

水稻田土壤甲烷厌氧氧化在整个甲烷氧化中的贡献率

吕镇梅, 闵航*, 陈中云, 吕琴

(浙江大学生命科学学院, 杭州 310029)

摘要:对黄松土水田土壤中 $> 0.02\text{ mm}$ 的颗粒和 $< 0.02\text{ mm}$ 的颗粒按不同比例组合成的土壤, 不同绝对含水量的黄松土水田土壤, 不同温育时段的水田土壤和长期定位不同施肥的水稻田土壤中的甲烷好氧氧化和厌氧氧化的速率的检测结果进行比较, 结果相当一致, 不仅证实了水稻田土壤甲烷厌氧氧化过程的存在, 而且表明水田土壤中的甲烷厌氧氧化活性远较甲烷好氧氧化活性要低, 如以两者的氧化活性作为对甲烷氧化的贡献来计, 则甲烷厌氧氧化的贡献率一般都在整个甲烷氧化的 10% 以下. 但在水田土壤被水淹没的情形下, 由于土壤厌氧条件的形成和甲烷扩散受阻, 甲烷厌氧氧化的速率明显超过好氧氧化的速率, 甲烷厌氧氧化在整个甲烷氧化中的贡献率可到达 30% 以上. 长期施肥对于水稻田土壤的甲烷好氧氧化活性和甲烷排放通量影响显著, 而对甲烷的厌氧氧化活性有影响但未达到显著水平. 长期施肥处理的土壤中甲烷好氧氧化活性在 $(9.072 \sim 41.088) \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$ 之间, 而甲烷厌氧氧化活性仅在 $(0.325 \sim 0.671) \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$ 之间, 仅及甲烷好氧氧化活性的 1.31% ~ 4.43%, 占整个甲烷氧化的 1.3% ~ 4.14%.

关键词:水稻田土壤; 甲烷好氧氧化; 甲烷厌氧氧化; 甲烷厌氧氧化贡献率

中图分类号: X511; S154 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2005)04-0013-05

Contribution of Anaerobic Oxidation of Methane to Whole Methane Oxidation

LÜ Zhen mei, MIN Hang, CHEN Zhong-yun, LÜ Qin

(College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The contribution of anaerobic methane oxidation to the whole methane oxidation is investigated by monitoring the activities of anaerobic and aerobic oxidation of methane in paddy soils composed mechanically of $< 0.02\text{ mm}$ and $> 0.02\text{ mm}$ soil granules, contained different water contents, and long-term fertilized organic manure or inorganic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers. The results obtained from various treated soils are relatively identical, which shows that most of the activities of anaerobic methane oxidation is obviously lower than those of aerobic methane oxidation. The contribution of anaerobic methane oxidation was generally lower than 10% of total methane oxidation in paddy soils with different treatments, however, higher than 30% in the soils emerged in water as the soils became anaerobic and methane diffused difficultly into soil, leading to lower activity of aerobic methane oxidation. The long-term fertilization has a significant effect on the activity of aerobic methane oxidation in paddy soil, with the $|t| > t_{0.05}$, $p < 0.05$, but a slightly one with $(|t| < t_{0.05}, p > 0.05)$, leading to the obvious influence on the emission flux of methane. The contribution rates of anaerobic methane oxidation were lower from 1.31% to 4.14% in the whole methane oxidation.

Key words: paddy soil; anaerobic methane oxidation; aerobic methane oxidation; contribution rate of anaerobic methane oxidation

大气甲烷的浓度正不断上升, 对于大气温室效应的贡献日益增大^[1]. 进入大气的生物学源甲烷是产甲烷菌在厌氧环境中形成后, 被甲烷氧化菌氧化后剩余的逸出部分, 即这部分甲烷是在环境中甲烷形成量大于甲烷氧化量或在某一时段内甲烷形成速率大于甲烷氧化速率的结果. 甲烷氧化是在甲烷氧化菌的作用下将甲烷氧化为 CO_2 , 尽管 CO_2 同样是温室效应气体, 但是每 mol 的甲烷对温室效应的贡献却远比每 mol 的 CO_2 大几近 26 倍, 减少甲烷排放要比减少等量的 CO_2 排放, 对减少温室效应的贡献要大 20 ~ 60 倍^[2~4]. 因此, 促进甲烷的氧化与抑制甲烷的形成对于减缓大气甲烷浓度的增加速率具有同等意义.

许多研究已经证实, 淹水土壤、河流和海洋的沉积物中不仅发生甲烷好氧性氧化^[2~4], 而且也发生

厌氧性氧化. Blair 和 Aller^[5]、Burns^[6]、Hinrichs 等^[7]、Jverson 和 Jorgensen^[8]等的研究都揭示了甲烷的厌氧氧化是海洋沉积物中甲烷消耗的主要方式, 由海洋沉积物向大气排放的甲烷通量相对是较少的^[1]. Pancost 等用同位素 ^{13}C 生物标记古细菌膜脂的方法, 阐明了是甲烷厌氧氧化支持了地中海淤泥中的古细菌生存, 其分布受淤泥中甲烷分布的影响^[9,10]. 水稻田土壤中也发生甲烷的氧化过程^[11]. 笔者先前的研究也证明了淹水稻田土壤甲烷厌氧氧化作用的存在, 尽管其氧化速率远较好氧氧化速率

收稿日期: 2004-10-02; 修订日期: 2004-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30170030)

作者简介: 吕镇梅 (1976 ~), 女, 博士, 讲师, 主要从事环境微生物研究.

* 通讯联系人, Tel: 0571-86971287, E-mail: minhang_zju.edu.cn

慢得多^[12].然而,水田土壤中甲烷厌氧氧化对整个甲烷氧化的贡献率如何未见报道.

本文报道在不同环境条件下水田土壤甲烷好氧氧化活性和甲烷厌氧氧化活性,并以此计算水田土壤甲烷厌氧氧化对整个甲烷氧化的贡献率.

1 材料与方法

1.1 供试土壤及其处理

机械组成实验土样、含水量实验土样和不同时段实验土样均采自浙江大学华家池校区黄松土水田土壤.长期定位不同施肥处理水田土壤甲烷氧化实验的土样采自早稻收割后,发育于湖积相过度地带浅海沉积物母质的浙江农科院国家黄松土肥力与肥料效益监测基地自1982至2002年20a期间的长期定位施肥的黄松稻田土壤(位于杭州湾钱塘江口西岸,海拔3~4m,年平均气温15℃~16℃).11种水稻田土壤处理设计见表1.

土样均采自0~20cm的表层耕作土.多点采取若干后捣碎混匀,用100目筛去除杂质.然后称取

50g混合土于干燥箱中烘干,测定土样含水量(质量分数).其他土样于室温下风干至含水量20%左右.然后用100目筛去除杂质,置若干于1000mL的试剂瓶中,在28℃好氧培养2周,去除易被微生物分解的有机质,备试验用.土壤pH和各种理化性质见表2.

表1 长期定位施肥的设计¹⁾/kg·(hm²·a)⁻¹
Table 1 Design of long-term fertilization/kg·(hm²·a)⁻¹

处理代号	处理内容	处理代号	处理内容
CK1	免耕,不施肥	CK2	免耕, M (22500); P (157.5); K (157.5)
CK3	不施肥,麦稻-麦稻轮作	CK4	不施肥,麦稻-油稻轮作
N	N (315)	NPK	N (315); P (157.5); K (157.5)
NP	N (315); P (157.5)	MNPK	M (22500); P (157.5); K (157.5); N (315)
NK	N (315); K (157.5)	MNPK+	M (22500); P (205.5); K (205.5); N (409.5)
M	M (22500)		

1) 各区均为麦稻轮作. N:尿素; P:磷酸钙; K:氯化钾; M:猪粪球.

1.2 土壤机械组成和含水量

表2 黄松土水田土样的主要理化性状¹⁾
Table 2 Physico-chemical properties of the tested Huangsong soil

土样名称	pH	电导率 /μS·cm ⁻¹	水解性 N /mg·kg ⁻¹	有效 P /mg·kg ⁻¹	速效 K /mg·kg ⁻¹	活性有机质 /g·kg ⁻¹
黄松田	7.15	0.212×10 ³	88.54	43.8	48.98	22.2
黄松土	7.80	0.245×10 ³	91.65	139.8	82.82	24.3

1) 测定pH方法:水:土=1:3搅拌均匀,用SPM10A数字酸度计测pH值;电导测定:采用DDS-11A型电导率仪;有效磷测定:0.5mol·L⁻¹NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法;速效钾测定:1mol·L⁻¹NH₄OAc浸提,火焰光度法;水解性测定:碱解扩散法;活性有机质测定:稀释热法.

用0.02mm筛将土样分为>0.02mm和<0.02mm颗粒的2部分,然后按要求比例称量后充分混匀.

实验土样的含水量以质量分数计.

1.3 土样甲烷氧化活性的测定

(1) 厌氧条件下水稻田土壤甲烷氧化活性的测定 取供试土样20g于100mL血清瓶中,加9mL蒸馏水使得含水量在70%左右即使加入水浸没土壤显明水.然后用异丁基橡胶塞密封,再用99.999%的氮气置换血清瓶中的空气5~8min,在28℃培养7d.再用99.999%的氮气置换血清瓶中的空气5min,加入1mL纯甲烷,在28℃培养2d测血清瓶中的甲烷量.

(2) 好氧条件下水稻田土壤甲烷氧化活性的测定 取供试土样20g于100mL血清瓶中,再加1mL蒸馏水使得含水量在24%左右.然后用异丁基

橡胶塞密封,再加入5mL纯甲烷,在28℃培养7d后,用新鲜空气置换血清瓶中气体,再用异丁基橡胶塞密封,加入5mL纯甲烷,再于28℃培养7d.重复3次获得最大甲烷氧化活性的水稻田土壤.然后再用新鲜空气置换血清瓶中气体10min,再加入1mL纯甲烷,在28℃培养2d测血清瓶中的甲烷量.

1.4 甲烷的气相色谱仪检测

用102G型气相层析仪氢火焰检测器检测甲烷含量.以100%纯甲烷气体作标准气体,在100mL血清瓶中加入不同量的标准甲烷气体,获得不同浓度的标准气体,然后制作甲烷含量与峰高的标准曲线.样品中甲烷含量根据标准曲线进行换算.甲烷检测条件:N₂25mL/min,H₂60~70mL/min,空气600~700mL/min,层析柱温38℃,担体GDX-502,出峰时间为17s.

所有实验数据均为3次重复的平均值.数据分

析用 SPSS 10.0 for windows 分析软件.

2 结果

2.1 不同大小颗粒组合土壤的甲烷厌氧氧化的贡献率

由于土壤颗粒影响土壤的通透性,从而间接影响甲烷的氧化速率,因此用黄松土中 > 0.02 mm 的颗粒和 < 0.02 mm 的颗粒按不同比例组合成土壤来观察对土壤甲烷氧化的速率.甲烷好氧化化是在含水量 24 %(质量分数)的条件进行,厌氧氧化是在好氧化实验结束后用同一土壤加水至 70 %(质量分数)左右即使土壤显明水并将上部空气用纯氮气置换 5 min 条件下进行.结果表明,不同大小颗粒比例

的土壤对于水田土壤的甲烷好氧化速率并无显著影响($|t| < t_{0.05}, p > 0.05$),但对于甲烷的厌氧氧化除由 40 %的 > 0.02 mm 颗粒和 60 %的 < 0.02 mm 颗粒组成的 A7 土壤速率较低外,呈现出 2 种颗粒都有一定比例且两者比例较为接近的组合土壤的甲烷厌氧氧化速率相对较高,而 100 % < 0.02 mm 颗粒组合的土壤可能由于土壤颗粒太细甲烷扩散受到一定阻力,其氧化速率较低.这个结果也导致水田土壤中甲烷厌氧氧化对于整个甲烷氧化的贡献率呈现与此相类似的趋势(表 3).表 3 表明在本研究条件下水田土壤甲烷厌氧氧化的贡献率在 10 %以下.这个结果与其他实验获得的结果(表 4,表 5)比较,甲烷厌氧氧化的贡献率是相一致的.

表 3 黄松泥田土(干土)的机械组成对甲烷氧化速率的影响

Table 3 Effect of the Huangsong soil particle-size distribtrition on the activities of methane oxidation

编号	机械组成(颗粒大小)/ %		甲烷氧化		
	> 0.02 mm	< 0.02 mm	甲烷好氧化速率 $\times 10^{-6}$	甲烷厌氧氧化速率 $\times 10^{-6}$	甲烷的厌氧氧化在整个甲烷
			/ $\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	/ $\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	氧化中的贡献率/ %
A1	100	0	2.094	0.1253	5.646
A2	90	10	2.206	0.1135	4.893
A3	80	20	2.269	0.1973	7.999
A4	70	30	2.285	0.1647	6.723
A5	60	40	2.342	0.1809	7.170
A6	50	50	2.206	0.1975	8.217
A7	40	60	2.728	0.0634	2.271
A8	30	70	2.361	0.1526	6.071
A9	20	80	2.542	0.1466	5.453
A10	10	90	2.595	0.0929	3.456
A11	0	100	2.428	0.0350	1.421

表 4 不同含水量条件下的黄松土(干土)水田土壤甲烷好氧化和厌氧氧化

Table 4 The methane aerobic and anaerobic oxidation rate under different moisture levels in Huangsong paddy soil

绝对含水量(质量分数)	甲烷好氧化速率 $\times 10^{-6}$	甲烷厌氧氧化速率 $\times 10^{-6}$	甲烷厌氧氧化对整个甲烷
/ %	/ $\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	/ $\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	氧化的贡献率/ %
6.84	0	0	0
18.37	1.030464	0.03021	2.848
24.29	1.241841	0.03378	2.648
30.41	1.165217	未测	
36.13	1.101803	0.03327	2.931
42.05	1.025179	未测	
48.28	0.779453	0.02981	3.684
53.89	0.443892	未测	
59.8	0.303855	0.03206	9.544
65.72	0.229873	0.04399	16.063
77.57	0.079266	0.03629	31.401
136.74	0.066055	0.03515	34.733
195.93	0.036991	0.02981	44.625

2.2 不同含水量条件下土壤甲烷厌氧氧化的贡献率

用黄松土水田土壤风干后调节不同含水量,并

在同等含水量条件下用高纯氮气置换血清瓶空气的方法测定甲烷厌氧氧化速率,与土壤的甲烷好氧化速率比较,见表 4.结果表明,水田土壤甲烷厌氧

氧化的贡献率随着土壤含水量的提高,尤其是土壤含水量达到 60 %以上以后,由于甲烷的扩散速度和甲烷好氧化菌活性明显下降,导致甲烷好氧化速率迅速下降,而甲烷厌氧氧化速率仍保持原有相似水平,因此,甲烷厌氧氧化的贡献率也逐步增大.在含水量为 60 %左右的土壤中甲烷厌氧氧化的贡献率占整个甲烷氧化的 10 %左右,在完全浸没(含水量为 77 %、136 %和 195 %)的土壤中的甲烷厌氧氧化的贡献率可达 30.0 %以上.而含水量在 20 %~35 %左右的土壤中,甲烷好氧化速率较高,因此甲烷厌氧氧化的贡献率相对就较低,仅 3 %左右.

表 5 绝对含水量为 24 %时水田土壤的甲烷氧化速率比较

Table 5 The methane oxidation rate while the soil water content was 24 % in paddy soil

温育时段	0 ~ 48h	48 ~ 72h	72 ~ 90h	90 ~ 108h	108 ~ 126h
甲烷好氧化速率 $\times 10^{-6} / \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	0.669	1.373	1.825	1.841	1.845
甲烷厌氧氧化速率 $\times 10^{-6} / \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	0.408	0.0825	0.0683		
甲烷厌氧氧化占整个甲烷氧化的贡献率/ %	37.88	5.668	5.282		

2.4 长期定位施肥水稻田土壤甲烷好氧化与厌氧氧化的比较

表 6 表明长期定位施肥对水稻田土壤好氧甲烷氧化活性产生了显著影响($|t| > t_{0.05}, p < 0.05$),而对厌氧甲烷氧化活性没有产生显著影响($|t| < t_{0.05}, p > 0.05$).当水田土壤中加入猪粪球后(M、

表 6 长期肥料定位不同处理的水田土壤(干土)中甲烷厌氧氧化对整体甲烷氧化的贡献率

Table 6 The contribution of methane oxidation to methane anaerobic oxidation in long-term fertilization treated paddy soil

处理	CK1	CK2	CK3	CK4	N	NK	NP	NPK	M	MNPK	MNPK +
甲烷厌氧氧化活性 $\times 10^{-6} / \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	0.463	0.519	0.392	0.325	0.398	0.443	0.472	0.529	0.498	0.671	0.528
甲烷好氧化活性 $\times 10^{-6} / \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	19.224	28.08	9.072	11.16	16.176	24.96	22.776	26.304	31.032	41.088	39.72
甲烷厌氧氧化对甲烷整体氧化的贡献率/ %	2.32	1.77	4.16	2.80	2.41	1.74	2.03	1.97	1.58	1.60	1.31

经 MNPK 处理并耕作的水稻田土壤的好氧和厌氧甲烷氧化活性最高,分别达 $41.088 \times 10^{-6} \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$ 和 $0.671 \times 10^{-6} \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$.经 MNPK 处理但免耕水稻田土壤(CK2)的好氧甲烷氧化活性,较加有机肥并耕作的水稻田土壤(M、MNPK 和 MNPK +)的好氧甲烷氧化活性要低,只有 $28.08 \times 10^{-6} \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$,这显然与耕作水田土壤通透性要高于免耕水稻田土壤有关;而厌氧甲烷氧化活性,较加有机肥并耕作的水稻田土壤(MNPK 和 MNPK +)的厌氧甲烷氧化活性要低,但高于仅加猪粪球并耕作的水稻田土壤(M)的厌氧甲烷氧化活性,其厌氧甲烷氧化活性为 $0.519 \times 10^{-6} \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$.经尿素处理的水稻田土壤(N)的好氧甲烷氧化活性为 $26.176 \times 10^{-6} \text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$,低于

2.3 水田土壤不同温育时段中的甲烷氧化速率比较

将绝对含水量为 24 %的水田土壤分别置于好氧条件下和用高纯氮气置换后的无氧条件下进行甲烷氧化速率的比较.结果(表 5)表明,在温育的初始 48 h 内,甲烷厌氧氧化的速率已明显低于好氧化速率,不足后者的 2/3,但仍在同一速率级别内.然而,自温育 48 h 后,甲烷厌氧氧化速率更是仅为好氧化速率的 5 %.无疑,48 h 后甲烷厌氧氧化实验中的甲烷消耗是完全由于甲烷的厌氧氧化所致.这一时段所获的甲烷厌氧氧化速率与在整个甲烷氧化中的贡献率和其他实验结果吻合.

MNPK、MNPK +、M、MNPK、MNPK + 和 CK2)土壤的好氧和厌氧甲烷氧化活性均要高于仅加无机肥(N、NK、NP 和 NPK)或不施肥(CK1、CK3 和 CK4)的水稻田土壤.由于有机肥的加入提供了丰富的产甲烷基质,从而间接地增加了甲烷氧化的底物数量.这一结果与作者先前的研究相一致^[13].

不施肥免耕的水稻田土壤(CK1),但当尿素和钾肥或磷肥混合后(NK、NP 和 NPK),水稻田的好氧甲烷氧化活性达到 CK1 或高于 CK1 的水平,即钾或磷缓解了由尿素引起的对甲烷好氧氧化的抑制作用.而 N、NK、NP 和 NPK 处理土壤的厌氧甲烷氧化活性,比 CK1 的厌氧甲烷氧化活性都低.长期轮作而不施肥的水稻田土壤(CK3 和 CK4)的好氧和厌氧甲烷氧化活性最低,约为经 MNPK 处理水稻田土壤好氧和厌氧甲烷氧化活性的 25 %和 50 %,CK1 水稻田土壤好氧和厌氧甲烷氧化活性的 50 %和 70 %.这可能与长期轮作过度消耗了土壤肥力有关.

在长期肥料定位处理的水田土壤中,甲烷厌氧氧化活性远比好氧化活性要小,两者间比值在 0.013 ~ 0.043 之间.甲烷的厌氧氧化活性对整体甲

烷氧化的贡献率相对较小(表 6),仅占整体甲烷氧化活性的 1.31 % ~ 4.14 % .这一结果与以前的其它研究结果相吻合^[12].

3 讨论与结论

上述实验结果表明,对黄松土水田土壤中 > 0.02 mm 的颗粒和 < 0.02 mm 的颗粒按不同比例组合成的土壤,不同绝对含水量的黄松土水田土壤,不同温育时段的水田土壤和长期定位不同施肥水稻田土壤中的甲烷好氧氧化和厌氧氧化速率的检测结果相当一致,水田土壤中的甲烷好氧氧化活性远较甲烷厌氧氧化活性要低,若以两者的氧化活性作为对甲烷氧化的贡献来计,甲烷厌氧氧化的贡献率一般都低于整个甲烷氧化的 10 % .只有在好氧氧化的实验土壤完全被水浸没的情形下,由于这种淹水环境不利于甲烷的好氧氧化而为厌氧氧化创造了有利条件,而使甲烷好氧氧化速率极低时,甲烷厌氧氧化的贡献率可达 30 % 以上.长期定位不同施肥处理中,施用猪粪球有机肥能明显增加水稻田土壤的好氧甲烷氧化活性和甲烷排放通量,但对厌氧甲烷氧化活性的促进影响并不显著.这是由于有机肥的加入提供了丰富的甲烷形成底物,促进了甲烷形成,而甲烷形成量的增加刺激了甲烷氧化菌种群数量的明显增长和甲烷氧化活性的提高^[13].所获数据表明,水稻田土壤中的甲烷厌氧氧化对整个甲烷氧化的贡献率相当低,在各种条件下除个别外大多仅及 3 % 以下.

Reinoud^[14]指出,甲烷的氧化速率受生态类型、温育温度、原位通气状况和有氧与无氧界面的距离、环境中甲基营养型细菌的种群数量等等因素的影响.本研究的结果证实了这些因素的影响.Bender 和 Conrad 研究了无氧土壤中甲烷氧化的动力学^[15],Tlustos^[16]和 Hutsch^[17]等分别测定了英国和德国的可耕种土壤原位的甲烷好氧氧化活性,结果较本研究的结果要低得多.这种差异的原因可能是本研究是在实验室密闭系统内,外加甲烷的浓度远较野外大气甲烷的浓度高的缘故.高淹水条件下甲烷厌氧氧化的活性要高于好氧氧化活性,这一结果与许多研究者^[5~8]的观点相一致.

参考文献:

[1] Reeceburgh W S. 'Soft spots' in the global methane budget. In Microbial Growth on Cl Compounds [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. 334 ~ 342.

[2] Conrad R. Soil microorganism as controllers of atmospheric trace

gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO) [J]. Microbiological Reviews, 1996, **60**: 609 ~ 640.

[3] Gilbert B, Frenzel P. Rice roots and CH₄ oxidation: the activity of bacteria, their distribution and the microenvironment [J]. Soil Biol. Biochem., 1998, **30**(14): 1903 ~ 1916.

[4] Hanson R S, Hanson T E. Methanotrophic Bacteria [J]. Microbiological Reviews, 1996, **60**(2): 439 ~ 471.

[5] Blair N E, Aller R C. Anaerobic methane oxidation on the Amazon shelf [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, **59**: 3707 ~ 3715.

[6] Burns S J. Carbon isotopic evidence for coupled sulfate reduction-methane oxidation in Amazon Fan sediments [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, **62**: 797 ~ 804.

[7] Hinrichs K U, Hayes J M, Sylva S P, Brewer P G, DeLong E F. Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments [J]. Nature, 1999, **398**: 802 ~ 805.

[8] Iverson N, Jorgensen B B. Anaerobic methane oxidation rates at the sulfate-methane transition in marine sediments from Kattegat and Skagerrak (Denmark) [J]. Limnol. Oceanogr., 1985, **30**: 944 ~ 955.

[9] Pancost R D, Hopmans E C, Sinnighe J S Damste. The MEDIAUT Shipboard Scientific Party. Archaeal lipids in Mediterranean cold seeps: molecular proxies for anaerobic methane oxidation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, **65**(10): 1611 ~ 1627.

[10] Pancost R D, Sinnighe J S Damste, de Linst S, van der Marrel M J E C, Gottschal J C. The MEDIAUT Shipboard Scientific Party. Biomarker evidence for widespread anaerobic methane oxidation in Mediterranean sediments by a consortium of methanogenic archaea and bacteria [J]. Appl. Environ. Microbiol., 2000, **66**: 1126 ~ 1132.

[11] Gilbert B, Frenzel P. Rice roots and CH₄ oxidation: the activity of bacteria, their distribution and the microenvironment [J]. Soil. Biol. Biochem., 1998, **30**(14): 1903 ~ 1916.

[12] 闵航,陈中云,陈美慈.水稻田土壤甲烷氧化活性及其环境影响因子的研究[J].土壤学报, 2002, **39**(5): 686 ~ 692.

[13] 陈美慈,闵航,等.有机肥和无机肥对水稻土产甲烷的影响[J].植物营养与肥料学报, 1998, **4**(4): 366 ~ 370.

[14] Reinoud Segers. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes [J]. Biogeochemistry, 1998, **41**(1): 23 ~ 51.

[15] Bender M, Conrad R. Kinetics of methane oxidation in oxic soils [J]. Chemosphere, 1993, **26**: 687 ~ 696.

[16] Tlustos P, Willison T W, Baker J C, Murphy D V, Pavlikova D, Goulding K W T, Powlson D S. Short-term effects of nitrogen on methane oxidation in soils [J]. Biol. Fertil. Soils, 1998, **28**: 64 ~ 70.

[17] Hutsch B W. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrite, and organic manure with respect to soil pH [J]. Biol. Fertil. Soils, 1998, **28**: 27 ~ 35.