

稻-鸭复合生态系统产甲烷细菌数量

邓 晓^{1,2}, 廖晓兰^{1*}, 黄 璜³

(1. 湖南农业大学植物保护学院, 长沙 410128; 2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 儋州 571737;
3. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要:采用厌氧培养箱技术,用最大或然数计数法(MPN 法)和滚管法同时测定稻-鸭复合系统和常规稻作系统早稻不同生育期土壤中的产甲烷细菌数量。结果表明:(1)两系统产甲烷菌数量具有明显的季节变化规律。水稻返青期前,两系统的产甲烷菌数量相差不大,随着水稻生育期的推进,两处理的产甲烷菌数量逐渐增加,均在分蘖盛期明显增高,孕穗期达到最高,乳熟期又显著减少,生长后期又有所回升。(2)稻田围栏养鸭能减少稻田中的产甲烷菌数量,特别是减少了稻田甲烷排放高峰期的产甲烷菌数量。在水稻分蘖盛期和孕穗期,MPN 计数法中,稻-鸭复合生态系统低于常规稻作系统 20.0%~96.9%;滚管法计数中,前者比后者降低 33.3%~98.1%,两系统的产甲烷菌数量之间的差异均达极显著水平。(3)产甲烷细菌对甲醇、异丙醇、CO₂/H₂、乙酸钠有嗜好表现,对甲胺、甲酸、甲胺+甲醇+甲酸+异丙醇+乙酸钠(混合基质 1)、甲酸+甲醇+异丙醇+乙酸钠(混合基质 2)、甲醇+异丙醇+乙酸钠(混合基质 3)有不适应的表现。

关键词:稻-鸭复合生态系统;产甲烷细菌;数量;基质

Studies on amount of methanogens in the rice-duck agroecosystem

DENG Xiao^{1, 2}, LIAO Xiao-Lan^{1*}, HUANG Huang³ (1. College of Plant Protection of Hu'nan Agricultural University, Changsha, 410128, China; 2. Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou, 571737, China; 3. College of Agronomy of Hu'nan Agricultural University, Changsha, 410128, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1695~1699.

Abstract: The study was focused on the relationship between the intensify rice-duck planting and its effects on the amount of methane emission from the paddy field. During the study, the author took a careful study and appraisal of the basis of rice-duck complex planting and breeding pattern, and how it could evidently decrease the total amount of methane emission present on the paddy field.

The study also covers the amount of methanogens present and the influence of the substrates on it in the rice-duck complex ecosystem. It is aimed at expounding the mechanism of rice-duck ecological planting and breeding pattern evidently decrease the total amount of methane emission in paddy field and its adjusting and controlling factors; And also offer the theoretical foundation and practice basis for setting up measure to mitigate methane emission.

We examined the amount of methanogens in the rice-duck complex ecosystem and ordinary early paddy system with the aid of Anaerobic box with probable number and roll tube methods.

The results obtained were as follows: (1) The amount of methanogens had obvious seasonal law of variation in paddy field, and it was relatively fewer at re-green stage of the paddy in the ecosystem. It increases step by step with extension of growth stage of paddy and it is therefore the greatest at booting stage of paddy but decreases significantly at the milk-ripe stage of paddy, and increases at the yellow-ripe stage of paddy.

基金项目:湖南省科技厅资助项目(00NYK1001)

收稿日期:2003-04-28; **修订日期:**2004-04-08

作者简介:邓晓(1976~),女,湖南常宁人,硕士,讲师,主要从事农业生态学研究。

* **通讯作者** Author for correspondence, E-mail: liaoxiaolan88@yahoo.com.cn

致谢:甲烷细菌测试过程中承蒙湖南农业大学李 教授、蒋道松副教授指导帮助,一并致谢

Foundation item: Programme of Science and Technology Bureau of Hu'nan Province(No. 00NYK1001)

Received date: 2003-04-28; **Accepted date:** 2004-04-08

Biography: DENG Xiao, Master, Lecturer, mainly engaged in agricultural ecology.

(2) Rice-paddy ecological planting and breeding pattern could greatly decrease the amount of methanogens in paddy field especially during the methane emission peak period but the amount of methanogens in rice-duck complex ecosystem was obviously less than that of ordinary of paddy system at active tillering and booting stage of the paddy;for instance,20%~96.9% less than that of the later for the MPN method; And for the roll tube method,less than 33.3%~98.1% of the later, and the differences between both ecosystems was significant by statistics.

(3) We deduce from our findings that methanogens can use Methanol,Isopropanol, CO₂,H₂,Sodium Acetate for growth and methanogenesis but None Methylamine, Formate, and that of Mixed None Methylamine,Methanol,Isopropanol,Sodium Acetate, Mixture of Formate,Methanol, Isopropanol and Sodium Acetate.

From the aforementioned results, we can see that the seasonal law of variation of the amount of methanogens in paddy field was consistent with methane emission from paddy field. It also confirmed that the amount of methanogens was one of the main factors affecting the amount of methane emission from paddy field. This research has suppressed the production of methanagens through breeding duck in paddy field and also achived the goal of mitigating methane emission from paddy field; More so, the research could also increase economic efficiency of the ecosystem. It is therefore significant for making counter measure on mitigating emission of greenhouse gas.

Key words: rice-duck; agroecosystem; methane emission; substrate; anaerbic box paddy; isopropanol; re-green; sodium acetate; tillering; booting stage; mitigate; greenhouse; MPN

文章编号:1000-0933(2004)08-1695-05 中图分类号:S154.1;S181 文献标识码:A

近年来,温室气体对全球气温变化的影响已成为可持续发展研究的重要内容之一。CH₄ 是重要的温室气体之一,目前它在大气中浓度正以 0.6%的年增长率急剧上升^[1],且 70%属于生物起源^[2]。水稻田被认为是大气甲烷的最大农业排放源之一^[4,5],占全球排放总量的 4%~20%^[6]。稻田中的 CH₄ 释放量决定于根系际部产甲烷菌的数量及其活性和甲烷氧化菌的数量及其活性^[3]。因而研究稻田土壤中产甲烷菌的数量和活性,可以更好地从本质上认识其排放特性,对将来制定温室气体缓解释放对策具有重要意义。2000~2001 年的研究表明,稻-鸭复合种养模式改善了稻田土壤的理化性状,提高了土壤肥力和土壤的通气性,其中稻-鸭复合系统的土壤氧化还原电位比常规稻作系统增加 15.3mv;稻-鸭复合生态系统甲烷排放具有明显的季节变化规律,早稻田两系统的排放峰值均出现在水稻幼穗分化至孕穗期间,乳熟期显著减少,成熟期又有所回升;研究还表明实行稻鸭生态种养显著降低了稻田甲烷排放总量,特别是减少甲烷排放高峰期的排放量,早稻在分蘖盛期-孕穗期甲烷排放总量减少了 3.185g/m²,降低率为 60.7%^[12]。在此基础上,对稻-鸭复合系统产甲烷菌数量及其基质的影响进行研究,旨在阐明稻鸭复合生态种养模式显著降低甲烷排放量的机理与调控因素,为建立稻田甲烷减排技术提供理论基础和实践依据。

1 材料和方法

1.1 实验设计与田间管理

试验于 2002 年 4 月 21 日~2002 年 7 月 10 日在湖南省长沙县星沙镇简灰村进行。大田试验以相邻两个自然丘块为单位,两丘块的土壤理化性状一致。一丘用作稻田养鸭,一丘用作对照(CK),每丘面积 0.2hm²,然后将两丘田分别隔成 3 个均等小区用作重复,稻田养鸭区用围网隔成,对照区用泥埂隔开。稻田养鸭区为连续 3 年围栏养鸭区,不施化学农药,每小区四周用高 50 的尼龙网做成围栏,以防鸭子外逃,田角设 1m² 的鸭栖息棚。雏鸭出壳后喂养 15d,待秧苗移栽返青后(分蘖始期),按每 666.7m² 15 只的标准将鸭投放于稻田中露宿饲养,齐穗期收回鸭子。对照区不放鸭,并长期施用化学农药。两处理均于 3 月 18 日播种,水稻品种为中优早 12 号,供试鸭品种为江南一号。4 月 21 日抛秧,抛秧前每 hm² 稻田均施 N150kg,P₂O₅ 75kg,K₂O90kg,7 月 10 日收获。

1.2 土壤样品的采集

采用 5 点取样法,分别于早稻的返青期、分蘖盛期、孕穗期、乳熟期、成熟期,在植株间用采土器取 0~20cm 土样,切除土柱两端 5cm 的土样,立即将土柱转移至塑料袋中混合均匀,用橡皮条扎紧带回实验室尽快接种培养,以保证数据的准确性。

1.3 产甲烷细菌的培养与测定方法

(1)基础培养基组成(g/L) NH₄Cl 1g;酵母浸膏 1g;MgCl₂ 0.1g;刃天青 0.001g;L-半胱氨酸 0.5g;KH₂PO₄ 0.4g;K₂HPO₄ 0.4g;水 1000ml;微量元素溶液 10ml;土壤浸出液 100ml;pH 7.0;固体培养基组成则在基础培养基的基础上再加 2.0%的琼脂。富集培养时,15mm×150mm 培养管每支分装 8.5ml,分离培养时,15mm×150mm 培养管每支分装 4.5ml,121℃ 高压蒸汽灭菌 15min。

(2)采用厌氧培养箱技术,取上述土壤 1g,分别以乙酸钠、甲醇、异丙醇、甲酸、甲胺、CO₂/H₂ 为基质,在装有 8.5ml 培养液

的培养管中富集培养一周,气相色谱检测有 CH₄ 产生,然后将菌液摇匀,用无菌水逐级稀释(10⁻¹~10⁻⁹),用无菌注射器分别注入 0.5ml 于不同的产甲烷菌基质的培养管中,以 CO₂/H₂ 为基质的培养管中,H₂ 和 CO₂ 的体积分数分别为 80%和 20%;以乙酸钠、甲醇、异丙醇、甲酸、甲胺为基质的培养管中,每管基础培养基中分别注入 2.5mol/L 的乙酸钠,体积分数 50%的甲醇、异丙醇、甲酸及 30%甲胺各 0.1ml,混合基质即在含有基础培养基的培养管中同时注入上述基质各 0.1ml,MPN 法处理重复 4 次,滚管法处理重复 3 次,35℃培养 3~4 周。

(3)培养产甲烷菌基质的选择,以水稻分蘖期的土壤为样品,分别利用 CO₂/H₂、甲胺、甲醇、异丙醇、甲酸、乙酸钠以及混合基质①甲胺+甲醇+甲酸+异丙醇+乙酸钠,混合基质②甲酸+甲醇+异丙醇+乙酸钠,混合基质③甲醇+异丙醇+乙酸钠作为产甲烷菌的生长基质,2 次重复,富集培养 1 周,再用气相色谱检测。选择能刺激产甲烷细菌生长的物质作为培养产甲烷菌的基质。

产甲烷菌种群数量采用 MPN 法和滚管法同时测定,其中,MPN 法以 CH₄ 形成作生长指标,滚管法计数则以日产 Olympus BH-2 型荧光显微镜下直接计有荧光的菌落数。

CH₄ 的测定采用 6890N 型气相色谱仪,毛细管色谱柱法,氢火焰离子检测器检测。在以 N₂ 为载气,流量为 3.0ml/min,H₂ 为燃烧气,流量为 45.0ml/min,Air 流量为 450.0ml/min,尾吹为 45.0ml/min,柱室温为 60℃,检测器温为 200℃,进样口温为 170℃,柱压为 12.73psi,保留时间为 1.104min 的色谱条件下,CH₄ 的测定可以达到较好的效果。CH₄ 含量的测定,以标准 CH₄ 作参照,外标法计算。

2 结果与讨论

2.1 不同基质培养对甲烷产生量的影响及基质选择

检测结果(表 1)表明,以甲胺、甲酸、甲胺+甲醇+甲酸+异丙醇+乙酸钠(混合基质 1)、甲酸+甲醇+异丙醇+乙酸钠(混合基质 2)、甲醇+异丙醇+乙酸钠(混合基质 3)为基质的培养管中,产 CH₄ 量均少于空白,围栏养鸭田中,少于空白 49.75%~80.39%,CK 田中少于空白 98.78%~99.84%,说明甲酸、甲胺及 3 种混合基质对产甲烷菌均有抑制作用。以甲醇、CO₂/H₂、异丙醇、乙酸钠为基质,产 CH₄ 量均高于空白,围栏养鸭田中,产 CH₄ 量分别是空白的 82.16、132.6、78.24、94.71 倍。CK 田中,产 CH₄ 量分别是空白的 5.59、8.2、1.84、6.25 倍。它们之间的差异均达极显著水平。说明该 4 种基质对产甲烷菌的生长有刺激作用。因此,本试验选择甲醇、CO₂/H₂、异丙醇和乙酸钠为培养产甲烷菌的生长基质。表 1 同时表明,在利用甲醇、CO₂/H₂、异丙醇、乙酸钠作基质以及不加基质培养时,常规稻作生态系统(CK)中的产 CH₄ 量均高于围栏养鸭田(除异丙醇以外),且两处理之间的差异均达 1%的显著水平。

本研究中产甲烷菌表现出 2 个明显的特征:一是对甲醇、异丙醇、乙酸钠、CO₂/H₂ 有嗜好表现;二是对以甲胺、甲酸以及甲胺、甲酸、甲醇、异丙醇、乙酸钠配制的 3 种混合培养基质有不适应的表现。这两个特征,尚未见报道。本研究的采样地点是湖南省长沙县,位于湘中丘陵地区。采样丘块是耕作多年的稻田,熟化程度高。

2.2 水稻不同生育期对产甲烷菌数量的影响

在早稻各个生长时期,分别对两个系统土壤中的产甲烷菌进行了计数分析。结果表明,湿地稻田生态系统种稻期间产甲烷菌数量具有明显的季节变化规律。表 2 和表 3 表明,水稻不同生育期对产甲烷菌的生长发育有很大影响。水稻返青期,产甲烷菌的数量相对较少,且两系统中的产甲烷菌数量相差不大,随着水稻生育期的推进,两系统的产甲烷菌数量明显增加,这说明土壤淹水后为产甲烷菌创造了一个合适的厌氧环境。两系统中的菌数均在分蘖盛期明显增高,孕穗期达到最高,乳熟期又显著减少,黄熟期又有所回升。这是因为在水稻田这一独特的厌氧环境中,水稻在各个不同的生长发育阶段,其根系的分泌物和脱落物的质与量不一样,对根系周围

表 1 不同基质对甲烷产生量的影响及基质利用情况(mmol/管)
Table 1 The effect of different substrates on methane emission and the utilization of substrates (mmol/tube)

基质 Substrates	处理之间的差异 Difference of treatments		基质之间的差异 Difference of substrates	
	稻田养鸭 Rice-duck	常规稻田 CK	稻田养鸭 Rice-duck	常规稻田 CK
空白 blank	0.61	b B 12.71	a A	e E
CO ₂ /H ₂	80.95	b B 103.60	a A	a A
甲醇 Methanol	50.28	b B 71.11	a A	c C
甲酸 Formate	0.10	a A 0.13	a A	f F
异丙醇 Isopropanol	47.89	a A 23.34	b B	d D
甲胺 Nonemethylamine	0.02	a A 0.02	a A	f F
乙酸钠 Sodium acetate	57.97	b B 79.39	a A	b B
混合基质 1 Mixed substrate 1	0.12	a A 0.16	a A	f F
混合基质 2 Mixed substrate 2	0.08	a A 0.14	a A	f F
混合基质 3 Mixed substrate 3	0.10	a A 0.14	a A	f F

* 以上数据均为 3 个小区的平均值,处理之间的差异分析采用 LSD 测验,基质之间的差异采用 Duncan 测验;其中小写字母表示 5% 的显著水平,大写字母表示 1% 的显著水平 Above states are average number of three blocks; The differential analysis between treatments by LSD test; The differential analysis on substrates by Duncan's test. small letter is $p<0.05$. Capital is $p<0.01$

表 2 早稻不同生育期土壤中的产甲烷菌数量(cfu/g 干土,MPN 法)

生育期 Growth stage 2002 年 Year (月/日)(Month / Day)	甲醇 Methanol		异丙醇 Isopropanol		乙酸钠 Sodium acetate		CO ₂ / H ₂	
	稻田养鸭	常规稻田	稻田养鸭	常规稻田	稻田养鸭	常规稻田	稻田养鸭	常规稻田
	Rice-duck	CK	Rice-duck	CK	Rice-duck	CK	Rice-duck	CK
返青期 (5/7)	5.8×10 ⁴	5.6×10 ⁴	1.5×10 ⁵	1.8×10 ⁵	6.5×10 ⁵	7.4×10 ⁵	6.9×10 ⁶	6.5×10 ⁶
Regreening	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A
分蘖盛期(5/20)	1.2×10 ⁶	1.5×10 ⁶	5.8×10 ⁸	2.6×10 ¹⁰	5.1×10 ⁹	1.2×10 ¹⁰	2.7×10 ⁹	8.3×10 ⁹
Active tillering	a A	a A	b B	a A	b B	a A	b B	a A
孕穗期 (6/2)	1.1×10 ⁷	2.6×10 ⁸	5.2×10 ⁹	1.3×10 ¹¹	6.6×10 ⁸	1.2×10 ¹⁰	2.1×10 ¹⁰	9.6×10 ¹¹
Booting	b B	a A	b B	a A	b B	a A	b B	a A
乳熟期 (6/23)	7.0×10 ⁵	2.2×10 ⁶	1.4×10 ⁶	5.2×10 ⁶	5.6×10 ⁵	8.2×10 ⁵	2.2×10 ⁷	3.8×10 ⁷
Milk ripening	b B	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A
黄熟期 (7/10)	4.6×10 ⁷	4.6×10 ⁷	1.3×10 ⁶	1.0×10 ⁵	4.5×10 ⁵	3.8×10 ⁴	4.6×10 ⁶	5.3×10 ⁶
Yellow ripening	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A

* 以上数据均为 3 个小区的平均值,处理之间的差异分析采用 LSD 测验,其中小写字母表示 5%的显著水平,大写字母表示 1%的显著水平,下同 Above states are average number of three blocks; Different letters are significantly difference by LSD test; small letter is *p*<0. 05. Capital is *p*<0. 01; the same below

表 3 早稻不同生育期土壤中产甲烷菌数量(cfu/g 干土,滚管法)

生育期 Growth stage 2002 年 Year (月/日)(Month / Day)	甲醇 Methanol		异丙醇 Isopropanol		乙酸钠 Sodium acetate		CO ₂ / H ₂	
	稻田养鸭	常规稻田	稻田养鸭	常规稻田	稻田养鸭	常规稻田	稻田养鸭	常规稻田
	Rice-duck	CK	Rice-duck	CK	Rice-duck	CK	Rice-duck	CK
返青期(5/7)	2.7×10 ³	1.0×10 ⁴	4.5×10 ⁶	1.5×10 ⁵	1.5×10 ⁴	8.0×10 ⁵	5.8×10 ³	5.6×10 ³
Regreening	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A
分蘖盛期(5/20)	2.7×10 ³	1.0×10 ⁴	1.5×10 ⁵	4.5×10 ⁶	1.1×10 ⁴	1.7×10 ⁵	6.5×10 ⁶	7.2×10 ⁷
Active tillering	a A	a A	b B	a A	b B	a A	b B	a A
孕穗期 (6/2)	9.8×10 ⁵	5.0×10 ⁶	1.0×10 ⁸	1.5×10 ⁸	1.5×10 ⁷	8.0×10 ⁸	3.9×10 ⁸	5.2×10 ⁹
Booting	b B	a A	b B	a A	b B	a A	b B	a A
乳熟期 (6/23)	5.0×10 ³	7.0×10 ⁴	5.5×10 ³	7.6×10 ⁴	3.0×10 ³	1.3×10 ⁴	4.8×10 ⁵	3.6×10 ⁶
Milk ripening	b B	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A
黄熟期 (7/10)	8.0×10 ³	2.1×10 ⁴	1.5×10 ⁵	1.8×10 ³	3.0×10 ⁴	a A1.6×10 ⁴	1.8×10 ⁵	1.1×10 ⁶
Yellow ripening	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A	a A

土壤中微生物的发育提供的营养源也不同,也就间接地影响了厌氧食物链中的最后成员——产甲烷菌的生长发育。水稻在营养生长旺盛时期光合作用最强,有较多的光合产物从根系分泌,而根分泌物主要由碳水化合物、有机酸和氨基酸组成,很容易被土壤中的发酵性细菌分解成 CO₂、H₂ 和乙酸盐,而被产甲烷细菌利用^[7]。进入孕穗期,根系分泌物减少。到生长后期,水稻死根增多,又为甲烷菌的生长提供较多的营养基质。这表明厌氧环境和甲烷形成基质的提供是产甲烷菌种群发育所必需的。这与闵航、段彬伍等^[9,10]报道的研究结果相一致,同时与水稻田中甲烷排放的季节变化规律相一致^[8,12],从而证实了水稻田中的 CH₄ 释放量决定于根系际部产甲烷菌种群的数量及其活性这一观点。

2.3 稻-鸭复合生态系统对产甲烷菌数量的影响

结果表明(表 2,表 3),养鸭对稻田甲烷排放高峰期的产甲烷菌种群数量控制效果最为明显。水稻返青期前,两系统的产甲烷菌数量差异不显著,这是由于此时两系统的土壤条件基本一致;水稻进入返青期以后,特别是在分蘖盛期和孕穗期,湿地稻-鸭复合生态系统土壤中的产甲烷菌数量明显低于对照,MPN 计数中,前者低于后者 20.0%~96.9%;滚管法计数中前者比后者降低 33.3%~98.1%,在以甲醇为基质的两种计数方法中,稻-鸭复合生态系统均在水稻孕穗期和乳熟期对产甲烷菌种群生长发育的抑制作用最明显,两系统之间产甲烷菌数量的差异均达极显著水平。以异丙醇、乙酸钠和 CO₂/H₂ 为基质的两种计数法中,稻-鸭复合生态系统产甲烷菌种群数量均在分蘖盛期和孕穗期明显受到控制,两系统之间的差异均达极显著水平。这是因为随着鸭子的放入,并长期露宿于田间,其频繁地活动搅动了土壤,提高了土壤的通气能力,也由于鸭子在田间大量觅食杂草和浮游生物,将甲烷菌活动增加了田泥与氧气的接触机会,改善了土壤的氧化还原状况,加强了土壤中有机物质的好氧性氧化。同时尽管鸭粪及残余的饵料在淹水条件下分解导致氧气的消耗加快而引起土壤氧化还原电位下降,但研究表明稻-鸭复合系统中土

壤氧化还原电位仍比常规稻作系统高 15.3mV^[12]。水稻进入乳熟期以后,两系统中的产甲烷菌数量又表现为基本一致,这可能是由于鸭子在齐穗期收回以后,稻-鸭复合系统中的氧化还原电位又逐渐恢复的缘故。这种结果表明土壤的氧化还原特性是影响产甲烷菌生长的主要因素。

3 结论

综上所述,湿地稻田生态系统种稻期间产甲烷菌数量具有明显的季节变化规律,且与稻田甲烷排放的季节变化模式基本一致,从而证实了产甲烷菌的数量是决定水稻田中甲烷释放量的主要因素之一。通过围栏养鸭,不仅能提高经济效益^[11,13],还可以减少稻田中的产甲烷菌数量,特别是减少了稻田甲烷排放高峰期的产甲烷菌数量。本研究通过养鸭抑制了甲烷菌的产生,达到了减少稻田甲烷排放的目的,对将来制定温室气体缓释对策具有重要意义。同时也寻找到一种既不影响经济效益又能减少水稻田中产甲烷释放量的措施,兼具社会、生态、经济三重效益。

References:

[1] IPCC. *Climate Change* 1995. The science of climate change. Summary for policymakers, 1995.

[2] IPCC. *Climate Change*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment,1992. 5~19.

[3] Schutz H, Seiler W and Comad R. Processes involved in formation. And emission in rice paddies. *Biogeochemistry*, 1989, **7**:33~53.

[4] Xie J H, Li Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils. *Chnia Agricultural Weather*, 2002,**23**(4):47~52.

[5] Sun W T, Xiao Q M, Lou C R, *et al.* Production and emission of methane and its influencing factor in soil. *Rain fed Crops*, 2000,**20**(5):44~47.

[6] Neue H U, Wassmsnn R, Lantin R S, *et al.* Methane emission from ricefield. *International Rice Res. Notes*, 1994, **19**(3):31.

[7] Sicui Liang, Geng yang. Possibilities for reducing methane emission from ricefield in China. *International Rice Res. Notes*, 1994, **19**(3):39~40.

[8] Min H, Chen M C, Qian Z S. Release of methane in paddy soil and its biological mechanism. *Acta Pedologica Sinica*, 1993,**30**(2):125~129.

[9] Duan B W, Lu W F, Chen W, *et al.* Evaluation of the effect of planted hybrid rice on methane emission from paddy field. *China Environmental Science*,1999,**19**(5):397~401.

[10] Chen M C, Ming H, Qian Z S. Amount and dominant species of MPB in submerged paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, **18**(4):432~437.

[11] Wang H, Huang H. Analysis on Ecological and Economic benefits of complex ecosystem in wet land paddy fields. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, **18**(1):71~75.

[12] Huang H, Yang Z H, Wang H, *et al.* . A study on the pattern of methane emission in wetland rice-duck complex ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(5):929~934.

[13] Huang M, Huang H, Gan D X. On application duck-culturing technique to no-tillage cast-transplant. *Journal of Hu’nan Agricultural University*, 2003,**29**(3):207~210.

参考文献:

[4] 谢军飞,李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展. 中国农业气象,2002,**23**(4): 47~52.

[5] 孙文涛,肖千明,娄春荣,等. 土壤中甲烷的形成、排放及影响因素. 杂粮作物,2000,**20**(5):44~47.

[8] 闵航,陈美慈,钱泽澍. 水稻田中甲烷释放及其生物学机理. 土壤学报,1993,**30**(2):125~129.

[9] 段彬伍,卢婉芳,陈苇,等. 种植杂交稻对甲烷排放的影响及评价. 中国环境科学,1999,**19**(5):397~401.

[10] 陈美慈,闵航,钱泽澍. 水稻田中产甲烷菌数量和优势种. 土壤学报,1993,**18**(4):432~437.

[11] 王华,黄璜. 湿地稻萍鸭立体生态系统的经济效益研究. 中国农学通报,2002,**18**(1):71~75.

[12] 黄璜,杨志辉,王华,等. 湿地稻-鸭复合系统的甲烷排放规律. 生态学报,2003,**23**(5):104~110.

[13] 黄梅,黄璜,甘德欣. 晚稻免耕抛秧养鸭技术应用. 湖南农业大学学报,2003,**29**(3):207~210.