

早稻灌浆乳熟期蓄水灌溉对产量及温室气体排放的影响

傅志强, 龙攀, 刘依依, 谢天洋, 龙文飞, 钟娟

(湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要:为给湖南双季稻区稻田蓄水采用“早水晚用”的节水栽培模式提供理论依据,于早稻灌浆乳熟期起保持稻田不同的灌水深度(10、15、20 cm),通过大田试验探讨不同灌水深度对早稻产量及温室气体排放的影响。结果表明:与常规水管理相比,灌深水有利于提高光合速率,但降低了结实率和千粒重,使产量减少 3.1%~5.7%,但差异不显著;灌深水增加了 62.7%~113.6%的 CH_4 累积排放量,减少了 63.1%~84.1%的 N_2O 累积排放量,差异显著。各灌水处理中以灌水深度 10 cm 增排量最高,随着灌水深度增加增温潜势降低,各灌水处理的增温潜势超出常规水管理 57.2%~96.6%。根据湖南降雨季节分布规律,加高加固田埂后,早稻成熟期蓄积 20 cm 深水有利于双季稻区晚稻种植和节水。但蓄深水增加了 CH_4 排放,对此有待进一步深入研究减排措施。

关键词:早稻;蓄水深度;产量;温室气体

中图分类号:X16 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)03-0599-07 doi:10.11654/jaes.2015.03.025

Rice Yields and Greenhouse Gas Emissions as Influenced by Standing Water Depths at Milking Stage of Early Rice

FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, XIE Tian-yang, LONG Wen-fei, ZHONG Juan

(Agronomy College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Rice fields contribute substantially to greenhouse gas emissions, and water managements affect this contribution. In this study, a field experiment was designed to examine the effects of irrigation water on yields and greenhouse gas emissions by keeping different depths of standing water (10 cm, 15 cm, and 20 cm) in paddy field from milking to maturity stage of early rice. Compared to traditional water regime (CK), deep standing water improved plant photosynthetic rate, but reduced seed setting rate and 1000-grain weight, resulting in 3.1%~5.7% reduction of rice yields with no significant difference. However, deep standing water treatments increased the cumulative CH_4 emission by 62.7%~113.6%, but decreased the cumulative N_2O emission by 63.1%~84.1%, compared to the control. Significant differences were found among the treatments. The global warming potential (GWP) of CH_4 and N_2O was found to be the highest in the 10 cm depth of standing water. The deeper the standing water, the lower GWPs were observed. Overall, the GWP was 57.2%~96.6% higher in deep standing water than in CK. In conclusion, holding 20 cm depth water in early rice field would benefit late rice cultivation in the double-season rice area of Hunan Province. Further study is necessary on reducing CH_4 emission from deep standing water paddy field.

Keywords: early rice; deep standing water; yields; greenhouse gases

我国是世界上人均水资源最贫乏的国家之一,我国农业用水量占比例较高,约占全国总用水量的 70%,其中稻田灌溉用水总量占农业总用水量的 65%

以上^[1],而且农业用水存在水资源利用率和生产效率“两低”的突出问题。湖南是我国水稻主产区,种植面积位居全国第二,产量位居全国第一。湖南温光水资源丰富,适于双季稻种植,特别是湘南地区为湖南省重要的双季稻三熟制种植区。根据湖南省历年来降雨分布规律,4—6月降水集中,占全年降雨量的 40%~50%,7—9月则缺水干旱^[2],而7月中下旬正值湖南省晚稻栽插、分蘖的关键时期,如果缺水,灌溉条件差

收稿日期:2014-08-05

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAD11B02、2011BAD16B01、2012BAD04B10、2013BAD07B11);湖南省科技厅支撑计划项目(2013SK3158)

作者简介:傅志强(1968—),男,湖南涟源人,博士,副教授,主要从事水稻栽培、稻田碳氮循环研究。E-mail:zqf_cis@126.com

的区域或者天水田,极易造成晚稻栽插困难,严重影响晚稻正常生长。因此,如何合理利用早稻成熟期雨水充足的特点,提高早稻季雨水利用效率,为晚稻栽插与早期生长提供必需的水分保证,是湖南省双季稻区确保稳产增产的重要前提。

目前,我国稻田 CH_4 排放总量为 7.67~8.05 Tg(1 Tg=10⁹ kg),约占全世界水稻田 CH_4 总量的 19.6%^[3-4]。灌水是造成稻田 CH_4 排放的重要因素,淹水稻田是大气 CH_4 排放的重要人工源,许多研究表明稻田田面水分状况显著影响 N_2O 的排放^[5],且已发现稻田水层深度对水稻的产量也会有影响^[6]。但已有研究的稻田蓄水深度一般在 10 cm 左右,不超过 15 cm,针对乳熟至成熟期的长期蓄深水研究目前鲜见报道。为此,本研究针对湖南省降雨季节分布规律,加高加固田埂,把早稻后期的降雨尽可能蓄积在田中,以研究蓄水深度对水稻产量和温室气体排放的影响,为双季稻“早水晚用”节水栽培模式提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概述

试验于 2012 年在湖南长沙县干杉镇干杉村上大屋组试验基地(28°08′18″E,113°12′0″N)进行,当地海拔 42 m,年平均温度为 17.1 ℃,年降水量 1500 mm,年≥10 ℃积温 5300~6500 ℃,为湖南典型的双季稻生产区。稻田土壤类型为第四纪红壤发育而成的红黄泥土。供试土壤理化性状为 pH 6.2,有机碳 16.57 g·kg⁻¹,全氮 1.63 g·kg⁻¹,碱解氮 149 mg·kg⁻¹,有效磷 7.3 mg·kg⁻¹,速效钾 57 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

供试品种为陵两优 211。试验所选田块排灌水方便,采用随机区组设计,3 次重复,小区面积 3.5 m×5.5 m=19 m²,区组间、小区间均留过道,所有小区田埂均加高加固到 20 cm 以上,并且每个小区田埂用较厚薄膜覆盖,以防肥水串灌和渗漏。3 月 26 日播种,4 月

28 日移栽,移栽规格为 20 cm×20 cm,每穴插 2 苗,7 月 15 日收获。在早稻灌浆乳熟期前按常规水管理方法进行。从灌浆乳熟期开始(齐穗后约 10 d,6 月 19 日)灌深水 10 cm(T1)、15 cm(T2)、20 cm(T3),以常规水管理为对照(CK),具体的试验处理如表 1 所示。每天上午 8:00 查看小区水位变化并及时补灌,以保证各处理的水位稳定。各小区施肥量和施用方法均一致,施肥量按纯 N 140 kg·hm⁻²、P 34 kg·hm⁻²、K 75 kg·hm⁻² 的标准进行,分别以尿素、过磷酸钙、氯化钾的形式投入,其中尿素按基肥:分蘖肥:穗肥=3:2:1 的比例施用。分蘖肥和穗肥的施用时间分别为 5 月 8 日和 6 月 6 日。其他耕作、防治病虫害等栽培管理措施同当地高产栽培方法。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 光合特性测定

于灌水处理后第 12 d 采用 LI-6400 型便携式光合测定仪(美国 LI-COR 公司生产)进行测定。选定晴天上午 9:00—11:30,选择有代表性的植株,摘取剑叶进行测定。在使用 LI-6400 时,设置好叶室 CO_2 浓度和温度,使用内源光照进行处理,光照强度设定为 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光量子。剑叶摘取以后,立即通过 LI-6400 测定叶片即时的光合速率、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、气孔导度数据,测定部位为剑叶中部,每处理重复测定 10 点^[7-8]。叶片水分利用率为光合速率与蒸腾速率的比值。

1.3.2 温室气体取样与测定

大田小区试验温室气体采样采用圆柱体静态箱技术,箱底直径 30 cm、高 100 cm。底座于移栽后即插入小区土壤中 5 cm,以防来回搬动对土壤的扰动。气体从灌深水处理后开始测定,每隔 5~7 d 取样 1 次,选定上午 9:00—11:00 进行。温室气体取样时,将取样箱垂直轻放在圆型凹槽底座上,底座水槽内灌浅层水以确保取样箱放入底座时起到箱内外气体隔绝的水封作用,在罩箱后立即抽取一次气样,然后每隔 10

表 1 试验处理设计

Table 1 Experimental treatment design

代号	处理名称	操作方法
T1	乳熟期灌水深 10 cm	乳熟期之前,按常规水管理方法进行,从乳熟期开始,对稻田进行灌水处理,每次蓄水至 10 cm 深,用时 10 h,一直保持到收获。
T2	乳熟期灌水深 15 cm	乳熟期之前,按常规水管理方法进行,从乳熟期开始,对稻田进行灌水处理,每次蓄水至 15 cm 深,用时 15 h,一直保持到收获。
T3	乳熟期灌水深 20 cm	乳熟期之前,按常规水管理方法进行,从乳熟期开始,对稻田进行灌水处理,每次蓄水至 20 cm 深,用时 20 h,一直保持到收获。
CK	常规水管理	水稻生长期,一直按常规水管理方法进行。乳熟期干湿交替,收获前一周开始落干。

min 用 50 mL 注射器从箱中抽取气体,并注入由三通阀连接的气体采样袋中备测。样品 CH₄ 和 N₂O 浓度采用湖南省土壤肥料研究所提供的气相色谱(Agilent7890A,美国)测定。CH₄ 采用 FID 检测器,检测温度为 180 ℃,柱温 70 ℃,载气流速 40 mL·min⁻¹;N₂O 采用 ECD 检测器,检测温度 300 ℃,柱温 70 ℃,载气流速 40 mL·min⁻¹。

1.3.3 考种与测产

成熟期每小区取 5 苑有代表性的稻株,考查其经济性状,计算经济产量。每小区单收单晒称重,计算实际产量。

1.4 数据处理方法

稻田 CH₄、N₂O 排放通量计算公式为:

$$F=\rho \times h \times dC/dt \times 273/(273+t)$$

式中: F 为排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; CH₄、N₂O 标准状态下的密度 ρ 分别为 $0.714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; h 为采样箱高度, m ; dC/dt 为采样过程中采样箱内 CH₄、N₂O 浓度变化率, CH₄ 为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、N₂O 为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; t 为采样箱内平均温度, $^{\circ}\text{C}$ [9]。

排放总量计算公式为:

$$T=\sum(Ri \times Di)$$

其中 Ri 是相邻两次测定的排放通量的均值, Di 是两次测定相距天数 [10]。排放通量均值为排放总量与天数的比值。对于 100 a 时间尺度的气候变化, CH₄ 和 N₂O 气体的 GWP_s 计算系数分别为 25 和 298(IPCC,

2007) [11]。

数据计算与统计分析采用 Excel 2003 和 DPS V3.01 软件进行。多重比较采用新复极差法(LSR 法)。

2 结果与分析

2.1 蓄深水处理对水稻光合特性的影响

由表 2 可知, 3 个蓄深水处理的光合速率均要高于常规水管理, 增幅达 $0.98 \sim 2.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 超出常规 $6.8\% \sim 18.3\%$, 而且蓄水越深, 光合速率越高。3 个蓄深水处理的光合速率与常规水管理之间的差异达到极显著水平; 3 个蓄深水处理相比, 蓄水深 20 cm 与蓄水深 15、10 cm 相差极显著, 而蓄水深 15 cm 与 10 cm 间差异不显著。气孔导度和胞间 CO₂ 浓度均以常规水管理最高, 分别超出灌水处理 $4.2\% \sim 21.3\%$ 和 $1.9\% \sim 3.9\%$ 。蒸腾速率随着蓄水深度减小而降低, 但均高于常规水管理, 各处理间差异不显著。3 个蓄深水处理的水分利用率均高于对照, 而且差异达极显著水平, 但 3 个蓄水处理间差异不显著。可见, 在水稻成熟期蓄水有助于增强光合速率, 提高水分利用率。

2.2 灌水深度对产量的影响

灌浆乳熟期蓄深水对株高、单株有效穗数、穗长、每穗总粒数等均无明显影响(表 3)。与常规水管理相比, 蓄深水一定程度上降低了水稻结实率和千粒重, 使产量降低 $236 \sim 427 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 降幅在 $3.7\% \sim 5.7\%$ 之间, 但蓄深水对产量的影响效果并不显著。随着蓄水

表 2 灌水处理 10 d 后不同处理植株光合特性

Table 2 Photosynthetic characteristics of rice plants after 10 days of different depths of standing water

处理	光合速率/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	气孔导度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	胞间 CO ₂ 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	蒸腾速率/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	水分 利用率/%
T1	15.31bB	0.71a	314.79a	9.65a	0.159aA
T2	15.61bB	0.61a	309.83a	9.66a	0.162aA
T3	16.95aA	0.68a	308.92a	9.74a	0.174aA
CK	14.33cC	0.74a	321.02a	9.63a	0.149bB

注: T1、T2、T3 分别表示灌深水 10、15、20 cm 处理, CK 代表常规水分处理; 同一列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下表同。

Note: CK indicates the conventional water regime. T1, T2, and T3 indicate 10 cm, 15 cm, and 20 cm deep standing water, respectively. Means with different small and capital letters indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. The same below.

表 3 早稻产量构成因素及产量

Table 3 Early rice yield and its component factors

处理	株高/cm	单株有效穗数/个	穗长/cm	每穗总粒数/粒	结实率/%	千粒质量/g	理论产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	实际产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
T1	69.6	10.4	18.0	115.9	89.4	27.8	8987a	7306a
T2	69.7	10.3	18.2	113.6	88.2	27.5	8514a	7297a
T3	69.8	10.7	18.2	114.4	87.5	27.1	8707a	7115a
CK	70.0	10.7	18.1	114.3	90.3	28.3	9376a	7542a

深度增加,产量呈降低趋势,但不同蓄水深度处理间在产量构成因素及产量上也均无显著差异。

2.3 灌水深度对温室气体排放的影响

2.3.1 温室气体排放规律

从图 1 可知,蓄深水处理后,CH₄ 排放通量变化规律总体呈递减态势。蓄水初期测得 CH₄ 排放通量较高,随着水稻生育期推进,CH₄ 排放通量呈下降趋势,在成熟后期 CH₄ 排放通量达最低。3 个蓄深水处理下的 CH₄ 排放通量均高于常规水管理,其中变化幅度最大的是蓄水深 10 cm 处理,与对照相差 21.7 mg·m⁻²·h⁻¹;蓄水深 10 cm 处理与蓄水深 20 cm 处理之间 CH₄ 排放通量相差最大,达 17.4 mg·m⁻²·h⁻¹。从整个测定时期来看,蓄水深 10 cm 处理下的 CH₄ 排放通量降幅最大,达到 26.0 mg·m⁻²·h⁻¹,而以蓄水深 20 cm 降幅最小,仅 8.4 mg·m⁻²·h⁻¹。

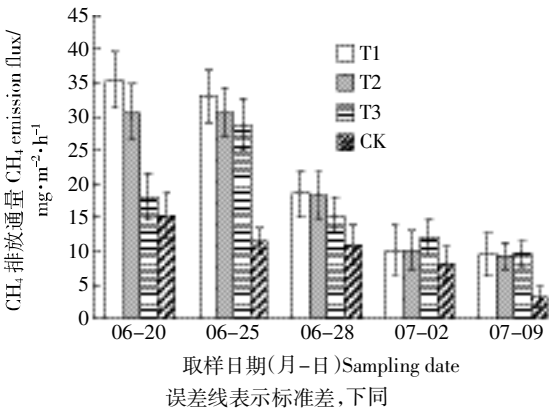


图 1 早稻不同蓄深水处理 CH₄ 排放动态变化

Figure 1 Dynamics of CH₄ emission fluxes from early rice fields during deep standing water period

蓄深水处理后 N₂O 排放通量动态变化如图 2 所示,总体上呈 S 形变化趋势。常规水管理模式 N₂O 排放整体呈下降趋势,而蓄水处理下的 N₂O 排放有增加态势。蓄水初期,常规水管理的 N₂O 排放要高于灌水处理,后期则基本接近。不同蓄水深度相比,蓄水越深 N₂O 排放越少。3 个蓄水处理中,变化幅度最大是

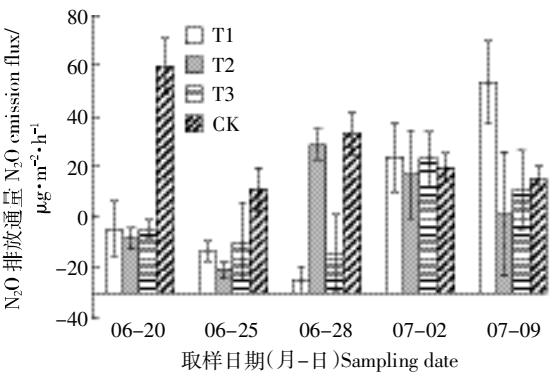


图 2 早稻不同蓄深水处理 N₂O 排放动态变化

Figure 2 Dynamics of N₂O emission fluxes from early rice fields during deep standing water period

蓄水深 10 cm 处理,其变化量为 78.1 μg·m⁻²·h⁻¹,最小的是蓄水深 20 cm 处理,其变化量为 37.1 μg·m⁻²·h⁻¹。

2.3.2 温室气体排放量比较

从表 4 可知,乳熟期蓄深水处理后,不同处理间 CH₄ 平均排放通量呈极显著差异,蓄水越深平均排放通量越低,以蓄水深 10 cm 处理平均 CH₄ 排放通量最高,与对照相差 11.6 mg·m⁻²·h⁻¹。蓄水处理后,各处理间的 CH₄ 排放总量差异显著,3 个蓄深水处理均极显著高于常规水管理,而蓄水深 10 cm 处理与蓄水深 20 cm 处理间差异显著。各处理中,以蓄水深 10 cm 处理排放总量最大,常规水处理最低,两者相差 6.1 g·m⁻²。不同处理间 N₂O 平均排放通量也呈极显著差异,以常规水管理为最高,蓄水深 20 cm 处理最低,蓄水越深排放通量越少,各处理间的极差为 26.7 μg·m⁻²·h⁻¹。各处理 N₂O 排放总量变化趋势与平均排放通量相似,以常规水管理最大,蓄水深 20 cm 最小,二者相差 14.8 mg·m⁻²。综合考虑 CH₄ 与 N₂O 排放增温潜势,以蓄水深 10 cm 最高,且蓄水越深增温潜势越低,总体较常规水管理高 805.8~1 361.2 kg CO₂ eq·hm⁻²,超出了 57.2%~96.6%。蓄深水处理单位产量增温潜势均明显高于常规水管理,增量达 0.12~0.19 kg CO₂ eq·kg⁻¹ 稻谷,增幅达 63.2%~100%。

表 4 早稻季灌深水后各处理 CH₄ 和 N₂O 累积排放量

Table 4 Cumulative CH₄ and N₂O emissions from early rice fields with different depths of standing water

处理	CH ₄		N ₂ O		增温潜势/ kg CO ₂ eq·hm ⁻²	单位产量增温潜势/ kg CO ₂ eq·kg ⁻¹ 稻谷
	排放均值/mg·m ⁻² ·h ⁻¹	排放总量/g·m ⁻²	排放均值/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	排放总量/mg·m ⁻²		
T1	21.4aA	12.0aA	6.9bB	6.5bB	2 769.7	0.38
T2	19.8bB	11.1abA	3.7cC	4.4cC	2 566.9	0.35
T3	16.8cC	9.6bA	1.1dD	2.8dD	2 214.3	0.31
CK	9.8dD	5.9cB	27.8aA	17.6aA	1 408.5	0.19

3 讨论

3.1 灌深水对产量的影响

成熟期水稻一般采用干湿交替节水灌溉方式进行水分管理,以促进灌浆结实,提高结实率和千粒重,如果缺水干旱易造成减产^[12-13]。但蓄深水是否影响到产量还鲜有报道。本研究结果表明,在成熟期蓄深水可以提高光合速率,影响干物质的积累与分配,另一方面也降低了早稻的结实率与千粒重。这可能是由于在田间水分充足的条件下,虽然水稻植株的光合速率有所提升,但也使稻株出现贪青现象,使光合产物向植株茎叶转移较多以维持其代谢活动,减少了干物质向籽粒的输送,这需对水稻的经济系数进行讨论,还有待进一步研究。虽然灌深水导致结实率和千粒重降低,但产量变化并不显著,与前人研究结果一致^[14-15]。水稻在灌浆乳熟期穗粒结构已经形成,但光合作用需要营养物质,体内同化物生产、运转和积累仍需要较多的水分,如果受到水分胁迫,将会影响到同化物生产、运转和积累,从而导致减产^[16-17]。乳熟期后灌深水可能影响到根际的通气环境,降低根系活力,对产量形成产生一定的影响。本研究发现蓄深水导致减产,但减产并不显著。因此,针对湖南降雨季节分配规律,基于提高降雨利用率的目标,利用稻田加高加固田埂,充分蓄积早稻生长后期的降雨,把稻田变成“隐形水库”^[18],既可以减少因雨水径流对河流容量的冲击,减轻河流泄洪压力,避免洪涝灾害,又可为晚稻整地、移栽和前期水管理提供灌溉用水,确保晚稻的栽插和返青成活,对于促进湖南“扩双压单”,提高双季稻种植面积具有重要意义。

3.2 灌深水对温室气体排放的影响

稻田水分管理是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的关键因素^[19-20]。在淹水灌溉条件下,土壤中还原性物质在产甲烷细菌的利用下转化为 CH_4 气体,排放到大气之中。土壤的通气状况显著影响 CH_4 排放,而厌氧条件有利于 CH_4 的排放^[21-22]。前人已有研究表明,干湿交替、间歇灌溉方式均有助于 CH_4 气体减排,但导致 N_2O 增排^[23-24]。同样地,在本研究中与常规的间歇灌溉相比,蓄水处理均表现出较高的 CH_4 排放量。这主要在于蓄水改变了土壤的通气状况,使土壤长期处于厌氧条件下,有利于土壤还原性物质的积累,促进 CH_4 的排放。从不同的蓄水深度来看, CH_4 排放量随水层深度的增加有降低的趋势,蓄水深 10 cm 与 20 cm 表现出显著性差异。 CH_4 产生于厌氧环境下,但能在向

大气扩散过程中被氧化^[21-22],而 CH_4 气体主要是通过水稻植株、液相扩散和冒气泡的形式排放到大气中。深水条件下,水压增加,要保持蓄水深需要水量的补充,与 10 cm 水深相比,保持 20 cm 水深需补充大量的水,如此增加了水体的溶氧量,有利于 CH_4 的氧化而减少排放。有研究表明,水层超过 10 cm 不利于 CH_4 排放^[25],同时在深水条件下,水稻根系的通气组织可能受到影响,这尚需进一步的研究。

稻田 CH_4 排放与 N_2O 排放呈此消彼长的关系^[26]。本研究中,蓄水处理前期各蓄水处理的 N_2O 排放通量均低于对照,并出现负排放通量,与前人研究结果相似^[5, 27-28]。 N_2O 的排放是土壤硝化作用与反硝化作用的产物,水分是影响这些生物过程的最重要因素之一。通常,反硝化作用随水分含量增加而加强,反硝化作用产生的 N_2 与 N_2O 的相对量也随水分状况而异,许多研究表明 N_2O 排放的最大值出现在 45%~75% 的充水孔隙率(WFPS)时^[28-29]。当水分含量低于 60% 时,土壤以反硝化作用为主产生 N_2O ;当土壤水分含量超过 70% 的 WFPS 时,气体传输受阻, N_2O 被进一步还原为 N_2 ,以至 80%~98% 的反硝化产物为 N_2 ^[30]。而稻田长期淹水条件下,土壤孔隙含水量往往高于 70%,这可能就是淹水条件下 N_2O 排放很少甚至吸收的主要原因。与常规水管理相比,蓄水处理均降低了 N_2O 的排放,而两者最根本的区别在于常规水管理田面会不时落干。来自中科院和其他研究表明,稻田 87%~99% 的 N_2O 排放来自于田面落干阶段,淹水期的 N_2O 排放量极少^[31-32]。因此与常规灌溉相比,蓄水不利于 N_2O 的排放。从本研究结果来看,蓄水深度对 N_2O 的排放同样具有显著的影响。 N_2O 作为硝化与反硝化的产物,强烈地受 N 源供给的影响^[22, 33-34],一般 N_2O 的排放随 N 源有效性的增加而增加。蓄水越深水层压力越大,不可避免地促进水分的下渗而导致 N 素的淋失,减少了 N 素来源而降低 N_2O 的排放。

与 CH_4 相比较, N_2O 排放量较低,其增温潜势仅占 0.4%~0.7%,即 99% 以上是由 CH_4 气体排放量决定的。因此,蓄深水虽抑制了 N_2O 排放,但由于促进了 CH_4 的排放,与常规水管理相比,仍显著增加了增温潜势。由于本研究仅针对早稻蓄水期温室气体排放的影响,对于晚稻来说在持续蓄水条件下,土壤硝化细菌与反硝化细菌活性一直被抑制,蓄水仍可能对晚稻季的 N_2O 排放具有一定的减排作用。目前对于如何减少由蓄积深水所造成的 CH_4 排放还需进一步研究,以期对湖南稻田蓄水采用“早水晚用”节水栽培技术体

系提供支持。

4 结论

(1) 早稻灌浆乳熟期, 植株高度可以保证在 20 cm 深水灌溉条件下能正常进行光合作用, 同时不影响根系正常呼吸。

(2) 早稻灌浆乳熟期深灌导致产量轻微下降, 但影响不显著。不同深度水层灌溉处理间穗粒结构的差异未达显著水平, 与常规灌溉相比较, 灌深水处理下水稻结实率和千粒重轻微下降, 但产量的差异也未达到显著水平。

(3) 与常规水管理相比较, 深水灌溉增加了 CH_4 气体的排放, 减少了 N_2O 排放, 但增温潜势、单位产量增温潜势均显著增加。水层深度的提高能在一定程度上减缓温室气体增温潜势的增加。

参考文献:

- [1] 沈振荣, 贺伟程. 中国农业用水的评价、存在问题及解决途径[J]. 自然资源学报, 1996, 11(3): 221-230.
SHEN Zhen-rong, HE Wei-cheng. Assessment of Chinese agricultural water use and approach to the solution of existing problems[J]. *Journal of Natural Resources*, 1996, 11(3): 221-230.
- [2] 柳晓甘, 张硕辅. 湖南干旱的成因分析与对策措施[J]. 湖南水利水电, 2000, 3: 46-48.
LIU Xiao-gan, ZHANG Shuo-fu. Causes and countermeasures analysis of drought in Hunan Province[J]. *Journal of Hunan Hydraulic and Hydroelectric*, 2000, 3: 46-48.
- [3] Cai Z C. A category for estimate of CH_4 emission from rice paddy fields in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1-3): 171-179.
- [4] Sass R L, Fisher F M, Ding A, et al. Exchange of methane from rice fields national regional and global budgets[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104(D21): 26943-26951.
- [5] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放关系及其微生物学机理和一些影响因子[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 270-274.
HOU Ai-xin, CHEN Guan-xiong, WU Jie, et al. Relationship between CH_4 and N_2O emissions from rice field and its microbiological mechanism and impacting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(3): 270-274.
- [6] 纪明喜, 迟道才, 郭成久, 等. 稻田的水分调节对水稻需水量和产量的影响[J]. 农田水利与小水电, 1994, 1: 10-14, 48.
JI Ming-xi, CHI Dao-cai, GUO Cheng-jiu, et al. Affects of rice field water control on the water requirement and yield of rice[J]. *Irrigation, Water Conservancy and Hydroelectric*, 1994, 1: 10-14, 48.
- [7] Su P, Zhang L, Bi Y, et al. Photosynthetic character and water use efficiency of different leaf shapes of *Populus euphratica* and their response to CO_2 enrichment[J]. *Acta Phytocological Sinica*, 2002, 27(1): 34-40.
- [8] 林贤青, 周伟军, 朱德峰, 等. 稻田水分管理方式对水稻光合速率和水分利用效率的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(4): 333-338.
LIN Xian-qing, ZHOU Wei-jun, ZHU De-feng, et al. Effect of water management on photosynthetic rate and water use efficiency of leaves in paddy rice[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2004, 18(4): 333-338.
- [9] 傅志强, 朱华武, 陈灿, 等. 水稻根系生物特性与稻田温室气体排放相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12): 2416-2421.
FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, et al. Research on the correlation between the greenhouse gases emission from paddy fields and the biological characteristics of rice root system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12): 2416-2421.
- [10] Singh S, Singh J S, Kashyap A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N fertilization[J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31(9): 1219-1228.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 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.
- [12] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华. 干湿交替灌溉方式下水稻节水增产机理研究[J]. 杂交水稻, 2009, 24(3): 72-75.
XU Fen-fen, ZENG Xiao-chun, SHI Qing-hua. Studies on yield-increasing effects of intermittent irrigation and its physiological mechanism in rice[J]. *Hybrid Rice*, 2009, 24(3): 72-75.
- [13] 程建平, 曹湊贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1859-1865.
CHENG Jian-ping, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, et al. effects of different irrigation modes on biological characteristics and water use efficiency of paddy rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1859-1865.
- [14] 黄璜. 稻田抗洪抗旱的功能 I. 深灌对水稻产量及营养器官的影响[J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(5): 341-344.
HUANG Huang. A study on paddy field flood-and-drought resisting ability: I. Effect on rice yield and its nutritive organs by deep water irrigation[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1998, 24(5): 341-344.
- [15] 黄璜. 稻田抗洪抗旱的功能 II. 深灌对早稻光合作用的影响[J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(6): 423-427.
HUANG Huang. A study on paddy field flood-and-drought resisting ability: II. effect of deep water irrigation on photosynthesis of rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1998, 24(6): 423-427.
- [16] 邵玺文, 马景勇, 童淑媛, 等. 灌浆乳熟期不同水分处理对水稻产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 41-43.
SHAO Xi-wen, MA Jing-yong, TONG Shu-yuan, et al. Effect of different water disposal on growth and yield of rice in milking stage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(3): 41-43.
- [17] 魏丹, 窦超银, 孟维忠. 分蘖和乳熟期控制灌溉对水稻生长和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27): 13-18.
WEI Dan, DOU Chao-yin, MENG Wei-zhong. Effects of controlled irrigation on rice growth and yield in tillering and milk stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(27): 13-18.
- [18] 黄璜. 湖南境内隐形水库与水库的集雨功能[J]. 湖南农业大学学报, 1997, 23(6): 499-503.

- HUANG Huang. The function gathering rain of stealthy reservoir and reservoir[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1997, 23(6): 499-503.
- [19] 颜晓元, 蔡祖聪. 淹水土壤中甲烷产生的影响因素研究进展[J]. 环境科学进展, 1996, 4(2): 24-31.
- YAN Xiao-yuan, CAI Zu-cong. Advance in study of factors influencing methane production and emission in wetland soils[J]. *Advances in Environmental Science*, 1996, 4(2): 24-31.
- [20] 李香兰, 马 静, 徐 华, 等. 水分管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放季节变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 535-541.
- LI Xiang-lan, MA Jing, XU Hua, et al. Effect of water management on seasonal variations of methane and nitrous oxide emissions during rice growing period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 535-541.
- [21] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N_2O , CO_2 and CH_4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 53(1): 29-39.
- [22] Yang X, Shang Q, Wu P, et al. Methane emissions from double rice agriculture under long-term fertilizing systems in Hunan, China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3-4): 308-316.
- [23] Cicerone R J, Shetter J D. Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion[J]. *Geophys Res*, 1981, 86(C8): 7203-7209.
- [24] 彭世彰, 李道西, 缴锡云, 等. 节水灌溉模式下稻田甲烷排放的季节变化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(5): 546-550.
- PENG Shi-zhang, LI Dao-xi, JIAO Xi-yun, et al. Effect of water-saving irrigation on the seasonal emission of CH_4 from paddy field[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2006, 32(5): 546-550.
- [25] Yagi K, Tsuruta H, Minamik K. The effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field; Automate methane monitoring[J]. *Global Biogeochemical Cycle*, 1996, 10(2): 255-267.
- [26] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 N_2O 和 CH_4 排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2): 231-237.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. CH_4 and N_2O emissions from rice paddy fields in Southeast China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 21(2): 231-237.
- [27] 白小琳, 张海林, 陈 阜, 等. 耕作措施对双季稻田 CH_4 与 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 282-289.
- BAI Xiao-lin, ZHANG Hai-lin, CHEN Fu, et al. Tillage effects on CH_4 and N_2O emission from double cropping paddy field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 282-289.
- [28] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 节水灌溉对稻田 N_2O 季节排放特征的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 14-18.
- PENG Shi-zhang, HOU Hui-jing, XU Jun-zeng, et al. Effects of water-saving irrigation on seasonal characteristics of N_2O emission from paddy fields[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 14-18.
- [29] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.
- PENG Shi-zhang, HOU Hui-jing, XU Jun-zeng, et al. CH_4 and N_2O emissions response to controlled irrigation of paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13): 121-126.
- [30] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4294-4300.
- YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. CH_4 and N_2O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4294-4300.
- [31] 徐 华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 400-505.
- XU Hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Effect of soil water regime and soil texture on N_2O emission from rice paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 400-505.
- [32] 陈冠雄, 黄国宏, 黄 斌, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 的排放及养萍和施肥的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 378-382.
- CHEN Guan-xiong, HUANG Guo-hong, HUANG Bin, et al. CH_4 and N_2O emission from a rice field and effect of *Azolla* and fertilization on them[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 378-382.
- [33] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 973-981.
- [34] Cayuela M L, Velthof G L, Mondini C, et al. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions during initial decomposition of animal by-products applied as fertilisers to soils[J]. *Geoderma*, 2010, 157(3-4): 235-242.