

稻麦轮作条件下机插水稻 CH_4 和 N_2O 的排放特征及温室效应

张岳芳¹, 陈留根¹, 王子臣¹, 张传胜², 朱普平¹, 盛 婧¹, 郑建初¹

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.农业部农业机械试验鉴定总站, 北京 100122)

摘 要:于 2008 年采用静态暗箱-气相色谱法对人工手插和机插 2 种水稻种植方式下 CH_4 和 N_2O 排放进行田间观测, 研究稻麦轮作条件下机插水稻 CH_4 和 N_2O 的排放特征及其温室效应。结果表明, 水稻生长季 CH_4 排放通量人工手插水稻和机插水稻均呈先升高后降低的变化趋势, N_2O 仅在水稻搁田期间有明显排放, 机插和人工手插水稻 CH_4 平均排放通量分别为 4.68 、 $4.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, N_2O 平均排放通量为 92.80 、 $111.33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与人工手插水稻相比, 机插水稻增加 CH_4 排放总量 14%, 减少 N_2O 排放总量 11%, 使稻季排放 CH_4 和 N_2O 所产生的全球增温潜势(GWP)和“单位产量的 GWP”分别提高 8%和 10%。在稻麦轮作条件下采用机插水稻种植方式, 水稻生长期间排放的 CH_4 和 N_2O 所形成的温室效应有提高的趋势。

关键词:机插水稻; CH_4 和 N_2O 排放; 温室效应; 稻麦轮作

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1403-07

Characteristics of CH_4 and N_2O Emissions and Greenhouse Effects for Mechanical Transplanting Rice in Rice-wheat Rotation System

ZHANG Yue-fang¹, CHEN Liu-gen¹, WANG Zi-chen¹, ZHANG Chuan-sheng², ZHU Pu-ping¹, SHENG Jing¹, ZHENG Jian-chu¹

(1.Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.China Agricultural Machinery Testing Center, Beijing 100122, China)

Abstract: CH_4 and N_2O play important role in global warming and climate change, the emissions of CH_4 and N_2O in rice fields are affected by many factors, such as climate, soil properties, water regime, fertilizers et al. However, the emissions of CH_4 and N_2O in rice fields under various cultivation patterns are currently poorly understood. By using the method of static chamber-gas chromatographic techniques, a field experiment was conducted in 2008 to study the characteristics of CH_4 and N_2O emissions and greenhouse effects of mechanical transplanting rice in a rice-wheat rotation system. The results showed that, the seasonal variation of CH_4 emission in two different rice cultivation patterns was defined, an increasing of CH_4 emission at the beginning and declining in later season were observed. A N_2O emission peak was observed during the midseason drainage period. The seasonal CH_4 emission averaged at $4.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in mechanical transplanting rice, and $4.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in manual transplanting rice. Seasonal N_2O emission averaged at $92.80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and $111.33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in mechanical transplanting rice and manual transplanting rice, respectively. Compared with manual transplanting rice, total CH_4 emissions was 14% higher in mechanical transplanting rice, while total N_2O emissions was 12% lower. In contrast with manual transplanting rice, mechanical transplanting rice increased total global warming potential (GWP) of CH_4 and N_2O emissions during paddy season and GWP per yield by 8% and 10%, respectively. These results indicated that mechanical transplanting rice would mildly intensify the radiative forcing during paddy season in rice-wheat rotation system relative to manual transplanting rice cultivation pattern.

Keywords: mechanical transplanting rice; CH_4 and N_2O emissions; greenhouse effect; rice-wheat rotation

收稿日期: 2010-01-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2007BAD89B12, 2006BAD02A15, 2006BAD15B08); 农业部公益性行业科研专项(200803028)

作者简介: 张岳芳(1978—), 男, 江苏常熟人, 博士, 副研究员, 主要从事农业生态与资源利用研究。

通讯作者: 陈留根 E-mail: chenliugen@sina.com

甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是与全球气候变化关系密切的重要温室气体,对温室效应的贡献仅次于二氧化碳(CO₂)^[1]。在 100 a 时间尺度上,单位质量 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势(GWP)分别为 CO₂ 的 25 倍和 298 倍^[2]。稻田是大气 CH₄ 的主要生物排放源之一,年排放量约为 31~112 Tg,占全球总排放量的 5%~19%^[2];稻田 N₂O 的排放量小于旱地^[3],但在水稻生长期采用搁田措施会明显促进 N₂O 的排放^[4-8]。

我国是世界上最大的水稻生产国和稻米消费国,稻田面积约占世界水稻种植总面积的 23%,因此,深入了解我国稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放规律并在此基础上采取相应减排措施,对缓解全球增温效应有非常重要的意义。长期以来我国水稻种植方式主要以人工手插水稻为主,随着近年来社会经济的发展和农村劳动力大量向非农产业转移,以省工省力、高产高效为特征的机插水稻、直播稻和抛秧稻的面积迅速扩大^[9]。特别是在农村经济较为发达和劳动力相对短缺的长江下游稻麦轮作地区,省工高效的机插水稻种植面积正逐年扩大,而传统的人工手插水稻面积越来越小^[10]。目前研究者关于我国稻田 CH₄ 和 N₂O 排放规律的认识主要是在人工手插水稻种植方式下获得的^[6,8,11-15],虽然在直播稻^[16-17]和抛秧稻^[18-20]种植方式下也做了一些研究,但对于机插水稻种植方式下稻田温室气体的排放特征缺乏了解。为此,本文通过田间试验比较研究传统人工手插水稻和机插水稻 2 种水稻种植方式下 CH₄ 和 N₂O 的排放特征及其温室效应,为稻麦轮作农田温室气体排放的精确估算及合理减排措施的制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于 2008 年 6 月—11 月在江苏省常熟市辛庄镇苏州市现代农业水稻示范区(31°32'N, 120°41'E)进行,该区地处阳澄湖低洼湖荡平原,主要实行水稻-冬小麦轮作制度。试验稻田土壤类型属乌栅土,前茬小麦于 6 月 3 日用收割机收获,留茬高 10 cm 左右,小麦秸秆不还田。试验前 0~20 cm 土壤理化性状为有机质 3.4%,速效氮 110.5 mg·kg⁻¹,速效磷 6.8 mg·kg⁻¹,速效钾 99.8 mg·kg⁻¹,土壤容重 1.2 g·cm⁻³, pH6.4。

试验采用随机区组设计,设置 2 种水稻种植方式处理:人工手插水稻和机插水稻,小区面积 60(5×12) m²,重复 3 次。供试水稻材料为大面积生产上的主推

品种早熟晚粳杂交稻常优 1 号,人工手插水稻采用常规水育秧,5 月 18 日落谷,6 月 20 日人工插秧移栽(移栽规格为行距 26.64 cm,株距 13.32 cm,每穴 2 本),11 月 13 日收获,大田生长期 146 d。机插水稻采用营养土双膜育秧,5 月 25 日落谷,6 月 13 日机械插秧移栽(移栽规格为行距 30 cm、株距 13.3 cm,每穴 3 本),11 月 16 日收获,大田生长期 156 d。各处理的施肥量和施肥方法相同,氮肥(尿素)、磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)用量每公顷分别为 N 240 kg、P₂O₅ 120 kg、K₂O 120 kg,氮肥按基肥:分蘖肥:长粗肥:穗肥=3:3:2:2 施用,磷肥一次性基施,钾肥作基肥和长粗肥施用,每次 50%,追肥分别于移栽后 7 d、7 月 16 日、7 月 23 日施用。各处理均在移栽前 3 d 灌水泡田,水稻生长期水分管理采用前期浅水(移栽至 7 月 25 日)、中期搁田(7 月 26 日至 8 月 9 日)、后期干湿交替(8 月 10 日至收获前 7 d)的管理模式,其他田间管理措施同一般高产大田。

1.2 气样采集与分析

CH₄ 和 N₂O 气体采用静态箱法测定,静态箱底横截面积为 50 cm×50 cm,采样箱由 PVC 材质制成,箱体高度随水稻高度而增加(拔节前 0.5 m、拔节后 1.2 m),采样箱外部包有海绵和铝箔纸,防止太阳照射导致箱内温度变化过大。水稻自移栽后第 3 d 起,每周采气 2 次,搁田期间(7 月 27 日—8 月 9 日)2 d 采气 1 次,抽穗后每周 1 次,采样时间在上午 8:00—10:00。采气样前打开采样箱内顶部两个 12 V 小风扇以充分混匀箱内气体,采集气样时,将采样箱垂直安放在底座 5 cm 深的凹槽内并加水密封,密封后用两通针将气体导入 18 mL 真空玻璃瓶中,每隔 10 min 采 1 次样,共 3 次。在每次气样采集的同时测定稻田 10 cm 土壤氧化还原电位(*Eh* 值)。CH₄ 气体浓度由带有氢火焰离子检测器的岛津 GC-12A 气相色谱仪测定,柱温 80 ℃,检测温度为 200 ℃,载气流速 40 mL·min⁻¹;N₂O 由带有 Ni⁶³ 电子捕获检测器的岛津 GC-14B 气相色谱仪测定,柱温 65 ℃,检测温度为 300 ℃,载气流速 40 mL·min⁻¹。气体排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \cdot h \cdot (dc/dt) \cdot 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为标准状态下气体的密度; h 是采样箱的净高度, m; dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率; 273 为气态方程常数; T 为采样过程中采样箱内的平均温度, ℃。

试验数据采用 SPSS11.5 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 机插水稻 CH₄ 排放的季节变化

图 1 显示了 2 种水稻种植方式下 CH₄ 排放通量的季节变化。研究表明,水稻生长季 CH₄ 排放通量人工手插水稻和机插水稻均呈先升高后降低的变化趋势。机插水稻的 CH₄ 排放峰值在 7 月 5 日出现,比人工手插水稻提前 3 d, 并且前者的 CH₄ 排放通量峰值也明显高于后者。机插水稻的 CH₄ 排放通量峰值达到 44.46 mg·m⁻²·h⁻¹,人工手插水稻为 29.12 mg·m⁻²·h⁻¹,2 个处理排放高峰都持续 10 d 左右。排放高峰过后,机插水稻的 CH₄ 排放通量下降速度较快,人工手插水稻下降相对较慢,因此直到采用搁田措施之前,机插水稻的 CH₄ 排放通量低于人工手插水稻(图 1)。在水稻搁田期间,CH₄ 排放非常微弱,即使搁田过后再度复水,2 种水稻种植方式处理的 CH₄ 排放通量始终较低直至水稻成熟收获。不同种植方式下水稻生长季 CH₄ 平均排放通量机插水稻高于人工手插水稻,分别为 4.68 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 4.39 mg·m⁻²·h⁻¹(表 1)。

为进一步分析比较不同水稻种植方式下稻季 CH₄ 排放的差异,明确机插水稻 CH₄ 排放特征,将水稻全生育期(大田生长期)分为移栽至有效分蘖临界叶龄期、有效分蘖临界叶龄期至拔节期、拔节期至抽

穗期、抽穗期至成熟期 4 个阶段。由表 1 可见,水稻不同生育阶段 CH₄ 累积排放量及其占全生育期排放总量的比例均为移栽至有效分蘖临界叶龄期>有效分蘖临界叶龄期至拔节期>抽穗期至成熟期>拔节期至抽穗期,说明 CH₄ 排放量主要集中在水稻生育前期,特别是移栽至有效分蘖临界叶龄期,机插水稻和人工手插水稻所占比例分别为 86.84%和 71.69%。

CH₄ 是强还原条件下产 CH₄ 菌的活动产物,一般认为产 CH₄ 菌在土壤 Eh<-150 mV 的环境中才能产生 CH₄^[21]。2 种水稻种植方式下,秧苗移栽后稻田土壤 Eh 迅速下降至-200 mV 后趋于稳定。土壤 Eh 在水稻搁田与复水期间快速上升和下降,在水稻成熟收获前又逐渐升高(图 2)。相关分析表明,人工手插水稻和机插水稻 CH₄ 排放通量的季节变化和土壤 Eh 呈极显著线性负相关关系($r=-0.687\ 7$ 和 $-0.558\ 1$, $P<0.01$, $n=36$ 和 38),说明土壤 Eh 对稻麦轮作农田稻季 CH₄ 排放有明显负作用。与人工手插水稻种植方式相比,机插水稻的大田生长期长 10 d、泡田和秧苗移栽时间均提前 7 d,其土壤 Eh 达到-150 mV 以下和-200 mV 以下的时间分别比人工手插水稻提前 6 d 和 4 d,并且机插水稻的稻季平均土壤 Eh 低于人工手插水稻(图2),机插水稻适宜产 CH₄ 的土壤 Eh 时间较长,可能导致机插水稻 CH₄ 排放较高。

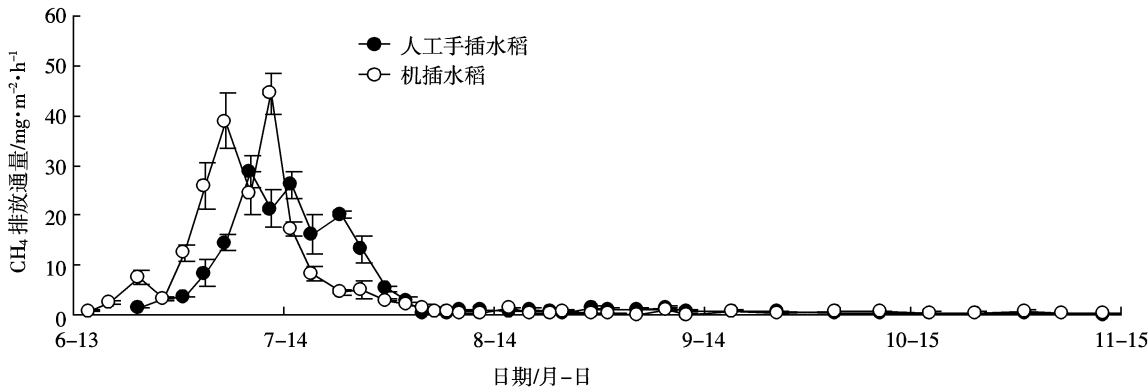


图 1 不同水稻种植方式下 CH₄ 排放通量的季节变化

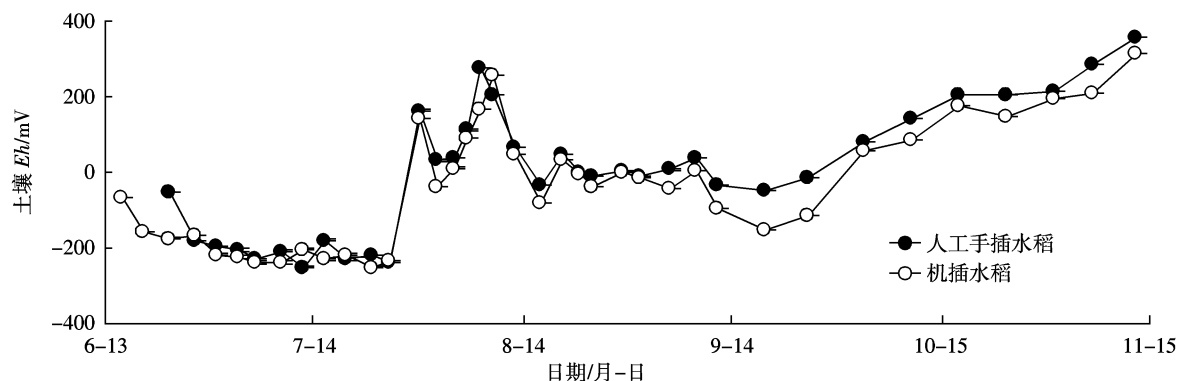
Figure 1 The seasonal variation of CH₄ fluxes under different rice cultivation patterns

表 1 稻季 CH₄ 平均排放通量及水稻不同生育阶段 CH₄ 累积排放量占全生育期排放总量的比例

Table 1 The mean CH₄ fluxes and percentage of accumulative emissions in different growing period to total emissions during paddy season

种植方式	平均排放通量/mg·m ⁻² ·h ⁻¹	移栽至有效分蘖临界叶龄期		有效分蘖临界叶龄期至拔节期		拔节期至抽穗期		抽穗期至成熟期	
		累积排放量/kg·hm ⁻²	占全生育期百分比/%	累积排放量/kg·hm ⁻²	占全生育期百分比/%	累积排放量/kg·hm ⁻²	占全生育期百分比/%	累积排放量/kg·hm ⁻²	占全生育期百分比/%
人工手插水稻	4.39±0.35	110.23 b	71.69 b	27.31 a	17.76 a	6.88 a	4.48	9.33	6.07
机插水稻	4.68±0.38	152.29 a	86.84 a	11.20 b	6.38 b	3.91 b	2.23	7.97	4.55

注:同列数值间不同英文小写字母表示 Duncan's 多重比较差异达 0.05 显著水平。

图 2 不同水稻种植方式下土壤 Eh 的季节变化Figure 2 The seasonal variation of soil Eh under different rice cultivation patterns

2.2 机插水稻 N_2O 排放的季节变化

稻田自移栽至搁田前采用浅水灌溉,基本处于淹水状态,2种水稻种植方式处理几乎无 N_2O 排放(图3)。搁田措施始于7月26日,2d后田间基本落干,土壤 Eh 迅速升高(图2),此时 N_2O 大量排放,人工手插水稻和机插水稻分别在8月3日和8月5日达到 N_2O 排放通量的最大值,排放峰值分别为 $1\,947.63$ 、 $1\,834.89\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。各处理在8月10日田间复水后 N_2O 排放通量降至 $59.45\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $46.92\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,在之后的干湿交替水分管理期间 N_2O 排放通量较低,少量的 N_2O 排放出现在水稻收获前14d的水分落干期(图3)。稻季 N_2O 平均排放通量人工手插水稻高于机插水稻,分别为 111.33 、 $92.80\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (表2)。

土壤中 N_2O 主要产生于土壤微生物的硝化和反硝化过程^[3],水稻生长期田间水分状况是决定 N_2O 季节变化的主要因素^[5-6,11,22]。水稻搁田期间适宜的土壤含水量和良好的土壤通气性,为土壤硝化和反硝化作用的快速进行创造了条件, N_2O 作为反应的主要产物而大量排放^[5-6,8,13]。由于搁田措施在有效分蘖临界叶

龄期至拔节期进行,这个阶段的 N_2O 累积排放量及其占全生育期排放总量的比例也最大,累积排放量约占稻季 N_2O 总排放量的80%,其次是拔节期至抽穗期,约排放15%的 N_2O ,抽穗期至成熟期、移栽至有效分蘖临界叶龄期2个阶段 N_2O 排放量较少(表2)。

2.3 稻季 CH_4 和 N_2O 的排放总量及其温室效应

鉴于人工手插水稻和机插水稻秧田期 CH_4 和 N_2O 排放微弱,并且其秧田与大田面积比分别达1:10和1:80,故本文对秧田期 CH_4 和 N_2O 的排放量忽略不计,只讨论大田生长期的排放量。由表3可知,机插水稻整个稻季(大田生长期)排放 CH_4 $175.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 N_2O $3.47\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,人工手插水稻的 CH_4 和 N_2O 排放总量分别为 $153.75\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3.90\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,机插水稻较人工手插水稻增加 CH_4 排放总量14%、减少 N_2O 排放总量11%。

全球增温潜势(GWP)一般作为相对指标来估算不同温室气体对气候系统的潜在效应,以 CO_2 作为参考气体,在100a时间尺度上,单位质量 CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 CO_2 的25倍和298倍^[2],据此计算各处理稻季 CH_4 和 N_2O 排放所产生的温室效应(CO_2 当

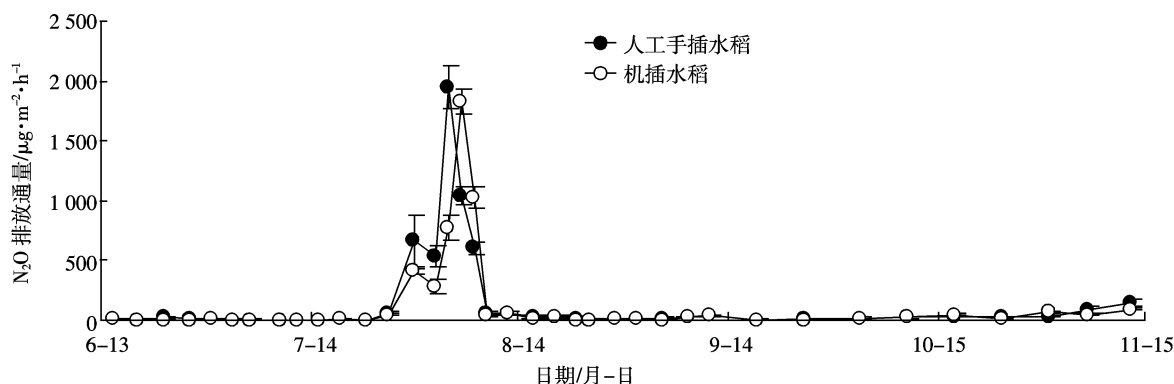
图 3 不同水稻种植方式下 N_2O 排放通量的季节变化Figure 3 The seasonal variation of N_2O fluxes under different rice cultivation patterns

表 2 稻季 N₂O 平均排放通量及水稻不同生育阶段 N₂O 累积排放量占全生育期排放总量的比例

Table 2 The mean N₂O fluxes and percentage of accumulative emissions in different growing period to total emissions during paddy season

种植方式	平均排放通量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	移栽至有效分蘖临界叶龄期		有效分蘖临界叶龄期至拔节期		拔节期至抽穗期		抽穗期至成熟期	
		累积排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	占全生育期百分比/%	累积排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	占全生育期百分比/%	累积排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	占全生育期百分比/%	累积排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	占全生育期百分比/%
人工手插水稻	111.33±27.26	0.07	1.70	3.05	78.23	0.18	4.63	0.60	15.44
机插水稻	92.80±14.76	0.06	1.74	2.75	79.22	0.15	4.43	0.51	14.61

表 3 不同水稻种植方式下稻季产量、CH₄ 和 N₂O 排放总量及温室效应

Table 3 Grain yield, total CH₄ and N₂O emissions during paddy season and their greenhouse effects under different rice cultivation patterns

种植方式	稻谷产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	CH ₄ 排放总量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N ₂ O 排放总量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	温室效应/ $\text{kgCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$	单位产量的 GWP
人工手插水稻	9747.43±950.18	153.75±12.22b	3.90±0.96	5 006	0.51b
机插水稻	9632.57±851.09	175.36±14.20a	3.47±0.55	5 418	0.56a
差值(机插水稻-人工手插水稻)	-114.86	21.61	-0.43	412	0.05

注:同列数值间不同英文小写字母表示 Duncan's 多重比较差异达 0.05 显著水平。

量)。由表 3 可知,机插水稻种植方式排放 CH₄ 和 N₂O 产生的温室效应相当于 5 418 kgCO₂·hm⁻², 人工手插水稻产生的温室效应为 5 006 kgCO₂·hm⁻²,机插水稻较人工手插水稻提高 412 kgCO₂·hm⁻², 增加温室效应 8%。考虑到 2 种水稻种植方式下稻谷产量水平有所差异,采用“单位产量的 GWP”这一指标来评价不同水稻种植方式对 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响^[14-15]。机插水稻和人工手插水稻“单位产量的 GWP”分别为 0.56 和 0.51, 前者比后者高约 10%, 差异达到显著水平 ($P<0.05$)。这表明,要获得相同的稻谷产量,机插水稻种植方式要比人工手插水稻增加温室效应 10%。

3 讨论

目前,我国水稻种植方式包括人工手插、机械插秧、直播、抛秧等^[9]。随着近年来插秧机械及其配套农艺技术的改进,机插水稻作为水稻机械化种植的主要模式,正在全国范围内迅速推广,2008 年的种植面积超过 3×10⁶ hm²,已发展成为水稻生产的重要种植方式^[23]。已有研究^[4,6,8,11-22,24-25]表明,影响稻田 CH₄ 排放的因子很多,水稻种植方式也是其中之一。傅志强等^[16]对直播稻与人工手插水稻的研究显示,2 种水稻种植方式呈现相同的 CH₄ 排放日变化与季节变化趋势;比较刘金剑等^[14]、向平安等^[18]、伍芬琳等^[20]的研究结果可见,湖南双季晚稻人工手插和抛秧 2 种水稻种植方式的 CH₄ 排放均呈前期高、后期随生育期进程而下降的趋势;而关于水稻种植方式对稻季 N₂O 排放季节变化的影响未见报道。本研究对稻麦轮作农田人工手插水稻和机插水稻 2 种水稻种植方式的研究表明,水稻移栽至搁田 CH₄ 排放呈先升高后降低趋势,搁田后土壤

CH₄ 排放较低,而 N₂O 仅在搁田期间土壤水分落干后有较多排放,其余时间排放非常微弱,与众多采用相同稻田水分管理模式(即前期浅水、中期烤田、后期干湿交替)下人工手插种植方式的研究^[6,8,11,13]结论一致。对湖南双季稻地区不同水稻种植方式的研究表明,直播稻大田生长期较人工手插水稻长 25~30 d,直播稻 CH₄ 季节平均排放通量小于人工手插水稻,但 CH₄ 排放总量大于人工手插水稻,水稻根系活力可能是影响 CH₄ 排放通量的重要因素^[16]。Ko 等^[24]在韩国的试验显示,季节 CH₄ 排放总量移栽 8 d 秧龄水稻>移栽 30 d 秧龄水稻>水直播稻>旱直播稻;Singh 等^[25]对印度直播稻、人工手插水稻和机插水稻的研究指出,不同水稻种植方式下 CH₄ 排放总量因施肥不同而异,产量水平较高时人工手插水稻和机插水稻 CH₄ 排放总量差异不大,但均明显高于直播稻。本研究结果表明,机插水稻和人工手插水稻整个稻季(大田生长期)CH₄ 排放总量分别为 175.36、153.75 kg·hm⁻²,机插水稻种植方式明显高于人工手插水稻。在长江下游稻麦轮作农田水稻生产中,人工手插水稻的移栽秧龄在 30 d 左右,机插水稻的移栽秧龄一般小于 20 d,为尽可能多的获取光温条件从而为取得高产打下基础。机插水稻的移栽时间通常早于人工手插水稻,而抽穗及成熟期略晚。本研究中 2 种水稻种植方式采用的农业措施(包括育秧时间、播种量、整地方法、移栽时间、栽插密度、肥料运筹、水浆管理等)与当地一般高产大田基本相同,因而试验具有代表性。从本试验来看,机插水稻较人工手插水稻的大田生长期长 10 d、泡田和秧苗移栽时间均提前 7 d,使得适宜产 CH₄ 的土壤 Eh 时间较长(图 2),这可能促进了稻季 CH₄ 排放。但本研究

还发现,2 种水稻种植方式下水稻生长季内 CH_4 和 N_2O 排放之间存在明显的相互消长关系,机插水稻较人工手插水稻减少 N_2O 排放总量 11%。

由以上结果可以看出,不同水稻种植方式改变了水稻大田期生长时间,并可能影响到稻田土壤性状和稻株自身生长,进而对 CH_4 和 N_2O 的排放通量和排放总量产生影响,但并未改变水稻生长期内 CH_4 和 N_2O 排放的季节变化趋势。

本研究对 2 种水稻种植方式下排放 CH_4 和 N_2O 产生的温室效应——全球增温潜势(GWP)的分析结果表明,机插水稻较人工手插水稻提高 $412 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$,增加温室效应(GWP)8%,由于机插水稻较人工手插水稻的产量水平略低,2 种水稻种植方式间“单位产量的 GWP”的差异进一步扩大,机插水稻较人工手插水稻的“单位产量的 GWP”提高 10%左右,并且差异达到显著水平($P < 0.05$)。从农业部制定的《全国水稻生产机械化十年发展规划(2006—2015)》^[26]来看,为缓解农村劳动力紧张和提高种稻效益,未来几年我国机插水稻种植方式所占比例将明显提高。由此推测,在水稻总产量相对稳定的情况下,随着机插水稻种植面积的不断扩大,水稻生长期间排放的 CH_4 和 N_2O 所形成的温室效应(GWP)有进一步提高的可能。由于本文未涉及稻麦轮作农田小麦生长期排放 CH_4 和 N_2O 产生的温室效应,全面评价不同水稻种植方式下稻麦轮作农田周年温室气体排放所形成的综合温室效应尚待进一步探讨。

4 结论

(1)稻季 CH_4 排放通量人工手插水稻和机插水稻 2 种水稻种植方式均呈先升高后降低的变化趋势,水稻搁田至成熟收获期间 CH_4 排放较低, N_2O 仅在水稻搁田期间有明显排放,稻季 CH_4 和 N_2O 排放之间存在明显的相互消长关系;机插水稻的 CH_4 排放峰值比人工手插水稻提前 3 d,并且 CH_4 排放通量峰值明显高于后者,机插水稻和人工手插水稻 CH_4 平均排放通量分别为 $4.68, 4.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, N_2O 平均排放通量为 $92.80, 111.33 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(2)大田生长期机插水稻和人工手插水稻 CH_4 排放总量分别为 $175.36, 153.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_2O 排放总量分别为 $3.47, 3.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,机插水稻较人工手插水稻增加 CH_4 排放总量 14%、减少 N_2O 排放总量 11%,使稻季排放 CH_4 和 N_2O 所产生的全球增温潜势(GWP)和“单位产量的 GWP”分别提高 8%和 10%。与传统人

工手插水稻相比,在稻麦轮作农田采用机插水稻种植方式,提高了水稻生长期间排放 CH_4 和 N_2O 产生的温室效应。

参考文献:

- [1] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to the global warming[J]. *Nature*, 1990, 344:529-531.
- [2] IPCC. Climate Change 2007:Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[R/OL]. (2007-11-17)[2010-1-9]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>.
- [3] 封克,殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. 土壤学进展, 1995, 23(6):35-41.
FENG Ke, YIN Shi-xue. Soil factors influencing N_2O production and emission[J]. *Progress in Soil Science*, 1995, 23(6):35-41.
- [4] CAI Z C, XING G X, YAN X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196:7-14.
- [5] 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):499-505.
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):499-505.
- [6] 蒋静艳,黄耀,宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):552-556.
JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of water controlling and straw application on CH_4 and N_2O emissions from rice field[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5):552-556.
- [7] 黄树辉,吕军,曾光辉. 水稻烤田期间 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2004, 24(6):1084-1090.
HUANG Shu-hui, LV Jun, ZENG Guang-hui. Nitrous oxide emissions and impact factors in paddy soil drying[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(6):1084-1090.
- [8] 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.
- [9] 朱德峰,陈惠哲,徐一成. 我国水稻种植机械化的发展前景与对策[J]. 北方水稻, 2007(5):13-18.
ZHU De-feng, CHEN Hui-zhe, XU Yi-cheng. Countermeasure and perspective of mechanization of rice planting in China[J]. *Reclaiming and Cultivation*, 2007(5):13-18.
- [10] 张传胜. 江苏省水稻机插秧技术发展的实践与趋势的探讨[J]. 中国农机化, 2007(3):51-53.
ZHANG Chuan-sheng. Study on the practice and trend of development of rice mechanic insert planting technology in Jiangsu Province[J]. *Chinese Agricul Tural Mechanization*, 2007(3):51-53.
- [11] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6):758-764.

- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6):758-764.
- [12] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12):4294-4300.
- YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. CH₄ and N₂O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12):4294-4300.
- [13] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪, 等. 埥沟埋草对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4):27-31.
- MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Influence of wheat straw buried in ditches on CH₄ and N₂O emissions from rice fields[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4):27-31.
- [14] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH₄ 的排放[J]. 生态学报, 2008, 28(6):2878-2886.
- LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2878-2886.
- [15] Zou J W, Liu S W, Qin Y M, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129:516-522.
- [16] 傅志强, 黄 璜. 种植方式对水稻 CH₄ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2513-2517.
- FU Zhi-qiang, HUANG Huang. Impact of rice cultivation patterns on methane emission from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2513-2517.
- [17] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2166-2172.
- DAI Guang-zhao, LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, et al. Effects of no-tillage and fertilization on paddy soil CH₄ and N₂O emissions and their greenhouse effect in central China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9):2166-2172.
- [18] 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.
- [19] 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 Xiao-ping, WU Fen-lin, HUANG Feng-qiu, 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.
- [20] 伍芬琳, 张海林, 李 琳, 等. 保护性耕作下双季稻田甲烷排放特征及温室效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9):2703-2709.
- WU Fen-lin, ZHANG Hai-lin, LI Lin, et al. Characteristics of CH₄ emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9):2703-2709.
- [21] 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):24-32.
- 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):24-32.
- [22] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2):231-237.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in Southeast China[J]. *Scientia Atmosperica Sinica*, 1997, 21(2):231-237.
- [23] 农业部农业机械化管理局. 中国农业机械化科技发展报告(1949—2009)[R]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2009:54.
- Administration department of agricultural mechanization, Ministry of agriculture of the People's Republic of China. Proceedings of China scientific and technological development report on agricultural mechanization(1949—2009)[R]. Beijing:China Agricultural Sciencetech Press, 2009:54.
- [24] Ko J Y, Kang H W. The effects of cultural practices on methane emission from rice fields[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58:311-314.
- [25] Singh S K, Bharadwaj V, Thakur T C, et al. Influence of crop establishment methods on methane emission from rice fields[J]. *Current Science*, 2009, 1:84-89.
- [26] 农业部. 全国水稻生产机械化十年发展规划(2006—2015)[EB/OL]. (2008-6-11)[2010-1-9]. <http://info.nongji.hc360.com/2008/06/11075687259.shtml>.
- Ministry of agriculture of the People's Republic of China. The ten-year development plan of rice mechanization production(2006—2015)[EB/OL]. (2008-6-11)[2010-1-9]. <http://info.nongji.hc360.com/2008/06/11075687259.shtml>.

致谢:南京农业大学郭世伟教授,中科院南京土壤所徐华研究员、李小平高级工程师在本研究大田试验和气样分析过程中给予了帮助,对此深表谢意。