

水分管理对旱直播稻温室气体排放与土壤无机氮的影响

魏永霞^{1,2} 冀俊超¹ 刘慧³ 郭彦君⁴ 郑衍波¹ 石蕴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. 东北农业大学文理学院, 哈尔滨 150030; 4. 北京邮电大学现代邮政学院, 北京 100876)

摘要: 为探究寒地黑土区不同水分管理方案对旱直播水稻温室气体排放和土壤无机氮的影响, 设置4个处理: 淹灌旱直播(YH)、湿灌旱直播(SH)、旱管旱直播(HH)和常规插秧淹灌(CK), 并以CK处理作为对照, 采用微区测坑进行试验, 研究了旱直播水稻对温室气体甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放量、全球增温潜势(GWP)、以产量为基准的全球变暖潜势(GWP_y)、0~60 cm土壤剖面铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量的影响, 分析了0~20 cm土层土壤温度、CH₄和N₂O排放量和0~20 cm土层NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量的相关关系。结果表明: 各处理CH₄和N₂O排放量均呈先增后减的变化趋势, CH₄排放峰值出现在拔节孕穗期, N₂O排放峰值出现在抽穗开花期。各处理CH₄累积排放量、GWP和GWP_y由大到小均表现为CK、YH、SH、HH, N₂O累积排放量由大到小表现为HH、SH、YH、CK。CK、YH、SH处理土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量在时间和剖面上的变化规律基本一致, 从时间上看, NH₄⁺-N含量峰值出现在分蘖中期和抽穗开花期, 而NO₃⁻-N含量峰值出现在分蘖前期; 从土壤剖面上看, CK、YH、SH处理NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量分别以20~40 cm和40~60 cm土层最高, 而HH处理NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量分别以40~60 cm和0~20 cm土层最高。各处理稻田5、10、15、20 cm土层土壤温度(T₅、T₁₀、T₁₅、T₂₀)均呈先升后降的变化趋势。CK、YH、SH、HH处理T₅、T₁₀、T₁₅、T₂₀与CH₄排放量、NH₄⁺-N含量呈正相关; YH处理T₁₅、T₂₀与N₂O排放量呈正相关, 与NO₃⁻-N含量呈负相关; SH、HH处理T₅、T₁₀、T₁₅与N₂O排放量呈负相关, 与NO₃⁻-N含量呈正相关。YH、SH、HH处理NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量呈此消彼长的密切关系。本研究可为东北黑土区旱直播稻田减缓温室效应和土壤氮素高效利用提供理论依据。

关键词: 东北黑土区; 旱直播水稻; 气体排放; 增温潜势; 土壤氮; 相关性

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0305-10

OSID:



Effects of Water Management on Greenhouse Gas Emission and Soil Inorganic Nitrogen of Dry Direct Seeding Rice

WEI Yongxia^{1,2} JI Junchao¹ LIU Hui³ GUO Yanjun⁴ ZHENG Yanbo¹ SHI Yun¹

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

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

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

4. School of Modern Post, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to explore the effects of different water management schemes on greenhouse gas emission and soil inorganic nitrogen of dry direct seeding rice in the cold black soil region, micro-area test pits were used in the experiment. The effects of dry direct seeding rice on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emission fluxes, global warming potential (GWP), global warming potential based on yield (GWP_y), the contents of ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) and nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) in 0~60 cm soil profile were studied. The relationships among soil temperature in 0~20 cm soil layer, CH₄ and N₂O emission fluxes and content of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in 0~20 cm soil layer were analyzed. Four treatments were set: flooded irrigation dry direct seeding rice (YH), wet irrigation dry direct seeding rice

收稿日期: 2020-11-21 修回日期: 2020-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC040010101)

作者简介: 魏永霞(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究, E-mail: wyx0915@163.com

(SH), arid irrigation dry direct seeding rice (HH) and transplanting flooded rice (CK), and CK as the control. Results showed that the CH_4 and N_2O emission fluxes in four treatments showed the trend from increasing to decreasing, the CH_4 emission peak appeared in the jointing and booting stage, and N_2O emission peak appeared in the heading and flowering stage. The cumulative emission of CH_4 , GWP and GWP_y in four treatments from big to small were as follows: CK, YH, SH and HH, the cumulative emission of N_2O in four treatments from big to small were as follows: HH, SH, YH and CK. The changes of NH_4^+-N and NO_3^--N contents in CK, YH and SH were basically consistent in time and profile. In terms of time, the peak of NH_4^+-N content appeared in the middle tillering and the heading and flowering stages, while the peak of NO_3^--N content appeared in the early tillering stage. In terms of soil profile, the NH_4^+-N and NO_3^--N content of CK, YH and SH were the highest in 20 ~ 40 cm and 40 ~ 60 cm soil layers, respectively. The contents of NH_4^+-N and NO_3^--N of HH were the highest in 40 ~ 60 cm and 0 ~ 20 cm soil layers, respectively. The NH_4^+-N was the most important nitrogen source for CK and YH, and NO_3^--N was the most important nitrogen source for SH and HH. The soil temperature of 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm soil layers (T_5 , T_{10} , T_{15} and T_{20}) of four treatments showed the tendency that firstly increased and then decreased. The T_5 , T_{10} , T_{15} and T_{20} of CK, YH, SH and HH were positively correlated with CH_4 emission flux and NH_4^+-N content. In YH, the T_{15} and T_{20} were positively correlated with N_2O emission flux and negatively correlated with NO_3^--N content. In SH and HH, the T_5 , T_{10} and T_{15} were negatively correlated with N_2O emission flux and positively correlated with NO_3^--N content. In YH, SH and HH, the content of NH_4^+-N was negatively correlated with the content of NO_3^--N . The research results can provide theoretical basis for the mitigation of greenhouse effect and efficient use of soil nitrogen in dry direct seeding paddy field in the black soil region of northeast China.

Key words: black soil region of Northeast China; dry direct seeding rice; gas emission; warming potential; soil nitrogen; correlation

0 引言

大气中主要的温室气体为 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等, 由于人类生产活动使得温室气体含量逐年升高, 全球温室效应越发严峻^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会的评估报告指出: 单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势分别是 CO_2 的 25 倍和 298 倍^[2]。农业已经成为全球温室气体的主要排放源, 其排放量占全球总排放量的 17% ~ 32%^[3], 其中水稻种植排放量占农业温室气体总排放量的 10.1%^[4]。因此, 研究稻田 CH_4 和 N_2O 排放规律对于减缓温室效应和保障粮食安全具有重要意义。

水稻旱直播是一种无需泡田育秧, 将稻种直接播入稻田的旱作栽培方式^[5], 具有节水、节本、增效的优势, 在世界范围内得到了广泛应用^[6]。氮素是极为重要的养分元素, 作物需要的氮有 50% ~ 80% 来自于土壤^[7]。土壤中 90% 以上的氮素以有机形态存在, 而作物能够吸收利用的只有无机形态的氮^[8-10]。以往的研究普遍认为水稻为喜铵作物, NH_4^+-N 是其主要氮源^[11-13], 但由于种植方式、灌溉方案等因素影响, 水稻吸收土壤无机氮会产生不同程度差异。石英等^[14]研究了不同施氮水平下旱直播水稻土壤无机氮的变化特征, 表明与水作水稻相比, 旱直播水稻以 NO_3^--N 作为主要氮源, 并能正常生长和获得较高的

产量。崔远来等^[15]研究了不同水肥条件下水稻氮素变化规律, 表明间歇灌溉下土壤 NO_3^--N 含量明显大于淹水灌溉。目前, 关于稻田 CH_4 和 N_2O 排放的研究比较深入, 主要集中在水稻品种、水肥管理、耕作模式等方面^[1,16], 有研究表明, 与移栽淹灌水稻相比, 旱直播水稻田的 CH_4 排放量减少了 18%^[17]。也有研究发现处于干湿交替状态的水稻能显著降低 CH_4 排放^[18]。随着土壤水分条件的改变, 土壤温度环境势必发生改变, 对稻田温室气体排放、无机氮含量等产生直接和间接影响, 因此, 研究土壤温度与 CH_4 和 N_2O 的排放、土壤 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 的产生与转化的相关关系具有重要意义。目前, 在北方寒地黑土区研究不同水分管理对旱直播水稻 CH_4 和 N_2O 排放、土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的影响较少, 而且研究旱直播稻田土壤温度对 CH_4 和 N_2O 排放、土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的相关性影响鲜有报道。

因此, 本文以东北黑土区主栽的龙庆稻 3 号水稻为试验材料, 对旱直播水稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 排放量、全球增温潜势、以产量为基准的全球变暖潜势、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, 并分析 0 ~ 20 cm 土层土壤温度、 CH_4 及 N_2O 排放量和 0 ~ 20 cm 土层 NH_4^+-N 及 NO_3^--N 含量的相关关系, 为稻田温室气体减排和土壤养分资源高效利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019 年在位于黑龙江省绥化市庆安县和平灌区的庆安国家灌溉试验重点站(46°52'41"N, 127°30'4"E)进行。该地临近于第二积温带与第三积温带之间,属于寒温带大陆性季风气候,多年平均气温 2.5℃,多年平均降雨量 550 mm,作物水热生长期 156~171 d,平均无霜期 128 d。试验地区属于典型寒地黑土分布区,土壤类型为白浆土型水稻土,土壤容重 1.01 g/cm³,孔隙度 61.8%,pH 值 6.45,饱和含水率 50%。土壤基础肥力(均为质量比)为:有机质 41.8 g/kg、全氮 15.06 g/kg、全磷 15.23 g/kg、全钾 20.11 g/kg、速效钾 112.06 mg/kg、有效磷 36.22 mg/kg 和碱解氮 198.29 mg/kg。

表 1 不同处理水稻各生育阶段水分管理方案

Tab. 1 Water management schemes for different treatments of rice at different growth stages

处理	苗期(或返青期)	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
YH	(80%~100%) θ_s	30~50 mm	30~50 mm	晒田	30~50 mm	30~50 mm	20~50 mm
SH	(80%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(60%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(70%~100%) θ_s
HH	(80%~100%) θ_s	(60%~85%) θ_s	(60%~85%) θ_s	(45%~85%) θ_s	(60%~85%) θ_s	(60%~85%) θ_s	(55%~85%) θ_s

注: θ_s 为土壤饱和含水率。

为 4.5:2:1.5:2 分施;磷肥施用量 45 kg/hm²,作为基肥一次性施入;钾肥施用量 80 kg/hm²,按照基肥、促花肥比例为 1:1 分施 2 次。2019 年 9 月 29 日收获。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气体样品采集与测定

采用人工静态暗箱法原位采集气体^[19],静态箱由顶箱和不锈钢底座两部分组成。不锈钢底座顶端留有宽 3 cm、深 3 cm 的密封槽,用于采样时与顶箱密封。顶箱由厚 5 mm 的有机玻璃板制成,箱外包裹 1 层厚 2 cm 的海绵及 1 层铝箔,以减小采气期间由于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(ET)、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(M)采集各处理气体样品。每个处理分别在 0、10、20、30 min 时采样,采样时间为 10:00—11:00。

气体浓度采用气象色谱仪(岛津 GC-2010Plus 型,日本)手动进样测定。CH₄浓度检测时采用氢火焰离子检测器(FID),N₂O 气体浓度检测时采用电子捕获检测器(ECD)。标准气体由大连大特气体有

1.2 试验设计

试验在有移动式遮雨棚的有底测坑(测坑面积 2 m × 2 m)中进行,共设 4 个处理:淹灌早直播(YH)、湿灌早直播(SH)、旱管早直播(HH)和常规插秧淹灌(CK)处理,每个处理设 3 次重复,共 12 个测坑。水稻供试品种为龙庆稻 3 号。YH、SH、HH 处理均采用手工穴播,于 2019 年 5 月 7 日播种,每穴 10~12 粒,穴距 10 cm,行间距 10 cm + 26 cm + 10 cm。CK 处理采用人工插秧,插秧时间为 5 月 25 日,插秧密度为行距 30 cm,株距 13 cm。不同处理水稻各生育阶段水分管理方案见表 1。不建立水层的生育阶段以根层的土壤含水率确定灌水时间和灌水量,建立水层的生育阶段以水层深度为控制指标确定灌水时间和灌水量。各处理氮肥施用量为 110 kg/hm²,按照基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥比例

限公司提供。CH₄和 N₂O 排放量计算公式为

$$F = \rho h \frac{273}{273 + T} \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中 F ——CH₄或 N₂O 排放量,μg/(m²·h)

ρ ——CH₄或 N₂O 在标准状态下密度,kg/m³

h ——采样箱有效高度,m

T ——采样箱内温度,℃

dc/dt ——采样过程中 CH₄或 N₂O 浓度变化率,μL/(m³·h)

全球变暖潜势和气体累积排放量计算式为

$$GWP = 25F_{CH_4} + 298F_{N_2O} \quad (2)$$

$$GWP_y = \frac{GWP}{Y} \quad (3)$$

其中

$$F_{CH_4} = F_{ACH_4} T_h \quad (4)$$

$$F_{N_2O} = F_{AN_2O} T_h \quad (5)$$

式中 GWP ——CH₄和 N₂O 的排放量全球变暖潜势,kg/hm²

F_{CH_4} ——水稻全生育期 CH₄ 累积排放量,kg/hm²

F_{N_2O} ——水稻全生育期 N₂O 累积排放量,kg/hm²

F_{ACH_4} ——水稻全生育期 CH₄ 平均排放量,mg/(m²·h)

F_{AN_2O} ——水稻全生育期 N_2O 平均排放量,
 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

T_h ——水稻全生育期总时长, h

GWP_y ——以产量为基准的全球变暖潜势,
 kg/kg

Y ——产量, kg/hm^2

1.3.2 土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--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3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(Seal Analytical GmbH, 德国,灵敏度0.001)测定土壤中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量,计算公式为

$$W(N) = \frac{CV}{m} \quad (6)$$

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

C ——浸提溶液质量浓度, mg/L

V ——浸提溶液体积, mL

m ——土壤质量, g

1.3.3 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),地温观测从水稻进入分蘖期开始至乳熟期结束,每隔5 d 观测一次。观测时刻为每天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)。

1.3.4 产量测定

从每个测坑取9穴植株,经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,计算理论产量。

1.4 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,显著性水平取0.05,用 R 4.0.3 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理 CH_4 和 N_2O 排放特征

2.1.1 CH_4 排放变化特征

农业生产活动产生的 CH_4 是大气中甲烷的重要来源,减少 CH_4 排放,有助于解决全球变暖等问题^[20]。由图1(图中不同小写字母表示处理间差异

显著($P < 0.05$),下同)可知,不同处理稻田 CH_4 排放量均呈倒“V”形变化趋势。各处理在分蘖前期 CH_4 排放量均处于较低水平,分蘖末期至抽穗开花期, CH_4 排放量维持较高水平。拔节孕穗期各处理 CH_4 排放量达到最高峰, YH、SH、HH 处理分别较 CK 处理显著降低 43.71%、60.33%、74.89% ($P < 0.05$)。抽穗开花期至乳熟期,各处理稻田 CH_4 排放逐渐减少。除乳熟期 YH 与 CK 处理 CH_4 排放量差异不显著($P > 0.05$)外,其余各生育阶段早直播处理 CH_4 排放量均显著低于 CK 处理,且处理间差异显著($P < 0.05$)。各生育阶段 CH_4 排放量由大到小均依次为 CK、YH、SH、HH,这表明淹水灌溉会导致稻田 CH_4 排放量增加,而早直播种植水稻有利于降低稻田 CH_4 排放。

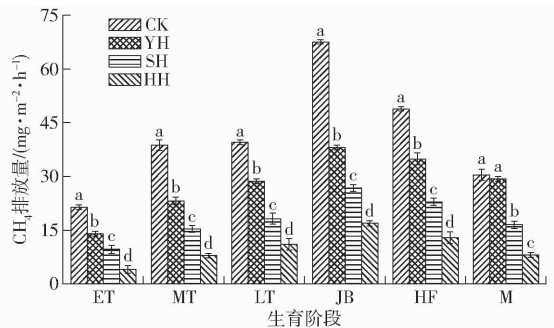


图1 不同处理稻田 CH_4 排放量

Fig.1 CH_4 emission in paddy fields under different treatments

2.1.2 N_2O 排放变化特征

N_2O 是稻田生态系统中一种主要的温室气体,在全球温室效应中起着重要作用^[1]。不同处理 N_2O 排放呈先增加后降低的变化趋势(图2)。分蘖前期各处理 N_2O 排放处于较低水平,施加分蘖肥后,各处理在分蘖中期出现一个小的排放量高峰。抽穗开花期,各处理 N_2O 排放量达全生育期最大, YH、SH 和 HH 处理 N_2O 排放量分别较 CK 处理增加 51.03%、57.99%、71.35 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 差异显著($P < 0.05$)。各生育阶段 N_2O 排放量由大到小依次为 HH、SH、YH、CK, 这表明早直播种植水稻促进稻田 N_2O 排放,也表明土壤含水率越低,稻田 N_2O 释放能力越强。

2.2 不同处理 CH_4 和 N_2O 温室效应

由表2可知,各处理 CH_4 累积排放量远大于 N_2O 累积排放量,这表明温室气体 CH_4 对全球气候变化的贡献率远大于 N_2O 。淹水灌溉处理的 CH_4 累积排放量显著高于田面无水层处理,与 CK 处理相比, YH、SH、HH 处理 CH_4 累积排放量分别降低 22.23%、49.25%、71.64%。YH、SH 和 HH 处理

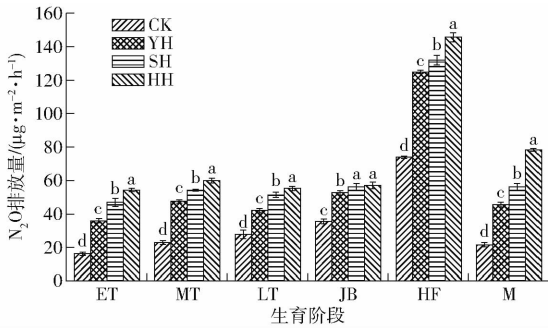
图 2 不同处理稻田 N₂O 排放量Fig. 2 N₂O emission in paddy fields under different treatments

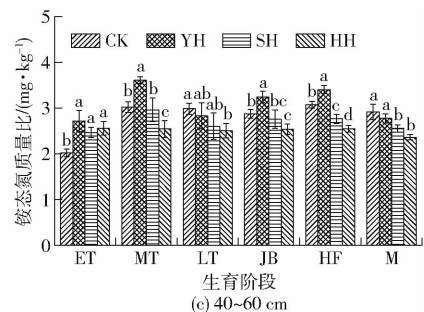
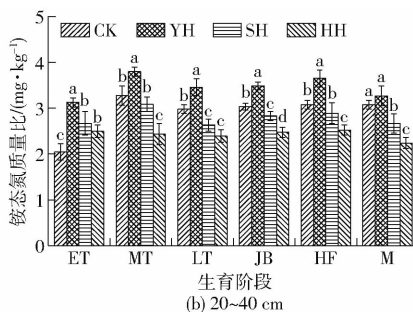
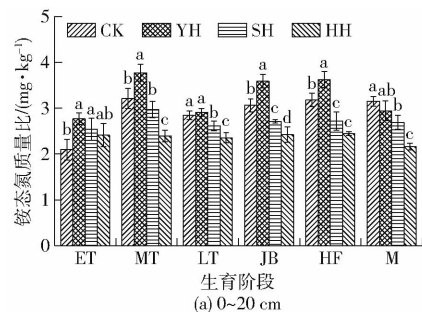
表 2 不同处理 CH₄ 与 N₂O 累积排放量和增温潜势
 Tab. 2 Cumulative emissions of CH₄ and N₂O, and warming potential under different treatments

处理	CH ₄ 累积排放量/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 累积排放量/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	GWP/ (kg·hm ⁻²)	GWP _y / (kg·kg ⁻¹)
CK	1 263.31 ^a	1.02 ^b	8 160.11 ^a	31 886.58 ^a	3.91 ^a
YH	982.48 ^b	2.04 ^a	7 860.89 ^b	25 171.00 ^b	3.20 ^b
SH	641.07 ^c	2.33 ^a	7 712.00 ^b	16 719.73 ^c	2.17 ^c
HH	358.22 ^d	2.63 ^a	6 483.17 ^c	9 740.15 ^d	1.50 ^d

注：同一列数据后不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。下同。

N₂O 累积排放量分别较 CK 处理增加 1.02、1.31、1.61 kg/hm²，这表明插秧淹灌水稻有利于降低稻田 N₂O 累积排放量。

CH₄ 和 N₂O 在 100 年时间尺度上，以 CO₂ 作为参考气体 (GWP = 1 kg/hm²)，分别求出其排放 CO₂ 当量，两者求和即为全球增温潜势^[21]。由表 2 可知，CK 处理的 GWP 显著高于其它处理，YH、SH 和 HH 处理 GWP 分别较 CK 处理降低了 6 715.58、15 166.85、22 146.43 kg/hm²，这表明早直播种植水稻能显著降低温室效应。CK 处理产量最大，为 8 160.11 kg/hm²，YH、SH 和 HH 处理分别较 CK 处理显著降低 3.67%、5.49% 和 20.55% (P < 0.05)。CK 处理的 GWP_y 最大，为 3.91 kg/kg，YH、SH 和 HH 处理分别较 CK 处理降低了 18.16%、44.50% 和

图 3 不同土层的 NH₄⁺-N 含量Fig. 3 NH₄⁺-N content in different soil layers

61.64%，这表明 YH 和 SH 处理水稻在保证产量的前提下能降低稻田温室效应。

2.3 不同处理土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量变化特征

2.3.1 土壤 NH₄⁺-N 含量变化特征

由图 3a 可知，在 0~20 cm 土层，CK、YH、SH 处理 NH₄⁺-N 含量呈“M”形变化趋势，而 HH 处理呈逐渐降低的变化趋势。分蘖前期，各处理 NH₄⁺-N 含量处于较低水平。分蘖中期，水稻分蘖旺盛，对水分和养分的需求量大，且已施加分蘖肥，使得 CK、YH、SH 处理 NH₄⁺-N 含量达到第 1 个峰值，与 CK 处理相比，YH 处理 NH₄⁺-N 含量增加 17.48%，而 SH 减少 7.55%。分蘖末期水稻进行控蘖晒田，土壤表层通气性条件好，NH₄⁺ 发生硝化反应导致 NH₄⁺-N 含量降低。抽穗开花期，水稻处于生殖生长阶段且已施加穗肥，这使得各处理 NH₄⁺-N 含量达到第 2 个峰值，与 CK 处理相比，YH 处理增加 14.0%，SH 和 HH 处理分别显著降低 14.51% 和 23.15% (P < 0.05)。CK、SH、HH 处理在乳熟期 NH₄⁺-N 含量较抽穗开花期下降，而 YH 处理有所增加。各处理在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层 NH₄⁺-N 含量变化规律与 0~20 cm 土层基本一致 (图 3b、3c)。

从 0~60 cm 土壤剖面上看，NH₄⁺-N 携带正电荷，极易被带负电荷的土壤胶体所吸附，向下层土壤迁移能力较弱，在土壤根系、灌溉方式等共同影响下，最终使得 YH、SH、CK 处理各土层 NH₄⁺-N 含量由大到小基本表现为 20~40 cm、0~20 cm、40~60 cm，而 HH 处理由大到小表现为 40~60 cm、20~40 cm、0~20 cm。分蘖中期至乳熟期，CK 处理各土层 NH₄⁺-N 含量变化过程平稳，而 YH、SH、HH 处理变化过程强烈。YH、SH、CK 处理各土层 NH₄⁺-N 含量与施肥密切相关，施肥之后含量比较高，此后逐渐降低，两次 NH₄⁺-N 含量的峰值分别出现在施分蘖肥后的分蘖中期和施穗肥后的抽穗开花期。

2.3.2 土壤 NO₃⁻-N 含量变化特征

由图 4a 可知，在 0~20 cm 土层，YH、CK 处理 NO₃⁻-N 含量呈逐渐降低的变化趋势，SH 处理 NO₃⁻-N

含量呈先降低后升高再降低的变化趋势,HH处理 NO_3^- -N含量呈先升高后降低再升高的变化趋势。YH、CK处理在分蘖前期土壤 NO_3^- -N含量达全生育期最大,YH处理较CK处理显著增加37.99% ($P < 0.05$)。分蘖中期是水稻营养生长旺盛阶段,对氮素需求量高,YH、SH、CK处理 NO_3^- -N含量较分蘖前期发生大幅降低。分蘖末期,HH处理 NO_3^- -N含

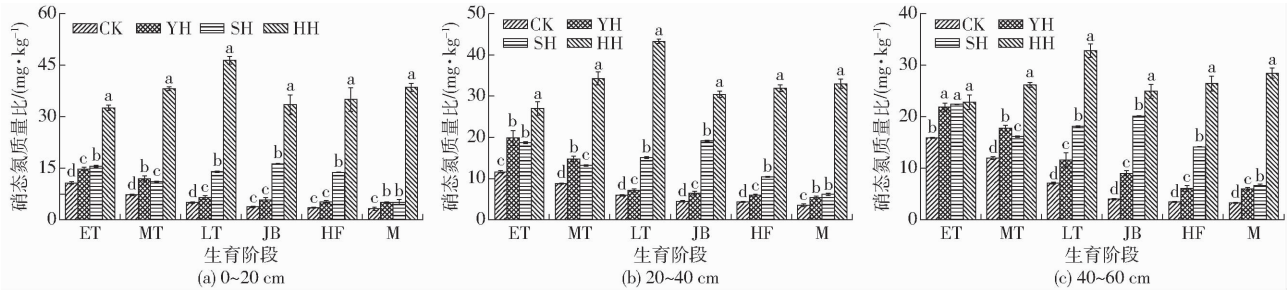


图4 不同土层的 NO_3^- -N含量

Fig.4 NO_3^- -N content in different soil layers

量达全生育期最大,HH处理较CK处理增加41.41 mg/kg。拔节孕穗期,SH处理 NO_3^- -N含量达全生育期最大,SH处理较CK处理增加12.51 mg/kg。抽穗开花期至乳熟期,YH、SH、CK处理 NO_3^- -N含量逐渐降低,而HH处理逐渐增加。各处理在20~40 cm和40~60 cm土层 NO_3^- -N含量变化规律与0~20 cm土层基本一致(图4b、4c)。

2.3.3 土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N平均含量变化特征

由表3可知,分蘖前期至乳熟期,YH处理在0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层 NH_4^+ -N平均质量比分别较CK处理增加0.34、0.55、0.28 mg/kg,而SH和HH处理在0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层 NH_4^+ -N平均含量分别较CK处理降低7.45%、19.15%、4.12%、16.84%、4.62%、10.84%。结果表明,淹水灌溉水稻有利于提高土壤供 NH_4^+ -N水平,其中 NH_4^+ -N是YH处理最重要的氮源,也表明土壤含水率越低,早直播水稻土壤供

NH_4^+ -N水平越低。

分蘖前期至乳熟期,在0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层,HH处理 NO_3^- -N平均质量比分别较CK处理增加31.78、26.87、19.32 mg/kg,SH处理 NO_3^- -N平均质量比分别较CK处理增加7.08、7.35、8.66 mg/kg,YH处理 NO_3^- -N平均含量较CK处理分别增加47.50%、52.63%和58.28%。结果表明,早直播种植水稻有利于提高土壤供 NO_3^- -N水平,土壤含水率越低,越有利于土壤 NO_3^- -N含量增加。

2.4 不同处理土壤温度变化特征

图5为不同处理稻田5、10、15、20 cm土层土壤温度变化。不同土层各处理土壤温度均表现为先升后降的变化趋势。各土层温度均在分蘖末期和拔节孕穗期处于较高水平,这表明气温对土壤温度变化起着重要作用。在5 cm土层,SH、HH处理分蘖前期至拔节孕穗期土壤温度均高于CK处理,说明无水层灌溉对5 cm土层增温效果较好。在10 cm土层,CK处理各生育阶段土壤温度均高于YH、SH、HH处理,这表明插秧水稻对10 cm土层增温效果优于早直播水稻。CK、YH、SH处理10、15、20 cm土层温度由大到小均表现为10、15、20 cm土层,这表明土层越深,土壤温度越低。

2.5 相关性分析

图6为CK、YH、SH、HH处理测定的5、10、15、20 cm土层土壤温度与其0~20 cm土层土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量以及 CH_4 和 N_2O 排放量的相关性分析。各处理 CH_4 排放量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈正相关性,其中各处理 CH_4 与 T_{20} 的相关系数最高,与 T_5 的

表3 各土层 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N平均含量(质量比)

Tab.3 Average contents of NH_4^+ -N and NO_3^- -N

in different soil layers

mg/kg

无机氮 类型	处理	土层深度/cm		
		0~20	20~40	40~60
NH_4^+ -N	CK	2.93 ^b	2.92 ^b	2.82 ^b
	YH	3.27 ^a	3.47 ^a	3.10 ^a
	SH	2.71 ^c	2.80 ^b	2.68 ^b
	HH	2.37 ^d	2.43 ^c	2.51 ^c
NO_3^- -N	CK	5.57 ^d	6.47 ^d	7.60 ^d
	YH	8.22 ^c	9.88 ^c	12.03 ^c
	SH	12.65 ^b	13.82 ^b	16.26 ^b
	HH	37.35 ^a	33.34 ^a	26.92 ^a

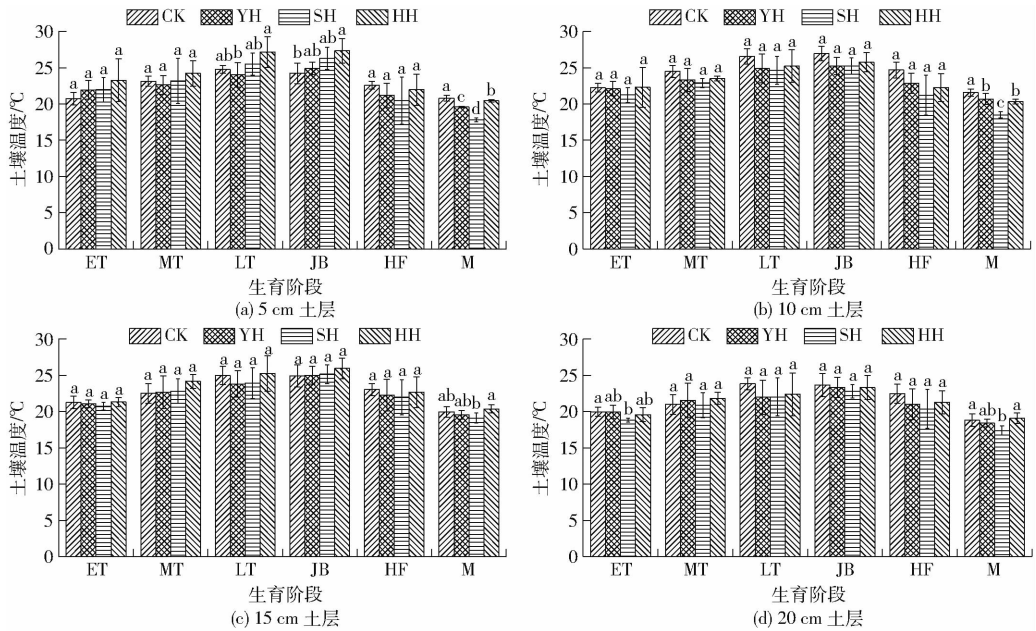


图 5 不同处理土壤温度

Fig. 5 Changes of soil temperature under different treatments

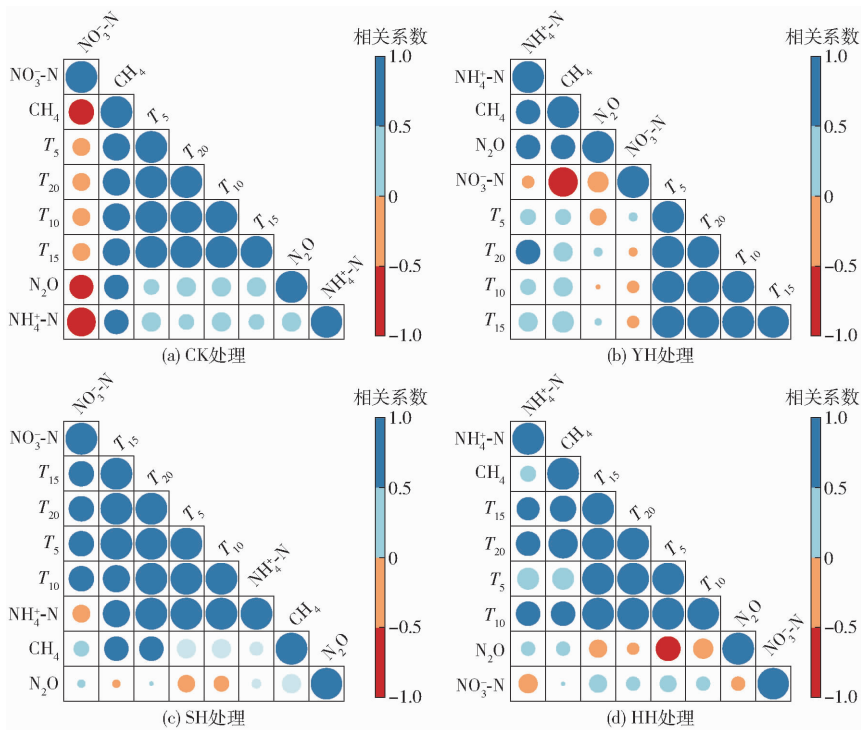


图 6 相关性分析热力图

Fig. 6 Thermodynamic diagrams of correlation analysis

相关系数最小,表明随土层深度增加,土温对 CH_4 排放正影响越大。CK 处理 N_2O 排放量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈正相关性;YH 处理 N_2O 排放量与 T_{15} 、 T_{20} 呈正相关性,而与 T_5 、 T_{10} 呈负相关性;SH 处理 N_2O 排放量与 T_{20} 呈正相关性,而与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 呈负相关性;HH 处理 N_2O 排放量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈负相关性,表明土壤含水率越低,土温对 N_2O 排放的负影响越大。

各处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈正相关

性,其中 YH、SH、HH 处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与 T_{20} 的相关系数最高,与 T_5 的相关系数最小,这表明在早直播水稻田中随着土层越深,土温对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的正影响越大。CK 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈负相关性;YH 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量与 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈负相关性,而与 T_5 呈正相关性;SH、HH 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈正相关性,其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量与 T_5 相关系数最高,与 T_{20} 相关系数最低,这表明

不建立水层的早直播水稻,土层越深,土温对 NO_3^- -N 含量正影响越小。

各处理 NH_4^+ -N 含量与 NO_3^- -N 含量呈负相关性,其中以 CK 处理的负相关性最大,表明插秧淹灌水稻的 NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N 消长关系密切。各处理 CH_4 和 N_2O 的排放量呈正相关性,其中 CK、YH 处理相关系数均较高,表明淹水条件下, CH_4 和 N_2O 排放关系密切。

3 讨论

农田土壤是 CH_4 和 N_2O 的主要排放源之一,对全球温室效应贡献巨大,稻田生态系统温室气体减排对我国生态环境建设具有重要意义^[22]。本研究发现,CK 处理 CH_4 排放量为 $21.42 \sim 67.57 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,早直播处理 CH_4 排放量为 $4.04 \sim 38.04 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,表明插秧淹灌的水稻种植方式释放 CH_4 能力较强。不同处理 CH_4 排放峰值出现在拔节孕穗期,这是由于在分蘖末期各处理土壤含水率较低且田面处于无水层状态,土壤含氧量增加,土壤氧化还原电位升高,抑制土壤中厌氧产 CH_4 菌活性,使得稻田 CH_4 产生量降低,至拔节孕穗期各处理稻田复水,使得 CH_4 大量释放,这与周玲红等^[23]认为 CH_4 排在齐穗期达最大值的**研究结果不一致。原因可能是由于拔节孕穗期施加氮肥,使得土壤在短时间内 CH_4 大量排放。减少稻田温室气体排放的前提是不减产,将水稻产量考虑在内的 GWP_y 能更好地平衡农田温室效应和经济效益^[24]。与已有研究结果^[25-26]相比,本研究得出的 GWP 和 GWP_y 均处于较高水平,原因可能是 CH_4 累积排放量较高且 CH_4 相对于 CO_2 的当量倍数较大,这说明稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 排放导致的温室效应比过去更加严重,需要寻找例如早直播种植水稻等方式降低 GWP_y 以达到节本减排的目的。

氮素是水稻最重要的养分元素之一,水稻既可直接吸收正离子态 NH_4^+ ,也可直接吸收负离子态 NO_3^- ,吸收的氮素进入水稻体内将很快转变成各具重要生理功能的多种含氮化合物^[27]。本研究发现,分蘖前期,YH、SH、CK 处理各层土壤 NO_3^- -N 含量均较高,这反映出该阶段 YH、SH、CK 处理水稻对 NO_3^- -N 的吸收速率较低,使得 NO_3^- -N 大量累积。随着水稻的生长发育,水稻体内硝酸还原酶活性提高,水稻对 NO_3^- -N 的吸收速率逐渐加快,对 NO_3^- -N 的需求也会增加,这使得 YH、SH、CK 处理整个生育期内各土层 NO_3^- -N 含量整体呈现降低的变化趋势。本研究结果表明,YH、SH、CK 处理各土层 NH_4^+ -N 含量均表现为以 20 ~ 40 cm 最高,0 ~ 20 cm 次之,

40 ~ 60 cm 最低,这与杜臻杰等^[7]研究在 0 ~ 80 cm 土层中 NH_4^+ -N 含量随土层深度的增加而减小的结果不完全一致,这可能是由于表层被土壤颗粒吸附的 NH_4^+ 被灌溉水淋移到下层土壤中,使得 20 ~ 40 cm 土层 NH_4^+ -N 含量较 0 ~ 20 cm 土层高。一般认为水稻是典型的喜铵作物,栽培在淹水环境中的水稻以吸收还原态的 NH_4^+ -N 为主,CK、YH 处理各土层 NH_4^+ -N 平均含量均高于 SH、HH 处理,这表明淹水条件下 NH_4^+ -N 是水稻的优势氮源。早直播处理在各土层 NO_3^- -N 平均含量由大到小表现为 HH、SH、YH,这表明土壤含水率越低的早直播水稻,越有利于增加土壤 NO_3^- -N 含量。

土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的产生与转化、温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放都与土壤微生物的生化反应密切相关。稻田土壤温度的变化对土壤微生物的活性、微生物种群数量、反应物数量等产生直接或间接的影响。采用不同的水稻种植方式和水分管理方案均导致土壤温度的变化,进而影响稻田生态系统。本试验研究发现,SH 处理 N_2O 排放量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 呈负相关性,HH 处理 N_2O 排放量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈负相关性,这说明土壤水分含量越低,早直播水稻田土壤温度对 N_2O 排放负影响越大。SH、HH 处理 NO_3^- -N 含量与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{20} 呈正相关性,而 CK 处理 NO_3^- -N 含量与土壤温度呈负相关性,分析其原因可能是 SH、HH 处理土壤通气性和土壤温度提高,使得土壤中的硝化细菌活性增强,硝化细菌活性远大于反硝化细菌活性,硝化反应加剧,最终导致土壤中氮素形态发生变化, NO_3^- -N 含量升高^[28]。任何土壤都同时存在 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的相互转化与平衡,土壤中 NH_4^+ -N 经过硝化作用转换成 NO_3^- -N,相反方向由 NO_3^- -N 经还原作用转化成 NH_4^+ -N。本研究得出土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 存在负相关关系,说明二者在土壤中不断进行着相互间的转化反应,呈现此消彼长的密切关系。

4 结论

(1)各处理 CH_4 和 N_2O 排放量均呈先增加后降低的变化趋势。与插秧淹灌水稻相比,早直播水稻有利于降低稻田 CH_4 排放量,但不利于降低稻田 N_2O 排放量。各处理 GWP 和 GWP_y 由大到小均表现为 CK、YH、SH、HH,说明早直播水稻降低了稻田温室效应,减排效果显著。

(2)各处理土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 土层变化规律一致。早直播水稻 NH_4^+ -N 含量峰值出现在分蘖中期和抽

穗开花期,而 NO_3^- -N 含量峰值出现在分蘖前期。淹灌条件下,有利于水稻对 NH_4^+ -N 的吸收, NH_4^+ -N 是 YH、CK 处理最重要的氮源。土壤含水率越低的旱直播稻田,越有利于增加土壤中 NO_3^- -N 含量。

(3) 在 0 ~ 20 cm 土层,随土壤深度增加,土壤温

度对旱直播水稻田 CH_4 排放量和 NH_4^+ -N 含量正影响越大;土壤含水率越低的旱直播水稻,土壤温度对 N_2O 排放量负影响越大;不建立水层的旱直播水稻,随土壤深度增加,土壤温度对 NO_3^- -N 含量正影响越小。

参 考 文 献

- [1] 夏仕明,陈洁,蒋玉兰,等. 稻田 N_2O 排放影响因素与减排研究进展[J]. 中国稻米,2017,23(2): 5-9.
XIA Shiming, CHEN Jie, JIANG Yulan, et al. Advances in nitrous oxide emission and its reduction in rice field[J]. China Rice, 2017, 23(2): 5-9. (in Chinese)
- [2] IPCC. Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report, climate change 2013: the physical science basis: summary for policymakers[R/OL]. [2013-10-28]. <http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM-Approved27Sep2013.pdf>.
- [3] 韩圆圆,曹国军,耿玉辉,等. 农业废弃物还田对黑土温室气体排放及全球增温潜势的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 36-42.
HAN Yuanyuan, CAO Guojun, GENG Yuhui, et al. Effects of agricultural wastes on greenhouse gas emission and global warming potential in black soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(5): 36-42. (in Chinese)
- [4] MEIJIDE A, GRUENING C, GODED I, et al. Water management reduces greenhouse gas emissions in a Mediterranean rice paddy field[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 238: 168-178.
- [5] 徐莹莹,刘玉涛,王俊河,等. 水稻旱直播研究现状及发展前景[J]. 黑龙江农业科学, 2018(6): 150-152.
XU Yingying, LIU Yutao, WANG Junhe, et al. Research status and development prospect of rice direct seeding in dry land[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018(6): 150-152. (in Chinese)
- [6] 刘红江,陈留根,郑建初,等. 不同播栽方式对水稻产量形成和经济效益的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 474-479.
LIU Hongjiang, CHEN Liugen, ZHENG Jianchu, et al. Effects benefits of different planting modes on grain yield formation and economic of rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(3): 474-479. (in Chinese)
- [7] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 262-269. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170830&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.030. (in Chinese)
- [8] 杨静,聂三安,杨文浩,等. 不同施肥水稻土可溶性有机氮组分差异及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 955-966.
YANG Jing, NIE San'an, YANG Wenhao, et al. Effects of various influencing factors of soil soluble organic nitrogen components under different long-term fertilization treatments in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 955-966. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] WU Qicong, ZHANG Congzhi, LIANG Xuequan, et al. Elevated CO_2 improved soil nitrogen mineralization capacity of rice paddy[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136438.
- [11] 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.
- [12] 王晓琪,姚媛媛,陈宝成,等. 淹水条件硝态氮和铵态氮配施对水稻生长与土壤养分的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 254-261.
WANG Xiaoqi, YAO Yuanyuan, CHEN Baocheng, et al. Effects of combined application of nitrate and ammonium on rice growth and soil nutrients under flooding conditions[J]. Soils, 2020, 52(2): 254-261. (in Chinese)
- [13] 张忠学,陈鹏,聂晔哲,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/OL]. 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 models on nitrogen distribution and availability in paddy soils[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 210-219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.025. (in Chinese)
- [14] 石英,冉炜,沈其荣,等. 不同施氮水平下旱作水稻土壤无机氮的动态变化及其吸氮特征[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(2): 61-65.
SHI Ying, RAN Wei, SHEN Qirong, et al. Dynamics of soil inorganic N in rice crop cultivated on upland condition and N

- absorption by rice supplied with different N fertilizer rate[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*,2001,24(2): 61 - 65. (in Chinese)
- [15] 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*,2004,15(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*,2004,15(3): 280 - 285. (in Chinese)
- [16] 葛会敏,陈璐,于一帆,等. 稻田甲烷排放与减排的研究进展[J]. *中国农学通报*,2015,31(3): 160 - 166.
GE Huimin,CHEN Lu,YU Yifan, et al. Advances in methane emission and emission reduction in rice field [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2015,31(3): 160 - 166. (in Chinese)
- [17] CORTON T M,BAJITA J B,GROSPE F S, et al. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in central Luzon (Philippines) [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2000,58(1 - 3): 37 - 53.
- [18] ANJANI K,NAYAK A K,DAS B S, et al. Effects of water deficit stress on agronomic and physiological responses of rice and greenhouse gas emission from rice soil under elevated atmospheric CO₂ [J]. *Science of the Total Environment*,2019,650: 2032 - 2050.
- [19] 彭世彰,侯会静,徐俊增,等. 节水灌溉对稻田 N₂O 季节排放特征的影响[J]. *农业工程学报*,2011,27(8): 14 - 18.
PENG Shizhang,HOU Huijing,XU Junzeng, et al. Effects of water-saving irrigation on seasonal characteristics of N₂O emission from paddy fields [J]. *Transactions of the CSAE*,2011,27(8): 14 - 18. (in Chinese)
- [20] 魏海苹,孙文娟,黄耀. 中国稻田甲烷排放及其影响因素的统计分析[J]. *中国农业科学*,2012,45(17): 3531 - 3540.
WEI Haiping,SUN Wenjuan,HUANG Yao, et al. Statistical analysis of methane emission from rice fields in China and the driving factors [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2012,45(17): 3531 - 3540. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 张浪,徐华勤,李林林,等. 再生稻和双季稻田 CH₄ 排放对比研究[J]. *中国农业科学*,2019,52(12): 2101 - 2113.
ZHANG Lang,XU Huaqin,LI Linlin, et al. Comparative study on CH₄ emission from ratoon rice and double-cropping rice fields [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2019,52(12): 2101 - 2113. (in Chinese)
- [23] 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)
- [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)
- [25] 彭程琳,崔远来,才硕,等. 水肥管理对鄱阳湖流域稻田温室气体排放的影响[J]. *农业工程学报*,2020,36(16): 85 - 93.
PENG Zenglin,CUI Yuanlai,CAI Shuo, et al. Effects of different water and fertilizer managements on greenhouse gas emissions of rice fields in Poyang Lake Basin [J]. *Transactions of the CSAE*,2020,36(16): 85 - 93. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 奚振邦. 硝态氮与铵态氮[J]. *磷肥与复肥*,2011,26(1): 62 - 65.
XI Zhenbang. Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*,2011,26(1): 62 - 65. (in Chinese)
- [28] 杨士红,彭世彰,徐俊增. 控制灌溉稻田部分土壤环境因子变化规律[J]. *节水灌溉*,2008(12): 1 - 4, 8.
YANG Shihong,PENG Shizhang,XU Junzeng. Study on impacts of soil moisture condition on paddy soil environment under water-saving irrigation [J]. *Water Saving Irrigation*,2008(12): 1 - 4, 8. (in Chinese)