

湿地稻-鸭复合系统的 CH₄ 排放规律

黄 璜, 杨志辉, 王 华, 胡泽友, 陈仕贵, 陈 灿

(湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要:采用小区试验,大田试验研究湿地稻-鸭复合生态系统甲烷排放规律。稻鸭复合生态系统中甲烷排放随季节变化,在早稻-晚稻耕作制度条件下,6月上旬和7月底分别有2个高峰。早稻与晚稻的排放规律也各异,早稻甲烷排放峰值出现在水稻幼穗分化期,最高值为13.693mg/(m²·h),晚稻峰值出现在分蘖盛期,可达23.145~105.595mg/(m²·h)。养鸭处理与常规栽培甲烷排放差异达极显著水平。稻田养鸭的早稻生育期间甲烷排放总量为5.517g/m²,传统栽培为9.89g/m²。稻田养鸭的晚稻生育期间排放总量为10.113g/m²,传统栽培为17.054g/m²。稻田养鸭与传统栽培比较,土壤氧化还原电位增加15.3mV,还原物质总量、活性还原物质总量、活性有机还原物质总量分别降低0.365cmol/kg、0.242cmol/kg和0.180cmol/kg。土壤氧化还原特性影响甲烷排放通量,土壤还原物质总量、活性还原物质及活性有机还原物质数量与甲烷排放通量的相关系数分别为0.805、0.791、0.769,湿地稻鸭复合生态系统土壤氧化还原状况改善是甲烷排放减少原因之一。

关键词:湿地;稻;鸭;生态种养;甲烷排放

A study on the pattern of methane emission in wetland rice-duck complex ecosystems

HUANG Huang, YANG Zhi-Hui, WANG Hua, HU Ze-You, CHEN Shi-Gui, CHEN Can

(College of Agronomy of Hu'nan Agricultural University, Changsha 410128, China). *Acta Ecologica Sinica*. 2003. 23 (5): 929~934.

Abstract: The pattern of methane emission in wetland rice-duck complex ecosystems was studied in block experiment and field production. The results showed that methane emission displayed clear seasonal variation in rice-duck complex ecosystems. In the case of the early rice-late rice cropping system, methane emission peaked in the first part of June and the end of July respectively. Methane emission also varied by the growth course. For early rice, 2 methane emission peak of 13.693mg/(m²·h) appeared in the young panicle differentiation stage, and for late rice in the full tiller stage with 23.145~105.595 mg/(m²·h). The difference in total methane emission between rice-duck complex ecosystems and conventional culture was the most obvious by statistics. For the total course of early rice, methane emission in rice-duck

基金项目:国家863资助项目(863-306-ZD05-3-E);国家自然科学基金资助项目(39670142);湖南省科技厅资助项目(OONKY1001)

收稿日期:2002-07-15; **修订日期:**2003-03-05

作者简介:黄璜(1958~),男,博士,教授,主要从事农田生态和农业灾害治理。E-mail:huangh@hunau.net
研究过程中得到湖南农业大学荣湘民老师的帮助,特此致谢。

Foundation item: National High Technology Research and Development Program (No. 863-306-ZD05-3-E), National Natural Science Foundation of China (No. 39670142) and Science and Technology Department of Hu'nan Province (No. OONKY1001)

Received date: 2002-07-15; **Accepted date:** 2003-03-05

Biography: HUANG Huang, Ph. D., Professor, main research field: field ecology and governing of calamity in agriculture.
E-mail: huangh@hunau.net

complex systems was $5.517\text{g}/\text{m}^2$ and in conventional culture was $9.891\text{g}/\text{m}^2$. For the total course of late rice, methane emission in rice-duck complex systems was $10.113\text{g}/\text{m}^2$ and in conventional culture was $17.054\text{g}/\text{m}^2$. Comparing rice-duck complex ecosystems to conventional culture, redox status increased by 15.3mV ; reducing matter, active reducing matter and active organic reducing matter decreased by $0.365\text{cmol}/\text{kg}$, $0.242\text{cmol}/\text{kg}$ and $0.180\text{cmol}/\text{kg}$ respectively. Soil oxidation-reduction characteristics affected the fluxes of methane emission. The correlation between the total reducing matter, active reducing matter, active organic reducing matter and fluxes of methane emission were 0.805^* , 0.791^* and 0.769^* respectively. The improvement in soil oxidation-reduction status of wetland rice-duck complex ecosystem was one of the contributing factors to the reduction of methane emission.

Key words: wetland; rice; duck; eco-planting and breeding; methane emission

文章编号: 1000-0933(2003)05-0929-06 中图分类号: S154.1, S181 文献标识码: A

CH_4 是大气中的重要温室气体之一。温室气体破坏臭氧层, 导致全球气候变暖, 对环境构成的威胁早已引起科学界的关注^[1]。大气 CH_4 的主要来源是湿地, 湿地稻田 CH_4 排放量占甲烷排放总量的 $4\% \sim 35\%$ ^[2,3]。湿地生态系统不同, 甲烷的排放量差异较大, 通常在 $0.47 \sim 171.12\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间波动^[4,5]。同时耕作制度、施肥制度、水分管理、温度、质地、氧化还原状况等都影响到 CH_4 的排放^[4,6-8]。这些研究结果为制定如何减少甲烷排放的措施提供了重要的科学依据。

稻-鸭复合生态系统是一种发展已久的稻田综合利用方式, 也是我国江南一带主要的稻田复合种养系统。该系统利用鸭子好动、勤觅食的生活习性, 搅动土壤, 起到中耕、除草作用, 并增加土壤养分、改善作物群体的通风透光条件, 从而产生显著的经济效益和社会效益^[9-11]。然而, 把稻-鸭复合生态系统作为一种既增加稻田综合效益又能减少甲烷排放的模式, 利用鸭子长期在田间活动破坏稻田的缺氧还原环境, 抑制甲烷菌的活性, 降低甲烷排放通量和排放总量的研究还尚无报道。为此, 本文从稻田甲烷气体排放的角度研究湿地稻-鸭复合生态系统的生态效应, 为建立稻-鸭复合生态系统提供理论基础和实践依据。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地自然条件

本研究于 2000 年 7 月至 2001 年 10 月在湖南农业大学植物科技学院作物标本园内进行小区试验, 同期在长沙县星沙镇简灰村进行大田试验, 共进行 3 季试验, 其中早稻 1 季, 晚稻 2 季。试验地座落在中亚热带季风湿润气候区。年平均气温 $16 \sim 18\text{C}$, $\geq 10\text{C}$ 的活动积温 $5000 \sim 5800\text{C}$, 适于双季稻栽培。试验地均为第四纪红土母质发育的红黄泥, 土壤肥力较高, 排灌方便。

1.2 试验设计

(1) 小区试验 试验设置 2 个处理: 即稻田围栏养鸭(不施化学农药及除草剂)与对照(不养鸭, 其它管理同常规管理), 两处理均实行浅水淹灌。小区试验设 4 次重复, 随机排列, 每小区面积 67m^2 , 养鸭处理每小区养鸭 2 只, 小区之间用水泥砌成田埂, 以免肥水串灌。

(2) 大田试验 大田试验以稻田自然丘块为单位, 面积 $3 \times 667\text{m}^2$, 然后在同丘田中用围网隔成 3 个均等小区用作重复, 每个小区的中央再用尼龙网围成 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的封闭区作为对照(不放鸭, 施用化学农药和除草剂)封闭区四周设泥埂防止与处理区串灌。稻田围栏养鸭小区四周用高 50cm 的尼龙网做成围栏, 以防鸭子外逃, 田角设 1m^2 的鸭栖息棚。2000 年晚稻于 6 月 16 日播种, 7 月 14 日移栽, 10 月 12 日收获, 2001 年早稻于 4 月 25 日抛栽, 7 月 16 日收获, 2001 年晚稻于 7 月 18 日移栽, 10 月 5 日收获。雏鸭出壳后喂养 15d, 待秧苗栽插返青后(分蘖始期), 按每 666.7m^2 12 只的标准将鸭投放于稻田中露宿饲养, 齐穗期收回鸭子。

1.3 供试材料

水稻品种为秀水 86 号, 2000 年晚稻用湘晚籼 6 号和湘晚籼 8 号, 2001 年早稻品种为湘早籼 31 号, 晚稻用威优 64, 施肥量 $\text{N}150\text{kg}/\text{hm}^2$, $\text{P}75\text{kg}/\text{hm}^2$, $\text{K}90\text{kg}/\text{hm}^2$ 。供试鸭品种为江南一号。

1.4 取样及测定

1.4.1 CH₄ 采样 CH₄ 采样采用静止箱技术,箱底面积为 51cm×51cm,高 100cm,在水稻分蘖始期(即放鸭前)、分蘖盛期、幼穗分化期、孕穗期、齐穗期、成熟期分别在同一地点采样。采样从 8:00 开始,采样时将采样箱轻置于与采样土面平齐的 4 个木桩上,打开安装于箱顶的电扇,混和箱内气体。用取气仪抽取箱内气体后,立即将气体转移至已抽成真空的 18ml 玻璃瓶中,一个取样点的甲烷采样分 4 次进行,每间隔 10min 采一次样。根据样品甲烷浓度与时间的关系曲线计算出试验稻田取样时甲烷的排放通量。

1.4.2 土壤氧化还原特性 每次采气体样的同时,测定各小区氧化还原电位、还原物质总量、活性还原物质含量及 Fe²⁺ 含量,活性有机还原物质含量由活性还原物质含量减去 Fe²⁺ 含量求得。

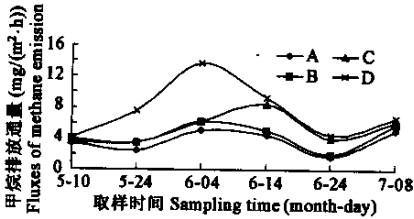
1.4.3 分析方法 甲烷气体用气相色谱仪测定,用 FID 检测器。氧化还原电位:电位法,pHS-29A 型酸度计测定;还原物质总量:Al₂(SO₄)₃ 浸提-重铬酸钾容量法;活性还原物质:Al₂(SO₄)₃ 浸提-高锰酸钾容量法;亚铁:Al₂(SO₄)₃-浸提-邻啡咯啉比色法。

2 结果与讨论

2.1 稻-鸭复合生态系统中甲烷的排放规律

甲烷排放是稻田中厌氧菌利用土壤中的有机物质产生甲烷气体,再除去水稻根际部和土、水界面甲烷氧化菌对甲烷的氧化及水土对甲烷的吸附后的剩余量,以冒气泡的形式传向空中的结果。它是甲烷产生、再氧化以及向大气传输这 3 个过程相互作用的结果。这 3 个过程都受到生物和非生物因素的影响,如水稻的生长状况、温度、土壤有机质、土壤氧化还原电位、土壤酸碱度等。由于这些影响因素在早稻和晚稻的生长期波动较大,如全年的气温变化。甲烷的排放也因早、晚稻生长季节不同而显示出不同的规律,即使入养鸭以后甲烷排放的季节变化也很明显。

2.1.1 稻-鸭复合生态系统中甲烷排放的季节规律 图 1、图 2 为 2001 年早、晚稻整个生长期各处理和对照的甲烷排放通量的季节变化。由图中可以看出,早、晚稻养鸭处理和对照的甲烷排放率都有较大的差异。由于晚稻期间气温远远高于早稻期间,更适于产甲烷菌的生长活动(产甲烷菌最适生长温度为 40℃)^[14],因此,无论养鸭处理还是对照晚稻田的甲烷排放量均高于早稻田的甲烷排放量。在早、晚稻的全生长过程中,共测到了两个排放高峰,早稻生长初期,由于气温较低,日平均气温在 20℃ 以下,且多阴雨天气,不适于甲烷菌生长和有机质分解,因此第一个甲烷产生高峰出现的时间晚于晚稻,而晚稻则不同,初期由于气温极高,最适产甲烷菌生长,且稻田土壤中供微生物活动的有机养分充足,加上此时水稻的营养生长旺盛使传输路径畅通,土壤中产生的甲烷能很快排放出来,因此在水稻分蘖盛期就达到甲烷排放高峰。此后甲烷的排放量急剧下降,到 8 月中旬就降至与早稻相近的水平;到水稻齐穗至成熟期,尽管有较多根脱落物和腐败物进入土壤,但由于此时气温较低,加上水稻田近收割期,表层干涸,破坏了淹水厌氧环境,甲烷的生

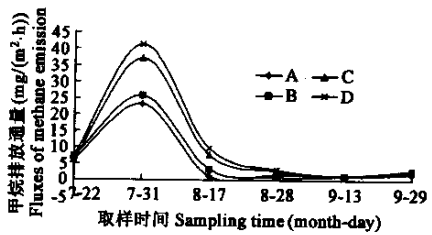


A-养鸭(小区) B-养鸭(大田) C-对照(小区) D-对照(大田)

A-Raise duck(plot) B-raise duck(field) C-CK(plot) D-CK(field)

图 1 早稻-鸭复合生态系统中甲烷排放季节变化

Fig. 1 The seasonal variation of methane emission in early rice-duck complex ecosystem



A-养鸭(小区) B-养鸭(大田) C-对照(小区) D-对照(大田)

A-Raise duck(plot) B-raise duck(field) C-CK(plot) D-CK(field)

图 2 晚稻-鸭复合生态系统中甲烷排放季节变化

Fig. 2 The seasonal variation of methane emission in late rice-duck complex ecosystem

成量与排放量急剧降低,当甲烷的生成量与氧化量达到平衡时甲烷的排放通量为零。

就处理和对照比较而言,整个放鸭期间处理的甲烷排放明显低于对照,处理除了在晚稻分蘖盛期出现一明显排放高峰,其余时间的排放量较为平缓。早稻田养鸭处理和对照甲烷排放量的季节变化,总的来说,无论养鸭处理还是对照波动都不太大,大田养鸭处理的变化范围为 1.975~6.159mg/(m²·h),大田对照的变幅略大,为 9.607mg/(m²·h)。方差分析结果表明,早稻田处理与对照的差异达到极显著水平($F_{\text{小区}}=17.029, F_{\text{大田}}=9.947, F_{0.01}=7.444$)。晚稻田中处理与对照甲烷排放的差异较大,在水稻分蘖盛期和幼穗分化期小区处理分别比小区对照低 13.935mg/(m²·h)和 6.325mg/(m²·h),而在其它生育时期二者的差别均较小。

稻田生态系统是甲烷的主要排放源,稻田中产生的平均 80%的甲烷在排放到大气前已被甲烷氧化菌氧化^[15,16]。剩余甲烷气体 90%以上是通过水稻植株体通气组织排放的^[17]。因而水稻的生长状况及生长环境影响甲烷的排放。稻-鸭复合生态系统中,鸭子主要通过以下 3 个方面减少稻田甲烷的排放:①鸭子长期露宿于田间,其活动与觅食搅动了土壤,加强了土壤的通气,同时由于鸭大量觅食田间杂草和浮游生物避免了因杂草和浮游生物的呼吸作用对水体溶氧的消耗,使水体溶解氧增加,甲烷氧化菌的活性提高,促使土壤产生的甲烷被较快地氧化,从而降低甲烷的排放通量;②鸭子觅食吃草,将田泥翻动,增加了田泥和氧气的接触机会,破坏了还原层,抑制甲烷菌的生长活性,减少了甲烷的产生量;③杂草和水稻的无效分蘖经鸭子消化排除,减少了因其腐烂、分解后的甲烷排放量。

2.2 稻-鸭复合生态系统种稻期间甲烷的排放总量

2.2.1 稻-鸭复合生态系统中水稻全生育期内甲烷排放通量比较

2001 年早、晚稻-鸭复合生态系统甲烷的排放总量,晚稻显著大于早稻(表 1)。早稻生长季节放鸭后甲烷排放总量比对照少 4.374 g/m²;晚稻期间稻田甲烷排放总量增加,放鸭对稻田甲烷释放的抑制效果更加明显,养鸭处理比对照甲烷排放降低了 6.941 g/m²。研究结果表明,养鸭对稻田甲烷排放高峰期的控制效果最为明显,早稻在分蘖盛期-孕穗期甲烷排放减少了 3.185 g/m²,降低率为 60.7%;晚稻在分蘖始期-分蘖盛期甲烷排放绝对量降低 6.11 g/m²。因此稻田生态系统实行稻-鸭种养能明显控制甲烷的排放量,对于改善全球的温室效应状况具有重大意义。

表 1 稻-鸭复合生态系统种稻期间甲烷的排放量(g/m²)

Table 1 The quantity of methane emission during the rice growing season in rice-duck complex ecosystem

季别 Type	处理 Treatment	放鸭前 Before introducing duck				放鸭后 After introducing duck			合计 Total
		移栽-分蘖始	分蘖始-分蘖盛	分蘖盛-幼穗分化	幼穗分化-孕穗	孕穗-齐穗	齐穗-成熟		
		①-②	②-③	③-④	④-⑤	⑤-⑥	⑥-⑦		
早稻 Early rice	稻田养鸭	1.496	0.819	1.42	0.639	0.319	0.924	5.517	
	CK	1.496	1.243	3.064	2.18	0.892	1.016	9.891	
晚稻 Late rice	稻田养鸭	2.766	5.075	1.419	0.224	0.488	0.131	10.113	
	CK	2.776	8.877	3.727	0.503	0.608	0.563	17.054	

*: ①Transplanting, ②The initial tillering stage, ③The full tillering stage, ④The young panicle differentiation stage, ⑤The boot stage, ⑥The complete panicle stage, ⑦The maturity stage

2.3 稻-鸭复合生态系统中土壤氧化还原特性对甲烷排放的影响

2.3.1 稻-鸭复合生态系统中土壤氧化还原特性

稻-鸭复合生态系统中,土壤氧化还原状况较为复杂,鸭粪及残余饲料在淹水条件下分解将导致土壤还原程度增强,另外鸭子在田间的活动与觅食,搅动了土壤,起到中耕的作用,土壤中溶解氧增加^[12]。

本研究结果表明:与对照相比,稻田养鸭处理氧化还原电位高出 15.3mV,还原物质总量减少 11.4%,活性还原物质减少 9.2%,活性有机还原性物质减少 14.9%,不过亚铁数量在两处理间的差异不大(表 2)。可见,稻-鸭复合生态系统中土壤氧化还原状况的改善主要是由于促进了活性有机还原物质的氧化。

2.3.2 稻-鸭复合生态系统中土壤氧化还原特性对甲烷排放的影响

甲烷是在极端还原条件下,产甲烷微生物的活动产物。当氧化还原电位低于 -150~-160mV 时,产甲烷微生物开始活动而排放出甲烷^[13]。

因此,土壤的氧化还原特性对甲烷的排放将产生一定影响。本研究在测定 Eh 的同时,也测定了土壤中还原物质总量、活性还原物质及活性有机还原物质数量。经相关分析,三者与甲烷排放通量的相关系数分别为 0.8053、0.7910 和 0.7693,均达到 5% 的显著水平,且三者相关系数大(表 3)。由此更说明湿地稻-鸭复合生态系统中土壤氧化还原状况的改善是减少甲烷排放的原因之一。

表 2 稻-鸭复合生态系统的土壤氧化还原特性

Table 2 Redox status of paddy soil in rice-duck complex ecosystem

处理 Treatment	取样时期 Sampling time	Eh7.0 (mV)	还原物质总量 Reducing matter (cmol/kg)	活性还原物质数量 Active reducing matter (cmol/kg)	Fe ²⁺ (cmol/kg)	活性有机还原物质数量 Active organic reducing matter (cmol/kg)
稻田养鸭 Rice-duck	7月31日	28.7	5.526	4.508	2.696	1.812
	8月17日	56.6	4.338	3.651	1.426	2.225
	8月28日	113.1	2.591	2.140	1.246	0.894
	9月13日	127.7	0.939	0.856	0.691	0.165
	9月29日	65.0	0.801	0.746	0.700	0.046
	平均	78.2	2.839	2.380	1.352	1.028
CK	7月31日	7.4	5.992	4.614	2.830	1.784
	8月17日	55.2	4.613	3.746	1.411	2.335
	8月28日	99.7	3.467	3.104	1.379	1.725
	9月13日	101.3	1.083	0.841	0.729	0.112
	9月29日	50.8	0.867	0.807	0.722	0.085
	平均(Average)	62.9	3.204	2.622	1.414	1.208

* 取样时间为 2001 年晚稻 Sampling time was late rice in 2001

表 3 稻-鸭复合生态系统中甲烷排放通量与土壤氧化还原性状的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between the fluxes of methane emission and redox properties of paddy soil in rice-duck complex ecosystem

	Eh	还原物质总量 Reducing matter	活性还原物质数量 Active reducing matter	活性有机还原物质数量 Active organic reducing matter	甲烷排放通量 Fluxes of methane emission
Eh	1				
还原物质总量 ^①	-0.682	1			
活性还原物质数量 ^②	-0.628	0.993**	1		
活性有机还原物质数量 ^③	-0.787*	0.921**	0.867*	1	
甲烷排放通量 ^④	0.618	0.805*	0.791*	0.769*	1

① Reducing matter, ② Active reducing matter, ③ Active organic reducing matter, ④ Fluxes of methane emission

3 结论与讨论

3.1 稻田生态系统种稻期间甲烷排放通量表现出一定的规律。早稻甲烷排放峰值出现在水稻幼穗分化期,最高值为 13.693 mg/(m²·h);晚稻种稻期间甲烷排放通量在水稻分蘖盛期最大,可达 23.145~105.595mg/(m²·h),此时的排放通量是其它时期的 2.3~106.3 倍。

3.2 稻田实行稻-鸭生态种养能减少甲烷气体的排放通量与排放总量,养鸭对稻田甲烷排放高峰期的控制效果最为明显。早稻田养鸭处理放鸭后甲烷排放总量比对照减少 4.374 g/m²;晚稻期间养鸭处理比对照甲烷排放降低了 6.941 g/m²;早稻在分蘖盛期-孕穗期甲烷排放减少了 3.185 g/m²,降低率为 60.7%;晚稻在分蘖始期-分蘖盛期甲烷排放绝对量降低 6.11 g/m²。

3.3 稻-鸭复合生态系统中,土壤环境条件得到明显的改善。土壤氧化还原电位增加 15.3mV,还原物质总量、活性还原物质总量、活性有机还原物质总量分别降低 0.365cmol/kg、0.242cmol/kg 和 0.180cmol/kg。土壤还原物质总量、活性还原物质及活性有机还原物质数量与甲烷排放通量的变化趋势相一致,土壤氧化还原状况的改善是降低甲烷排放的原因之一。

4.3 稻-鸭复合生态系统中,鸭子通过消灭杂草和水稻下脚叶影响甲烷菌生存的环境间接地减少甲烷的产生;最重要的因素是鸭群的活动增加稻田水体和土层的溶解氧^[12],改善了土壤的氧化还原状况,加快了甲烷的再氧化,从而降低甲烷的排放通量和排放总量。

References:

- [1] Gong Z T. *Change in Environment in Soil*, Science and Technology Press of China, Beijing, 1992. 299~301.
- [2] Cai Z C. Prosepects for the Research on Soil-trace Gases, *Acta Soil*, 1993, **30**(2): 117~124.
- [3] Zhu J O. The Sources and Sink of Methane in Atmosphor. *Science of Environmental Protect*, 1996, **22**(2): 5~9.
- [4] Wei C F, Gao M and Huang Q, *et al.* Effects of Tilliage-cropping Systems on Methane Emissions from Year-round Flooded Paddy Field in Southwest China, *Acta Soil*, 2000, **37**(2): 157~164.
- [5] Ye Y. Study on CH₄ Producing Efficiency and Factor Effecting Physical and Chemical Characteristics in Mangrove Wetland. *Acta Soil*, 2000, **37**(2): 157~164.
- [6] Wang Z P, Delaune R D, Masscheleyn P H, *et al.* Soil Redox and pH Effects on Methane Reduction in A Flooded Rice Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, **57**: 382~385.
- [7] Cai Z C, Xiang G X, Yan X Y, *et al.* Methane and Nitrous Oxide Evolution from Rice Paddy Fields as Affected by Nitrogen Fertilize and Water Management. *Plant and Soil*, 1997, **196**: 7~14.
- [8] Xu H, Cai Z C and Li X P, *et al.* Effect of Soil Drying CH₄ Flux from Rice Paddy Soil, *Acta Soil*, 2000, **37**(1): 77~84.
- [9] Yoshino Takao. Breeding Duck in Paddy, Tokyo, *Society of Fish Culture in Agriculture*, 1997. 21~58.
- [10] Zheng Y H, Deng G B and Lu G M. Economic Benefits of Rice-fish-duck Complex Ecosystem—A Preliminary Study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(4): 431~434.
- [11] Ekurem EDAR, Ryohei YABUKI. Comparative Studies on Behaviour, Weeding and Pest Control of Duck Free Ranged in Paddy Fields. *Jpn. Poult. Sci.*, 1996, **33**: 261~267.
- [12] Wang Y, Lei W C. Studies on the Ecological Effect of Planting breeding Models in the Rice Field, *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(2): 311~316.
- [13] Cai Z C, Sheng G C and Yang X Y, *et al.* Effects of Soil Texture, Soil, Temperature and Eh on Methane Emissions from Rice Paddy Field, *Acta Soil*, 1998, **35**(2): 145~153.
- [14] Che M C, Min H and Qian Z S. Amount and Dominant Species of MPB in Submerged Paddy Soil, *Acta Soil*, 1993, **30**(4): 432~437.
- [15] Xu X K. Main Factors on CH₄ Oxidation in Soil and Measure Decreasing Release of CH₄, *Research on Ecoagricultrue*, 1999, **7**(2): 18~22.
- [16] Wagatsuma T, *et al.* Decrease of Methane Concentration and Increase of Nitrogen Gas Concentration in the Rhizosphere by Hygrophytes. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1992, **38**(3): 467~476.
- [17] Li J. Study on Mechanism of CH₄ Release in Paddy Ecosystem, *Progress of Basic Science Research in China*, 2000, (7): 19~23.

参考文献:

- [1] 龚子同主编. 土壤环境变化. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 299~301.
- [2] 蔡祖聪. 土壤痕量气体研究展望. 土壤学报, 1993, **30**(2): 117~124.
- [3] 朱玖, 等. 大气甲烷的源和汇. 环境保护科学, 1996, **22**(2): 5~9.
- [4] 魏朝富, 等. 耕种制度对西南地区冬水田甲烷排放的影响. 土壤学报, 2000, **37**(2): 157~164.
- [5] 叶勇, 等. 红树林湿地土壤 CH₄ 产生率及其土壤理化因素影响的研究. 土壤学报, 2000, **37**(1): 77~84.
- [8] 徐华, 等. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响. 土壤学报, 2000, **37**(1): 69~76.
- [9] 吉野隆雄. 稻田养鸭. 东京: 农业渔村文化协会, 1997. 21~58.
- [10] 郑永华, 等. 稻鱼鸭复合生态经济效益的初步研究. 应用生态学报, 1997, **8**(4): 431~434.
- [12] 王纓, 雷慰慈. 稻田种养模式生态效益研究. 生态学报, 2000, **20**(2): 311~316.
- [13] 蔡祖聪, 等. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响. 土壤学报, 1998, **35**(2): 145~153.
- [14] 陈美慈, 等. 水稻田中产甲烷菌数量和优势种. 土壤学报, 1993, **30**(4): 432~437.
- [15] 徐星凯, 等. 土壤源 CH₄ 氧化的主要影响因子与减排措施. 生态农业研究, 1999, **7**(2): 18~22.
- [17] 李晶. 稻田生态系统甲烷排放的机理研究. 中国基础科学研究进展, 2000, (7): 19~23.