

节水灌溉模式对稻田 CH₄ 排放规律的影响

彭世彰^{1, 2}, 李道西^{1, 2}, 徐俊增^{1, 2}, 丁加丽^{1, 2}, 何岩³, 郁进元³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学节水研究所, 南京 210098; 3. 昆山市水利技术推广站, 苏州 215300)

摘要: 基于水稻节水灌溉技术和密闭静态箱技术田间原位采集甲烷气样, 试验研究了水稻节水控制灌溉模式对稻田 CH₄ 排放规律的影响. 结果表明, 控制灌溉稻田 CH₄ 排放呈现明显的下午极大值型日变化, CH₄ 排放高峰主要出现在下午 13:00, 淹水处理 CH₄ 排放峰值在 1 d 中各个时刻的出现具有一定的随机性. 控制灌溉稻田 CH₄ 排放呈现明显的单峰型季节排放规律, 排放高峰发生在分蘖前期, 比淹水处理提前了 10 d. 所以, 控制灌溉模式在水稻返青期后的水分调控及生产性用水等水管理措施对稻田 CH₄ 排放的影响至关重要. 控制灌溉水稻全生育期的稻田 CH₄ 排放总量为 24.46 g·m⁻², 比淹水稻田减少了 39%, 平均排放率为 7.96 mg·(m²·h)⁻¹, 但返青期和分蘖前期的 CH₄ 平均排放率比淹水稻田高, 在以后的各个生育阶段均低于淹水稻田.

关键词: 节水灌溉; 控制灌溉; 甲烷排放; 稻田生态

中图分类号: X131.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0009-05

Effect of Water-Saving Irrigation on the Law of CH₄ Emission from Paddy Field

PENG Shi-zhang^{1, 2}, LI Dao-xi^{1, 2}, XU Jun-zeng^{1, 2}, DING Jia-li^{1, 2}, HE Yan³, YU Jin-yuan³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Science Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Kunshan Water Conservancy Technique Expansion Station, Suzhou 215300, China)

Abstract: Based on rice water-saving irrigation technique and observation in situ with closed static chamber technique, field experiment was carried out to investigate the effect of rice water-saving controlled irrigation on the law of CH₄ emission from paddy field. The results show that the diurnal variation of CH₄ emission from paddy field under controlled irrigation (PFCI) appears regular afternoon-maximum model, mainly at 13:00, but that from paddy field under flooding irrigation (PFFI) appears random model. The seasonal variation of CH₄ emission from PFCI takes on distinct one-peak pattern, occurring at the initial tillering stage of rice, more than 10 days earlier than that from PFFI. So, water regulation and practical irrigation of control irrigation model, especially after rice turning-green stage, is quite important to affect CH₄ release from paddy field. The total CH₄ emission from PFCI is 24.46 g·m⁻², the seasonal average of CH₄ emission rate is 7.96 mg·(m²·h)⁻¹, reduced by 39% compared with that from PFFI. But the mean emission rate of CH₄ from PFCI is higher during rice turning-green and initial tillering stage, and lower than that from PFFI.

Key words: water-saving irrigation; controlled irrigation; methane emission; ecology of paddy field

20 世纪 90 年代以来, 我国各种水稻节水灌溉技术, 如“薄浅湿晒”、“薄露”、“浅湿晒”、“间歇灌溉”、“控制灌溉”、“半旱栽培”、“覆膜旱作”等都得到了大面积的推广应用, 稻田生态环境发生了很大改变^[1]. 前人对稻田生态环境的研究多是关于节水灌溉对稻田渗漏量、稻田温度、稻田通气性、稻田病虫害以及矿质营养等的影响^[2]. 实际上, 灌溉稻田还会产生二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等重要温室气体^[3-5], 对气候产生影响. 已有研究表明, 淹水稻田会有大量 CH₄ 气体产生^[6], 同时不同的灌溉模式对稻田 CH₄ 排放的影响极大^[6-8], 但节水灌溉模式对稻田 CH₄ 排放的影响如何还鲜有研究. 通过田间小区试验, 研究节水灌溉模式对稻田 CH₄ 排放规律的影响, 以更全面地评价水稻节水灌溉给

稻田生态环境带来的影响.

1 材料与方法

1.1 试区概况

试验地选在江苏昆山市水利技术排灌试验基地(31°15'15"N, 121°57'43"E)内. 试区属亚热带南部季风气候区, 年平均气温 15.5℃, 年降雨量 1 097.1 mm, 年蒸发量 1 365.9 mm, 日照时数 2 085.9 h, 平均无霜期 234 d. 当地习惯稻麦轮作, 土壤为潴育型黄泥土, 耕层土壤为重壤土, 0~18 cm 土层土壤有机碳 30.3 g/kg, 全氮 1.79 g/kg, 全磷 1.4 g/kg, 全钾

收稿日期: 2006-01-13; 修订日期: 2006-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50479022); 河海大学院士学科建设项目(2084/4021E7)

作者简介: 彭世彰(1959~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为节水灌溉理论与农田生态效应, E-mail: szpeng@hhu.edu.cn

20.86 g/kg, pH 值 7.4.

1.2 试验设计

在水稻品种、育秧、移栽、密度、植保、用肥、用药等技术措施以及基础地力相同的条件下,安排长期淹水和控制灌溉(以下简称“控灌”)2种水分处理,每个处理3个重复,计6个小区.小区周围有10 m以上的保护地.每个小区面积150 m²(20 m×7.5 m),田间小区布置如图1,各小区之间用砖砌混凝土田埂隔离(高30 cm,宽30 cm),田埂向地下内嵌50 cm深的塑料防渗膜,防止小区间的水分交换.每个小区中央离田埂2 m处预埋1个方形硬塑料底座(80 cm×80 cm),底座嵌入土壤5 cm深,作为采样点,用于放置CH₄人工采样静态箱,并在田间埋设TDR探头监测不同深度的土壤水分.

前茬作物为小麦,供试水稻品种为早熟晚粳型9998-3,2005-05-20播种,06-23移栽(株距×行距=16.7 cm×26.7 cm),10-25收割.其中,06-19施有机肥(猪粪)2.25×10⁴ kg·hm⁻²、06-23施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=10%:6%:9%)375 kg·hm⁻²作基肥;07-01施农用碳酸氢铵(总氮≥17.5%)375 kg·hm⁻²作分蘖肥;08-11施尿素(总氮≥46.2%)150 kg·hm⁻²、复合肥(N:P₂O₅:K₂O=10%:6%:9%)150 kg·hm⁻²作穗肥.

淹水处理从水稻插秧开始一直维持3~5 cm水层,直到黄熟期10-06后自然落干至收割.控灌处理是在秧苗本田移栽后的返青期田面保留5~25 mm薄水层,以后的各个生育期除生产性用水外,灌溉后田面不建立灌溉水层,以根层土壤水分作为控制指标,确定灌水时间和灌水定额^[9].

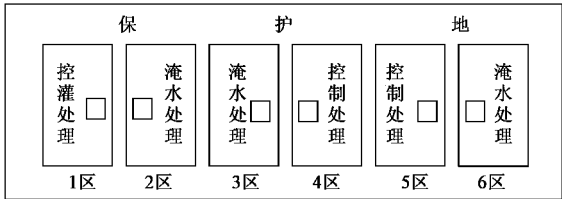


图1 田间试验布置
Fig.1 Layout of field experiment

1.3 田间采样

采用密闭静态箱法定位观测CH₄的气体通量^[8].箱体用厚5 mm的透明有机玻璃制成,包括中段箱和顶箱2部分,高分别为50 cm和60 cm,底面积均为80 cm×80 cm.中段箱顶部有密封用水槽,用于水稻生长后期加层.顶箱顶部封闭,装有搅拌小风

扇(12V,直径12 cm),并打孔接出风扇电源线和温度探头,箱侧面接出采气管线.采气管箱内外分别长约30 cm和2 m,箱外与带有三通阀的60 mL塑料针筒相连,抽样后立即用三通阀将气体转入气袋(120 mL,大连德霖生产).箱外先包1层约5 cm厚的海绵,然后覆盖1层铝箔,以减小采样期间由于太阳辐射引起的箱内温度变化.水稻移栽后第3 d开始采样,每隔3 d采样1次,采样时刻为上午10:00~11:00^[10],每个采样点在盖箱后第0、5、10和15 min时采样,同时记录箱温和田间水层深.

日变化的采样只在水稻每个生育阶段的中后期选取1 d进行,代表日期分别是06-30、07-16、08-05、08-26、09-06、09-26和10-13,分别代表水稻返青期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期.由于夜间人工取样困难,实际测量工作只在白天的7:00~8:30、10:00~11:30、13:00~13:30、15:00~16:30、18:00~19:30进行,考虑到9月中旬以后天黑较早,最后一个时刻取样被提前到17:00~18:30.

1.4 气样分析及通量计算

气样CH₄浓度用带有氢火焰离子化检测器(FID)的SP-2000A型气相色谱仪(山东鲁南瑞虹化工有限公司)分析,其测定条件为:不锈钢柱2 m×2 mm×0.5 mm,检测器、分离柱和进样器温度分别为160℃、130℃和140℃,载气为纯N₂,燃气为H₂,助燃气为纯空气,流速分别为60 mL·min⁻¹,40 mL·min⁻¹,350 mL·min⁻¹;定量管为2 mL.采用的CH₄标气浓度有11.6 mL/m³,110 mL/m³和620 mL/m³,由南京麦克斯南分特种气体有限公司生产提供,CH₄浓度用外标法确定.通过对每组4个样品CH₄浓度与对应的采样间隔时间进行直线回归可求得CH₄浓度变化率,继而根据(1)式求得CH₄排放通量^[8].对水稻各个生育阶段的CH₄排放通量进行内插积分求和,即可计算出各阶段的稻田CH₄排放量,各阶段的和即为水稻全生育期CH₄排放总量,进一步地将CH₄排放量按该生育阶段天数或小时数进行折算,即可求得该阶段CH₄平均排放率.

$$F = \frac{dm}{dt \times A} = \rho \cdot H \cdot \frac{dc}{dt} \\ = \frac{10^{-5} \cdot \bar{\mu p}}{R(T + 273.2)} \cdot H \cdot \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中,F为CH₄排放通量,mg·(m²·h)⁻¹;dm为箱内CH₄质量变化量,mg;ρ为箱内CH₄气体的密

度, $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$; A 为采样箱横截面积, cm^{-2} ; H 为箱内有效高度, cm ; m 为箱内 CH_4 气体的质量, mg ; dc/dt 为箱内 CH_4 浓度随时间的变化率, $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$; $\bar{p}$ 为箱内平均气压, 对于非高海拔区可取 $\bar{p} = 1.013\,25 \times 10^5\text{ Pa}$; $\bar{T}$ 为箱内平均气温; R 为普适气体常数 [$8.314\,4\text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$]; μ 为 CH_4 摩尔质量 ($16.123\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 控制灌溉对稻田 CH₄ 排放日变化的影响

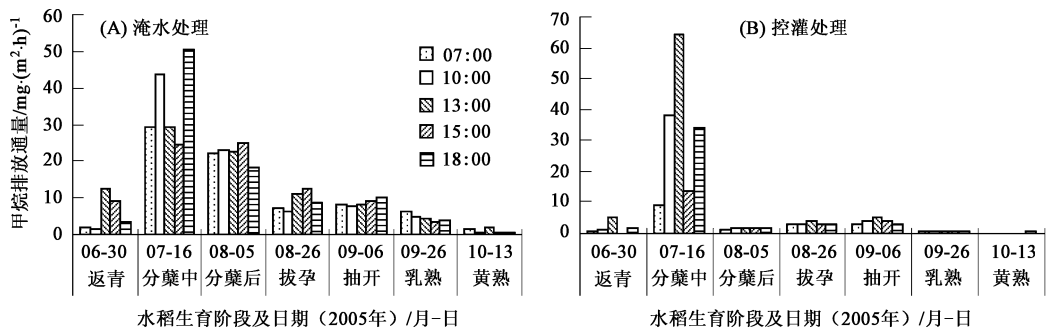


图 2 不同灌溉模式下水稻全生育期稻田 CH₄ 排放的日变化

Fig.2 Diurnal variation of CH₄ emission from rice paddies during rice entire growth period under different flooding treatments

2.2 控制灌溉对稻田 CH₄ 排放季节变化的影响

2.2.1 CH₄ 季节排放规律分析

已有研究表明, 稻田 CH₄ 季节排放有 3 个典型排放峰, 分别发生在水稻生长初期(返青期)、中期(分蘖、拔节期)和后期(黄熟期)^[8, 12]. 研究表明, 不同灌溉模式对稻田 CH₄ 季节排放的影响是显著的. 从图 3 可以很明显地看出, 控灌处理稻田出现 CH₄ 排放峰值的时间比淹水处理提前了 10 多天. 淹水条件下, 稻田 CH₄ 的排在分蘖中期达到最大, 随后基本上一直呈缓慢降低趋势. 但水分控制条件下, CH₄ 的排在分蘖前期的第 3 d 就出现了排放高峰, 而且在分蘖中期时排放高峰再次发生, 随后 CH₄ 排放迅速下降, 从拔节孕穗期开始就维持极低的 CH₄ 排放水平一直到水稻黄熟. 可以认为, 这种 CH₄ 季节性排放变化的差异主要缘于田间水分管理的不同. 淹水稻田长期有水层, 土壤中有机质分解较慢, CH₄ 的排放是一个缓慢释放过程. 但是, 控灌稻田分蘖前期田间就实行无水层管理, 土壤中有机质分解加快, 促进了 CH₄ 排放高峰的提前到来. 另外, 水稻分蘖前期的生产性用水(主要指施蘖肥和除草剂用水)可能导致短期的水层落干后再次复水, 稻田的这

图 2 显示了淹水和控制灌溉 2 种水分处理下在代表日的稻田 CH₄ 日排放变化. 淹水处理稻田 CH₄ 排放峰值在水稻全生育期某 1 d 中某个时刻的出现变化不定, 呈现随机型日变化特征. 控灌处理稻田 CH₄ 日排放呈现明显的下午极大值型日变化, 整个生育阶段进行的 7 次日排放测量中, 前 5 次都是以下午 13:00 出现 1 d 中 CH₄ 排放高峰. 与文献[11]报道的连续淹水稻田甲烷日排放最大值出现在 12:00 ~ 15:00 一致, 主要受水稻植株根区氧化还原状况、气温、土壤温度以及水温的综合影响.

种干湿交替可能引起又一次显著的 CH₄ 排放^[6]. 由此看来, 控制灌溉技术返青期后的水分调控及后期的生产性用水等水管理措施对稻田 CH₄ 排放的影响至关重要.

2.2.2 CH₄ 排放量分析

从表 1 可以看出, 控灌处理水稻全生育期稻田 CH₄ 排放总量为 $24.46\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 比淹水处理 $39.88\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 减少了约 39%. 淹水处理稻田 CH₄ 排放主要发生在分蘖中期和后期, 以及拔节孕穗期, 分别占水稻全生育期 CH₄ 排放总量的 28%、19% 和 26%. 控灌处理的稻田 CH₄ 排放则主要集中在分蘖前期和中期, 分别占水稻全生育期 CH₄ 排放总量的 30% 和 37%, 其它生育阶段的 CH₄ 排放量均较小. 可能原因是淹水处理稻田土壤一直处于厌氧环境, 制约稻田 CH₄ 排放的因素主要是外源有机质供应程度及土壤温度, 当有丰富的有机质供应和适宜的土温时, 淹水稻田 CH₄ 的显著排放随时都可以发生. 但控灌处理稻田在分蘖前期从有水层到无水层的变化最大程度地激发了在返青期已经积蓄在土壤中的 CH₄ 的释放^[13], 加上分蘖期温度较高(平均气温 $30\sim 34^{\circ}\text{C}$), 水稻植株生长也逐渐加快, 有利于 CH₄ 的产生和传

表 1 不同灌溉模式下水稻全生育期稻田 CH₄ 排放量/g·m⁻²

Table 1 Amount of CH₄ emission at various rice growth stages under different irrigation patterns/g·m⁻²

处理	泡田	返青	分蘖			拔节孕穗	抽穗开花	乳熟	黄熟	全生长期
			前期	中期	后期					
淹水处理	0.02	0.28	4.00	11.25	7.42	10.26	1.72	4.43	0.50	39.88
控灌处理	0.02	1.01	7.40	8.93	2.18	3.40	0.77	0.60	0.14	24.46

输,最终导致了控灌处理稻田 CH₄ 在分蘖期的大量排放^[8].到水稻生长中后期,田间不再建立水层,极大地破坏了产甲烷菌产生 CH₄ 所要求的厌氧环境,大部分产甲烷菌在分蘖期后就已经死亡,即便有丰

富的有机质供应和适宜产甲烷菌活动的土温,稻田也不会有明显的 CH₄ 排放,所以控灌处理水稻生长中后期的稻田甲烷排放量则相对较小.

2.2.3 CH₄ 平均排放率分析

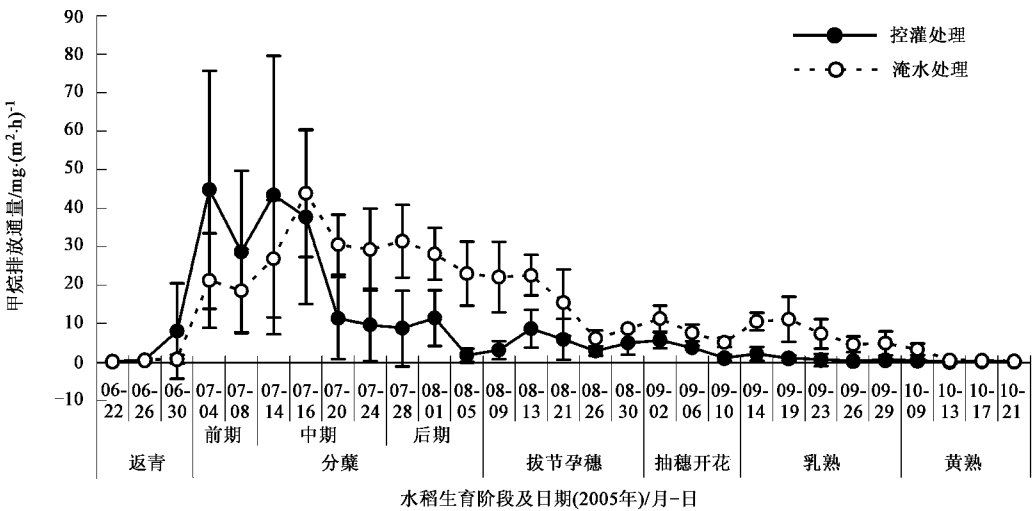


图 3 不同灌溉模式下水稻全生育期稻田 CH₄ 排放的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of CH₄ emission during the entire growth period under different irrigation patterns

计算表明,控灌处理水稻全生育期 CH₄ 平均排放率为 7.96 mg·(m²·h)⁻¹,淹水处理为 12.98 mg·(m²·h)⁻¹.控灌处理稻田 CH₄ 平均排放率在水稻各生育阶段的变化较大,分蘖前期和分蘖中期的 CH₄ 平均排放率可达 34.26 mg·(m²·h)⁻¹和 24.81 mg·(m²·h)⁻¹,而到拔节孕穗和抽穗开花时 CH₄ 平均排放率仅有 5.25 mg·(m²·h)⁻¹和 3.56 mg·(m²·h)⁻¹.从图 4 可以看出,控灌处理稻田 CH₄ 平均排放率在返青期和分蘖前期超过淹水处理,但在以后的各个生育阶段均低于淹水处理,与前面分析的稻田甲烷季节排放规律一致.

3 结论

(1)控制灌溉的稻田 CH₄ 日排放主要呈现下午极大值型日变化,CH₄ 排放高峰主要出现在下午 13:00,上午 07:00 最小.而淹水处理 1 d 中 CH₄ 排放

峰值在各个时刻出现具有不稳定性,其日变化峰值的出现具有一定的随机性.

(2)不同灌溉模式对稻田 CH₄ 季节排放的影响是显著的.控制灌溉条件下,CH₄ 的排放 in 分蘖前期

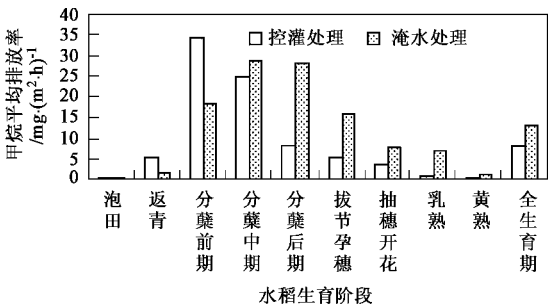


图 4 不同灌溉模式下水稻全生育期 CH₄ 平均排放率的比较

Fig.4 Mean emission rates of CH₄ during the entire growth period under different irrigation patterns

的第 3 d 就出现了排放高峰,而且在分蘖中期时排放高峰可能再次发生,随后 CH₄ 排放迅速下降,从拔节孕穗期开始就维持极低的 CH₄ 排放水平一直到水稻黄熟.

(3)控制灌溉稻田分蘖前期的水分调控会引起 2 种后果:①CH₄ 排放高峰会比淹水稻田提前到达 10 多天;②刺激闭蓄态 CH₄ 的大量排放,其排放峰值甚至超过淹水稻田 CH₄ 排放的主峰,所以,控制灌溉模式在水稻返青期后的水分调控及生产性用水等水管理措施对稻田 CH₄ 排放的影响至关重要.

(4)控灌稻田水稻全生育期 CH₄ 排放总量为 24.46 g·m⁻²,比淹水稻田减少了 39%,其 CH₄ 排放主要发生在分蘖前期和中期,分别占水稻整个生长期 CH₄ 排放量的 30% 和 37%.

(5)控灌稻田水稻全生育期 CH₄ 平均排放率为 7.96 mg·(m²·h)⁻¹,但在各生育阶段的变化较大,在返青期和分蘖前期 CH₄ 平均排放率超过淹水稻田,在以后的各个生育阶段均低于淹水稻田.

参考文献:

[1] 茆智. 水稻节水灌溉及其对环境的影响[J]. 中国工程科学, 2002, 4(7): 8 ~ 16.
[2] 程旺大, 赵国平, 张国平, 等. 水稻节水栽培的生态和环境效应[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 191 ~ 194.
[3] Kahalil M A K. Emission of trace gases from Chinese rice fields and

biogas generation: CH₄, N₂O, CO₂, chorocarbons, and hydrocarbons[J]. Chemosphere, 1990, 20: 207 ~ 213.
[4] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758 ~ 764.
[5] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 484 ~ 491.
[6] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K, *et al.* Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 255 ~ 267.
[7] 张剑波, 邵可声, 李智. 北京地区春季稻田甲烷排放的研究[J]. 环境科学, 1994, 15(5): 23 ~ 26.
[8] 王明星. 中国稻田 CH₄ 排放[M]. 北京: 科学出版社. 2001. 31 ~ 48, 124 ~ 134, 218 ~ 219.
[9] 彭世彰, 俞双恩, 张汉松, 等. 水稻节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 1 ~ 7, 18 ~ 45.
[10] 李晶, 王明星, 陈德章. 稻田甲烷排放非连续测量中采样时间的选择[J]. 中国科学院研究生院学报, 1998, 15(1): 24 ~ 29.
[11] Satpathy S N, Rath A K, Ramakrishnan B, *et al.* Diurnal variation in methane efflux at different growth stages of tropical rice[J]. Plant and Soil, 1997, 195: 267 ~ 271.
[12] Sass R L, Fisher F M. CH₄ emission from paddy fields in United States Gulf Coast area[A]. In: Minami K, Mosier A, Sass R. CH₄ and N₂O[C], NIAES, Tsukuba, Japan. 1994. 65 ~ 77.
[13] Ratering S, Conrad R. Effects of short-term drainage and aeration on the production of methane in submerged rice soil[J]. Global Change Biology, 1998, 4(4): 397 ~ 407.