文章编号:1672-3317(2019)01-0014-08

# 不同灌溉模式寒地稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放特征及增温潜势分析

# 王长明1,张忠学1\*,吕纯波2,郑恩楠1,贠宁晗1

(1.东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨150030;2.黑龙江省农田水利管理中心,哈尔滨150001)

摘要:【目的】寻求黑龙江省寒地稻田的适宜灌溉方式。【方法】采用静态箱-气相色谱田间观测的方法,设置控制灌溉、间歇灌溉和淹水灌溉3种灌溉方式,展开了对寒地水稻生长季CH4和N2O排放特征及其增温潜势方面的研究。 【结果】①稻田CH4排放主要集中在分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期。与淹水灌溉相比,控制灌溉、间歇灌溉能显 著减少CH4排放量(P<0.01),其中控制灌溉减少56.29%,间歇灌溉减少26.59%。②土壤干湿交替的晒田期和施加 穗肥7d后是稻田N2O排放的主要时期,返青期有明显的负排放现象发生。施加穗肥后,控制灌溉稻田N2O排放首 先达到排放高峰,比间歇灌溉和淹水灌溉提前了6d。控制灌溉和间歇灌溉N2O排放量与淹水灌溉相比分别增加了 55.6%和56.0%。③淹水灌溉稻田CH4排放量与5 cm土壤温度显著正相关(P<0.01),控制灌溉稻田N2O排放量与 15 cm土壤温度显著正相关(P<0.01)。不同深度土壤温度、气温对间歇灌溉稻田CH4和N2O排放均有显著影响。淹 水灌溉CH4和N2O排放受土壤温度影响显著,其影响大小与不同灌溉方式有关。【结论】不同灌溉模式影响了寒地稻 田CH4和N2O排放特征,控制灌溉既降低了增温潜势又增加了籽粒产量,是一种较优的灌溉模式。

关键词:稻田;灌溉;气体排放;增温潜势

中图分类号:S274.3; X173 文献标志码:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0321 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.

# 0 引 言

CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O 是仅次于 CO<sub>2</sub>的温室气体,在 100 a 尺度上两者的全球增温潜势分别是 CO<sub>2</sub>的 25 倍和 298 倍<sup>[1]</sup>。农业生产是人为活动温室气体(GHG)的主要排放源之一<sup>[2]</sup>,排放的温室气体量约占人类活动总排放量 的 14%<sup>[3]</sup>,因此研究农田生态系统温室气体排放对制定减缓全球气候变暖的方案有重要意义。稻田是最重 要的 CH<sub>4</sub>人为排放源之一<sup>[4]</sup>,随着水稻种植面积不断扩大,CH<sub>4</sub>排放量也将进一步增多<sup>[5]</sup>。旱地和非饱和水稻 土是 N<sub>2</sub>O 的主要排放源之一,稻田排放的 N<sub>2</sub>O 约占农田系统的 10%左右,随着化肥和有机肥施用量不断增 加,农业 N<sub>2</sub>O 排放量到 2030 年将增长 35%~60%<sup>[6-7]</sup>。地域和水资源的差异性,导致中国稻田水分管理方式多 样化,因此研究不同节水灌溉技术,寻求适宜的灌溉方式,对控制稻田 GHG 排放显得尤为重要。

水分管理是影响农田CH4和N2O排放的重要因素之一<sup>[8-11]</sup>,灌溉模式直接影响稻田土壤的含氧量。长期 处于厌氧状态的饱和水稻土,土壤还原电位低,有机质被甲烷菌分解生成CH4;土壤中N2O的产生主要是在 微生物的参与下通过硝化和反硝化作用完成,氧气压力主要通过控制反硝化酶的活性与合成进而影响反硝 化反应,而硝化反应则是在需氧条件下发生<sup>[12]</sup>。随着人们对水资源的逐渐重视,东北地区水稻种植已由传统 的淹水灌溉向节水灌溉模式转变<sup>[13]</sup>。水稻节水灌溉的特点是从水稻分蘖期开始,稻田处于浅水层、无水层或 脱水状态,土壤水分变化引起土壤环境的改变,直接影响了CH4和N2O的产生和排放<sup>[9]</sup>。有研究发现,三江平 原寒地稻田CH4排放主要集中在水稻生长季淹水期,而N2O排放通量很小<sup>[14]</sup>。Dong等<sup>[15]</sup>对哈尔滨市稻作区、 岳进等<sup>[16]</sup>对海伦稻作区研究均发现间歇灌溉能够降低温室气体的排放。彭世彰等<sup>[17]</sup>发现控制灌溉显著降低

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51779046)

作者简介:王长明(1992-),男。硕士研究生,主要从事农业水土工程及农业环境方面的研究。E-mail: charmingwang1992@163.com 通信作者:张忠学(1965-),男。教授,主要从事节水农业理论与技术方面的研究。E-mail: zhangzhongxue@163.com

收稿日期:2017-06-01

了稻田CH₄和N₂O的综合温室效应。本试验在大田条件下,监测不同灌溉模式寒地黑土稻田的CH₄和N₂O 排放通量,以确定寒地黑土稻田CH₄和N₂O排放的主要生育期,探究减缓黑龙江寒地黑土稻田GHG排放的 适宜灌溉模式,为准确估算中国稻田CH₄和N₂O排放量提供一定参考。

# 1 材料与方法

# 1.1 研究区概况

试验田位于黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站(125°44′E,45°63′N)研究基地内,处于第二、三积温带之间,是典型的寒带气候区。多年平均降水量550 mm,平均水面蒸发量750 mm,平均气温为2.5℃,作物主要生长期为156~171 d,全年无霜期128 d,平均日照时间2 600 h。该区土壤类型为白浆土型水稻土,土壤质量分数1.01 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度61.8%。土壤基本理化性质:有机质质量分数为41.4 g/kg,pH值为6.40,全氮量为1.08 g/kg,全磷量为15.23 g/kg,全钾量为20.11 g/kg,碱解氮量为154.36 mg/kg,有效磷量为25.33 mg/kg,速效钾量为157.25 mg/kg。

#### 1.2 试验设计

试验于2016年5月17日—9月20日进行。试验田所在区每3a秸秆还田1次,2016年为本轮次秸秆还 田第1年。在水稻品种、育秧、移栽、密度、植保等技术措施以及基础地力相同的条件下,设置控制灌溉、间歇 灌溉和淹水灌溉3种灌溉模式,采用全面试验,每个处理重复3次,共计9个小区。各小区面积100m<sup>2</sup>(10m× 10m),小区四周加设保护行,保护行内水稻品种、灌溉模式及农艺措施等均与保护区内相同。每小区中央 距离周边4m处选取固定采集气样地点,用于放置人工采样静态暗箱。

返青期各处理田面保持较深水层,分蘖末期进行晒田。控制灌溉稻田除施肥、打药、除草等生产性要求 外不再建立灌溉水层,以根层土壤含水率作为灌溉水调控指标;间歇灌溉将每次灌溉水量分次灌入田面;淹 水灌溉为当地传统灌水方式,稻田除分蘖后期晒田、黄熟期自然落干外,在生育期的其他时间田面均维持 10~50 mm水层。各处理田面水层深度控制设计如表1所示。

	表] 水稻不同生育阶段各处理田面水层深度							mm
历天田	5月18—24日	5月25日—7月7日		7月8—25日	7月26日—8月4日	8月5—24日	8月25日—9月10日	
处理	返青期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	灌浆期	黄熟期
控制灌溉	10~30	85% <i>θ</i> s∼0	85% <i>θ</i> s~0	晒田	85% <i>θ</i> s∼0	85% <i>θ</i> s~0	70% <i>θ</i> s∼0	自然落干
间歇灌溉	10~30	0~30	0~30	晒田	0~30	0~30	0~30	自然落干
淹水灌溉	10~30	10~50	10~50	晒田	10~50	10~50	10~50	自然落干

注 θ<sub>s</sub>为土壤饱和含水率(53.33%)。

供试水稻品种为龙庆稻3号,5月18日移栽,种植密度为30 cm×10 cm,33 穴/m<sup>2</sup>,9月10日收割。试验 均施纯氮110 kg/hm<sup>2</sup>,五氧化二磷45 kg/hm<sup>2</sup>,氧化钾80 kg/hm<sup>2</sup>。磷肥作基肥一次施用;钾肥分基肥和8.5 叶 龄(幼穗分化期)2次施用,前后比例为1:1。尿素按照基肥、蘖肥、穗肥以比例5:2.5:2.5分期施用。5月6日 施基肥,5月31日、7月19日分别施尿素(含N量≥46.4%)59.26、59.26 kg/hm<sup>2</sup>作为分蘖肥和穗肥。水稻生育 期为127 d。

# 1.3 气体样品采集

田间气样采集于水稻本田生长期进行,在水稻各主要生育阶段采集气体样品,生育旺盛阶段加测,如遇 强降雨天气推迟采样时间。气象数据来自试验站DZZ2型自动气象站(天津气象仪场)(图1)。



图1 2016年水稻生育期内气温及降雨量

采用人工静态暗箱法原位采集气样<sup>[17]</sup>。箱体由5mm厚的有机玻璃制成,箱外包一层铝箔,以减小由于

太阳辐射引起采样器件箱内温度变化。水稻生育前期箱体高度60 cm,后期增加到110 cm。箱体侧面接入采气管,采气管深入箱内25 cm,末端链接三通阀,以连接采气袋(大连海得,120 mL)与注射器(50 mL),每个处理分别在第0、10、20、30 min各采集1次,每次连续抽取2次作为1个气体样品并转入采气袋中。在10:00—13:00采样<sup>[13]</sup>。

# 1.4 气体分析及通量计算

气体物质的量浓度采用气象色谱GC-2010(日本岛津)手动进样测定,CH₄检测器为FID(氢火焰离子化 检测器),检测温度200℃,柱温60℃,载气为高纯N₂,流速30 cm³/min;N₂O检测器为ECD(电子捕获检测 器),检测温度250℃,柱温60℃,载气为氩甲烷气(95%氩气+5%甲烷),流速30 cm³/min。标准气体由大连 大特气体有限公司提供。

对每组4个样品物质的量浓度与对应的采样间隔时间进行直线回归求得气体物质的量浓度变化率。累积排放量是平均排放通量乘以整个水稻生长期总小时数,CH4和N2O排放通量<sup>[18]</sup>,计算式为:

$$F = \rho \cdot h \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot \frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} \quad , \tag{1}$$

式中:F为 CH<sub>4</sub>排放通量(mg/(m<sup>2</sup>·h))和 N<sub>2</sub>O 排放通量( $\mu$ g/(m<sup>2</sup>·h)); $\rho$ 为 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 在标准状态下密度 (0.714 kg/m<sup>3</sup>和1.964 kg/m<sup>3</sup>);h为箱内有效高度(m),田面有水层时为水面到达箱顶内高度,无水层时为箱体 内部自身高度(生育前期和后期分别为0.6和1.1 m);T为箱内平均温度( $\mathbb{C}$ ); dc/dt 为箱内 CH<sub>4</sub>物质的量浓 度(mL/(m<sup>2</sup>·h))和 N<sub>2</sub>O( $\mu$ L/(m<sup>2</sup>·h))物质的量浓度随时间的变化率。

#### 1.5 全球增温潜势计算

全球增温潜势(global warming potential, GWP)的计算以CO<sub>2</sub>作为参考气体(GWP值为1),在100 a时间 尺度气候变化中, CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O气体GWP值分别为25和298<sup>III</sup>, 其综合温室效应( $GWP_s$ , kg/hm<sup>2</sup>, 以CO<sub>2</sub>计)的计 算式为:

$$GWP_{s} = CH_{4} \# \dot{m} \pm 25 + N_{2}O \# \dot{m} \pm 298 \quad (2)$$

#### 1.6 数据处理与分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 22 进行统计分析[19],采用最小显著性差异法(LSD)法进行方差分析。

# 2 结果与分析

# 2.1 不同灌溉模式CH4和N2O的排放特征

#### 2.1.1 CH4排放特征

CH<sub>4</sub>排放特征如图2所示,图中箭头表示施加氮肥,5月6日施基肥,5月31日、7月19日分施追肥,下同。 由图2可知,在移栽后第19天(6月4日),各处理CH<sub>4</sub>排放通量明显上升。晒田初期(移栽后41d)CH<sub>4</sub>排放量 达第1个高峰,节水灌溉模式稻田CH<sub>4</sub>排放量(14.90~20.04 mg/(m<sup>2</sup>·h))明显小于淹水灌溉(34.79 mg/(m<sup>2</sup>·h)) (P<0.05)。复水后(7月7日),各处理CH<sub>4</sub>排放量逐渐上升。在移栽后第59天(7月14日),控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub>排放达到最高峰(19.90 mg/(m<sup>2</sup>·h)),7d后(7月21日),间歇灌溉和淹水灌溉达第2个排放高峰,分别为 38.22和32.49 mg/(m<sup>2</sup>·h)。控制灌溉排放最高峰值较淹水灌溉减少了42.8%,而间歇灌溉增加了9.9%。移 栽后第93天(8月17日),节水灌溉模式下CH<sub>4</sub>排放通量迅速上升,随后各处理CH<sub>4</sub>排放通量在较低水平波动 (-0.03~0.48 mg/(m<sup>2</sup>·h)),直至水稻收获期。



图2 不同灌溉模式下稻田CH4排放特征

#### 2.1.2 N<sub>2</sub>O 排放特征

N<sub>2</sub>O排放特征如图3所示。从图3可以看出,施用分蘖肥(5月31日)后第4天(6月4日),控制灌溉N<sub>2</sub>O 排放量略有上升,7d后(6月11日)间歇灌溉排放量也明显增加,而淹水灌溉稻田排放量一直处于较低水 平。排水晒田期,间歇灌溉N<sub>2</sub>O出现第1个排放高峰。施用穗肥后(7月19日),各处理N<sub>2</sub>O排放明显上 升。控制灌溉于穗肥施用第6天(7月25日)激增,排放量首先达到最高峰(76.41 μg/(m<sup>2</sup>·h)),6d后(7月31 日)间歇灌溉和淹水灌溉也达到排放最高峰,分别为39.40和60.42 μg/(m<sup>2</sup>·h)。控制灌溉模式N<sub>2</sub>O排放量峰 值的出现时间明显提前,且峰值比淹水灌溉增加了26.46%,而间歇灌溉比淹水灌溉减少了34.8%。随后控 制灌溉和淹水灌溉N<sub>2</sub>O排放量逐渐下降,而间歇灌溉在乳熟期(8月17日)N<sub>2</sub>O排放通量又达另一峰值 (27.24 μg/(m<sup>2</sup>·h))。整个生育期,间歇灌溉N<sub>2</sub>O平均排放通量最大,淹水灌溉最低。





# 2.2 水稻不同生育阶段稻田CH4和N2O排放通量

水稻不同生育阶段稻田CH4和N2O的排放通量变化如表2所示。从表2可以看出,控制灌溉稻田CH4排 放通量除拔节孕穗期较高,其余各时期均处于较低水平。间歇灌溉稻田CH4排放量主要集中在分蘖中期和 拔节孕穗后期,且拔节孕穗后期CH4排放通量比其他生育期明显增加。淹水灌溉稻田CH4排放量从分蘖中 期开始到抽穗开花期结束一直处于较高水平,其中以分蘖后期和拔节孕穗后期最大。与淹水灌溉相比,节 水灌溉模式在分蘖后期和抽雄开花期CH4排放通量显著减少(P<0.05),说明灌溉模式导致的土壤环境变化 对水稻不同生育期CH4排放通量大小有直接影响。各处理N2O阶段排放通量在稻田干湿交替的分蘖后期和 施加穗肥后的拔节孕穗后期及抽雄开花期较大。分蘖后期控制灌溉和间歇灌溉的N2O排放通量明显增加, 而淹水灌溉的N2O排放通量增加不明显,甚至有减小的趋势。施加穗肥后,控制灌溉稻田N2O排放通量首先 在拔节孕穗后期达到高排放阶段,并一直持续至抽雄开花期,而间歇灌溉和淹水灌溉在抽穗开花期达阶段 排放最大值,其中间歇灌溉高排放持续到乳熟期。故除田间灌溉管理影响了N2O排放外,氮肥的施用特别 是后期追施氮肥也对N2O的排放有重要影响。

表2	水稻不同生	上育阶段稻田	CH4和N2O	的排放通量
----	-------	--------	---------	-------

	从珊	近主相	分蘖期		拔节马	<b></b> 連穂期	抽油工业相	创新和	本計和	
1日 4小	处理	必有别 -	前期	中期	后期	前期	后期	加德开化别	7170777	與熱翔
011 批批活具/	淹水灌溉	0.07a	0.07a	14.17a	21.51a	16.99a	21.44a	12.21a	4.70a	0.10b
CH4排放 <b>迪</b> 里/	间歇灌溉	0.08a	-0.04a	12.26a	8.85b	8.95a	28.9a	6.39b	5.79a	0.09b
(Ing III II )	控制灌溉	-0.08a	-0.02a	3.81b	6.94b	11.87a	8.63b	3.44b	5.20a	0.31a
いっ批社活具	淹水灌溉	-10.52a	5.09b	8.22b	7.93c	3.55b	19.14b	40.24a	6.56c	0.20c
N <sub>2</sub> O排放理重/	间歇灌溉	-6.64b	7.04b	10.72a	19.22a	10.64a	19.21b	33.69a	20.02a	7.37a
(µg·m·m)	控制灌溉	-6.24b	10.26a	7.15b	11.94b	8.63a	43.56a	33.12a	14.15b	3.77b

注 同一列数值后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

# 2.3 温度对稻田 CH4和 N2O 排放通量的影响

表3为CH₄和N₂O排放通量与不同土层土壤温度和气温的相关系数。采样期内土壤温度在13.4~31.25 ℃ 之间波动。从表3可以看出,淹水灌溉条件下,CH₄排放通量与土壤温度显著正相关(P<0.05),与气温相关 关系不显著,N₂O排放通量与土壤温度和气温相关关系均不显著;间歇灌溉条件下,CH₄排放通量与土壤温 度和气温的相关关系与淹水灌溉条件下相似,N₂O排放通量与气温和10、15 cm 土层土壤温度显著正相关 (P<0.05),但与5 cm 土层土壤温度无显著相关关系;控制灌溉条件下,CH4排放通量与土壤温度和气温均无显著相关关系,N<sub>2</sub>O排放通量与10 cm 和15 cm 土层土壤温度显著相关(P<0.05),但与气温和5 cm 土层土壤温度相关关系不显著。

	秋了 CH44-1020 新秋道至马尔特工法工家温及尔 C加时相关示数						
	かい田		<b></b> 岸泪				
处理		5 10		15	C 4mi		
	控制灌溉	0.250	0.304	0.351	0.025		
$CH_4$	间歇灌溉	0.468*	0.509*	0.476*	0.191		
	淹水灌溉	0.598**	0.569*	0.538*	0.262		
	控制灌溉	0.390	0.541*	0.624**	0.294		
$N_2O$	间歇灌溉	0.441	0.500*	0.519*	0.525*		
	淹水灌溉	0.246	0.342	0.385	0.396		

表3 CH4和N2O排放通量与不同土层土壤温度和气温的相关系数

注 \*为0.05水平显著;\*\*为0.01水平显著。

#### 2.4 不同灌溉模式下CH4和N2O综合温室效应及单位产量温室效应

不同灌溉模式下稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的综合温室效应及单位产量温室效应见表4。由表4 可知,不同灌溉模式的稻田 CH<sub>4</sub>累积排放量顺序为淹水灌溉>间歇灌溉>控制灌溉。控制灌溉和间歇灌溉减少 CH<sub>4</sub>累积排放量 (*P*<0.05)的同时,增加了稻田 N<sub>2</sub>O 排放量 (*P*<0.05)。控制灌溉和间歇灌溉 N<sub>2</sub>O 累积排放量分别比淹水灌溉 (0.250 kg/hm<sup>2</sup>)增加了 55.6%和 56.0%。对比 *GWP*。值可以看出,淹水灌溉产生的综合温室效应最大,控制灌溉和间歇灌溉稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的综合 *GWP*。较淹水灌溉稻田显著减少(*P*<0.05),且控制灌溉减幅达 55.26%, 间歇灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 减幅为 25.83%。

间歇灌溉和淹水灌溉产量相近(P=0.314),控制灌溉提高了水稻籽粒产量(P<0.05)。对比每生产1kg水稻造成的温室效应,各处理单位产量温室效应差异明显(P<0.05),控制灌溉和间歇灌溉能有效减少稻田单位产量温室效应,其中控制灌溉小于间歇灌溉。结合减排量与产量来看,控制灌溉减排效果明显并且能够增加籽粒产量。

表4 不同灌溉模式下稻田CH4和N2O的综合温室效应及单位产量温室效应

h						
	处理	CH <sub>4</sub> 累积排放量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	N <sub>2</sub> O累积排放量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	综合温室效应 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	单位产量温室效应/(kg·kg <sup>-1</sup> )
	控制灌溉	141.289±5.66c	0.389±0.018a	3648.147c	9635.7±298.7a	0.379c
	间歇灌溉	237.282±11.88b	0.390±0.010a	6048.270b	7915.5±227.9b	0.764b
	淹水灌溉	323.219±35.19a	0.250±0.024b	8154.975a	8164.3±113.2b	0.999a
Î						

注 表中数值为均值±标准差。

# 3 讨论

#### 3.1 灌溉模式对稻田 CH4排放的影响

稻田水分管理条件是影响CH4排放的重要因素之一。土壤中有氧环境或无氧环境的形成受土壤水分状况的影响,而灌溉模式直接影响了土壤水分状况。Mori等<sup>[20]</sup>通过对日本火山草原土壤的研究发现,土壤含水率与CH4排放通量显著正相关。研究表明,控制灌溉稻田CH4排放峰值多出现在土壤脱水后第1~2天,且稻田水层消失后会引起CH4短暂的剧烈排放<sup>[9]</sup>。本试验各处理CH4在分蘖后期与拔节孕穗期均有明显排放(表2)。分蘖后期出现CH4排放高峰,这与Kreye等<sup>[21]</sup>研究结果一致,出现这种情况的原因是稻田表层水的突然消失或土壤突然脱水,改善了土壤中CH4的排放途径,使淹水期产生的大量闭蓄在土壤中的CH4短时间大量释放。从整个生育期来看,控制灌溉稻田土壤的脱水状态使稻田CH4长期处于低排放状态;间歇灌溉的薄水层状态改善了土壤环境,除拔节孕穗后期CH4排放量明显高于淹水灌溉,其余时期排放量较淹水灌溉低。除分蘖期外,各处理在拔节孕穗期CH4均有明显的排放,该排放特征与南方稻田的观测结果不同<sup>[9,224]</sup>,黑龙江寒地水稻生育期、日均温及土壤有机质量和南方有所差异,因此水稻生育期CH4排放特征也有所不同。

Ahn等<sup>[25]</sup>通过田间试验发现稻田节水灌溉 CH,排放量比常规淹水灌溉减少78%。但不同的节水灌溉方式对 CH4的减排程度有很大差异。Xu等<sup>[26]</sup>发现,间歇湿润灌溉和间歇干燥灌溉 CH4排放通量分别比长期淹水灌溉条件下减少了60%和83%。袁伟玲等<sup>[27]</sup>对长江中游稻田气体排放的研究发现,间歇灌溉 CH4排放量比长期淹水灌溉减少了46.23%。Yang等<sup>[28]</sup>发现控制灌溉条件下稻田 CH4排放量比淹水灌溉减少了79.1%。本试验中,控制灌溉条件下土壤的脱水-复水过程及间歇灌溉条件下水层频繁变化,使土壤通气状况得到极

大改善,破坏了产生甲烷菌群的厌氧生存条件,可能是控制灌溉和间歇灌溉CH4排放减少的主要原因。同时,节水灌溉条件下水稻植株受水分胁迫的影响,可能会关闭部分气孔,减少CH4通过植株体的排放<sup>[29]</sup>。相比淹水灌溉,控制灌溉在分蘖期及拔节孕穗期CH4排放通量降低显著,而间歇灌溉在拔节孕穗期CH4排放通量降低显著,两者CH4累积排放量分别减少了26.59%和56.29%。

## 3.2 灌溉模式对稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响

稻田N<sub>2</sub>O是土壤中微生物硝化与反硝化过程的中间产物,而水和氮肥是影响N<sub>2</sub>O排放量的2个主要因子<sup>[9]</sup>。陈书涛等<sup>[30]</sup>发现稻田N<sub>2</sub>O排放主要集中在水分变化剧烈的干湿交替阶段。于亚军等<sup>[31]</sup>通过对成都平原水稻-油菜轮作研究,发现在施用基肥和追肥1周左右各观测到1次N<sub>2</sub>O排放。本试验稻田N<sub>2</sub>O排放主要在分蘖后期和追施穗肥7d后,而在返青期有负排放现象出现。返青期淹水后土壤中的有机氮矿化受到抑制<sup>[8]</sup>,不利于N<sub>2</sub>O形成。另外,初期作物通气组织不发达,减少了N<sub>2</sub>O通过植株体的输出<sup>[23]</sup>。施加分蘖肥和穗肥后,增加了土壤氮源,促进了N<sub>2</sub>O的排放,其中穗肥施加后N<sub>2</sub>O排放量显著增加。2次追肥施加后控制灌溉稻田N<sub>2</sub>O排放峰值均提前7d左右出现,且控制灌溉N<sub>2</sub>O排放最大峰值明显高于间歇灌溉和淹水灌溉。为了提高氮肥利用率,控制灌溉稻田在施追肥后田面保持短期的水层,水层的出现封闭了较深土层中原有的部分空气,土壤含氧量相对间歇灌溉和淹水灌溉较高,利于硝化反应的进行,但是土壤中NO<sub>3</sub>、基质的增多又促进了反硝化反应的进行,使中间产物N<sub>2</sub>O短期内大量生成,这可能是控制灌溉稻田N<sub>2</sub>O排放峰值提前出现的主要原因。除稻田水分管理模式外,追肥等栽培管理措施也影响了寒地稻田N<sub>2</sub>O的排放。

控制灌溉和间歇灌溉稻田地表无水层或低水层状态,利于土壤中生成的N<sub>2</sub>O直接排放,降低了N<sub>2</sub>O还原为N<sub>2</sub>的概率,增加了稻田N<sub>2</sub>O的排放量。Jiao等<sup>[32]</sup>发现间歇灌溉比淹水灌溉水稻稻田N<sub>2</sub>O排放量增加了23.72%。Hou等<sup>[33]</sup>通过对中国东南部区域的稻田研究,发现控制灌溉N<sub>2</sub>O排放量比淹水灌溉增加了135.4%。本试验中,控制灌溉N<sub>2</sub>O排放增加幅度(55.45%)略小于间歇灌溉(56.16%),N<sub>2</sub>O排量增加主要是由于土壤的干湿交替和水层频繁的交替变化,增加了微生物死亡量,打乱了土壤环境和有机物之间的相互作用,使得土壤有效碳和氮的矿化量增加,土壤的硝化和反硝化量显著高于淹水灌溉土壤<sup>[34:35]</sup>。淹水灌溉条件下土壤长期处于还原态,抑制了硝化作用,NO3基质得不到补充,反硝化作用随之减弱,且土壤空隙少,阻碍了深层土壤N<sub>2</sub>O向地表扩散<sup>[36]</sup>。从整个生育期来看,间歇灌溉水层频繁交替变化、控制灌溉追肥的施加是导致节水灌溉N<sub>2</sub>O累积排放量较大的主要原因。

# 4 结 论

1)灌溉模式影响了寒地稻田 CH4和 N2O 的最大排放量及水稻生育期排放规律。与淹水灌溉相比,控制 灌溉条件下 CH4峰值下降 42.8%, N2O 峰值提高 26.46%;间歇灌溉条件下 CH4峰值提高 9.9%, N2O 峰值下降 34.8%。间歇灌溉和控制灌溉减少了 CH4的排放量但增加了 N2O 的排放量,增减幅度因田间水分管理方式不 同有所差异。

2)寒地稻田 CH4和 N<sub>2</sub>O 排放与土壤温度和气温具有明显的相关性。灌溉模式影响了 CH4和 N<sub>2</sub>O 排放与 地温和气温的相关性。因此,在研究不同灌溉模式稻田温室气体减排时,应考虑到地温和气温的影响。

3)与淹水灌溉相比,节水灌溉降低了稻田CH4和N2O综合温室效应。控制灌溉和间歇灌溉稻田CH4和N2O在100a尺度上综合增温潜势分别降低55.26%和25.83%,减排效果明显,且增加了产量。在黑龙江寒地黑土稻作区,综合考虑温室气体排放量及水稻产量,需要高度重视控制灌溉模式的推广及应用。

#### 参考文献:

- WGIIII. Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change: Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC[J]. Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.
- [2] NYAMADZA WO G, WUTA M, CHIRINDA N, et al. Greenhouse Gas Emissions from Intermittently Flooded (Dambo) Rice under Different Tillage Practices in Chiota Smallholder Farming Area of Zimbabwe[J]. Atmospheric & Climate Sciences, 2013, 3(4): 13-20.
- [3] BOUWMAN A F, BOUMANS L J M, BATJES N H. Emissions of N<sub>2</sub>O and NO from fertilized fields: Summaryof available measurement data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(4): 1 058-1 070.
- [4] HADI A, INUBUSHI K, YAGI K. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia[J]. Paddy Water Environment, 2010, 8(4): 319-324.
- [5] CAI Zucong, SHAN Yuhua, XU Hua. Effects of nitrogen fertilization on CH4 emissions from rice fields[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(4):

353-361.

- [6] 夏仕明,陈洁,蒋玉兰,等.稻田N2O排放影响因素与减排研究进展[J].中国稻米,2017,23(2):5-9.
- [7] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Agriculture Proceedings of the Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [8] LIU Shuwei, QIN Yanmei, ZOU Jianwen, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N<sub>2</sub>O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(4): 906-913.
- [9] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH.和 N2O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.
- [10] ZSCHOMACK T, ROSA C M D, PEDROSO G M, et al. Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions in subtropical paddy rice under alternative irrigation systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 105(1): 61-73.
- [11] AKINBILE C O, SEMOWO O R, BABALOLA T E, et al. Assessment of the influence of continuous and intermittent irrigation on greenhouse gas emissions from paddy rice[J], Jurnal Teknologi, 2016, 78(1-2): 1-7.
- [12] 陈慧,侯会静,蔡焕杰,等.加气灌溉温室番茄地土壤N<sub>2</sub>O排放特征[J].农业工程学报,2016,32(3):111-117.
- [13] 王孟雪,张忠学.适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田N2O排放增加水稻产量[J].农业工程学报,2015,31(15):72-79.
- [14] 王毅勇, 陈卫卫, 赵志春, 等. 三江平原寒地稻田 CH4、N2O 排放特征及排放量估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 170-176.
- [15] DONG Wenjun, GUO Jia, XU Lijun, et al. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: Field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017: 1-9.
- [16] 岳进, 梁巍, 吴杰, 等. 黑土稻田 CH4与 N2O 排放及减排措施研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2 015-2 018.
- [17] 彭世彰,侯会静,徐俊增,等.节水灌溉对稻田N<sub>2</sub>O季节排放特征的影响[J].农业工程学报,2011,27(8):14-18.
- [18] 郭小伟, 杜岩功, 李以康, 等. 高寒草甸植被层对于草地甲烷通量的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 146-152.
- [19] 孙艳玲, 何源, 李阳旭. SPSS 统计分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [20] MORI A, HOJITO M, SHIMIZU M, et al. N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from a volcanic grassland soil in Nasu, Japan: Comparison between manure plus fertilizer plot and fertilizer-only plot[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2008, 54(4): 606-617.
- [21] KREYE CHRISTINE, DITTERT KLAUS, ZHENG XUNHUA, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(3): 293-304.
- [22] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田CH4排放规律的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 9-13.
- [23] 侯玉兰, 王军, 陈振楼, 等. 崇明岛稻麦轮作系统稻田温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1 862-1 867.
- [24] 傅志强,朱华武,陈灿,等.双季稻田CH4和N2O排放特征及品种筛选研究[J].环境科学,2012,33(7):2475-2481.
- [25] 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.
- [26] XU YING, GE JUNZHU, TIAN SHAOYANG, 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: 1 043-1 052.
- [27] 袁伟玲,曹凑贵,程建平,等. 间歇灌溉模式下稻田 CH4和 N:O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4 294-4 300.
- [28] YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2012, 53(12): 30-37.
- [29] 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, 27(4): 740-749.
- [30] 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): 2 053-2 060.
- [31] 于亚军,朱波,王小国,等.成都平原水稻-油菜轮作系统氧化亚氮排放[J].应用生态学报,2008,19(6):1277-1282.
- [32] JIAO Zhihua, HOU Aixin, SHIYi, et al. Water management influencing methane and nitrous oxide emissions from rice field in relation to soil redox and microbial community[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2007, 37(13): 1 889-1 903.
- [33] HOU Huijing, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Seasonal variations of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J], 2012, 89(7): 884-892.
- [34] 梁东丽, Oveemteryd. 灌溉和降水对旱地土壤N2O 气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 298.
- [35] 徐文彬, 刘广深, 刘维屏. 降雨和土壤湿度对贵州早田土壤N<sub>2</sub>O释放的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 67-70.
- [36] TEEPER, BRUMME R, BEESE F. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(9): 1 269-1 275.

reliability index, water pressure and flow velocity of pipe network node were as constraint conditions, and on the basis of this, the optimization model of the self-pressurized tree tube network pipe diameter was established. The PSO algorithm and the SAPSO algorithm were used to solve the model under an example of analyzing the SUB-ASHI river water irrigation in Xinjiang. [Result] Comparing with the objective function cost under the same node water reliability, the SAPSO algorithm is lower than the PSO algorithm, and the optimization result is better. The statistical analysis of the relative deviation between the calculated results and the optimal solution of the SAPSO algorithm when the node's water reliability R=0.7 can be found that the probability of less than 10% is 97% and so the model is stable and the precision is high. [Conclusion] With considering the reliability of the pipeline network, the model can systematically reflect the operation of the self-pressure water delivery network in the whole life cycle, and the reliability of its operation result is high. And when the SAPSO algorithm is used to optimize the model, the optimization results will be more accurate and reliable. In a word, this method can provide reference for the pipe diameter optimization of similar projects.

Key words: network; pipe diameter; reliability; algorithm

责任编辑:白芳芳

(上接第20页)

# CH₄ and N₂O Emission from Paddy Field in Cold Region is Impacted by Irrigation Methods

WANG Changming<sup>1</sup>, ZHANG Zhongxue<sup>1\*</sup>, LYU Chunbo<sup>2</sup>, ZHENG Ennan<sup>1</sup>, YUN Ninghan<sup>1</sup>
(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2.Water Conservancy Management Center of Heilongjiang, Harbin 150001, China)

Abstract: [Objective] Microbial activities involved in biochemical reactions that emit greenhouse gases are modulated by soil moisture and the purpose of this paper is to examine how irrigations affect these biochemical processes in paddy field with a view to provide a guidance for managing paddy filed in cold region in Heilongjiang province. [Method] The field experiment compared three irrigation methods: control irrigation, intermittent irrigation and flood irrigation. In each treatment, we measured the change in CH4 and N2O emission, as well as their warming potential using the static chamber-gas chromatograph technique. [Result] ①In all treatments, CH<sub>4</sub> emitted mainly during the tillering booting and flowering stages. Compared to flood irrigation, control and intermittent irrigation both significantly reduced CH<sub>4</sub> emission (P < 0.01), with the control irrigation reducing by 56.29% and the intermittent irrigation by 26.59%. 2 The drying period during the dry-wet alternation and one week after the third nitrogen fertilization were the main emission period of  $N_2O$ , and there was a negative  $N_2O$  emission during the seeding establishment period. The N<sub>2</sub>O emission in control irrigation peaked after the third nitrogen fertilization, which was six days earlier than the time it peaked under the intermittent and flood irrigation. Compared with flood irrigation, the control and intermittent irrigation increased N2O emission by 55.6% and 56.0% respectively. (3) There was a significant correlation between  $CH_4$  emission and 5 cm soil temperature under flooded irrigation (P < 0.01), while under control irrigation the N<sub>2</sub>O emission was significantly correlated with 15 cm soil temperature (P<0.01). Soil temperature profile and atmospheric temperature combined to significantly affect CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission under intermittent irrigation, while CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions under flood irrigation was significantly regulated by soil temperature. [Conclusion] Irrigations do affect CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from paddy field in cold region, and our results showed that control irrigation not only reduces the warming potential but also increases grain yield.

Key words: paddy field; irrigation; greenhouse gas emission; global warming potential