agricultural Water Resources,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 100050, China

4. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China

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

Abstract: In order to explore greenhouse gas emission and soil mineral nitrogen characteristics of paddy field under different irrigation methods in northeast black soil region of China, three test treatments (controlled irrigation (KG), intermittent irrigation (JG) and wet irrigation (CI)) were set according to different irrigation methods, with local conventional transplanting and inundation (CK) as control. The processes of greenhouse gas methane (CH₄) and nitrogen oxide (N₂O) emissions, global warming

收稿日期: 2021-07-10 修回日期: 2021-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC040010101)

作者简介: 曹晓强(1995—),男,博士生,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: 1033469520@qq.com

通信作者: 刘继龙(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: liujilong@neau.edu.cn

potential, global warming potential based on yield and NH_4^+ -N and NO_3^- -N contents in 0 ~ 60 cm soil of paddy fields with different treatments were studied, as well as the correlation between soil temperature in 0 ~ 20 cm soil layer and mineral nitrogen and CH_4 and N_2O emissions. The results showed that with the advancement of rice growth and development, the soil temperature of each layer of paddy soil in each treatment was increased first and then decreased. The emission of CH_4 and N_2O was increased at first and then decreased in reverse V-shaped trend. The emission peaks of CH_4 and N_2O appeared at jointing and booting stage and heading and flowering stage, respectively. In terms of time, inflection points of NH_4^+ -N content in paddy soils treated with CK, JG, CI and KG appeared at mid-tillering stage, heading and flowering stage, jointing and booting stage and milking stage respectively, while the maximum NO_3^- -N content in all treatments occurred at early tillering stage. Spatially, the average content of NH_4^+ -N in paddy soils of different treatments was gradually decreased with the increase of soil depth, while the average content of NO_3^- -N in CK treatment was gradually increased with the increase of soil depth, while the other treatments were decreased first and then increased. There was a significant correlation between soil temperature and CH_4 emissions, but no significant correlation with N_2O emissions. NH_4^+ -N in each treatment soil was positively correlated with CH_4 and N_2O emissions, while NO_3^- -N in soil was negatively correlated with CH_4 and N_2O emissions. Cumulative emissions of CH_4 from large to small in paddy fields were CK, JG, KG and CI, and accumulative emissions of N_2O from large to small in turn were CI, KG, JG and CK. Cumulative emissions of CH_4 and N_2O from each treatment were significantly different from those of CK treatment ($P < 0.05$). In terms of greenhouse effect per unit yield (GWP_y), KG, JG and CI treatment were decreased by 24.98%, 27.69% and 24.06%, respectively compared with that of CK treatment. The research results can provide theoretical basis and technical support for reducing emission of paddy field and improving utilization rate of mineral nitrogen in soil in northeast black soil region of China.

Key words: northeast black soil area; paddy field; irrigation mode; gas emissions; warming potential; soil mineral nitrogen

0 引言

近年来,全球增温趋势日益严重, CH_4 和 N_2O 作为主要的温室气体,在百年时间尺度下其增温趋势分别为 CO_2 的25倍和298倍^[1]。农田土壤是温室气体重要排放源,在我国农业温室气体排放占全国温室气体排放的17%^[2],其中水稻田排放量占我国农业温室气体排放量的10.1%^[3]。水稻是我国主要的粮食作物之一,2018年仅黑龙江省水稻种植面积就高达378.4万 hm^2 ,水稻产量为2 685.5万t,占全国水稻产量的12.7%^[4]。

节水灌溉模式是影响农田土壤水分、 CH_4 和 N_2O 排放及产量的重要管理措施^[5]。不同的节水灌溉模式会对土壤温度、水分等环境因子产生显著影响,对稻田温室气体排放、无机氮含量等产生直接和间接影响,从而使得稻田 CH_4 和 N_2O 排放量及水稻对无机氮的吸收有所差异。近年来,许多学者研究表明,节水灌溉可有效减少稻田水分损耗^[6],改善土壤透气性、增加土壤氧分含量^[7],有效缓解稻田温室气体排放。袁伟玲等^[8]通过对比研究间歇灌溉与常规插秧淹灌 CH_4 和 N_2O 排放表明,间歇灌溉 CH_4 累积排放量较常规灌溉减少46.23%,而 N_2O 累积排放量显著增加;王长明等^[9]研究表明,控制灌溉和间歇灌溉相较于常规插秧淹灌可有效降

低 CH_4 排放,但较大幅度增加 N_2O 排放。侯会静等^[10]研究表明控制灌溉稻田气体排放量与土壤水分含量密切相关。也有研究表明土壤中90%以上的氮素为有机氮,而作物能有效吸收利用的氮素只有无机氮^[11-12],施入土壤中的氮肥经过加工处理后能转变为能够被作物吸收利用的无机氮^[13],因此提高无机氮高效利用意义重大。崔远来等^[14]通过研究不同水肥条件下水稻对氮素运移转化规律表明,节水灌溉条件下利于提高氮素利用率且土壤 NO_3^- -N浓度明显大于淹水灌溉。张忠学等^[13]通过研究不同水氮管理对玉米地土壤无机氮影响表明,相同施氮量下,0 ~ 60 cm土层土壤 NH_4^+ -N含量随灌水量的增加而减少,而 NO_3^- -N含量随着灌水量增加呈现下降趋势。目前,在东北寒地黑土区研究不同灌溉模式下土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量特征及与 CH_4 和 N_2O 排放量间相关关系的较少。

本试验以当地主栽的龙庆稻3号水稻为试验材料,对不同灌溉模式下稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 排放量、全球增温潜势值、以产量为基准的全球变暖潜势值、0 ~ 60 cm土壤剖面 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量的变化过程进行研究,分析0 ~ 20 cm土层土壤温度和0 ~ 20 cm土壤剖面 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N含量与 CH_4 、 N_2O 排放量的相关关系,以期黑土区稻田温室气体有效减排和土壤养分高效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019 年 5—9 月在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站(46°52′41″N,127°30′4″E)进行。该地年降雨量 500~600 mm,多年平均气温 2.5℃,作物水热生长期 156~171 d,平均无霜期 128 d,属于寒温带大陆性季风气候。试验地区属典型寒地黑土分布区,土壤类型为典型黑壤土,饱和含水率 50%,土壤孔隙度 61.8%,pH 值 6.35,容重 1.01 g/cm³。土壤基础肥力(均为质量比)为:有机质 41.8 g/kg、速效钾 112.06 mg/kg、有效磷 36.22 mg/kg、全氮 15.06 g/kg、全钾 20.11 g/kg、全磷 15.23 g/kg 和碱解氮 198.29 mg/kg。

1.2 试验设计

试验在移动式遮雨测坑(2 m×2 m)中进行,以

龙庆稻 3 号水稻为供试作物,共 4 个处理,分别为对照组(常规插秧淹灌(CK))及试验组(控制灌溉(KG)、间歇灌溉(JG)和湿润灌溉(CI)),每个处理 3 次重复,共 12 个测坑。各处理均采用人工插秧种植方式,密度参照当地标准(行距 30 cm、穴距 13 cm)进行,每穴 5 株,其中 KG 处理在分蘖末期采用无水层管理,其余生育期进行“浅、湿、干”循环交替灌溉;JG 处理稻田水分采用“薄水层-湿润”循环灌溉模式,在分蘖末期进行晒田;CI 处理全生育期不建立水层。各处理肥料施用量为氮肥 110 kg/hm²、P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 80 kg/hm²,氮肥按照基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥比例为 4.5:2:1.5:2 分施,磷肥作为基肥一次性施入,钾肥按照基肥、促花肥比例为 1:1 分施 2 次,各处理均为撒施。所有处理均于 5 月 17 日插秧,9 月 22 日收获,不同处理水稻各生育阶段水分管理方案见表 1。

表 1 不同处理水稻各生育阶段水分管理方案

Tab.1 Water management scheme of rice with different treatments

处理	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
CK	30~40 mm	20~45 mm	20~45 mm	晒田	20~45 mm	45~85 mm	15~45 mm
KG	80% θ_s ~ 30 mm	85% θ_s ~ 20 mm	85% θ_s ~ 20 mm	60% θ_s ~ 0 mm	85% θ_s ~ 20 mm	85% θ_s ~ 20 mm	70% θ_s ~ 20 mm
JG	0~30 mm	0~40 mm	0~40 mm	晒田	0~30 mm	0~40 mm	0~40 mm
CI	30~40 mm	(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(60%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(70%~100%) θ_s

注:mm 为水层深度单位, θ_s 为饱和含水率。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤温度测定

所有测坑按深度 5、10、15、20 cm 埋设曲管地温计(HY-1 型),地温观测从水稻分蘖前期开始至乳熟期结束,每隔 5 d 观测一次。观测时间为每日 08:00、12:00、18:00,取其平均值作为日平均土壤温度(深度 5、10、15、20 cm 土壤温度分别以 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 表示)。

1.3.2 气体样品采集与测定

采用人工静态暗箱法原位采集气体,静态箱分为不锈钢底座和顶箱两部分。不锈钢底座顶端留有深 3 cm、宽 3 cm 的密封槽,用于采样时与顶箱密封。顶箱由厚度 5 mm 的有机玻璃板制成,箱外包裹 1 层厚度 2 cm 的海绵及 1 层铝箔,以减小采气期间由太阳辐射引起的箱内温度变化。水稻生育前期采用的顶箱高 60 cm,生育后期采用的顶箱高 110 cm。顶箱侧面接入采气管,采气管进入箱内 20 cm,采气管末端连接三通阀,三通阀其余两个接头分别连接采气袋与医用注射器(50 mL)。于分蘖前期(PT)、分蘖中期(MT)、分蘖末期(LT)、拔节孕穗期(JB)、抽穗开花期(HF)和乳熟期(MM)采集各处理气体样品。采样时间为 10:00—11:00,每个处理分别在 0、

10、20、30 min 时采样。气体浓度采用气象色谱仪(岛津 GC-2010Plus,日本)手动进样测定。CH₄ 浓度采用氢火焰离子检测器(FID)检测,N₂O 气体浓度采用电子捕获检测器(ECD)检测。标准气体由大连大特气体有限公司提供。

1.3.3 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量测定

于水稻分蘖前期至乳熟期,采用土钻在各处理测坑中按照“S”形路线分层取土样,每个测坑取 5 个取样点,取样深度为 0~60 cm,取样分层为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm,取得的新鲜土样放入冰箱中保存。土壤样品用 1 mol/L 氯化钾溶液浸提,并使用连续流动分析仪(灵敏度 0.001 AUFS, Seal Analytical GmbH,德国)测定土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。

1.3.4 产量测定

每个测坑取 9 穴植株,经过晾晒风干后测定水稻植株穗长、有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量,最终计算理论产量。

1.4 指标计算

CH₄ 和 N₂O 排放量计算公式为

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

(1)

式中 F —— CH_4 (或 N_2O) 排放量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (或 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)

ρ —— CH_4 或 N_2O 标准状态下密度, kg/m^3

h ——采样箱有效高度, m

T ——采样箱内温度, $^\circ\text{C}$

dc/dt ——采样过程中 CH_4 (或 N_2O) 浓度变化率, $\text{mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (或 $\mu\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)

全球变暖潜势值和气体累积排放量计算公式为

$$GWP = 25F_{\text{CH}_4} + 298F_{\text{N}_2\text{O}} \tag{2}$$

$$GWP_y = \frac{GWP}{Y} \tag{3}$$

式中 GWP —— CH_4 或 N_2O 排放量全球增温潜势值, kg/hm^2

F_{CH_4} ——水稻全生育期 CH_4 累积排放量, kg/hm^2

$F_{\text{N}_2\text{O}}$ ——水稻全生育期 N_2O 累积排放量, kg/hm^2

GWP_y ——以产量为基准的全球变暖潜势值, kg/kg

Y ——产量, kg/hm^2

土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量计算公式为

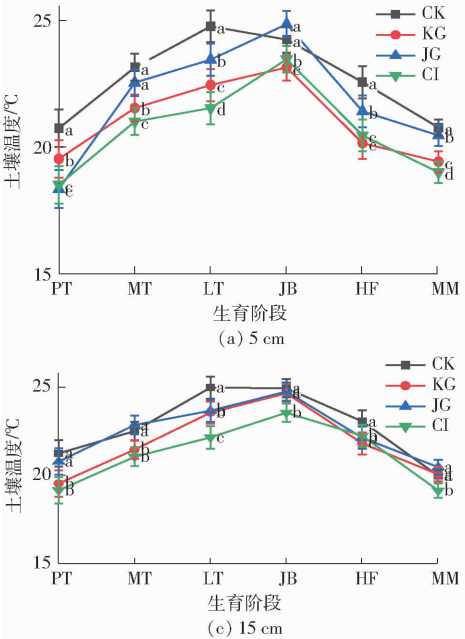
$$W = \frac{CV}{m} \tag{4}$$

式中 W ——土壤中 NH_4^+-N 或 NO_3^--N 的质量比, mg/kg

C ——流动分析仪测试值, mg/L

V ——浸提溶液体积, mL

m ——土壤质量, g



1.5 数据处理方法

所有指标均采用平均值,采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行初步处理,用 Origin 9.0 进行绘图,用 SPSS 22.0 进行显著性分析,多重比较采用 LSD 法,显著性水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式下稻田土壤温度变化特征

作为反映土壤热量的指标,适宜的土壤温度能有效促进农作物的营养生长和生殖生长。图 1 (图中不同小写字母表示处理间差异性显著 ($P < 0.05$),下同)为不同灌溉模式稻田 5、10、15、20 cm 处土壤温度变化曲线。由图 1 可知,不同处理稻田土壤各土层温度均呈先升高后降低的变化趋势。5 cm 土层土壤温度,CK 处理于分蘖末期升至最高,其余处理均于拔节孕穗期升至最高;10 cm 土层土壤温度各处理均于拔节孕穗期升至最高,除乳熟期外,CK 处理土壤温度均高于 KG、JG、CI 处理,表明常规淹灌水稻 10 cm 土层土壤增温效果优于节水灌溉水稻土壤;15、20 cm 土层土壤温度变化与 5 cm 土层土壤温度变化一致。不同灌溉条件下,不同土层土壤达到最高温度时期均为水稻分蘖末期或拔节孕穗期,这有助于在水稻快速生长阶段提供适宜的温度,促进作物生长。

2.2 不同灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放量

2.2.1 稻田 CH_4 排放量变化特征

图 2 为不同灌溉模式稻田的 CH_4 排放量。由图 2 可知,全生育期内各处理稻田 CH_4 的排放变化曲线为先增后降的单峰曲线。分蘖前期,各处理稻

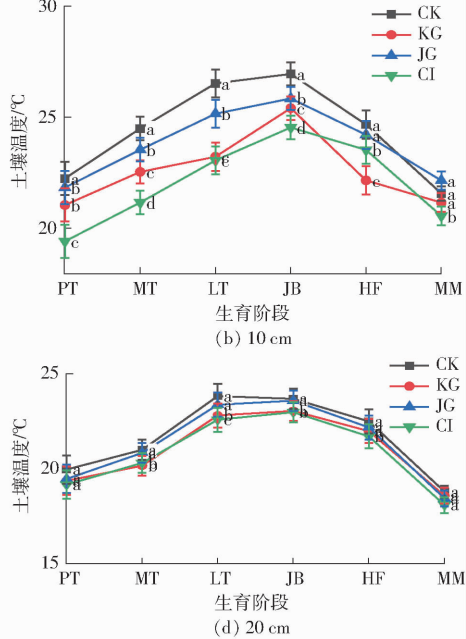


图 1 不同处理土壤温度变化曲线

Fig. 1 Change curves of soil temperature under different treatments

田 CH_4 排放量均处于较低水平;分蘖中期至分蘖末期,各处理 CH_4 排放量缓慢增长;分蘖末期至抽穗开花期,各处理 CH_4 排放量均处于较高水平,于拔节孕穗期达到排放峰值,由大到小依次为 CK、CI、JG、KG,KG、JG、CI 处理 CH_4 排放量分别较 CK 处理降低 34.07%、28.29%、20.65%,处理间差异显著 ($P < 0.05$);抽穗开花期后,各处理 CH_4 排放均缓慢降低。CK 处理全生育阶段的 CH_4 排放量均高于 KG、JG、CI 处理,表明不同水分管理对稻田 CH_4 排放影响明显,水分管理模式下有利于减少稻田 CH_4 的排放。

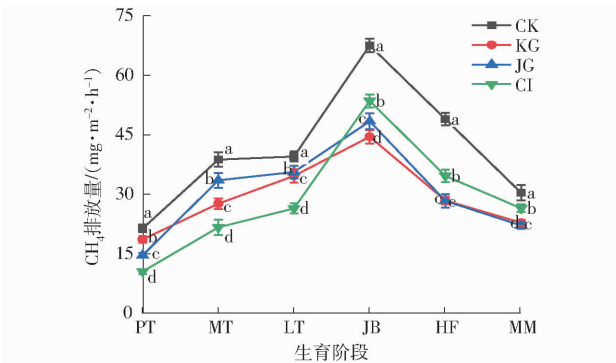


图2 不同处理稻田 CH_4 排放量曲线

Fig.2 Change curves of CH_4 emission in paddy fields under different treatments

2.2.2 稻田 N_2O 排放量变化特征

不同灌溉模式稻田 N_2O 的排放变化特征曲线如图3所示。由图3可知,全生育期内各处理 N_2O 的排放呈先增加后降低的倒“V”形变化趋势。分蘖前期至拔节孕穗期,各处理 N_2O 排放量缓慢增加,处于较低水平;拔节孕穗期至乳熟期,各处理稻田 N_2O 排放量处于较高水平,于抽穗开花期达到排放峰值,由大到小依次为 CI、KG、JG、CK,KG、JG、CI 处理 N_2O 排放量分别较 CK 处理增加 17.96%、9.59%、20.61%,处理间差异显著 ($P < 0.05$);抽穗开花期后,各处理稻田 N_2O 排放量快速降低。CK 处理各生育阶段 N_2O 排放量均低于 KG、JG、CI 处理,表明水分管理模式促进了稻田 N_2O 排放。

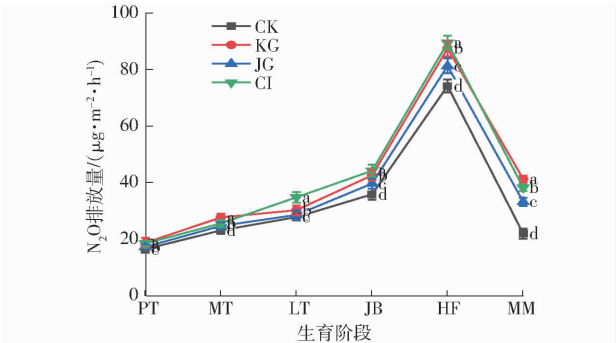


图3 不同处理稻田 N_2O 排放量曲线

Fig.3 Change curves of N_2O emission in paddy fields under different treatments

2.3 不同灌溉模式下稻田土壤矿质氮动态变化

2.3.1 土壤 NH_4^+-N 含量的变化特征

图4为稻田土壤0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm 土层 NH_4^+-N 含量在不同生育阶段的变化曲线。0~20 cm 土层,各处理土壤 NH_4^+-N 含量均呈增减波动变化,分蘖初期各处理土壤 NH_4^+-N 含量较低,由大到小依次为 CI、KG、JG、CK,处理间差异显著 ($P < 0.05$);CK、JG、CI 处理于分蘖中期达到第1个拐点,分别达到 3.21、3.56、4.05 mg/kg,于抽穗开花期达到第2个拐点,分别达到 3.18、3.41、4.05 mg/kg,可能是由于水稻生长阶段添加分蘖肥和穗肥;KG 处理于拔节孕穗期达到第1个拐点,乳熟期达到第2个拐点;乳熟期各处理土壤 NH_4^+-N 含量较其分蘖前期均有所增加,CK 处理增加 50.65%,KG 处理增加 48.06%,JG 处理增加 39.72%,CI 处理增加 31.93%,由大到小依次为 KG、CI、JG、CK,表明节水灌溉利于稻田土壤 NH_4^+-N 的积累。20~40 cm 土层,除第2个拐点到达时间不同,其余生育阶段均与0~20 cm 土层 NH_4^+-N 含量变化一致;CK、KG、CI 处理 NH_4^+-N 含量均于抽穗开花期达到拐点,CK 处理 NH_4^+-N 含量分别相较于 KG、CI 处理增加 0.53、0.51 mg/kg ($P < 0.05$);JG 处理于拔节孕穗期到达第2个拐点,达 2.94 mg/kg。各处理 40~60 cm 土层 NH_4^+-N 含量变化与20~

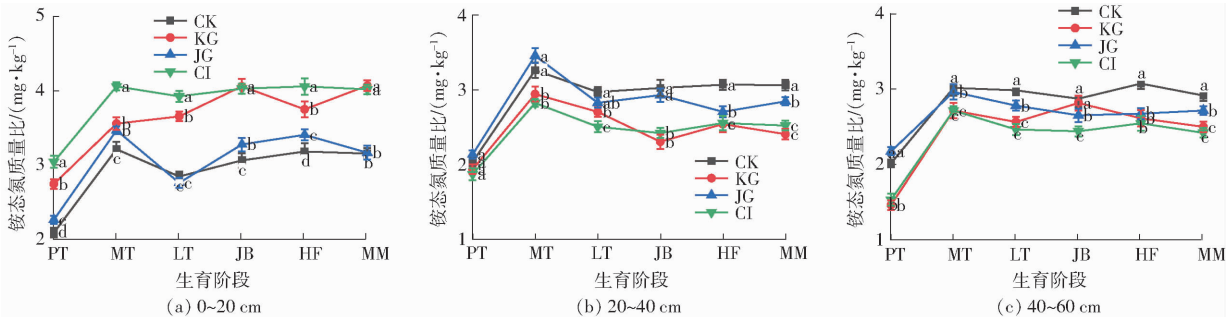


图4 不同土层 NH_4^+-N 含量变化曲线

Fig.4 Change curves of NH_4^+-N content in different soil layers

40 cm 土层一致。

2.3.2 土壤 NO₃⁻-N 含量的变化特征

图 5 为稻田土壤 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层 NO₃⁻-N 含量在不同生育阶段的变化曲线。由图 5 可知,0~20 cm 土层 NO₃⁻-N 含量随着水稻生育进程而逐步降低,分蘖初期各处理土壤 NO₃⁻-N 含量由高到低依次为 CI、KG、JG、CK,CI、KG、JG 处理分别较 CK 处理增加 14.23%、

3.89%、22.63%,表明节水灌溉模式水稻生育前期稻田土壤利于 NO₃⁻-N 的累积;至乳熟期,各处理土层土壤 NO₃⁻-N 逐渐降低,CK、KG、JG、CI 处理 NO₃⁻-N 含量分别较分蘖前期减少 69.51%、74.28%、62.65%、67.60%,分别为 3.27、3.15、4.17、4.27 mg/kg。20~40 cm 和 40~60 cm 土层 NO₃⁻-N 含量变化与 0~20 cm 土层变化基本一致。

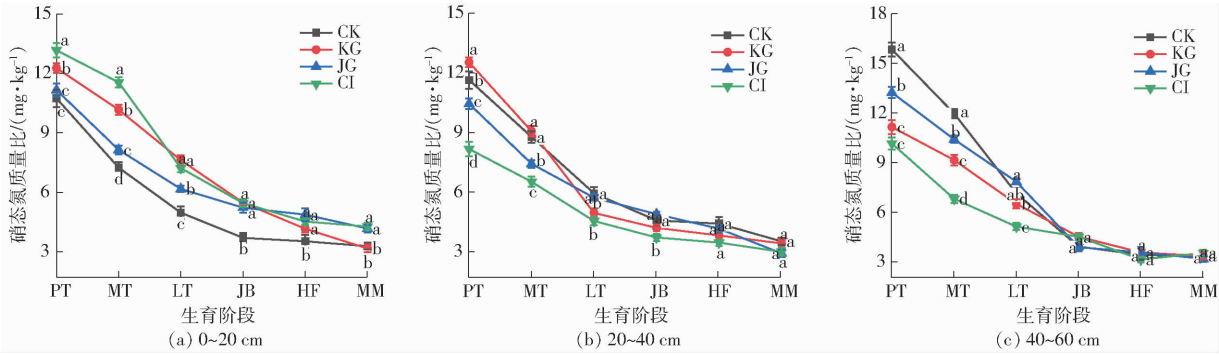


图 5 不同土层 NO₃⁻-N 含量变化曲线

Fig.5 Change curves of NO₃⁻-N content in different soil layers

2.3.3 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 平均含量变化特征

不同处理稻田土壤 NH₄⁺-N 平均含量变化见图 6。由图 6 可知,不同处理稻田土壤 NH₄⁺-N 平均含量随着土层深度增加而逐渐减少。0~20 cm 土层各处理 NH₄⁺-N 平均含量相对较高,KG、JG、CI 处理 NH₄⁺-N 平均含量均高于 CK 处理,分别较 CK 处理增加 24.35%、4.51%、31.72%;20~40 cm 土层各处理 NH₄⁺-N 平均含量由高到低依次为 CK、JG、KG、CI,分别相较于其 0~20 cm 土层减少 0.31%、7.49%、31.72%、36.15%;40~60 cm 土层各处理 NH₄⁺-N 平均含量表现与 20~40 cm 土层相同,CK、KG、JG、CI 处理分别较 0~20 cm 土层减少 0.11、1.19、0.40、1.50 mg/kg,表明节水灌溉模式有助于水稻对稻田土壤 NH₄⁺-N 的吸收。

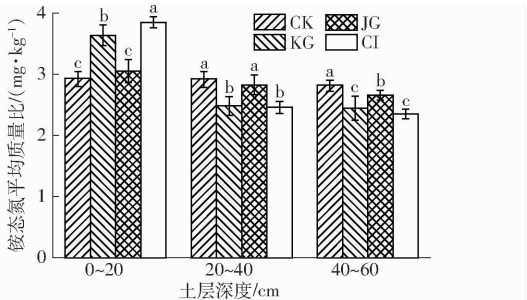


图 6 不同处理稻田土壤 NH₄⁺-N 平均含量

均含量随土壤深度逐步增加,其余各处理土壤 NO₃⁻-N 平均含量先减少再增加。0~20 cm 土层,各处理稻田土壤 NO₃⁻-N 平均含量由高到低依次为 CI、KG、JG、CK,处理间差异显著 ($P < 0.05$);20~40 cm,稻田土壤 NO₃⁻-N 平均含量表现为 CK 最高,KG、JG 和 CI 处理依次减少;40~60 cm,稻田土壤 NO₃⁻-N 平均含量由高到低依次为 CK、JG、KG、CI,其中 CK 和 JG 处理较其 0~20 cm 土层增加 36.50% 和 6.18%,KG 和 CI 处理分别较其 0~20 cm 土层减少 10.57% 和 27.84%,表明节水灌溉利于浅层土壤 NO₃⁻-N 的累积。

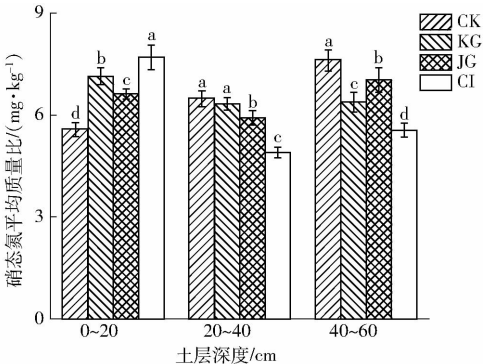


图 7 不同处理稻田土壤 NO₃⁻-N 平均含量

Fig.7 Average content of NO₃⁻-N in paddy soil under different treatments

Fig.6 Average content of NH₄⁺-N in paddy soil under different treatments

不同处理稻田土壤 NO₃⁻-N 平均含量变化见图 7。由图 7 可知,CK 处理稻田土壤 NO₃⁻-N 平

2.4 不同灌溉模式下稻田土壤温度、矿质氮含量与 CH₄ 和 N₂O 排放量的相关性

温度可直接影响微生物的生存环境,直接或间

接影响温室气体的排放,研究矿质氮和 CH₄ 和 N₂O 气体之间的转化既能减少温室气体排放,还能提高矿质氮利用率。表 2 为不同灌溉模式 CH₄ 和 N₂O 的排放量与不同深度土壤温度和矿质氮含量的相关系数。由表 2 可知,CK 处理 CH₄ 排放量与不同深度土壤温度均呈不显著正相关;KG 和 JG 处理 CH₄ 排放量与 T₅、T₁₀和 T₁₅呈极显著正相关($P < 0.01$),与 T₂₀呈显著正相关($P < 0.05$);CI 处理 CH₄ 排放量与 T₅、T₁₀、T₁₅和 T₂₀呈显著正相关($P < 0.05$);KG

处理 N₂O 排放量与 T₅呈不显著负相关,与 T₁₀、T₁₅和 T₂₀呈不显著正相关;CK、JG、CI 处理 N₂O 排放量与各土层土壤温度呈不显著正相关。各处理土壤 NH₄⁺-N 含量与 CH₄ 排放量和 N₂O 排放量呈不显著正相关,而土壤 NO₃⁻-N 含量与 CH₄ 排放量和 N₂O 排放量呈不显著负相关,KG、JG、CI 处理土壤 NH₄⁺-N 含量与 CH₄ 排放量和 N₂O 排放量相关系数均高于 CK 处理,可在农作时采用适当方式提高 NH₄⁺-N 利用,以减少 CH₄ 和 N₂O 的排放。

表 2 不同灌溉模式下 CH₄ 和 N₂O 排放量与土壤温度和矿质氮含量的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients of CH₄ and N₂O emission fluxes with soil temperature and mineral nitrogen under different irrigation modes

处理		土壤温度				矿质氮含量	
		T ₅	T ₁₀	T ₁₅	T ₂₀	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
CK	CH ₄ 排放量	0.698	0.799	0.735	0.749	0.558	-0.625
	N ₂ O 排放量	0.209	0.320	0.311	0.441	0.438	-0.528
KG	CH ₄ 排放量	0.918 **	0.983 **	0.982 **	0.866 *	0.596	-0.333
	N ₂ O 排放量	-0.138	0.062	0.170	0.335	0.453	-0.699
JG	CH ₄ 排放量	0.984 **	0.928 **	0.953 **	0.825 *	0.568	-0.462
	N ₂ O 排放量	0.156	0.331	0.092	0.335	0.547	-0.593
CI	CH ₄ 排放量	0.823 *	0.886 *	0.815 *	0.843 *	0.630	-0.703
	N ₂ O 排放量	0.183	0.610	0.474	0.374	0.488	-0.696

注:**表示在 0.01 水平上极显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关。

2.5 不同灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 累积排放量、作物产量及综合温室效应

不同处理稻田 CH₄ 和 N₂O 累积排放量、作物产量、综合温室效应及单位产量温室效应见表 3。由表 3 可知,各处理稻田 CH₄ 累积排放量远高于 N₂O 累积排放量,各处理稻田 CH₄ 累积排放量由大到小依次为 CK、JG、KG、CI,KG、JG、CI 处理稻田 CH₄ 累积排放量分别较 CK 处理降低 28.33%、25.91%、29.70%,各处理 CH₄ 累积排放量均与 CK 处理差异显著($P < 0.05$),表明节水灌溉模式有利于降低 CH₄ 累积排放量,减缓温室效应;各处理稻田 N₂O 累积排放量由大到小依次为 CI、KG、JG、CK,KG、JG、CI 处理稻田 N₂O 累积排放量分别较 CK 处理增加 24.51%、12.75%、25.49%,各处理 N₂O 累积排放量均与 CK 处理差异显著($P < 0.05$),表明节水灌溉模式促进了 N₂O 累积排放量增加。

各处理产量由大到小依次为 JG、CK、KG、CI,其中 JG 处理产量较 CK 处理增加 2.98%,KG 和 CI 处理分别较 CK 处理降低 3.79%和 6.75%。百年尺度上各处理 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应(GWP ,根据式(2),以 CO₂作为参考气体, $GWP = 1 \text{ kg/hm}^2$,在百年尺度下其增温趋势分别为 CO₂的 25 倍和 298 倍,分别求出其排放 CO₂当量,两者求和计算得出)来

表 3 不同处理 CH₄ 和 N₂O 累积排放量、作物产量、综合温室效应及单位产量温室效应

Tab.3 Cumulative emissions of CH₄ and N₂O, crop yield, comprehensive greenhouse effect and greenhouse effect per unit yield under different treatments

处理	CH ₄ 累积 排放量/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 累积 排放量/ (kg·hm ⁻²)	作物 产量/ (kg·hm ⁻²)	GWP / (kg·hm ⁻²)	GWP_y / (kg·kg ⁻¹)
CK	1 263.31 ^a	1.02 ^c	8 160.11 ^b	31 886.71 ^a	3.91 ^a
KG	905.45 ^b	1.27 ^a	7 850.50 ^c	23 014.71 ^b	2.93 ^b
JG	936.04 ^b	1.15 ^b	8 403.60 ^a	23 743.70 ^b	2.83 ^b
CI	888.12 ^c	1.28 ^a	7 609.60 ^d	22 584.44 ^b	2.97 ^b

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

看,CH₄ 是稻田系统 GWP 的主要影响因素,各处理 GWP 由大到小依次为 CK、JG、KG、CI,其他处理 GWP 较 CK 处理下降显著($P < 0.05$);单位产量温室效应(GWP_y)表现为 CK 最大,为 3.91 kg/kg,KG、JG、CI 处理分别较 CK 处理降低 24.98%、27.69%、24.06%,表明节水灌溉模式保产情况下能有效减缓稻田温室效应。

3 讨论

随着全球变暖趋势的日益严重,减排 CH₄ 和 N₂O 等温室气体已刻不容缓。农业作为温室气体的重要排放源,在我国农业温室气体排放占比较

高^[2],而水稻作为我国主要作物之一^[4],促使稻田土壤温室气体排放量减少尤为可观。有学者研究发现稻田节水灌溉模式 CH_4 排放量比常规插秧淹灌显著减少且不同节水灌溉模式下气体减排程度不均衡^[15],也有研究表明间歇湿润灌溉 CH_4 排放量较长期淹灌条件下显著减少^[16],而节水灌溉模式下的 N_2O 排放均有不同程度增加^[17-18]。本研究中,节水灌溉模式 KG、JG 和 CI 处理全生育期内 CH_4 排放量均低于常规插秧淹灌 CK 处理,而 N_2O 排放量均高于常规插秧淹灌 CK 处理,可能是由于 KG 处理稻田在生育期内进行“浅、湿、干”循环交替灌溉、JG 处理稻田水分采用“薄水层-湿润”循环灌溉、CI 处理全生育期无水层管理条件下土壤水层水分变化频繁,极大地改善土壤通透性,破坏了甲烷菌群厌氧环境^[9],从而减少了 CH_4 排放,但也促进了反硝化作用,增加了 N_2O 排放;也可能是由于节水灌溉稻田作物为保持水分减少蒸腾关闭部分气孔,减少稻田植株 CH_4 气体排放^[19]。以上结论表明不同水分管理对稻田 CH_4 和 N_2O 排放影响明显,水分管理模式下有利于减少稻田 CH_4 排放而促进了 N_2O 排放,这与 AHN 等^[15]、HOU 等^[17] 研究结果一致。各处理 CH_4 排放峰值出现在拔节孕穗期,这与周玲红等^[20] 研究表明 CH_4 排放峰值出现在齐穗期不同,可能是由于拔节孕穗期经过分蘖末期稻田晒田或无水层管理后土壤水分含量增加形成新的厌氧环境,进一步刺激了 CH_4 菌的形成,促进了 CH_4 大量排放。

水稻作为喜氮作物,其以 NH_4^+-N 作为主要吸收氮源^[21],而土壤中 90% 以上的氮素为有机氮,作物能有效吸收利用的氮素只有无机氮^[10]。本研究表明,乳熟期各处理土壤 NH_4^+-N 含量由大到小依次为 KG、CI、JG、CK,表明节水灌溉有利于稻田土壤 NH_4^+-N 积累,可能是由于节水灌溉模式改善了土壤通透性,抑制其硝化反应,促进其被土壤胶体吸附及被矿物晶格固定。不同处理稻田 0~60 cm 土壤 NH_4^+-N 平均含量随着土层深度增加而呈逐渐减少趋势,杜臻杰等^[22] 通过研究灌溉对氮素时空平衡转化研究也得到类似结论。各处理土层土壤 NO_3^--N 含量随着生育期进程呈现逐渐降低趋势,在分蘖前期各处理各土层 NO_3^--N 含量较多,可能是由于分蘖前期前各处理均有水层,含氧量低形成厌氧环境,不利于作物对其吸收利用^[18],导致了 NO_3^--N 大量积累,而后期可能是由于水稻随着生育期进行,相关硝酸还原酶活性提高^[23] 及其对无机氮的需求增加,致使 NO_3^--N 随着生育进程呈现逐渐降低趋势。

土壤温度对作物根系及土壤微生物活动有所影

响,是作物生长状况和产量的必备要素,直接或间接影响 CH_4 和 N_2O 的排放。本研究表明土壤温度与节水灌溉模式 CH_4 排放量有显著相关性,且节水灌溉模式各处理土壤温度与 CH_4 排放量相关性均高于常规插秧淹灌处理,可在作物种植管理方式上适度控温达到减排 CH_4 的效果,减缓增温趋势;而各处理土壤温度与 N_2O 排放量相关性不显著。节水灌溉各处理 CH_4 累积排放量均低于常规插秧淹灌处理,而 N_2O 累积排放量均高于常规插秧淹灌处理,而节水灌溉综合增温潜势均低于常规插秧处理,表明节水灌溉模式能有效减少稻田温室气体排放。在不减产的前提下减排温室气体,将水稻产量与增温潜势综合考虑相对能更好平衡经济效益和温室效应^[24]。本试验中从单位产量温室效应 (GWP_y) 来看,节水灌溉 KG、JG、CI 处理分别较 CK 处理降低 24.98%、27.69%、24.06%,研究表明节水灌溉模式保产情况下能有效减缓稻田温室效应。

4 结论

(1) 不同灌溉模式对 CH_4 和 N_2O 排放峰值有所影响,相较于 CK 处理,KG、JG、CI 处理的 CH_4 排放峰值均有所降低,而 N_2O 排放峰值均呈增加趋势。 CH_4 排放峰值降幅由大到小依次为 KG、JG、CI 处理, N_2O 排放峰值的增幅由大到小依次为 CI、KG、JG 处理。

(2) 不同灌溉模式下稻田土壤 NH_4^+-N 平均含量在 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层随土层深度的增加而减小,而 NO_3^--N 平均含量除了 CK 处理随土层深度逐步增加外,其余 3 个处理均呈先减少后增加趋势;CK、JG 和 CI 处理稻田土壤 NH_4^+-N 含量拐点出现在分蘖中期和抽穗开花期,KG 处理 NH_4^+-N 含量拐点出现在拔节孕穗期和乳熟期,所有处理土壤 NO_3^--N 含量最大值出现在分蘖前期。

(3) 土壤温度与节水灌溉模式 CH_4 排放量显著相关,与 N_2O 排放量的相关性则不显著;各处理土壤 NH_4^+-N 含量与 CH_4 和 N_2O 排放量呈正相关,而土壤 NO_3^--N 含量与 CH_4 和 N_2O 排放量则为负相关。

(4) 节水灌溉模式在保证产量的情况下能有效减缓温室效应。KG、JG 和 CI 处理的 CH_4 累积排放量均低于 CK 处理,而 N_2O 累积排放量均高于 CK 处理;百年尺度的各处理 CH_4 和 N_2O 综合温室效应,3 种节水灌溉模式处理的 GWP 较 CK 处理下降显著 ($P < 0.05$);单位产量的温室效应,KG、JG、CI 处理分别较 CK 处理降低 24.98%、27.69% 和 24.06%。

参 考 文 献

[1] 魏永霞,冀俊超,刘慧,等. 水分管理对旱直播稻温室气体排放与土壤无机氮的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(11): 305 – 314.
WEI Yongxia, JI Junchao, LIU Hui, et al. Effects of water management on greenhouse gas emission and soil inorganic nitrogen of dry direct seeding rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 305 – 314. (in Chinese)

[2] 李锐,杨恒山,郇继承. 灌溉方式对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2020, 35(5):402 – 407.
LI Rui, YANG Hengshan, TAI Jicheng. Effects of irrigation methods on farmland greenhouse gas emissions[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities(Natural Sciences), 2020, 35(5):402 – 407. (in Chinese)

[3] MEHIDE A, GRUENING C, CODED I, et al. Water management reduces greenhouse gas emissions in a mediterranean rice paddy field[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 238:168 – 178.

[4] 代滢芸. 2018 年黑龙江省水稻市场分析报告[J]. 黑龙江粮食, 2019(5):16 – 21.

[5] 王孟雪,张忠学,吕纯波,等. 不同灌溉模式下寒地稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2):95 – 100.
WANG Mengxue, ZHANG Zhongxue, LÜ Chunbo, et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy field and their GWPs research in different irrigation modes in cold region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2):95 – 100. (in Chinese)

[6] 罗文兵,孟小军,李亚龙,等. 南方地区水稻节水灌溉的综合效应研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(4):145 – 151.
LUO Wenbing, MENG Xiaojun, LI Yalong, et al. Research progress in comprehensive effects of rice field water-saving irrigation in southern China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(4):145 – 151. (in Chinese)

[7] 薛琰. 氮肥类型、秸秆还田和灌溉方式对水稻氨挥发和温室气体排放的影响[D]. 扬州:扬州大学,2017.
XUE Yan. Effects of nitrogen fertilizer type, straw residue and irrigation on paddy ammonia volatilization and greenhouse gas emissions[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017. (in Chinese)

[8] 袁伟玲,曹凑贵,程建平,等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学,2008,41(12): 4294 – 4300.
YUAN Weiling, CAO Cougui, CHENG Jianping, et al. CH₄ and N₂O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12):4294 – 4300. (in Chinese)

[9] 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. CH₄ and N₂O emission from paddy field in cold region is impacted by irrigation methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1):14 – 20,68. (in Chinese)

[10] 侯会静,SHALAMU Abudu,陈慧,等. 水稻控制灌溉下华东稻麦轮作农田 N₂O 排放模拟[J]. 农业机械学报,2016, 47(12):185 – 191.
HOU Huijing, SHALAMU Abudu, CHEN Hui, et al. Simulation of N₂O emission from rice-wheat rotation field under controlled irrigation of rice in Southeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):185 – 191. (in Chinese)

[11] XU Chunmei, CHEN Liping, CHEN Song, et al. Rhizosphere aeration improves nitrogen transformation in soil, and nitrogen absorption and accumulation in rice plants[J]. Rice Science, 2020, 27(2):162 – 174.

[12] WU Qicong, ZHANG Congzhi, LIANG Xuequan, et al. Elevated CO₂ improved soil nitrogen mineralization capacity of rice paddy[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710:136438.

[13] 张忠学,刘明,齐智娟. 不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(2):284 – 291.
ZHANG Zhongxue, LIU Ming, QI Zhijuan. Effects of different water and nitrogen managements on soil nitrogen and fertilizer nitrogen in maize field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):284 – 291. (in Chinese)

[14] 崔远来,李远华,吕国安,等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展,2004(3):280 – 285.
CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LÜ Guoan, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice [J]. Advances in Water Science, 2004(3):280 – 285. (in Chinese)

[15] AHN J H, CHOI M Y, KIM B Y, et al. Effects of water-saving irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic communities in rice paddy soil[J]. Microbial Ecology, 2014, 68(2):271 – 283.

[16] XU Y, GE J, TIAN S, et al. Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505:1043 – 1052.

WANG Xinkun, YAO Jicheng, XU Shengrong, et al. Effect of nozzle elevation and length on hydraulic performance of negative pressure feedback jet sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(13):75–82. (in Chinese)

[19] 段家现. 正交试验和综合评分法的注塑工艺多目标优化[J]. 塑料工业, 2018,46(7):66–69,91.
DUAN Jiaxian. Multi-objective optimization of injection molding process based on orthogonal experimental and comprehensive scoring method[J]. China Plastics Industry, 2018,46(7):66–69,91. (in Chinese)

[20] 冯果, 李玮, 何新, 等. 正交试验结合综合评分法优化苗药了哥王的提取工艺[J]. 中国药房, 2017,28(16):2216–2219.
FENG Guo, LI Wei, HE Xin, et al. Extraction technology optimization of miao medicine *Wikstroemia indica* by orthogonal test and comprehensive scoring meth[J]. China Pharmacy,2017,28(16):2216–2219. (in Chinese)

[21] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7): 078001.

[22] RETHORE P E, LAAN P, TROLDORG N, et al. Verification and validation of an actuator disc model[J]. Wind Energy, 2014, 17(6): 919–937.

[23] 陶洪飞, 朱玲玲, 马英杰, 等. 网式过滤器的计算模型选择及内部流场分析[J]. 节水灌溉, 2016(10): 83–87.
TAO Hongfei, ZHU Lingling, MA Yingjie, et al. Calculation model selection and internal flow field analysis of screen filter [J]. Water Saving Irrigation, 2016(10): 83–87. (in Chinese)

[24] 刘焕芳, 王军, 胡九英, 等. 微灌用网式过滤器局部水头损失的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(6): 57–60.
LIU Huanfang, WANG Jun, HU Jiuying, et al. The experimental study on local head loss of screen filter in micro irrigation [J]. China Rural Water and Hydropowe, 2006(6): 57–60. (in Chinese)

[25] 弋鹏飞, 马爽文, 张建鹏, 等. 节水承插式折角弯管水流流动特性研究[J]. 节水灌溉, 2021(4): 35–40.
YI Pengfei, MA Shiwen, ZHANG Jianpeng, et al. Study on flow characteristics of water-saving socket type bend pipe[J]. Water Saving Irrigation, 2021(4): 35–40. (in Chinese)

[26] 张凯, 喻黎明, 刘凯硕, 等. 网式过滤器拦截率计算及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 123–130.
ZHANG Kai, YU Liming, LIU Kaishuo, et al. Calculation of interception rate of mesh filter and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 123–130. (in Chinese)

[27] 吴丹妮, 裴向军. 基于正交试验设计和通径分析的反倾坡变形敏感性研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(10): 141–144.
WU Danni, PEI Xiangjun. Study on sensitivity of deformation of anti-dip layered rock slope based on orthogonal experimental design and path analysis[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(10): 141–144. (in Chinese)

(上接第 313 页)

[17] HOU H,PENG S,XU J, 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.

[18] 陈书涛,黄耀,郑循华,等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. 中国农业科学,2005,38(10):2053–2060.
CHEN Shutao, HUANG Yao, ZHENG Xunhua, et al. Nitrous oxide emission from cropland and its driving factors under different crop rotations[J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(10):2053–2060. (in Chinese)

[19] 李晶,王明星,王跃思,等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气科学,2003(4):740–749.
LI Jing, WANG Mingxing, WANG Yuesi, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2003(4):740–749. (in Chinese)

[20] 周玲红,魏甲彬,成小琳,等. 南方冬季种养结合模式对双季稻田 CH₄ 和 CO₂ 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018,34(5):433–440.
ZHOU Linghong, WEI Jiabin, CHENG Xiaolin, et al. Effects of winter green manure crops with and without chicken grazing on CH₄ and CO₂ emissions in a double-crop rice paddy field in South China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018,34(5):433–440. (in Chinese)

[21] DAI J L, DUAN L S, DONG H Z. Improved nutrient uptake enhances cotton growth and salinity tolerance in saline media[J]. Journal of Plant Nutrition,2014,37(8): 1269–1286.

[22] 杜臻杰,齐学斌,李平,等. 猪场废水灌溉对土壤氮素时空变化与氮平衡的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(8): 262–269.
DU Zhenjie, QI Xuebin, LI Ping, et al. Effect of piggery wastewater irrigation on temporal-spatial variation and balance of nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8): 262–269. (in Chinese)

[23] 周爽,王广帅,高阳,等. 滴灌对农田 N₂O 排放影响的研究进展[J]. 中国农村水利水电,2020(1):8–12.
ZHOU Shuang, WANG Guangshuai, GAO Yang, et al. The effects of drip irrigation on soil N₂O emissions from farmland: a review[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(1):8–12. (in Chinese)

[24] 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)