

# 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放增加水稻产量

王孟雪<sup>1,2</sup>, 张忠学<sup>1\*</sup>

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江八一农垦大学农学院, 大庆 163319)

**摘要:** 2014 年在大田试验条件下, 设置控制灌溉、间歇灌溉、浅湿灌溉及淹灌 4 种水分管理模式, 采用静态暗箱-气相色谱法田间观测寒地水稻生长季  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征, 研究不同灌溉模式对寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响及  $\text{N}_2\text{O}$  排放对土壤环境要素的响应, 同时测定水稻产量, 以期对寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征研究提供对策。结果表明: 不同灌溉模式下  $\text{N}_2\text{O}$  排放的高峰均出现在水分交替频繁阶段, 水稻生育阶段前期, 各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放都处于较低水平, 泡田期几乎无  $\text{N}_2\text{O}$  排放。与淹灌相比, 间歇灌溉使  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量增加 47.3%, 控制灌溉和浅湿灌溉使  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量减少 40.7% 和 39.6%。寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与土壤硝态氮含量关系密切, 与土壤 10 cm 温度显著相关 ( $P < 0.05$ )。水稻生长期各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放顺序间歇灌溉 > 淹灌, 二者均显著高于浅湿灌溉和控制灌溉 ( $P < 0.05$ )。各处理水稻产量以浅湿灌溉最低、其他方式差异不显著。可见, 间歇灌溉有助于提高水稻产量, 但会促进稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。在综合考虑水稻产量及稻田温室效应的需求下, 控制灌溉为最佳灌溉方式, 应予以高度重视。该研究可为黑龙江寒地稻作区选择节水减排模式提供科学支撑。

**关键词:** 灌溉; 排放控制; 氮氧化物; 寒地稻作;  $\text{N}_2\text{O}$

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.010

中图分类号: S274.3; Q178.51<sup>6</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0072-08

王孟雪, 张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放增加水稻产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 72-79.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.010 <http://www.tcsae.org>

Wang Mengxue, Zhang Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing  $\text{N}_2\text{O}$  emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 72-79. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.010 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

温室气体的过量排放是气候变暖及一系列环境问题的重要根源<sup>[1]</sup>。氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 作为痕量温室气体之一, 与气候变化密切相关, 对温室效应的贡献率为 6%<sup>[2]</sup>。农业是温室气体重要的排放源之一, 其排放的温室气体量约占人类活动总排放量的 14%<sup>[3-4]</sup>, 其中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量分别占各自总排放量的 52% 和 84%<sup>[5]</sup>。稻田是  $\text{N}_2\text{O}$  主要生物排放源之一, 其排放主要受气候条件、土壤特性和农业管理措施等因素的影响。稻田土壤水分状况是影响土壤硝化与反硝化过程的最重要因素之一<sup>[6-9]</sup>, 也影响着水稻植株对土壤中氮肥的吸收利用。这就使得土壤中水分状况和氮素转化过程同时影响土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  的生成量, 也影响着稻田  $\text{N}_2\text{O}$  向大气的传输过程。曾有学者研究<sup>[10]</sup>, 通过提高农田氮肥的利用率, 减少由于氮肥施用所产生的  $\text{N}_2\text{O}$  间接排放。黄耀等<sup>[11]</sup>认为, 如果将中国目前的氮肥利用率提高 10% 左右, 则可降低 10% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排

放。灌溉模式不同, 稻田的氮肥利用率也会产生差异。因此, 在节水灌溉模式下, 提高氮肥的利用率, 对减少稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放起到重要作用。

目前, 国内对农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的研究较多<sup>[12-18]</sup>, 但多集中在南方水稻产区, 对寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的研究较少。黑龙江水稻种植面积达 6 000  $\text{hm}^2$ , 是全国最大的水稻种植区, 也是中国北方重要的商品粮基地。稻田的节水灌溉模式, 能有效改善稻田通透性和土壤含氧量, 使水稻根系活力增强, 提升对氮肥的吸收作用, 从而减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放。通过对寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放及主要影响因子进行研究, 分析节水灌溉模式对寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放规律、氮肥利用率及产量的影响, 探讨减缓黑龙江寒地稻田温室气体排放的节水灌溉模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2014 年在黑龙江省水稻灌溉试验中心站进行, 该站位于庆安县和平镇。多年平均降水量 500~600 mm, 多年平均气温为 2~3℃。作物水热生长期为 156~171 d, 全年无霜期 128 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候<sup>[19]</sup>。土壤类型为白浆土型水稻土, 容重 1.01  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 孔隙度 61.8%。土壤基本理化性质为: 有机质 41.4  $\text{g}/\text{kg}$ 、pH 值 6.40、全氮 1.08  $\text{g}/\text{kg}$ 、全磷 15.23  $\text{g}/\text{kg}$ 、全钾 20.11  $\text{g}/\text{kg}$ 、碱解氮 154.36  $\text{mg}/\text{kg}$ 、有效磷 25.33  $\text{mg}/\text{kg}$  和速效钾 157.25  $\text{mg}/\text{kg}$ 。

收稿日期: 2015-04-16 修订日期: 2015-06-10

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAD08B05)

作者简介: 王孟雪, 女, 黑龙江人, 博士生, 主要从事农业水土工程及农业环境方面的研究。哈尔滨 东北农业大学水利与建筑学院, 150030。

Email: wangmengxue1978@163.com.

\*通信作者: 张忠学, 男, 黑龙江人, 博士, 教授, 主要从事节水农业理论与技术方向研究。哈尔滨 东北农业大学水利与建筑学院, 150030。

Email: zhangzhongxue@163.com

1.2 试验设计

试验当地常规灌溉方式淹灌为对照,另外设计 3 种节水灌溉模式：控制灌溉、间歇灌溉、浅湿灌溉。各处理重复 3 次。淹灌处理田面水层较深，由于黑龙江春季气温较低，淹水状态有利于插秧后返青，因此在返青期田面保持较深

水层，为减少水稻无效分蘖，分蘖末期均进行晒田。控制灌溉模式田面不建立水层，主要应用灌溉方式来调节土壤含水率；间歇灌溉将每次灌溉水量分次灌入田面，田面无明显水层；浅湿灌溉处理田面水层深度较浅，又称“浅灌、勤灌”。不同处理土壤水分设计如表 1 所示。

表 1 稻田生育期内各处理土壤水分管理方式

Table 1 Water management of different irrigation management pattern in rice growth stages

处理 Treatment	返青期 Seeding Establishment	分蘖初 Early tillering	分蘖盛 Filled tillering	分蘖末 Later tillering	拔节孕穗 Jointing and Booting	抽雄开花 Bloom	灌浆 Grouting	黄熟 Yellow Ripe
控制灌溉 Control irrigation	水层 0~30 mm	0.7 $\theta_s$	0.7 $\theta_s$	晒田	0.8 $\theta_s$	0.8 $\theta_s$	0.7 $\theta_s$	落干
间歇灌溉 Intermittent irrigation	水层 0~30 mm	水层 0~40 mm	水层 0~40 mm	晒田	水层 0~30 mm	水层 0~40 mm	水层 0~40 mm	落干
浅湿灌溉 Wet irrigation	水层 0~30 mm	水层 0~30 mm	水层 0~20 mm	晒田	水层 0~10 mm	水层 0~20 mm	水层 0~20 mm	落干
淹灌 Flood irrigation	水层 0~30 mm	水层 0~40 mm	水层 0~40 mm	晒田	水层 0~40 mm	水层 0~40 mm	水层 0~40 mm	落干

注： $\theta_s$ 为根层土壤饱和含水率质量分数，85.5%。  
Note:  $\theta_s$  is saturated moisture content of root layer soil, 85.5%.

1.3 试验管理

共设置 12 个小区，各小区 100 m<sup>2</sup>，小区四周加设保护行。为减少侧向渗透，小区四周用塑料板埋入田间地表以下 40 cm 深进行防渗。每个小区安装水表及水尺控制灌溉水量和水层深度。在每个小区中央距离周边 4 m 处安置固定采集气样地点，用于放置 N<sub>2</sub>O 人工采样静态箱。

试验前均施尿素 105 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>。P 肥作基肥一次施用，K 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、调节肥、穗肥比例为 5:2.5:1:1.5 分施。

供试水稻品种为龙庆稻 2 号，4 月 10 日播种育苗，种植密度为 30 cm×10 cm，33 穴/m<sup>2</sup>。水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理条件相同。5 月 3 日施基肥，5 月 20 日移栽，5 月 28 日施返青肥，6 月 15 日施分蘖肥，7 月 9 日施穗肥，9 月 20 日收获。水稻生育期为 126d,分为返青期（5 月 20 日—5 月 29 日）、分蘖期（5 月 30 日—7 月 7 日）、拔节孕穗期（7 月 8 日—7 月 21 日）、抽雄开花期（7 月 22 日—8 月 1 日）、灌浆期（8 月 2 日—8 月 24 日）、黄熟期（8 月 25 日—9 月 10 日）。

1.4 样品采集

1.4.1 气体样品

田间 N<sub>2</sub>O 采集在 2014 年 5 月—9 月，于水稻生长的

各主要生育阶段采集气体样品，生育旺盛阶段加测，如遇强降雨天气则推迟取样时间，全生育期共采集 20 次气体样品，每次采取 3 个平行样。

采用静态箱法取气体样品，静态箱（哈尔滨晶维玻璃加工有限公司）由 5 mm 厚的透明有机玻璃做成，箱体外部用锡纸密封隔温。水稻生育前期箱体高度 60 cm，生育后期箱体高度增加至 110 cm。箱内顶部安装微型电风扇及数字温度计之温度探头，用来校正取样过程中箱内温度升高引起的气体质量计算误差。箱体侧面接入采气管，采气管进入箱内 25 cm，采气管末端连接三通阀，分别连接采气袋与注射器（60 mL）。每个处理分别在 0、10、20、30 min 各采集 1 次，每次以连续抽取 2 次作为 1 个气体样品，转入采气袋（120 mL）内。该试验站位于黑龙江省第四积温带，昼夜温差较大，因此将采样时间安排在 10:00—14:00 之间进行，此时采样最能代表当日气体排放平均水平的时刻<sup>[19-21]</sup>。

1.4.2 土壤样品

用土钻均匀取 0~20 cm 新鲜土样，装入泡沫保温箱内，放置冰袋保鲜，带回实验室冷冻贮存，测定土壤硝态氮和铵态氮含量。采样同时，同步测定每个小区的水层深度及土壤 10 cm 温度。气象数据由试验站 DZZ2 型自动气象站（天津气象仪器厂）自动记录（图 1）。

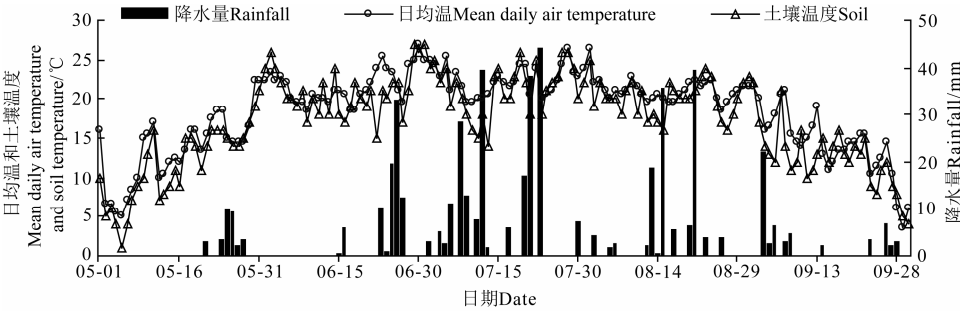


图 1 2014 年水稻生育期内气温、降水量及土壤 10 cm 处温度

Fig.1 Changes of atmospheric and soil temperatures and rainfall during rice growth stage in 2014

## 1.5 样品的测定

气体浓度采用气相色谱 GC-17A (日本岛津) 进行测定, 检测器为电子捕获检测器 ECD, 检测温度 330℃, 柱温 55℃, 载气为高纯 N<sub>2</sub>, 流速 30 cm<sup>3</sup>/min, 并加设除氧装置。标准气体由国家标准物质中心提供。

土壤铵态氮采用滴定法测定, 硝态氮采用比色法测定。同步称取对应处理的土样在 105℃ 下烘至恒质量后测定土壤含水率以便折算成干土质量。水稻成熟期各处理取样 5 株, 将整株水稻分为籽粒和茎秆 2 部分, 80℃ 恒温烘干后分别测定干物质质量。

## 1.6 计算方法和数据分析

稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量采用公式 (1) 计算<sup>[16]</sup>。

$$F = \rho \cdot h \cdot \frac{dc}{dt} \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

式中:  $F$  为 N<sub>2</sub>O 的排放通量,  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\rho$  为 N<sub>2</sub>O 在标准状态下的密度 1.964 kg/m<sup>3</sup> [21-22];  $h$  是箱体有效高度, m, 田面有水层时为水面到达箱顶高度, 无水层时候为箱体自身高度 (生育前期和后期分别为 0.6 和 1.1 m);  $\frac{dc}{dt}$  为采样过程中采样箱内 N<sub>2</sub>O 浓度变化率,  $\mu\text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ;  $t$  为采样箱内的平均温度, °C。  $p$  为采样箱内气压, 该地区属于

平原地区, 气压影响较小, 可等同于标准大气压, Pa;  $p_0$  为标准大气压, Pa。根据气样浓度与时间的关系曲线计算气体的排放通量, N<sub>2</sub>O 累积排放量是平均排放通量乘以相应的观测时间天数<sup>[23]</sup>。

试验数据采用 EXCEL2007 和 SPSS8.0 进行统计分析。均值之间的多重比较利用 Duncan's 分析, 统计显著性假设为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 节水灌溉对稻田生长季 N<sub>2</sub>O 排放的影响

#### 2.1.1 N<sub>2</sub>O 排放通量的季节变化特征

不同灌溉模式下稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量的变化特征较为相似 (图 2)。各处理在移栽后第 8 天 (5 月 28 日) 施用返青肥, 之后 N<sub>2</sub>O 排放通量略有上升, 但未出现明显排放高峰。在水稻移栽后第 25 天 (6 月 15 日), 施用分蘖肥后, 出现一个 N<sub>2</sub>O 排放小高峰。间歇灌溉处理的排放通量 (27.13  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 显著 ( $P < 0.05$ ) 大于淹灌处理 (14.56  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ), 控制灌溉处理的排放通量 (8.44  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 和浅湿灌溉处理 (8.71  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 接近, 均小于淹灌 ( $P < 0.05$ )。淹灌在其余时间 N<sub>2</sub>O 排放的波动都较小, 排放通量在 -38.5~76.4  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  之间。

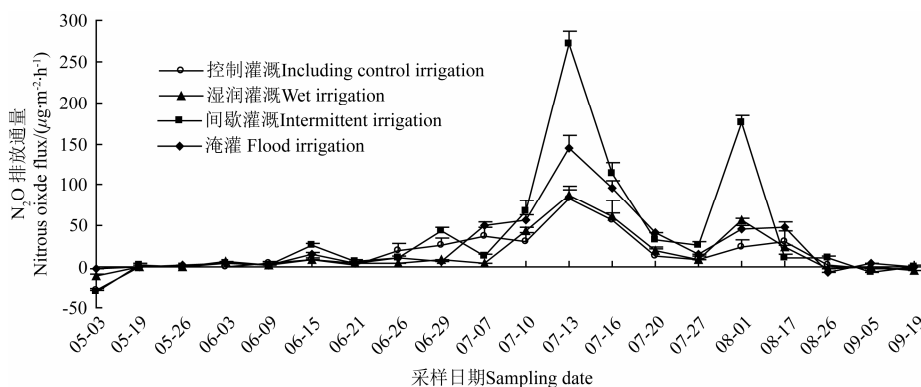


图 2 不同灌溉模式下稻田 N<sub>2</sub>O 排放季节变化

Fig.2 Seasonal variations of N<sub>2</sub>O emission from rice field under different irrigation models

在水稻移栽后第 31 天 (6 月 21 日) 起 N<sub>2</sub>O 排放通量开始上升, 并在穗肥施用后的第 3 天 (7 月 13 日) 达到排放最大高峰, 这可能是稻田施用穗肥的结果; 排放高峰过后各处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量逐渐下降, 在移栽后第 68 天 (7 月 13 日) 又出现一个 N<sub>2</sub>O 排放小高峰, 此后各灌溉处理在低排放通量下小幅波动。晒田期稻田的干湿交替改善了土壤的通气性, 增加土壤的有效氧, 促进了 N<sub>2</sub>O 的形成与产生。在水稻生长期, 控制灌溉、间歇灌溉、浅湿灌溉和淹灌处理的 N<sub>2</sub>O 排放最大峰值分别为 84.38、271.25、87.15、145.6  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 间歇灌溉处理明显提高了 N<sub>2</sub>O 排放峰值, 而控制灌溉和浅湿灌溉的排放峰值较淹灌显著降低。在水稻生育阶段前期, 各处理 N<sub>2</sub>O 排放都处于较低水平, 泡田期几乎无 N<sub>2</sub>O 排放。水稻生长期 N<sub>2</sub>O 平均排放通量顺序是间歇灌溉 > 淹灌 > 浅湿灌溉 > 控制灌溉, 依次为 39.5、27.33、16.42、16.2  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  ( $P < 0.05$ )。CK 处理除晒田期其余阶段田面水层变化较

小, 土壤的通气性较差, 减少了 N<sub>2</sub>O 的排放。间歇灌溉将单次灌水定额分 2~3 次灌入农田, 频繁的水层变化, 增加了 N<sub>2</sub>O 的排放。无论哪种灌溉模式, N<sub>2</sub>O 排放通量主要集中在晒田-拔节孕穗期及灌浆期两个阶段。其中淹灌在这 2 个阶段的 N<sub>2</sub>O 排放通量占全生育期排量的 82.21%, 控制灌溉处理 N<sub>2</sub>O 排放通量占总排放量的 77.87%, 间歇淹灌 N<sub>2</sub>O 排放通量占总排放量的 88.97%, 而浅湿灌溉模式下 N<sub>2</sub>O 排放量占水稻全生育期内排放量的比例高达 92.39%。

#### 2.1.2 节水灌溉对 N<sub>2</sub>O 总排放量和水稻产量的影响

不同灌溉模式下水稻生育期内 N<sub>2</sub>O 排放总量见表 2。在水稻全生育期内, 节水灌溉模式的 N<sub>2</sub>O 排放总量范围为 0.54~1.34 kg/hm<sup>2</sup>, 淹灌排放总量为 0.91 kg/hm<sup>2</sup>。间歇灌溉模式下的水稻 N<sub>2</sub>O 排放总量最高, 相比淹灌增加了 44.55%, 控制和浅湿灌溉处理的 N<sub>2</sub>O 排放总量相对淹灌分别减少了 58.99% 和 58.42%。

表 2 各处理 N<sub>2</sub>O 总排放量  
Table 2 N<sub>2</sub>O total emissions in each treatment

处理 Treatment	N <sub>2</sub> O 总排放量 N <sub>2</sub> O total emissions/(kg·h <sup>-2</sup> )	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	单位产量 N <sub>2</sub> O 排放量/N <sub>2</sub> O emission per unit yield/(g·kg <sup>-1</sup> )
控制灌溉 Control irrigation	0.54±0.19c	8977±346a	0.06c
间歇灌溉 Intermittent irrigation	1.34±0.15a	9267±200a	0.14a
浅湿灌溉 Wet irrigation	0.55±0.09c	8287±192b	0.07c
淹灌 Flood irrigation	0.91±0.09b	9195±103a	0.10b

注：同一列标注不同字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ），下同。  
Note: Different small letters following value mean significant difference among treatments at 5% level, same as below.

结合水稻籽粒产量，计算了各处理单位产量的 N<sub>2</sub>O 排放量。对产量而言，浅湿灌溉处理水稻产量显著低于淹灌（ $P<0.05$ ），控制灌溉和间歇灌溉处理对照淹灌差异不大（ $P>0.05$ ）。单位产量 N<sub>2</sub>O 排放量各处理表现出与排放总量相似的差异性，控制灌溉处理和浅湿灌溉处理的单位产量 N<sub>2</sub>O 排放量较淹灌分别降低了 40%和 30%，间歇灌溉处理相对淹灌增加了 40%。说明在节水灌溉模式下，综合产量因素，控制灌溉和浅湿灌溉有利于 N<sub>2</sub>O 减排。比较而言，控制灌溉既能增加产量又能减少 N<sub>2</sub>O 排放。

2.2 不同灌溉模式下土壤无机氮的变化

不同处理土壤铵态氮及硝态氮含量变化特征如图 3 所示。

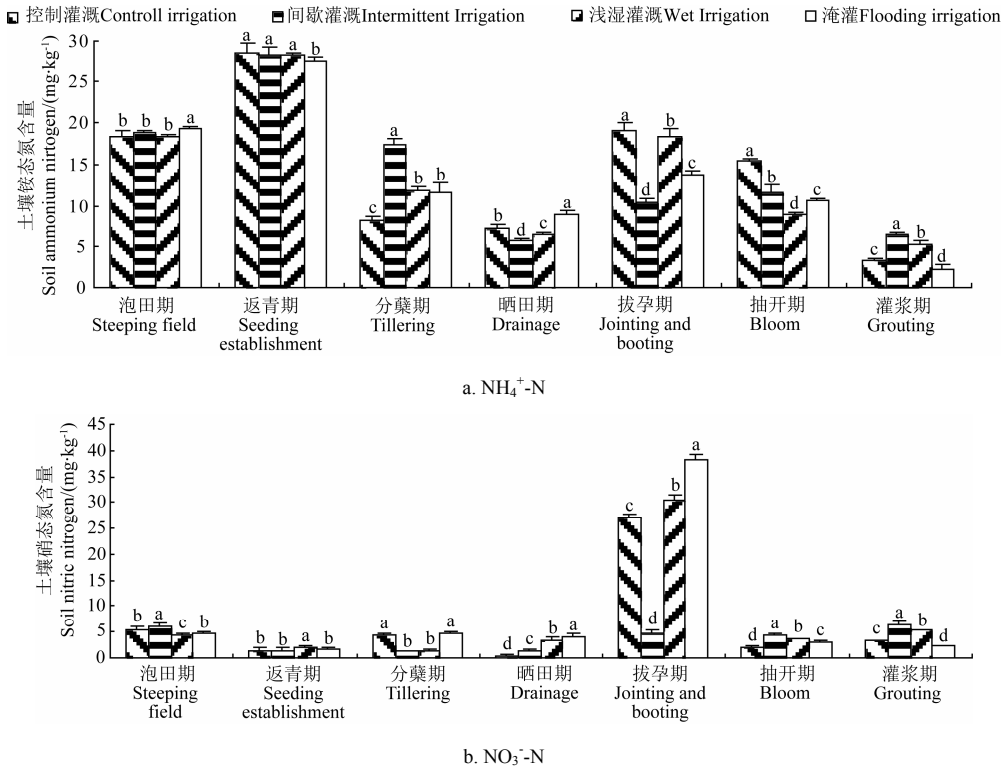


图 3 不同处理土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 变化

Fig.3 Dynamic trends of soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N contents under different treatments

土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在泡田及返青期节水灌溉各处理间差异较小（图 3a），但均与 CK 差异显著（ $P<0.05$ ）。从晒田期之后，各处理之间均达到了 5% 的显著差异。土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量均在返青期出现峰值。间歇灌溉条件下土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在不同生育阶段差异较大，范围在 5.65~28.24 mg/kg。控制灌溉和浅湿灌溉处理土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量变化在整个生育期内变化比较平稳。淹灌在返青期及灌浆期处于较低水平，在泡田期为各处理最高，为 19.34 mg/kg，在水稻生育后期表现出先上升后下降的趋势。

各处理土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均在水稻拔孕期出现峰值，其余生育阶段处于较低水平（图 3b）。晒田期控制灌溉、间歇灌溉及浅湿灌溉各处理的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 质量分数分别为 0.34、1.37、3.51 mg/kg，均低于淹灌处理。拔孕期除间歇灌溉处理外，其余 3 个处理土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量都出现

了峰值，其中淹灌处理的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 质量分数高达 38.09 mg/kg。间歇灌溉处理土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 质量分数在整个生育期内变化较小，范围在 1.37~6.5 mg/kg。

2.3 不同灌溉模式下 N<sub>2</sub>O 排放的环境影响因素

温度是影响稻田 N<sub>2</sub>O 排放的重要因素。本研究表明，各处理水稻全生育期的 N<sub>2</sub>O 排放通量与相应日均温的相关性不显著（ $P>0.05$ ），但土壤 10 cm 处温度呈极显著相关（ $P<0.01$ ）（表 3），表明土壤温度是影响稻田 N<sub>2</sub>O 排放的重要环境因素，土壤温度的提高有利于稻田 N<sub>2</sub>O 的排放。

土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量与 N<sub>2</sub>O 排放通量相关性不显著，土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量与 N<sub>2</sub>O 排放通量有显著的相关性，控制灌溉和浅湿灌溉处理的 N<sub>2</sub>O 季节排放通量与土壤的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量达到了极显著差异（表 3）。相关系数为正

说明土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放随  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量增加而增加。结合水稻生长季  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征 (图 2) 分析, 无论哪种水分管理模式, 在水稻生育前期各处理的土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量均处于较高水平, 但前期氧化亚氮排放量并不高。而此阶段土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量处于较低水平。拔孕期各处理土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量出现峰值, 此阶段  $\text{N}_2\text{O}$  排放也出现高峰, 说明土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放有明显的影响, 且土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放随土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的增加而增加。

表 3  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与环境因子的相关关系  
Table 3 Correlation between  $\text{N}_2\text{O}$  emission flux and environmental factors

处理 Treatment	日均温 Mean daily air temperature	土壤温度 Soil temperature	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen
控制灌溉 Control irrigation	0.10	0.51**	0.19	0.98**
间歇灌溉 Intermittent irrigation	0.29	0.62**	0.28	0.85*
浅湿灌溉 Wet irrigation	0.14	0.49**	0.21	0.90**
淹灌 Flood irrigation	0.14	0.37**	0.17	0.84*

注: \*为 0.05 水平显著; \*\*为 0.01 水平极显著。

Note: \*, significant at 0.05 level; \*\*, very significant at 0.01 level.

### 3 讨 论

在黑龙江寒地稻作区, 节水灌溉处理稻田生长季  $\text{N}_2\text{O}$  的排放与淹灌对照有较大变化 (图 2), 灌溉模式显著影响了稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放过程。相比淹灌处理, 间歇灌溉条件下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量增加了 44.55%, 控制灌溉模式下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量减少了 58.99%, 浅湿灌溉模式下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量减少了 58.42%。频繁的水层交替过程, 增加了稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。本试验各处理均在水稻移栽后第 25 天出现一个  $\text{N}_2\text{O}$  排放小高峰, 原因是此时刚施用分蘖肥, 氮肥的施用促进了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[5,10,24]</sup>。在水稻泡田之前以及黄熟期后  $\text{N}_2\text{O}$  排放量非常微小, 甚至出现负值, 这和很多研究结果较为一致<sup>[25-28]</sup>。无论哪种灌溉模式,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量主要集中在晒田-拔节孕穗期及灌浆期 2 个阶段。该排放特征不同于南方稻田的观测结果<sup>[6,12-13,15]</sup>, 黑龙江寒地水稻生育期和南方有所差异, 因此  $\text{N}_2\text{O}$  季节排放特征也有所不同。

相对于淹灌, 控制灌溉和浅湿灌溉模式下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量明显减少, 这与人的一些研究结果有所不同<sup>[29-34]</sup>。这可能因为黑龙江省气象条件的影响, 在水稻生长旺季, 降水量频繁, 控制灌溉处理土壤处于饱和,  $\text{N}_2\text{O}$  排放量较小。各处理不同生育阶段的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与相应的土壤铵态氮及硝态氮含量做相关性分析发现, 土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放受土壤铵态氮含量影响不显著, 而与土壤硝态氮含量关系密切。节水灌溉方式使水稻根系土壤供氧充足, 土壤的硝化作用大于反硝化作用<sup>[25]</sup>, 增加了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。持续淹水状态, 会使土壤长期处于厌氧状态, 硝化作用减弱,  $\text{NO}_3^-$  基质得不到补充, 使反硝化作用速率降低。本研究中各处理水稻生育前半程  $\text{N}_2\text{O}$  的排放非常微弱, 这可能是由于寒地稻田土壤温度较低, 土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$

含量较低, 限制了硝化细菌的生长。水稻收获后,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量出现负值, 可能是由于土壤处于较为干燥的状态, 有机质含量较高, 吸附了较多的  $\text{N}_2\text{O}$ , 抑制了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。此外, 本试验中水稻全生育期内  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量相对于南方水稻产区排放量减少<sup>[6,13-14,18]</sup>。黑龙江寒地水稻区, 气温较低, 2014 年年积温在 2 100~2 300℃, 低温条件使稻田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量下降。本试验采样时的温度在 21~26℃之间, 已满足硝化和反硝化作用进行所需的温度条件<sup>[30]</sup>。根据  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与对应-10cm 土壤温度显著性分析 (表 3), 二者之间呈显著线性相关 ( $R^2=0.37\sim0.62$ ,  $n=20$ ,  $P<0.05$ )。因此, 对于黑龙江寒地稻田土壤温度的变化会对  $\text{N}_2\text{O}$  排放产生重要影响。

黑龙江省寒地稻作已逐渐从传统的蓄水淹灌向节水灌溉方式转变, 采取水稻生长前期淹水、中期烤田、后期干湿交替、末期排干的水分管理模式。稻田复杂的土壤水分变化状况影响氮素在稻田土壤中的动态变化<sup>[30,35-36]</sup>, 也影响了土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  的积累和向大气的传输。本试验中, 控制灌溉及湿润灌溉处理的产量水平低于淹灌, 间歇灌溉处理相对于淹灌略增加 1%。控制灌溉模式和湿润灌溉模式下的单位产量  $\text{N}_2\text{O}$  排放量也与淹灌差异显著, 也说明了在获得相同产量的前提下这两种灌溉模式具有减排优势。间歇灌溉处理的水稻产量虽然有所增加, 但单位产量  $\text{N}_2\text{O}$  排放量相比淹灌处理显著增加。间歇灌溉虽然显著提高了稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 但稻田控水时期是作物生长旺期, 土壤氮素含量较低, 因此  $\text{N}_2\text{O}$  排放的增幅较小, 对全球增温潜力的总体影响还要进一步研究。

### 4 结 论

1) 节水灌溉模式改变了寒地稻田生长季  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的季节变化特征。相对淹灌而言, 间歇灌溉使稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量增加, 而控制灌溉及浅湿灌溉技术使得  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量减少, 减少的幅度因水分管理模式不同而有所区别。

2) 寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放主要集中在温度日变化较小, 且田面水层变化比较频繁时期。 $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与土壤 10 cm 温度显著相关, 土壤无机态氮对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放有显著交互效应, 在研究稻田温室气体减排时要考虑多种因素的综合分析。

3) 间歇灌溉虽然有助于提高水稻产量, 但会促进稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 从而增加温室气体排放量。控制灌溉和浅湿灌溉能有效控制稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 比淹灌减少 58.99% 和 58.42%, 且水稻产量差异不显著 ( $P<0.05$ )。在黑龙江寒地稻作区, 应综合考虑产量及稻田温室效应, 对控制灌溉和浅湿灌溉 2 种灌溉模式给予高度重视。

### [参 考 文 献]

- [1] 邵美红, 孙加焱, 阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 181-187.  
Shao Meihong, Sun Jiayan, Ruan Guanhai. Review on greenhouse gases emission and the reduction technology in rice fields[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(1): 181-187.(in Chinese with English abstract)

- [2] Lashof D A, Ahuja D. Relative contributions of greenhouse gas emissions to the global warming[J]. *Nature*, 1990, 344: 529—531.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 2009 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [4] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{NO}$  from fertilized fields: Summary of available measurement data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1058—1070.
- [5] Smith P, Martino P, Cai Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789—813.
- [6] 廖千家骅, 颜晓元. 施用高效氮肥对农田  $\text{N}_2\text{O}$  的减排效果及经济效益分析[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(12): 1695—1701. Liao Qianjiahua, Yan Xiaoyuan.  $\text{N}_2\text{O}$  mitigation effects and economic impacts from enhanced-efficiency N fertilizers from fields in China[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(12): 1695—1701. (in Chinese with English abstract)
- [7] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NO}$  产生机制研究进展[J]. *土壤*, 2012, 44(5): 712—718. Cai Yanjiang, Ding Weixin, Xiang Jian. Mechanisms of Nitrous oxide and nitric oxide production in soils: A review[J]. *Soils*, 2012, 44(5): 712—718. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究—模型灵敏度分析[J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1359—1366. Zhang Wen, Huang Yao, Zheng Xunhua, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model sensitivity analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1359—1366. (in Chinese with English abstract)
- [9] 章永松, 柴如山, 付丽丽, 等. 中国主要农业源温室气体排放及减排对策[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2012, 38(1): 97—107. Zhang Yongsong, Chai Rushan, Fu Lili, et al. Greenhouse gas emissions from major agricultural activities in China and corresponding mitigation strategies[J]. *Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci*, 2012, 38(1): 97—107. (in Chinese with English abstract)
- [10] Venterea R T, Halvorson A D, Kitchen N, et al. Challenges and opportunities for mitigating nitrous oxide emissions from fertilized cropping systems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(10): 562—570.
- [11] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 722—732. Huang Yao. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 722—732. (in Chinese with English abstract)
- [12] 康新立, 华银锋, 田光明, 等. 土壤水分管理对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2013, 23(2): 43—46. Kang Xinli, Hua Yinfeng, Tian Guangming, et al. Effects of soil water management on the emission of methane and nitrous oxide[J]. *Journal of EMCC*, 2013, 23(2): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [13] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 269—273. Dong Hongmin, Li Yu'e, Tao Xiuping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 269—273. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李香兰, 徐华, 曹金留, 等. 水分管理对水稻生长期  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 703—707. Li Xianglan, Xu Hua, Cao Jinliu, et al. Effect of water management on  $\text{N}_2\text{O}$  emission in rice-growing season[J]. *Soil*, 2006, 38(6): 703—707. (in Chinese with English abstract)
- [15] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  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.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4294—4300. (in Chinese with English abstract)
- [16] 叶丹丹, 谢立勇, 郭李萍, 等. 华北平原典型农田  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量及其与土壤养分动态和施肥的关系[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(3), 15—20. Ye Dandan, Xie Liyong, Guo Liping, et al. The emission-flux of  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  and its relationship with soil nutrient dynamic and fertilization in typical up land fields in North China plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(3): 15—20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究[J]. *中国农业科学*, 1996, 28(4): 58—65. Yang Jianchang, Wang Zhiqin, Zhu Qingsen. Effect of Nitrogen nutrition on rice yield and its physiological Mechanism under different status of soil moisture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 28(4): 58—65. (in Chinese with English abstract)
- [18] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 环境因素和作物生长对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(6): 711—714. Jiang Jingyan, Huang Yao, Zong Lianggang. Influence of environmental factors and crop-growing on emissions of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  from rice paddy[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6): 711—714. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱士江. 寒地稻作不同灌溉模式的节水及温室气体排放效应试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012. Zhu Shijiang. Experiment for Water-Saving and Greenhouse Effect of Irrigation Mode in Cold Rice Area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [20] 马秀枝, 张秋良, 李长生, 等. 寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的时间变异[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2149—2156. Ma Xiuzhi, Zhang Qiuliang, Li Changsheng, et al. Temporal

- variation of soil greenhouse gases fluxes in a cold-temperate *Larix gmelinii* forest in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2149—2156. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈卫卫, 王毅勇, 赵志春, 等. 三江平原春小麦农田生态系统氧化亚氮通量特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2777—2782.
- Chen Weiwei, Wang Yingyong, Zhao Zhichun, et al. Characteristics of nitrous oxide flux in spring wheat field ecosystem in Sanjiang Plain of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2777—2782. (in Chinese with English abstract)
- [22] Md Mozammel Haque, Sang Yoon Kim, Muhammad Aslam Ali. Contribution of greenhouse gas emissions during cropping and fallow seasons on total global warming potential in mono-rice paddy soils[J]. Plant Soil, 2012(387): 251—264.
- [23] 张岳芳, 周炜, 王子臣, 等. 氮肥施用方式对油菜生长季氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1690—1696.
- Zhang Yuefang, Zhou Wei, Wang Zichen, et al. Effects of nitrogen fertilizer application modes on Nitrous Oxide emissions season of oilseed rape[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(8): 1690—1696. (in Chinese with English abstract)
- [24] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- Cai Zucong, Xu Hua, Ma Jing. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [25] 董云社, 齐玉春, Manfred Domroes, 等. 内蒙古温带半干旱羊草草原  $\text{N}_2\text{O}$  通量及其影响因素[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 776—784.
- Dong Yunshe, Qi Yuchun, Manfred Domroes, et al. The  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in leymus Chinese grassland of inner Mongolia, China[J]. Geographical Research, 2004, 23(6): 776—784. (in Chinese with English abstract)
- [26] 裴志永. 青藏高原高寒草原生态系统碳过程研究——以青海省五道梁地区试验点为例[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003.
- Pei Zhiyong. Carbon Dynamics in the Alpine Grassland Ecosystem on the Tibetan Plateau: A Case Study of Wudaoliang, Qinghai Province[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Research, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王毅勇, 郑循华, 宋长春, 等. 三江平原典型沼泽湿地  $\text{N}_2\text{O}$  通量研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 493—497.
- Wang Yingyong, Zheng Xunhua, Song Changchun, et al.  $\text{N}_2\text{O}$  flux in typical wetlands of Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 493—497. (in Chinese with English abstract)
- [28] 向平安, 黄璜, 黄梅, 等. 稻-鸭生态种养技术减排甲烷的研究及经济评价[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 968—975.
- Xiang Ping'an, Huang Huang, Huang Mei, et al. Studies on technique of reducing Methane-emission in a rice-duck ecological system and the evaluation of its economic significance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(5): 968—975. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王毅勇, 陈卫卫, 赵志春, 等. 三江平原寒地稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及排放量估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 170—176.
- Wang Yiyong, Chen Weiwei, Zhao Zhichun, et al. Characteristics and estimation of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  emission from cold paddy field in the Sanjiang Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 170—176. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田  $\text{N}_2\text{O}$  产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1—5.
- Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Impacts of temperature on  $\text{N}_2\text{O}$  production and emission[J]. Environmental Science, 1997, 18(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [31] 冉伟. 农业土壤中化肥氮的形态转化机理及其调控研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2000.
- Ran Wei. Mechanisms and Regulations of Nitrogen Transformation in Agricultural Soils Amended with Mineral Fertilizers[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周胜, 宋祥甫, 颜晓元. 水稻低碳生产研究进展[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 213—222.
- Zhou Sheng, Song Xiangfu, Yan Xiaoyuan. Progress in research on low-carbon rice production technology[J]. Chin J Rice Sci, 2013, 27(2): 213—222. (in Chinese with English abstract)
- [33] 肖小平, 伍芬琳, 黄凤球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 629—632.
- Xiao Xiaoping, Wu Fenlin, Huang Fengqiu, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. Research of Agricultural Modernization, 2007, 28(5): 629—632. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张鲜鲜, 殷杉, 朱鹏华. 上海崇明岛不同施肥条件下的稻田温室气体排放格局[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2013, 31(2): 34—39.
- Zhang Xianxian, Yin Shan, Zhu Penghua. Greenhouse gases emission pattern in paddy fields under different fertilizer conditions in Chongming island[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2013, 31(2): 34—39. (in Chinese with English abstract)
- [35] Xie Baohua et al. Modeling methane emissions from paddy rice fields under elevated atmospheric carbon dioxide conditions[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(1): 100—114. (in Chinese with English abstract)
- [36] 彭英湘, 王凯荣, 彭娜, 等. 不同灌溉条件下稻草还田对土壤供氮特征及水稻产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 30—33.
- Peng Yingxiang, Wang Kairong, Peng Na, et al. Effects of incorporating rice straw into the soil on soil nitrogen supply and rice yield under different irrigation systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 30—33. (in Chinese with English abstract)

## Optimal water-saving irrigation mode reducing N<sub>2</sub>O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield

Wang Mengxue<sup>1,2</sup>, Zhang Zhongxue<sup>1\*</sup>

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

2. Agronomy College of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Greenhouse gas emissions from paddy field in China have aroused widespread attention. Northeast China is the most important marketable grain base in China, and the paddy fields acreage of northeast China is increasing rapidly in nearly a decade. It has only scattered reports in regard to paddy greenhouse gas emissions in the northeast cold region. The winter of northeast is very cold and long, and organic matter of farmland soil is relatively high. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from fields in cold region of northeast China may play an role in climate change. In this study, a field experiment was conducted to investigate the N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy field in cold region under different irrigation modes and its response to environmental factors. The experiment was set up in Rice Irrigation Experimental Center of Heilongjiang located in Heping town of Qing'an county in 2014 with four treatments including control irrigation, wet irrigation, intermittent irrigation and flood irrigation. The For all the treatments, drainage and drying were conducted in the lateral tillering stage and yellow ripe stage. In addition, under the control irrigation system, the soil water content was controlled at 0.7 or 0.8 times of saturated moisture content except for seeding establishment when water layer was 0-30 mm; Under the intermittent irrigation system, water layer was arranged at 0-30 or 0-40 mm for stages other than the lateral tillering stage and yellow ripe stage; Under the wet irrigation system, water layer was arranged at 0-20 or 0-30 mm for stages other than the lateral tillering stage and yellow ripe stage; Under the flood irrigation, most of stages had water layer of 0-40 mm. Each treatment was repeated three times. During the experiment, the N<sub>2</sub>O emission was measured at 10:00-14:00 using the method of static chamber-gas chromatographic techniques. Additionally, rice yield was determined at harvest. The results showed that the N<sub>2</sub>O emissions fluxes had same trend in the seasonal variation under different treatments. The peak of emissions appeared in the stage when water alteration was frequent. The N<sub>2</sub>O emission was low in the early stage of rice growth and small amounts of N<sub>2</sub>O emissions occurred in steeping field stage. Compare to flood irrigation, the total amount of N<sub>2</sub>O emissions under intermittent irrigation increased by 47.3%, but that of control and wet irrigation treatments reduced by 40.7% and 39.6%. The N<sub>2</sub>O emission flux from cold rice paddies was closely related to soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content and soil 10-cm temperature ( $P<0.05$ ). The N<sub>2</sub>O emission from rice yield would increase with soil temperature and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content. For rice yield, the treatment of wet irrigation was worse than the others and the other treatments had no significant difference. The N<sub>2</sub>O emissions per unit yield of control and wet irrigation were 40% and 30% lower than the flood irrigation. However, the rice yield of control irrigation treatment was significantly higher than wet irrigation. Therefore, the control irrigation was best irrigation mode to increase rice yield and reduce N<sub>2</sub>O emission among the four treatments. It should be heavily emphasized in future in the cold regions of China. The results can provide valuable information for selection of water-saving irrigation method in Heilongjiang cold region.

**Key words:** irrigation; emission control; nitrogen oxide; cold region rice culture; nitrous oxide