

水分管理对水稻生长期 CH₄ 排放的影响

李香兰^{1,4}, 徐华^{1*}, 曹金留², 蔡祖聪¹, 八木一行³

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 江苏农林职业技术学院, 江苏句容 212400; 3 国立农业环境技术研究所, 日本筑波 305;

4 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 通过温室盆栽试验研究相同施肥条件下, 不同水分管理 (持续淹水, 分蘖肥后提前烤田、正常烤田和推迟烤田) 对水稻生长期 CH₄ 排放的影响。结果表明, 对烤田处理而言, CH₄ 的排放峰值出现在烤田期间, 在此期间 CH₄ 排放量占季节排放量的 38.75%~52.21%。烤田初期出现排放高峰, 然后急剧下降, 烤田结束前接近于零; 水稻生长后期干湿交替阶段只有少量 CH₄ 排放。提前烤田、正常烤田和推迟烤田 3 个处理水稻生长期 CH₄ 平均排放通量依次为 0.86、0.96、1.45 mg/(m²·h), 烤田开始越晚, CH₄ 排放越多。土壤 Eh 是影响不同烤田处理水稻生长期 CH₄ 排放的主要因素。持续淹水处理水稻移栽 30 天后的 CH₄ 排放通量与土壤温度呈显著性相关 ($r=0.682^{**}$, $p<0.01$)。持续淹水处理 CH₄ 排放通量是烤田处理的 12~20 倍。

关键词: CH₄ 排放; 水分管理; 烤田; 稻田

中图分类号: S131; X511

甲烷 (CH₄) 对温室效应的贡献达 19%, 是仅次于 CO₂ 的重要的温室气体^[1]。CH₄ 在空气中的寿命 (8.4~12 年) 比 CO₂ (5~200 年) 短得多, 减少其排放对缓和潜在的全球增温趋势比减少 CO₂ 的排放更为有效^[2]。工业革命以来大气 CH₄ 浓度持续增加, 20 世纪 90 年代每年 CH₄ 的浓度增长已达到 7.0 μg/L^[3]。大气中 CH₄ 浓度的增加是各种人为因素和自然因素共同造成的, 其中水稻种植面积不断增加是最重要的原因之一。IPCC 估算稻田排放的 CH₄ 量大约是人为因素引起的 CH₄ 排放量的 17.5%±12.5%^[4]。因此如何正确评估并设法减少稻田 CH₄ 排放量倍受国内外农业环境科学家的重视。

稻田 CH₄ 是严格厌氧条件下产 CH₄ 菌作用于产 CH₄ 基质的结果, 与土壤还原条件关系密切的土壤水分状况是影响稻田 CH₄ 排放量的最重要的因素之一, 人们寄希望于寻求合适的水分管理措施来减少稻田 CH₄ 排放量。以前期淹水、中期烤田、后期干湿交替为特征的间灌是我国及亚洲其他水稻种植国家沿用久远的水分管理措施。近十几年来的大量研究表明, 水稻生长期持续淹水会造成稻田极端厌氧, 有利于 CH₄ 的产生排放; 相反, 烤田增加土壤通透性, 使大气中氧气扩散到土壤中破坏原有的还原状态, 从而抑制 CH₄ 的产生, 即烤田相对于持续淹水能大量减少水

稻生长期 CH₄ 的排放^[5-7]。目前国内外报道大多认为, CH₄ 排放量在烤田期间降为零, 在烤田结束复水后开始增加^[8-9]; 也有人发现, CH₄ 排放峰值出现在烤田时, 复水后没有 CH₄ 排放^[10-11]。水稻移栽后开始烤田的时间并不完全一致, 不同时间开始烤田土壤水分状况发生变化, 这必然会影响到 CH₄ 排放。本文通过温室盆栽试验研究了水稻生长期追施分蘖肥后不同时间开始烤田对 CH₄ 排放的影响, 并与持续淹水处理进行比较。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤采自江苏省宜兴市大浦镇 (31°17'N, 119°54'E) 的稻田。土壤全 C 和全 N 含量分别是 12.6 g/kg 和 1.3 g/kg, pH 6.23。试验为盆栽试验, 盆钵为圆柱形, 直径 25 cm, 高 35 cm, 每盆装土 16 kg。试验依水稻生长期水分管理共设 4 个处理: ①持续淹水 (水稻生长期自始至终保持 3~5 cm 水层); ②提前烤田 (水稻移栽后 24 天开始烤田); ③正常烤田 (水稻移栽后 30 天开始烤田, 与当地习惯一致); ④推迟烤田 (水稻移栽后 38 天开始烤田)。每个处理 3 个重复, 共 12 盆钵, 呈随机分布。

1.2 水肥管理

水稻于 6 月 11 日移栽, 10 月 28 日收获, 生长期

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371068) 和中国科学院全国优秀博士学位论文专项基金课题资助。

* 通讯作者 (hxu@issas.ac.cn)

作者简介: 李香兰 (1980—), 女, 山东莱芜人, 博士研究生, 主要从事农田生态系统温室气体排放的研究。E-mail: xlli@issas.ac.cn

为 139 天。水稻生长期水分管理采用传统的前期淹水、中期烤田、后期干湿交替（为方便比较，统一设为 5 天落干/5 天淹水）的管理模式，表 1 为处理方案及时间安排。各盆钵施肥情况相同，其施肥量为 N 270

kg/hm²，并且 N:P₂O₅:K₂O = 2:1:1。其中基肥于水稻移栽前施入，基肥施 N 量为设计施 N 量的 50%，分蘖肥和穗肥分别于 6 月 27 日和 8 月 7 日施入，施 N 量均为设计施 N 量的 25%。

表 1 水稻生长期不同处理的水分管理

Table 1 Water management of different treatments during rice-growing season

处理	前期淹水 (月/日)	中期烤田及复水期 (月/日)		后期干湿交替 (月/日)
		烤田时间	复水时间	
提前烤田	6/11—7/4	7/5—7/19	7/20—8/17	8/18—10/28
正常烤田	6/11—7/10	7/12—7/23	7/24—8/17	8/18—10/28
推迟烤田	6/11—7/18	7/19—7/29	7/30—8/17	8/18—10/28
持续淹水	自始至终保持 3~5 cm 水层			

1.3 采样和测定

采集气样时，将有机玻璃采气箱（30 cm × 30 cm × 100 cm）放置在 5 cm 深的水槽（与顶端下 5 cm 处盆钵外侧焊为一体）中。通过插进密封采样垫的两通针，用 18 ml 真空瓶采集箱内气体，每隔 10 min 采一次样，共 4 次。气体 CH₄ 浓度由带有氢火焰离子检测器的气相色谱仪（岛津 GC-12A）测定。土表、5 cm 及 10 cm 土层深度土壤温度由带温度探针的便携式温度计测定。土壤 Eh 通过插入盆钵土壤的 3 支铂电极（深度为 10 cm）用便携式土壤 Eh 计测定。

1.4 CH₄ 排放通量计算

CH₄ 排放通量计算公式如下：

$$F = \rho \times [(0.3 \times 0.3 \times 0.95 + 0.00049 \times h) / 0.049] \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T$$

式中， F 为 CH₄ 排放通量 (mg/(m²·h))； ρ 为标准状态下 CH₄ 密度 (0.714 kg/m³)； h 为盆钵顶部至盆钵内土面或水面的深度 (cm)； $\Delta c / \Delta t$ 为单位时间密闭箱内 CH₄ 浓度的变化量 (mg/(L·h))； T 为密闭箱内温度 (K)。CH₄ 排放通量用每次观测 3 个重复的平均值表示，CH₄ 季节平均排放量则是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。

2 结果与讨论

2.1 各处理水稻生长期 CH₄ 排放的季节变化

图 1 表示各处理水稻生长期 CH₄ 排放的季节变化。从图 1 可知，对持续淹水处理而言，CH₄ 排放量远远高于烤田处理，并且在相应的烤田开始和水稻进入分蘖期后出现大幅度上升，在水稻抽穗期达到高峰，最大峰值为 45.48 mg/(m²·h)；生长后期在水稻移栽后 99 天时出现大幅度降低。对不同的烤田处理而言，CH₄ 排放峰值出现在烤田期间，烤田初期出现排放高峰，然后急剧下降，烤田结束前 1~6 天内接近于零，烤田结束复水后较长时间的干湿交替阶段 CH₄ 排放量很

小；随着烤田开始时间的推迟 CH₄ 排放的峰值逐渐增大。

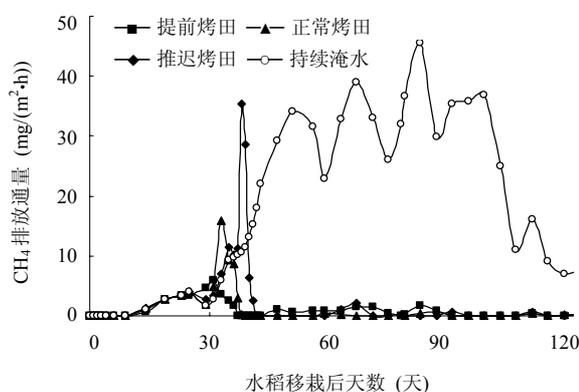


图 1 各处理水稻生长期 CH₄ 排放的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of CH₄ fluxes of different treatments during rice-growing period

CH₄ 排放量受土壤类型、施肥制度、水稻植株及水分管理等综合因素的影响，其中最重要的是土壤水分状况和施肥管理^[7]。在水稻移栽后第 24、30、38 天分别对提前烤田、正常烤田、推迟烤田 3 个处理的土壤进行充分烤田，结果显示，烤田前持续淹水阶段只有少量 CH₄ 排放，而之后烤田极大地促进了 CH₄ 排放。提前烤田、正常烤田、推迟烤田的 CH₄ 排放峰值依次是 6.02、15.98、35.35 mg/(m²·h)，分别出现在水稻移栽后的第 31、33、38 天；而水稻生长期平均排放通量分别为 0.86、0.96、1.45 mg/(m²·h)。随着烤田开始时间的推迟，CH₄ 排放通量逐渐增加。由于提前烤田和正常烤田处理烤田起始阶段土壤温度分别为 26.71℃ 和 29.17℃（图 2），提前烤田处理烤田起始阶段温度较低，使土壤不能快速落干而较长时间处于淹水或湿润状态，这样就使有效烤田的时间缩短，为 CH₄ 产生排放提供良好条件，导致其 CH₄ 平均排放通量偏高，与正常烤田的 CH₄ 平均排放通量接近。

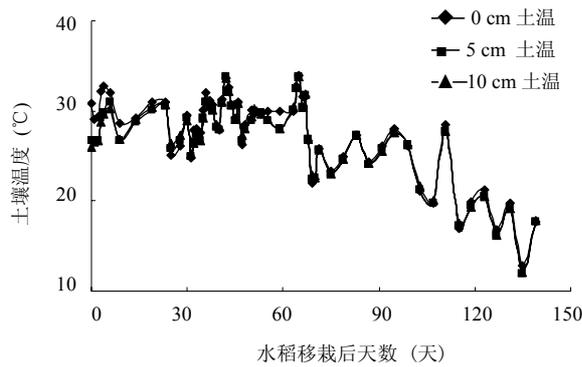


图 2 水稻生长期土壤温度的季节变化

Fig. 2 Seasonal soil temperature changes during rice-growing period

稻田 CH_4 排放的峰值出现在土面水分落干、土壤呈微干松软状态时；烤田至土壤干裂时， CH_4 排放通量降为零。烤田开始后，随着土壤水分含量逐渐降低和大气氧向土壤的扩散，土壤 Eh 会不断升高，但土壤却有大量的 CH_4 排放，说明烤田期间土壤排放的 CH_4 主要是土壤中早先产生但未及时排放的闭蓄态 CH_4 。烤田开始时间越迟，烤田前淹水时间越长，闭蓄态 CH_4 越多，烤田开始后 CH_4 排放峰值越大。土壤因烤田而呈微干松软状态时出现 CH_4 排放峰值，这可能是因为土壤是一个不均匀体，土面微干松软时部分土壤微区的 Eh 还没有达到抑制 CH_4 产生的水平，土壤仍有一定的产 CH_4 能力；并且这时相当一部分土壤微孔被空气充满，这大大增加了闭蓄态 CH_4 由土壤向大气传输的速率。产 CH_4 菌是严格厌氧细菌，它可以忍受一定的温度、pH 和盐度极限，但短时间暴露于空气即可死亡。随着烤田的进行，土壤 Eh 越来越高，土壤 CH_4 产生速率越来越低，直至为零。烤田期间 CH_4 排放量先增后降的趋势与其他研究者结果类似^[10-11]。各烤田处理在烤田结束后复水期以及随后干湿交替阶段只观察到少量 CH_4 排放，这主要是由于期间每次淹水时间较短，土壤 Eh 要么不能降至适宜 CH_4 产生水平，要么适宜 CH_4 产生的较低 Eh 水平保持时间较短

的缘故。

水分对土壤中 CH_4 的产生起着决定性作用，这是因为 CH_4 产生所需的厌氧条件在很大程度上决定于土壤水分状况，只有当水分阻止了氧的扩散从而形成了严格的厌氧环境时， CH_4 才能产生。在水稻移栽 30 天后，淹水处理 CH_4 的排放逐渐升高，并在水稻移栽 51 天时达到第一个排放峰值。郝瑞军等^[12]通过室内培养试验研究水分状况对水稻土有机 C 矿化动态的影响，结果发现培养 10~20 天内，淹水处理土壤中水溶性有机 C (DOC) 的含量逐渐下降，培养 30~60 天内含量显著升高，60 天时达到最大，与本试验持续淹水处理 CH_4 排放的动态变化基本一致。水溶性有机 C 含量与 CH_4 产生有显著的相关性，这在国内外已有大量报道^[14-15]。

2.2 CH_4 平均排放通量和不同水分管理阶段的分配

为进一步定量比较不同处理之间 CH_4 的排放差异，阐明水分管理对稻田 CH_4 排放的影响，将水稻生长季节分为烤田前淹水期、烤田期间和烤田后淹水及干湿交替 3 个阶段。表 2 显示各处理 CH_4 平均排放通量及不同水分管理阶段 CH_4 排放量占季节排放量的比例。由表 2 可知，对不同的烤田处理，随着烤田开始时间的推迟，烤田前淹水期 CH_4 排放量占季节排放量的比例由 15.9% 增加到 50.70%，而烤田期间比例则由 52.21% 降至 38.75%。水稻生长期各烤田处理 CH_4 平均排放通量存在如下关系：提前烤田 < 正常烤田 < 推迟烤田。

尽管烤田处理土壤在烤田期间短时间内出现极高的 CH_4 排放量，但烤田后较长的干湿交替期间其 CH_4 排放量远远低于持续淹水土壤，又由于烤田处理土壤烤田期间维持很高 CH_4 排放通量的时间很短，而烤田后干湿交替期间其 CH_4 排放通量明显低于持续淹水土壤的时间很长，所以烤田处理土壤总 CH_4 排放量低于持续淹水处理土壤，后者大约是前者的 12~20 倍 (表 2)。

表 2 CH_4 平均排放通量及不同水分管理阶段 CH_4 排放量占季节排放量的比例Table 2 The mean CH_4 flux and proportion of the CH_4 emission in different water-managing period to the total amount during rice-growing period

处理	CH_4 平均 排放通量 ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	烤田前淹水期		烤田期间		烤田后淹水及干湿交替阶段	
		CH_4 排放量 (mg/m^2)	占全生长期 比例 (%)	CH_4 排放量 (mg/m^2)	占全生长期 比例 (%)	CH_4 排放量 (mg/m^2)	占全生长期 比例 (%)
提前烤田	0.86	530.83	15.9	1743.05	52.21	1063.99	31.88
正常烤田	0.96	1109.03	34.36	1599.45	49.69	510.18	15.85
推迟烤田	1.45	2461.85	50.70	1881.36	38.75	512.32	10.55
持续淹水 ¹⁾	17.52	1038.31	1.70	1405.74	2.30	58607.54	96.00

1) 持续淹水处理对应的烤田时间与当地习惯一致。

2.3 土壤 Eh 和土壤温度对水稻生长期 CH₄ 排放的影响

图 3 表示水稻生长期土壤 Eh 的季节变化。从图 3 可以看出，水稻移栽后土壤 Eh 呈下降趋势，之后出现较小峰值，烤田开始后土壤 Eh 出现大幅度上升趋势，提前烤田、正常烤田和推迟烤田的土壤 Eh 峰值在烤田期间分别为 440.67、582.11 和 533.44 mV，水稻生长后期干湿交替阶段土壤 Eh 一直处于较高的水平。同时考查水稻生长期土壤温度的季节变化，由于钵体内土量较少，土壤温度能更快地随气温变化而变化，因此土表、5 cm 和 10 cm 深土温的变化趋势基本一致，整个水稻生长期各层土温均在 12.10 ~ 33.77℃ 之间变化（图 2）。相关分析表明，各处理整个水稻生长期 CH₄ 排放通量与土壤 Eh 呈显著负相关，而与土温之间没有显著相关性（表 3），说明土壤 Eh 是比土壤温度更重要的稻田 CH₄ 排放的影响因子。

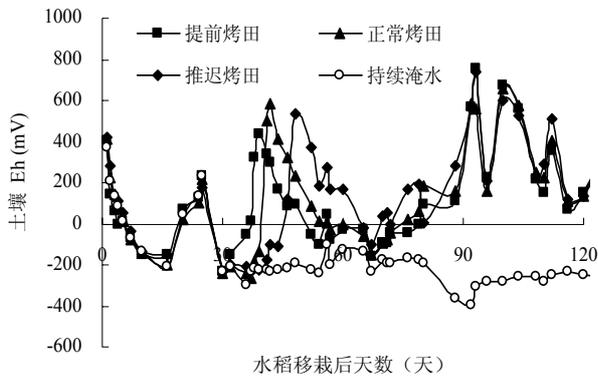


图 3 水稻生长期土壤 Eh 的季节变化

Fig. 3 Seasonal soil Eh changes during rice-growing period

从图 3 可知，持续淹水处理水稻移栽 30 天后直至收获，土壤 Eh 一直处于较低的适宜 CH₄ 产生的水平；而 CH₄ 排放则有很大的起伏（图 1）。相关分析表明，持续淹水处理水稻移栽 31 天至收获期间 CH₄ 排放通量与土温呈显著正相关 ($r = 0.682^{**}$, $p < 0.01$)，而与土壤 Eh 之间没有显著相关性（表 3）。由于持续淹水处理水稻移栽 31 天至收获期间土壤 Eh 皆较低，期间 CH₄ 排放通量的变化主要受土壤 Eh 之外的因素，如土壤温度的显著影响。其他不同烤田处理，由于土壤 Eh 变化较大，是 CH₄ 产生的主要限制因素，CH₄ 排放通量的变化只受土壤 Eh，而不受土壤温度的显著影响（表 3），这与 Xu 等^[13]研究冬季水分对随后水稻生长期 CH₄ 和土壤 Eh 季节变化影响时观测到的规律一致。

3 结论

受不同水分管理的影响，持续淹水处理 CH₄ 排放量远远大于烤田处理；前者是后者的 12 ~ 20 倍。烤田处理 CH₄ 排放峰值出现在烤田开始后，烤田结束前降为零，在此期间 CH₄ 排放量占水稻生长期 CH₄ 排放量的 38.75% ~ 52.21%，水稻生长后期只有少量 CH₄ 排放。水稻生长期不同烤田处理 CH₄ 平均排放通量存在如下关系：提前烤田 < 正常烤田 < 推迟烤田，土壤 Eh 是影响水稻生长期 CH₄ 排放的主要因素。持续淹水处理 CH₄ 排放集中在水稻移栽 30 天后，在此期间 CH₄ 排放量占季节排放量的 96%，并受土壤温度的显著影响。

表 3 水稻生长期及水稻移栽 31 天至收获期间 CH₄ 排放通量与土壤 Eh 和土壤温度的相关性系数

Table 3 Correlation coefficients between CH₄ flux and soil Eh and soil temperature during rice-growing period including and excluding the first 30 days of rice growth

处理	水稻生长期相关系数		水稻移栽 31 天至收获期间相关性系数	
	CH ₄ 排放通量-土壤 Eh	CH ₄ 排放通量-土壤温度	CH ₄ 排放通量-土壤 Eh	CH ₄ 排放通量-土壤温度
持续淹水	-0.518**	0.003	-0.156	0.682**
提前烤田	-0.410**	0.162	-0.504*	0.239
正常烤田	-0.471**	0.275	-0.516*	0.261
推迟烤田	-0.454**	0.265	-0.535*	0.290

注：*和**分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平上的显著相关性。

参考文献：

[1] Bouwman AF. Soils and the Greenhouse Effect. Chichester: John Wiley and Sons. 1990, 25-32, 457-466

[2] Hogan KB, Hoffman JS, Thompson AM. Methane on the greenhouse agenda. Nature, 1991, 354: 181-182

[3] IPCC. Climate Change 2001: The Science Basis: Technical Summary. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

[4] IPCC. Greenhouse Gas Inventory Workbook. UK: IPCC, 1995

[5] Sass RL, Fisher FM, Wang YB, Turner FT, Jund MF. Methane emission from rice fields: The effect of floodwater management. Global Biogeochem. Cycles, 1992, 6: 249-262

[6] Cai ZC, Xu H, Zhang HH, Jin JS, Estimate of methane emission

- from rice paddy fields in Taihu region, China. *Pedosphere*, 1994, 4 (4): 297-306
- [7] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K, Minami K. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochem. Cycle*, 1996, 10: 255-267
- [8] Bronson KF, Neue HU, Single U, Abao JR EB. Automatic chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. Residue, nitrogen, and water management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 981-987
- [9] 曹金留, 任立涛, 汪国好, 徐华, 蔡祖聪, 沈其荣. 爽水性稻田甲烷排放特点. *农业生态环境*, 2000, 19 (1): 10-14
- [10] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响. *土壤学报*. 2000, 37 (1): 69-76
- [11] 曹金留, 任立涛, 陈国庆, 徐华, 蔡祖聪. 水稻田烤田期间甲烷排放规律研究. *农村生态环境*, 1998, 14 (4): 1-4
- [12] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍. 水分状况对水稻土有机碳矿化动态的影响. *土壤*, 2006, 38 (6): 750-754
- [13] Xu H, Cai ZC, Li XP, Tsuruta H. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH₄ emission from rice field. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38 (1): 1-12
- [14] 上官行建, 王明星. 稻田甲烷排放的控制措施. *地球科学进展*, 1993, 8 (5): 56-62
- [15] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 稻田土壤理化特性对甲烷排放的影响. *土壤与环境*, 2001, 10 (1): 27-29

Effect of Water Management on CH₄ Emission during Rice-Growing Season

LI Xiang-lan^{1,4}, XU Hua¹, CAO Jin-liu², CAI Zu-cong¹, YAGI Kazuyuki³

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong, Jiangsu 212400, China; 3 National Institute of Agro-Environmental

Sciences, Tsukuba 305, Japan; 4 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A greenhouse pot experiment was carried out in rice-growing season to investigate the effects of water management on methane (CH₄) emissions. Four treatments including continuous flooding (CF), keeping 3 to 5 cm water layer during the rice-growing season; early aeration (EA), 24 days after rice transplanting; normal aeration (NA), 30 days after rice transplanting; late aeration (LA), 38 days after rice transplanting were dedicated to this experiment. The results showed that CH₄ emissions of different aeration treatments sharply increased after the beginning of mid-season aeration and then quickly decreased to near zero. Significant negative correlations between CH₄ emission and soil Eh were discovered during rice-growing period ($p < 0.01$). The total CH₄ emission of different aeration treatments during aeration periods accounted for 38.75% ~ 52.21% of those emitted during the whole rice-growing season. The average CH₄ fluxes of EA, NA and LA were 0.86、0.96、1.45 mg/(m²·h), respectively. So it is easily found that the later it began to aerate, the more CH₄ emitted. The CH₄ emission of treatment CF was 12 ~ 20 times more than those of aeration treatments. Significant positive correlation between CH₄ flux and soil temperature of treatment CF was found during rice-growing period excluding the first 30 days ($r = 0.682^{**}$, $p < 0.01$).

Key words: CH₄ emission, Water management, Mid-season aeration, Rice field