

Effect of Water and Nitrogen Fertilizer Management on CH₄ Emission from Paddy Soil

Yunsheng Lou^{1,2}, Zhongpei Li², Zeng-an Wei¹, Inubushi Kazuyuki³

¹College of applied meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, No 219 Ningliu Road, Nanjing 210044, China

²State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

³Laboratory of Soil Science, Faculty of Horticulture, Chiba University, Matsudo 648, Chiba 271-8510, Japan
Email: yunshlou@yahoo.com.cn

Abstract: CH₄ emission from paddy soil is the balance of methane production, oxidation and transmission in the soil. A pot experiment was conducted in greenhouse to study the effect of water and nitrogen fertilization management on CH₄ emission, to estimate the total CH₄ emission with different water and fertilization managements. The results showed that flooded-cultivation increased CH₄ emission; and NH₄Cl-cultivation also increased CH₄ emission.

Keywords: water; nitrogen fertilization; methane; emission flux

氮肥和水分管理对水稻土甲烷排放的影响*

娄运生^{1,2} 李忠佩² 韦增岸¹ 犬伏和之³

¹南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044, 中国;

²中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008, 中国

³千叶大学园艺学部土壤学研究室, 松户 648, 日本

E-mail: yunshlou@yahoo.com.cn

摘 要: 稻田CH₄排放是稻田土壤中CH₄产生、氧化和传输不同过程的净效应。采用温室土培方法研究了水分和氮肥管理对CH₄排放及其相关因子的影响, 并估算了不同水分和氮肥情况下CH₄累积排放量。结果表明, 水田在淹水(5cm水层)时, CH₄排放量明显高于湿润(100%饱和含水量)时; 供应NH₄Cl时CH₄排放量高于供应Ca(NO₃)₂。

关键词: 水分; 氮肥; 甲烷; 排放通量

1 引言

甲烷(CH₄) 是大气中含量仅次于 CO₂ 的温室气体, 其辐射增温效应是 CO₂ 的 20~30 倍。在对流层, CH₄ 被氧化生成其它温室气体(CO 和 CO₂), 其温室效应被进一步放大^[1,2]。对极地冰芯的研究表明: 工业革命前大气中甲烷的浓度约为 0.6~0.8μL/L。受人类活动影响, 大气 CH₄ 的浓度不断升高。目前地表大气中 CH₄ 的平均浓度为 1.7μL/L, 北半球比南半球平均高出 0.14μL/L, 季节波动为

0.03μL/L^[1,3]。

稻田是大气甲烷的主要源之一, 约占大气甲烷总来源的10%~20%^[4]。因此, 研究稻田甲烷排放对于研究全球碳收支和气候变化有特别重要的意义。稻田甲烷排放是土壤甲烷产生、氧化及输送过程相互作用的结果。稻田甲烷主要在土壤耕作层下产生, 主要是通过水稻植物体输送到大气中的。当土壤中甲烷产生速度比较小或输送不畅时, 大多数的甲烷在土壤中被氧化, 从而排放量就小。在整个水稻生长季节中, 在土壤中产生的甲烷70%~90%被氧化在土壤中^[5,6], 只有较少一部分能够排放到大气中去。稻田甲烷在稻田土壤的无氧环境中, 厌氧细菌的活动首先是土壤有机质腐败分解, 产生H₂

*资助信息: 国家自然科学基金(40871151), 江苏省自然科学基金(BK2009413), 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812000062)和江苏省“青蓝工程”项目联合资助。

和 CO_2 或乙酸和甲酸等小分子化合物, 这些化合物在产甲烷细菌的作用下产生甲烷^[5,7]。

水分管理是影响稻田 CH_4 产生、氧化与排放的重要因素之一。有研究表明, 冬季淹水不仅引起冬季(非水稻生长期) CH_4 的大量排放, 还影响水稻生长期 CH_4 排放量。非水稻生长期土壤水分含量越高, 随后水稻生长期 CH_4 排放量越大, 产生和氧化能力越强。其主要原因是土壤水分影响产甲烷菌和甲烷氧化菌的种群状态, 长期的好氧条件可使产甲烷菌数量大幅度减少, 活性受到极大抑制^[8]。施肥是影响稻田甲烷排放的重要管理措施, 有机肥能为甲烷的产生提供易分解的有机质, 氮肥则由于供应过多氮素改变 C/N 比而抑制甲烷产生和排放^[9]。所以, 研究水分和氮肥的管理, 对于研究甲烷的排放有重要的意义。

2 材料与方法

2.1 材料

本实验采用温室土培方法。供试水稻品种为 IR72, 由国际水稻研究所提供。供试土壤为砂质水稻土, 其基本理化性状为: 有机碳 = 7.5 g kg^{-1} ; 砂粒 = 91.0%; 壤粒 = 8.0%; 粘粒 = 1.0%; $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 6.3$; $\text{CEC} = 6.1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \text{ soil}$ 。供试肥料为 NH_4Cl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 施肥量为 300 kg N/ha 。

2.2 方法

水分管理包括淹水(5cm 水层)和湿润(100%饱和含水量)两种处理。温室育苗, 每盆移入大小一致的幼苗 2 株。水稻淹水处理, 整个生育期保持 5cm 水层。

甲烷排放通量采用密闭箱-气相色谱法测定。采样箱为圆柱形, 箱高 100cm, 直径 27cm, 壁厚 0.15cm, 由有机玻璃制成, 箱外顶部装有硅胶塞, 用于接注射器; 箱内顶部接有一根 50cm 的软管, 伸入箱内用于混合箱内气体。采样在每天上午 9:00 进行, 罩箱后将底座加水密封, 罩箱 10min 后开始采样。每两周采集一次气体样品, 直到成熟。重复 3 次, 取平均值。

2.3 数据统计分析

数据处理采用 SPSS 分析软件进行统计分析。不同处理平均值之间的差异显著性用单因素方差分析, 仅限于同一采样时间的不同处理。

3 结果与讨论

3.1 淹水与湿润下 CH_4 排放通量的比较

图 1 表明, 不论是淹水还是湿润情况, 在水稻移植后的 20 天之内, CH_4 通量的排放没有明显区别, 均维持在 $0 \mu\text{g pot}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 左右。移植 20 天之后, 两种情况下 CH_4 通量的排放都呈上升趋势, 且淹水条件下 CH_4 排放通量高于湿润条件下。淹水是土壤产生 CH_4 的主要条件, 土壤悬液试验表明, 只有当土壤氧化还原电位 Eh 低于 -100 到 -150 mV 时, 才有甲烷生成。稻田淹水一段时间后甲烷产生量随土壤 Eh 的迅速下降而急剧增加^[11], 所以即有淹水条件下 CH_4 的产生明显高于湿润条件下。另外, 产甲烷菌在厌氧条件下更易成活, 稻田淹水时由于缺氧, 存在大量产甲烷菌, 在产甲烷菌的作用下, 便产生较多的甲烷。

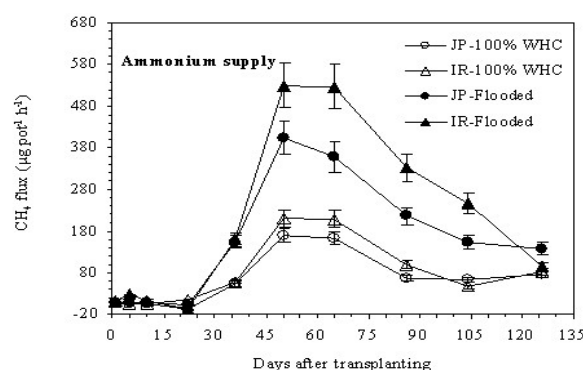


图 1 不同水分条件下施铵态氮对甲烷排放的影响

土壤甲烷的排放是土壤中甲烷生成与甲烷氧化消耗的综合结果, 农田水分管理不仅影响土壤甲烷的生成, 也影响甲烷的氧化消耗。稻田排放的甲烷只是甲烷生成量的 20%, 而土壤中产生的甲烷大部分(80%) 在排放前已被氧化消耗掉^[12]。因此, 不仅影响甲烷生成的因素会影响稻田甲烷排放, 影响甲烷氧化的因素对稻田甲烷排放也起着至关重要的作用。稻田土壤微生物长期处在高浓度甲烷环境中, 逐渐形成的对甲烷态碳源的利用能力, 只要有氧的供应就会氧化消耗环境中的甲烷。有研究表明, 土壤氧化甲烷的速率随甲烷浓度的升高而增加^[13]。土壤水分从两个方面影响甲烷氧化, 一是通过气体的扩散影响甲烷和氧对微生物的供应, 二是影响微生物的活性。甲烷氧化菌是好氧性细菌, 淹水不仅导致甲烷和氧的运动速度减慢, 而且使土壤甲烷氧化菌的活性受到抑制, 从而增加甲烷的排放。而水分过低, 甲烷氧化微生物的渗透压增加, 活性降低, 也影响其甲烷氧化能力。综合甲烷生成和

氧化的结果, 即有淹水条件下 CH_4 的排放通量明显高于湿润条件下。

图 1 移植后 50 天左右, CH_4 排放通量都达到了最大值, 再往后, 淹水条件下 CH_4 排放通量仍然高于湿润条件, 但淹水与湿润条件下 CH_4 排放通量都逐渐下降。这是在移植后期, 即水稻生长后期, 水稻根系和通气组织生长渐衰, CH_4 排放通量下降。对于不同的水稻品种, 其 CH_4 排放通量也不同, 这种区别在移植 35 天后日趋明显, 水稻 IR 的 CH_4 排放通量高于水稻 JP, 这可能与不同水稻品种的根氧化力强弱和通气组织(分蘖数)有关^[14]。

由图 2 看出, 不论是淹水还是湿润情况, 在水稻移植后的 20 天之内, CH_4 排放通量没有明显区别, 均维持在 $0 \mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ 左右。移植 20 天之后, 随着根系生长和分蘖数增加, 稻田 CH_4 排放通量逐渐上升, 而且在淹水情况下 CH_4 排放通量高于湿润情况下。淹水时, 土壤中氧化还原电位 Eh 下降, 甲烷的生成量上升。土壤中只要有氧的供应就会氧化消耗所产生的甲烷, 使甲烷排放减少; 而淹水时严重缺氧, 甲烷被氧化消耗极少, 排放的就多。而稻田淹水时由于缺氧, 存在大量产甲烷菌, 能产生较多的甲烷。甲烷氧化菌是好氧性细菌, 淹水不仅导致甲烷和氧的运动速度减慢, 而且使土壤甲烷氧化菌的活性受到抑制, 从而增加甲烷的排放。水稻移植后的 50 天至 90 天之内正是水稻的生长盛期, 根系和通气组织都比较发达, 所以这段时期内稻田 CH_4 排放通量出现了极大值。

到了水稻移植后期, 水稻的根系和通气组织生长渐衰, 甲烷传输不畅, 极大地减少了 CH_4 排放通量。不过在整個生长期中, 淹水情况下的 CH_4 排放通量始终高于湿润情况下。由图 2 还看出, 对于不同的水稻品种, 其 CH_4 排放通量是不相同的。这种差异在水稻生长盛期更明显, 其中水稻 IR 的 CH_4 排放通量高于水稻 JP 的, 这跟图 1 中的结论是一致的。

图 3 表明, 在湿润条件下, 不论是供应 NH_4Cl 还是 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 在水稻移植后的 20 天之内, 水稻的根系和通气组织都不发达, 其 CH_4 排放通量没有明显区别, 均维持在 $0 \mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ 左右。

移植 20 天之后, 两种供肥情况下的 CH_4 排放通量都呈上升趋势, 而供应 NH_4Cl 的情况 CH_4 排放通量高于供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的情况, 且这种差距在拉大, 直到移植后 50 天左右, 两种供肥情况下的 CH_4 排放通量

都达到了最大值。氮肥对甲烷的影响比较复杂, 但比较一致的观点是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或产 NH_4^+ 氮肥, 对 CH_4 的氧化有抑制作用, 从而增加 CH_4 的排放。农业利用和施肥使土壤对大气甲烷的消耗减少 25%-75%^[17]。Sitaula 等^[18]的研究表明, 每年使用 $\text{N } 30 \text{ kg/hm}^2$ 的 NH_4NO_3 , 大气甲烷的氧化速率降低 38% 左右。长期施用铵态氮肥或产铵氮肥的土壤, 使甲烷氧化能力降低数倍至数十倍, 甚至对 10 ul/L 的甲烷失去氧化能力, 而且在停止使用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 肥 3 年后, 也未恢复^[19]。因此, 一些学者认为因土壤氮肥的利用使土壤甲烷汇的萎缩可能是大气甲烷浓度升高的另一个原因^[17]。 NO_3^- 氮肥长期施用对甲烷排放没有明显的影响^[20], 但许多短期试验表明 NO_3^- 也抑制甲烷氧化, 而使甲烷排放增加^[21]。

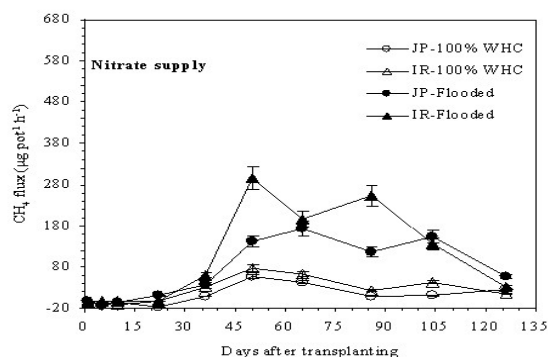


图 2 不同水分条件下施硝态氮对甲烷排放的影响

从理论上讲, 由于产甲烷菌和甲烷氧化菌主要利用 NH_4^+ 作为氮源而非 NO_3^- , 因此如果土壤底物的供应充足而氮供应不足时, 氮肥施用可以显著促进产甲烷菌的繁衍和功能的发挥, 也就相应地增加了土壤产甲烷的数量。然而这种效应可能会被氨硝化作用形成的硝态氮的反硝化作用所抑制。硝化作用的强度取决于土壤中氮和活性有机碳含量及 C/N 比, 当土壤有机碳含量较高时, 硝化作用对产甲烷的影响较弱^[16]。

移植后期, 水稻根系和通气组织生长渐衰, 甲烷传输不畅, CH_4 排放通量都呈下降趋势, 但供应 NH_4Cl 的水稻 CH_4 排放通量始终高于供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 这种情况一直持续到移植后的 105 天左右。

由图 3 还可看出, 不同的水稻品种都在湿润条件下, 供应同一种肥料时, 其 CH_4 排放通量也不同, 表现为 IR 水稻的 CH_4 排放通量基本上稍高于 JP 水稻的 CH_4 排放通量, 这与之前的结论是一致的。不过在供应 NH_4Cl 条件下, 移植 100 天之后, 水稻 IR 的 CH_4

排放通量则低于水稻 JP 的, 原因有待进一步研究。同样, 在供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的情况下, 水稻移植 120 天之后, 也出现了水稻 IR 的 CH_4 排放通量低于水稻 JP 的上述现象。为什么不同的供肥, 上述现象出现的时间不一样呢? 这明显是跟供肥有关, 前面说过, NH_4Cl 能抑制甲烷的氧化, 从而增加甲烷的排放。 NH_4Cl 的这种能力比 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 要强, 维持着甲烷的高排放, 从而使得水稻 IR 的 CH_4 排放通量低于水稻 JP 的 CH_4 排放通量的出现时间往后推迟。这也可能与土壤的酸碱度有关, 不同的供肥土壤的酸碱度不一样。

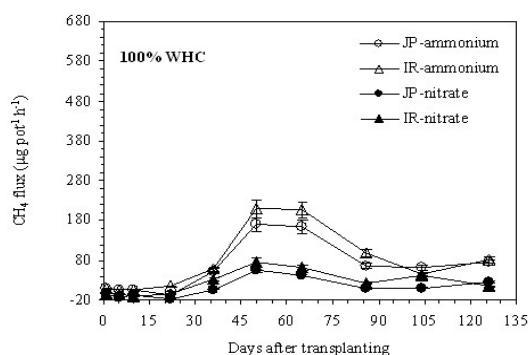


图 3 不同氮肥条件下 100%饱和含水量对甲烷排放的影响

图 4 中水稻移植 20 天之后, 不论是供应 NH_4Cl 还是 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 稻田 CH_4 排放通量都明显地呈上升趋势。这主要是由于水稻进入生长盛期, 根系和通气组织发达, 传输排放的甲烷较多。尤其在移植后 40 天至 90 天这段时期, 水稻生长正旺盛, 所以这段时期内 CH_4 排放通量出现了极大值, 且一直保持着较高的值。而在这段时期内, 供应 NH_4Cl 的稻田 CH_4 排放通量明显高于供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的稻田, 这跟图 4 中的结论是一致的。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或产 NH_4^+ 氮肥, 对 CH_4 的氧化有抑制作用, 从而增加 CH_4 的排放; NO_3^- 氮肥长期施用对甲烷排放没有明显的影响^[20], 所以出现了供应 NH_4Cl 的稻田 CH_4 排放通量高于供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的稻田的现象。

3.3 CH_4 排放量的比较

图 5 表明, 在一定水分条件下 (淹水或湿润), 供应 NH_4Cl 的处理 CH_4 累积排放量高于供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的, 差异达显著水平。在氮肥品种相同时, 淹水处理的 CH_4 累积排放量大于湿润处理, 差异达显著水平。在水分和氮肥供应相同条件下, 水稻 IR 品种的 CH_4 排放量高于 JP 品种。总之, 对于同一水稻品种, 淹水

且供应 NH_4Cl 情况下, CH_4 累积排放量最高, 其次是淹水且供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的处理, 第三是湿润且供应 NH_4Cl 的情况, 而湿润且供应 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的情况 CH_4 累积排放量最低。

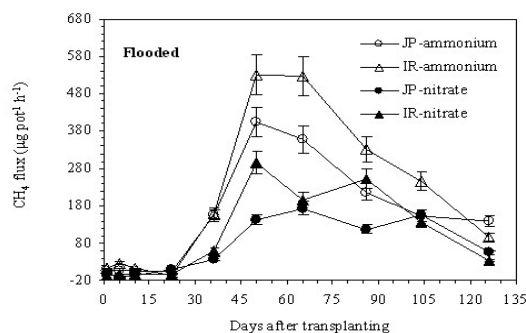


图 4 不同氮肥条件下淹水对甲烷排放的影响

水稻 CH_4 累积排放量受水分管理的影响大于受氮肥供应的影响。从图 5 可以看出, a 为 750 mg pot^{-1} , h 为 275 mg pot^{-1} , c 为 400 mg pot^{-1} 。a 与 h 都是相同的水稻品种、相同的供肥, 不同的是水分管理, 两者相差 475 mg pot^{-1} 。a 与 c 都是相同的品种、相同的水分, 不同的是氮肥管理, 两者相差 350 mg pot^{-1} 。很明显, 水分管理不同时, CH_4 累积排放量的差异大于氮肥管理不同时的情况。而水分管理主要是在淹水缺氧时产生大量甲烷, 由此可见, 甲烷的生成是甲烷排放的主要关键过程。 CH_4 排放通量受土壤 CH_4 产生率、氧化率及 CH_4 从土壤向大气传输能力的综合影响, 其中 CH_4 产生应该是 CH_4 排放的最基本的条件, 土壤 CH_4 产生率是比土壤 CH_4 氧化潜力和传输能力更重要的 CH_4 排放量的控制因子。

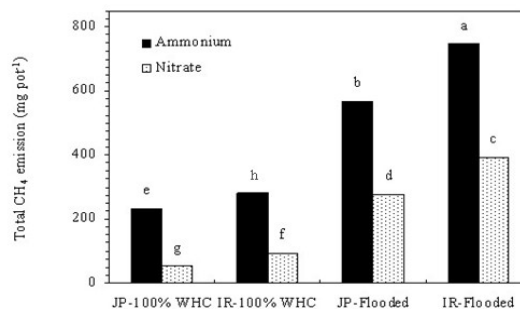


图 5 不同水分和氮肥条件下甲烷的总排放量

4 结论

农田水肥管理对甲烷排放的重要影响, 因此通过适宜的农业管理措施改变甲烷菌的生存环境, 可以有

效的控制稻田 CH_4 排放，减少大气中的温室气体。

第一，水分控制，稻田中不宜留有过多水分，尤其不能淹水，保持湿润即可。

第二，氮肥管理，用 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 代替 NH_4Cl 肥可有效地减少稻田 CH_4 排放。

第三，选择适宜的水稻品种。本研究中 JP 水稻相对 IR 水稻，可明显减少甲烷排放量。

References(参考文献)

- [1] Li Jun, Tong Xiaojuan, Yu Qiang, Methane uptake and oxidation by unsaturated soil, *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 141-147.
李俊, 同小娟, 于强, 不饱和土壤 CH_4 的吸收与氧化, *生态学报*, 2005, 25 (1): 141-147.
- [2] Milich L, The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused, *Global Environ. Change*, 1999, 9: 179~201.
- [3] Dlugokencky E J, Steele L P, Lang P M, et al. The growth rate and distribution of atmospheric methane. *J. Geophys. Res.* Atmos., 1994, 9: 17021-17043.
- [4] Shen Renxing, Shangguan Xingjian, Methane emission from rice fields in Guangzhou region and the spatial variation of methane emission in China. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 4(10): 387-392.
沈壬兴, 上官行健, 广州地区稻田甲烷排放及中国稻田甲烷排放的空间变化, *地球科学进展*, 1995, 4 (10) : 387-392.
- [5] Han Guangxuan, Zhu Bo, Gao Meirong, Zhang Zhongjie, Research progress on methane emission from rice field in China. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 16: 49-54.
韩广轩, 朱波, 高美荣, 张中杰, 中国稻田甲烷排放研究进展, *西南农业学报*, 2003, 16: 49-54.
- [6] Shangguan Xingjian, Wang Mingxing, Methane transport in paddy fields. In: Wang Gengchen, Wen Yupu, *Greenhouse Gas Concentrations, Emission Measurement and Related Processes*, China Environmental Science Press, 1996, pp1-5.
上官行健, 王明星, 稻田 CH_4 的传输, 见: 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放检测及相关过程, 中国环境科学出版社, 1996, pp1-5.
- [7] Takai Y, The mechanism of methane formation in flooded paddy soil[J]. *Soil Sci and Plant Nutr*, 1970, 16 :238 - 2441.
- [8] Li Xianglan, Xu Hua, Li Xiaoping, Cai Zuchong, Water regime management affects methane emission from rice paddy field: A Review. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2009, 28(2): 221-227.
李香兰, 徐华, 李小平, 蔡祖聪, 水分管理影响稻田甲烷排放研究进展 *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 221-227.
- [9] Qin Xiaobo, Li Yu-er, Liu Keying, Wan Yunfan, Gao Qingzhu, The effect of lone-term fertilization treatment on methane emission from rice fields in Hunan. *China Agricultural Meteorology*, 2006, 27(1): 19-22.
秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 万运帆, 高倩竹, 长期施肥对湖南稻田甲烷排放的影响 *中国农业气象*, 2006, 27 (1) : 19-22.
- [10] Jia Zhongjun, Cai Zuchong, Effects of rice plants on methane emission from paddy fields. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 2049-2053.
贾仲君, 蔡祖聪, 水稻植株对稻田甲烷排放的影响, *应用生态学报*, 2003, 14 (11) : 2049~2053.
- [11] Tian Guangming, He Yunfeng, Li Yongxian, Effect of water and fertilization management on emission of CH_4 and N_2O in paddy soil. *Soil and Environment*, 2002, 11(3): 294-298.
田光明, 何云峰, 李勇先, 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响, *土壤与环境*, 2002, 11(3): 294~298.
- [12] Cai Zuchong, Advance in methane emission from paddy fields in China, In: *Chinese Society of Soil Sciences (ed), Soil Sciences for 21st Century: Proceedings of the Ninth National Member Meeting of Chinese Society of Soil Sciences [C]*, 1999: 139-142.
蔡祖聪, 中国稻田甲烷排放研究进展, 见: 中国土壤学会编, 迈向21世纪的土壤科学: 中国土壤学会第九次全国会员代表大会论文集(综合卷) [C], 1999: 139-142.
- [13] Nesbit SP, Breitenbeck GA, A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils[J]. *Agri Ecosystem Environ*, 1992, 41: 39-54.
- [14] Cao Yunying, Zhu Qingshen, Lang Yuchang, Yang Jianchang, Wang Zhiqin, Yue Dazhong, Effect of rice varieties and cultivation approach on methane emission from paddy fields. *Jiangsu Agricultural Research*, 2000, 21(3): 22-27.
曹云英, 朱庆森, 郎有忠, 杨建昌, 王志琴, 薛大忠, 水稻品种及栽培措施对稻田甲烷排放的影响, *江苏农业研究*, 2000, 21 (3) : 22~ 27.
- [15] Sigren LK, Byrd GT, Fisher FM, Sass RL. Comparison of soil acetate concentrations and methane production transport, and emission in two rice cultivars. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11: 1-14.
- [16] Ding Weixin, Cai Zuchong, Effect of nitrogen fertilization on methane production in wetland soils. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(3): 380-383.
丁维新, 蔡祖聪, 氮肥对土壤甲烷产生的影响, *农业环境科学学报*, 2003, 22(3): 380-383.
- [17] Keller M, Mire ME, Stallard RF, Consumption of atmospheric methane in soils of central panama: effect of agricultural development[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1990, 4: 21-27.
- [18] Sitaula BK, Bakken LR, Abrahamsen G, N-fertilization and soil acidification effects of N_2O and CO_2 emission from temperate pine forest soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27: 871-880.
- [19] Castro MS, Peterjohn WT, Melillo JM, Effect of Nitrogen fertilization on the fluxes of N_2O , CH_4 and CO_2 from soils in a Florida slash pine plantation[J]. *Can J Forest Res*, 1994, 24: 9-13.
- [20] Cai Zuchong, *Research and Application of Soil Chemistry*, Beijing: China Environmental Science Press, 1997: 7-14.
蔡祖聪, *土壤化学研究与应用*, 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 7~14.
- [21] Lindau CW, Methane emissions from Louisiana rice field amended with nitrogen fertilizers[J]. *Soil Bio Biochem*, 1994, 26: 353-359.
- [22] Gilbert B, Frenzel P, Rice roots and CH_4 oxidation: The activity of bacteria, their distribution and the microenvironment[J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30: 1903 - 1916.