

## 养鸭数量对 CH<sub>4</sub> 排放的影响

傅志强<sup>1</sup>, 黄 璜<sup>2,\*</sup>, 廖晓兰<sup>3</sup>, 胡 英<sup>4</sup>, 谢 伟<sup>2</sup>, 何保良<sup>2</sup>

(1. 湖南农业大学 理学院; 2. 湖南农业大学 农学院; 3. 湖南农业大学 生物安全科技学院; 4. 湖南农业大学 教务处, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 探讨不同养鸭数量对稻田甲烷(CH<sub>4</sub>)排放的影响, 为确定稻鸭共育模式中最佳养鸭数量提供环境学支撑。运用静止箱原位采样技术测定了不同养鸭数量的稻田甲烷排放通量、稻田土壤化学性质、产甲烷细菌种群数量以及水层溶解氧含量。结果表明, 不同养鸭数量稻田水层溶解氧含量间差异显著( $p < 0.01$ ), 养鸭数量越多, 溶解氧含量越高。20 只鸭/667m<sup>2</sup> 稻田的水层溶解氧含量最大, 与对照比, 早稻增加了 2.2% ~ 68.7%, 晚稻增加了 11.07% ~ 110.77%; 养鸭稻田土壤还原物质含量减少, 产甲烷细菌数量下降。不同养鸭数量的稻田甲烷排放量之间差异显著, 养鸭数量越多, 甲烷排放量越少, 与对照比, 早稻减少了 18.22% ~ 28.13%, 晚稻减少了 17.73% ~ 34.44%。相关分析表明, 甲烷排放通量与水层溶解氧含量呈极显著负相关( $p < 0.001$ ), 与土壤还原物质含量及产甲烷细菌数量呈显著正相关( $p < 0.01$ )。因此, 稻鸭共育减排甲烷的主要原因是养鸭提高了水体和土壤中溶解氧含量, 增加养鸭数量促进甲烷减排。

**关键词:** 稻-鸭; 甲烷; 溶解氧含量; 甲烷细菌; 机理

文章编号: 1000-0933(2008)05-2107-08 中图分类号: Q148, S181 文献标识码: A

## The effect of ducks on CH<sub>4</sub> emission from paddy soil: mechanism research in the rice-duck ecosystem

FU Zhi-Qiang<sup>1</sup>, HUANG Huang<sup>2,\*</sup>, LIAO Xiao-Lan<sup>3</sup>, HU Ying<sup>4</sup>, XIE Wei<sup>2</sup>, HE Bao-Liang<sup>2</sup>

1 Science College of Hunan Agricultural University

2 Agronomy College of Hunan Agricultural University

3 Bio-safety Science and Technology College of Hunan Agricultural University

4 Dean's Office of Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2107 ~ 2114.

**Abstract:** The study carried out different treatments consisted of different numbers of duck in the rice-duck ecosystem compared with the no-duck rice farming in an early and late season. The treatments were designed with triplication by randomized blocks. Methane emission fluxes from paddy soils were measured by the static chambers technique. The correlations between methane emission and soil physical and chemical characteristics were also analyzed. The results showed significant differences ( $p < 0.01$ ) existed in the dissolved oxygen contents of water in the treatment fields, and that the more ducks, the higher the dissolved oxygen content. The dissolved oxygen content of 20 ducks per 667m<sup>2</sup> was higher than any other situation compared with no-duck rice farming. The oxygen dissolve increased by 2.2%—68.7% and 11.07%—

**基金项目:** 国家“十一五”粮食丰产科技工程资助项目(2006BAD02A01)

**收稿日期:** 2007-09-09; **修订日期:** 2008-01-24

**作者简介:** 傅志强(1968~), 男, 湖南涟源人, 博士, 主要从事作物生态信息学及生物数学研究。E-mail: zqf\_cis @ 126. com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: hh863@ 126. com

**致谢:** 中国科学院亚热带生态农业研究所张美文博士对论文写作提供指导、湖南农业大学国际学院彭志魁博士、马来西亚理工大学 Safa 博士对英文摘要进行润色, 特此致谢。

**Foundation item:** The project was financially supported by the National Science and Technology Project of Food Production Enhance, China (No. 2006BAD02A01)

**Received date:** 2007-09-09; **Accepted date:** 2008-01-24

**Biography:** FU Zhi-Qiang, Ph. D., mainly engaged in crop information science and biomathematics. E-mail: zqf\_cis @ 126. com

110.77% in the early and late season respectively. Secondly, the soil redox matter content and methanogenic bacteria population of the rice-duck ecosystem reduced more sharply than the no-duck rice farming resulting in a lower methane production. Moreover, methane emission fluxes at different growth stages varied as the methanogenic bacteria population varied. Thirdly, the amount of methane emission differed between the treatments - the more ducks, the less methane emission. Methane emission of rice-duck ecosystem reduced by 18.22%—28.13% during the early season and by 17.73%—34.44% during the late season in comparison with no-duck rice farming. The other related analysis showed that the negative correlation was significant ( $p < 0.001$ ) between the methane emission flux and dissolution oxygen content of water body. However,  $\text{CH}_4$  emission flux had significant positive correlation ( $p < 0.01$ ) with the soil redox matter content and rice field methanogenic population. Therefore, more ducks in the rice-duck ecosystem resulted in lower methane emission than the no-duck rice farming. The optimal number of duck has great effect on methane mitigation.

**Key Words:** rice; number of ducks; methanogenic bacteria; methane mitigation; mechanism

稻田养鸭是我国传统农业的精华,已经历流动放牧、圈牧结合和稻鸭共栖等发展阶段<sup>[1,2]</sup>。稻鸭复合生态系统利用鸭子旺盛的杂食性,吃掉稻田内的杂草和害虫;利用鸭子不间断的活动刺激水稻生长,产生中耕浑水增氧的效果,促进养分物质循环,增强植株的抗性,同时鸭粪是一种很好的有机肥料;稻田为鸭提供充足的水、适量的食物以及劳作、栖息的场所。稻鸭构成一个相互依赖、相互促进、共同生长的复合生态系统。因此,稻-鸭生态种养是一项种养相结合、降本增效的生态农业模式<sup>[3~8]</sup>。

研究表明,稻鸭共作提高稻田土壤和水层溶解氧量和土壤氧化还原电位,降低土壤容重,增加土壤结构系数,减少还原物质、活性还原物质以及活性有机还原物质总量;在每  $667\text{m}^2$  稻田中喂养 10~12 只鸭子能显著减少甲烷的排放通量<sup>[3,4,6,9,10]</sup>。从水稻生产的经济效益角度研究了稻鸭共育模式中适宜喂鸭数量<sup>[11]</sup>。但是不同放鸭只数对水稻甲烷排放的影响及机理,以及从生态环境保护的角度考虑稻鸭系统中最佳养鸭数量报道少见。本试验在稻鸭共育模式中通过设置 3 种不同鸭子数量处理,探讨不同养鸭数量对稻田甲烷排放通量的影响,以期寻求能高效减排甲烷排放通量,又不超出水稻田承载范围的养鸭数量,为进一步优化稻鸭种养模式,提高农户经济效益以及为稻鸭种养减排甲烷提供理论和实践依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

早、晚稻品种分别为金优 974,生育期 106 d,威优 46,生育期 110 d,湖南农业大学水稻研究所提供;供试鸭为金定鸭,湖南农业大学动物科学与技术学院提供。试验田有机质含量为  $25.57\text{ g/kg}$ ,全 N 含量  $1.41\text{ g/kg}$ ,速效磷  $29.7\text{ mg/kg}$ ,速效钾  $67\text{ mg/kg}$ ,土壤容重  $0.965\text{ g/cm}^3$ ,pH 值 6.8。

### 1.2 试验设计

2005 年早、晚 2 季在湖南农业大学水稻试验基地进行大田试验。试验设置 4 个处理,分别为喂养 10 只鸭/ $667\text{m}^2$ 、15 只鸭/ $667\text{m}^2$ 、20 只鸭/ $667\text{m}^2$ ,以不养鸭为对照,3 次重复,共计 12 个小区,随机区组排列,每个小区面积  $133\text{ m}^2$ 。秧苗移栽后 7 d 把雏鸭放入各小区,鸭龄 15 d。各小区之间用泥块砌成田埂,并覆膜以免肥水串灌。同时沿田埂各小区之间用围栏隔开,并在小区之间用黑色遮阳网阻断鸭子的视线,以免鸭子之间相互干扰,设法群集而损坏围栏。每小区田角设有  $1\text{ m}^3$  的简易鸭栖息棚,作为鸭子休息和饲料补给场所。鸭初下田时适量添加鸭饲料为补给食物,一个星期后主要以稻谷作为辅助食物。

整地后即在每个小区设置 1 个甲烷气体取样点,并把铝制的回型底座( $52\text{ cm} \times 52\text{ cm}$ ,  $15\text{ cm}$ )固定在取样点上。取样时将取样箱轻扣在底座上,底座上有水槽,宽  $1\text{ cm}$ ,槽内装有水,起到水封作用,隔绝箱内外气体交换。并且搭好木桥,取样时注意避免人为干扰泥土及水面,影响稻田甲烷的产生和排放,导致数据误差。

### 1.3 取样指标与测定方法

#### 1.3.1 甲烷取样与测定

$\text{CH}_4$  采样采用静止箱技术,箱底面积  $51\text{ cm} \times 51\text{ cm}$ ,高  $100\text{ cm}$ 。从水稻返青期开始每隔 3 d 原位测定各

小区甲烷排放通量。每次取样从 8:00 开始,到 18:30 结束,每隔 2 h,从取样箱中以 10 min 为时间间隔进行连续 4 次抽样。所取样品立即带回实验室用 GC6890N 型气相色谱仪进行测定。气相色谱仪由湖南农业大学国家油料作物研究中心湖南分中心提供。甲烷气体浓度测定与计算方法参见文献<sup>[12,13]</sup>。

### 1.3.2 土壤取样与化学性质测定

还原物质与土壤产甲烷菌数量测定所用土样采样日期相同(具体时间见表 3,4)。每个生育时期,在每个小区用五点法取土样。所取土样立即带回实验室进行分析测定土壤还原物质总量、活性还原物质、活性有机还原物质、亚铁含量;还原物质总量用 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 浸提-重铬酸钾容量法;活性还原物质总量用 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 浸提-高锰酸钾容量法测定;亚铁含量用 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 浸提-邻啡罗啉比色法;活性有机还原物质用活性还原物质减去亚铁含量计算<sup>[14]</sup>。

### 1.3.3 溶解氧含量测定

每个生育期的中期连续 3d,在每个小区用 SJG-203A 型溶解氧分析仪田间实位测定水层溶解氧含量。测定时,每个小区田面水溶解氧含量上午和下午各测 3 次,以 6 次取定的数据均值作为该天的溶氧含量,以每个生育期的 3d 测定的数据均值作为该生育期田面水溶解氧含量。

### 1.3.4 土壤产甲烷细菌数量测定

培养基组成 蛋白胨 2 g, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.5 g, MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.5 g, NaNH<sub>4</sub>HPO<sub>4</sub> 1.5 g, CH<sub>3</sub>OH 2 g, CaCO<sub>3</sub> 3 g, 土壤提取液 300 ml, 刃天青 0.1% 1 ml, 蒸馏水 700 ml, pH 7.0

测定方法 选取 7 个稀释度 10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup>、10<sup>-4</sup>、10<sup>-5</sup>、10<sup>-6</sup>、10<sup>-7</sup>、10<sup>-8</sup> 的土壤悬液作为接种材料。每一稀释度重复接种 4 管,每管接种 1 ml。于 26~30℃ 温度下培养。培养 14 d 分别进行检查,综合培养基的颜色、滤纸上是否有菌落、滤纸是否变软、溶解来判断甲烷细菌的有无。记录检测结果。并根据“数量指标计算细菌数量统计表”得出数量指标和菌的近似数。根据测得数量指标结果,按常法根据数量指标及土壤含水量换算成每克干土中的产甲烷细菌的数量<sup>[15,16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 养鸭数量对稻田 CH<sub>4</sub> 排放的影响

4 个不同处理早、晚稻稻田甲烷排放量计算见表 1、表 2。早稻期间,常规耕作、10 只鸭/667m<sup>2</sup>、15 只鸭/667m<sup>2</sup>、20 只鸭/667m<sup>2</sup> 等 4 个处理甲烷排放总量比较,3 个养鸭处理分别比对照减少了 2.92、4.18、4.51 g/m<sup>2</sup>,降低了 18.22%、26.08%、28.13%。差异显著性分析表明,对照与其它处理间差异显著;10 只鸭/667m<sup>2</sup>、15 只鸭/667m<sup>2</sup> 处理与 20 只鸭/667m<sup>2</sup> 处理间差异也显著。晚稻期间,4 个处理间甲烷排放量差异均显著。对照比 10 只鸭/667m<sup>2</sup>、15 只鸭/667m<sup>2</sup>、20 只鸭/667m<sup>2</sup> 3 个处理分别高出 3.78、5.89、7.35 g/m<sup>2</sup>;3 个养鸭处理甲烷排放量比对照分别减少了 17.73%、27.59%、34.44%。养鸭数量越多,甲烷排放量减少越多。

养鸭处理与对照相比,主要减少了水稻生长中期的甲烷排放量,而水稻生长前期与后期处理间差异不大。早稻分蘖盛期到孕穗期处理间甲烷排放量比较,10 只鸭/667m<sup>2</sup>、15 只鸭/667m<sup>2</sup>、20 只鸭/667m<sup>2</sup> 3 个处理分别比对照减少了 1.58、2.72、3.22 g/m<sup>2</sup>,降低了 21.73%、37.41%、44.29%,占总减排量的 54.11%、65.07%、71.39%;晚稻这个阶段分别减少了 3.15、5.25、6.07 g/m<sup>2</sup>,降低了 27.09%、45.14%、52.19%,占总减排量的 83.33%、89.13%、82.59%。

### 2.2 土壤还原物质含量变化及其与 CH<sub>4</sub> 排放相关性

试验结果表明,与对照相比,养鸭稻田土壤还原物质总量、活性还原物质、亚铁含量以及活性有机还原物质均减少;而且鸭子数量越多,减少的幅度越大。与对照比,3 个养鸭处理土壤的还原物质总量、活性还原物质、亚铁含量以及活性有机还原物质降低幅度分别为 0.171~0.628 cmol/kg、0.220~0.591 cmol/kg、0.064~0.158 cmol/kg、0.157~0.433 cmol/kg,分别减少了 5.3%~22.8%、8.88%~27.9%、4.46%~11.85%、14.8%~55.4%。

不同养鸭数量 CH<sub>4</sub> 排放通量季节均值与稻田土壤氧化还原特性呈正相关关系。以各处理早、晚 2 季甲烷排放通量季节均值为依变量,以各处理的稻田土壤氧化还原特性为变量进行线性回归分析,并对相关系数进

接表 1,表 2

行了显著性分析。结果表明,稻田甲烷排放通量季节均值与土壤氧化还原特性均呈线性正相关关系。其中,CH<sub>4</sub>排放通量与还原物质总量间的线性回归方程为: $Y=2.1138X+1.7552$ ,相关系数  $R$  为 0.8397 ( $n=8$ ),经相关系数显著性检验,两者达到 0.05 显著水平;与活性还原物质总量、活性有机还原物质总量的相关系数分别为 0.9250 ( $n=8$ )、0.9208 ( $n=8$ ),达到了 0.01 极显著性水平;回归方程分别为  $Y=3.6161X-0.3435$ ,  $Y=5.9046X+1.9865$ 。CH<sub>4</sub>排放通量季节均值与活性还原物质、活性有机还原物质都呈真实的线性正相关。

### 2.3 溶解氧含量变化及其与 CH<sub>4</sub> 排放相关性

稻-鸭复合系统中不同养鸭数量对稻田水层溶解氧含量的影响及季节变化见图 1。不同生育期水层溶解氧含量不同。从分蘖始期到成熟期,4 个处理的水层溶氧含量均在抽穗期达到最大值,然后下降。稻鸭共栖期间,养鸭处理水层溶解氧含量显著高于对照。4 个处理之间溶解氧含量差异明显。养鸭处理与对照比,在分蘖始期区别较小,仅增加 0.08 mg/L;分蘖盛期到齐穗期增加幅度较大,早稻期间达到 2.37~2.66 mg/L,晚稻达到 3.34~3.60 mg/L,与对照比差异极显著。并且随着鸭子数量的增多,水层溶解氧含量也增加。20 只鸭/667m<sup>2</sup>处理下的水层溶氧含量最大,与对照比,早稻增加了 2.2%~68.7%,晚稻增加了 11.07%~110.77%。早、晚稻各处理下水层溶解氧含量差异显著性方差分析表明,各处理间溶氧含量差异达到极显著水平。鸭子觅食活动,经常扰动田面泥土和水层是促使水层溶氧含量增加的主要原因。

早、晚稻期间,各处理在不同时期水层溶氧含量不同,甲烷排放通量也不同,并且两者呈负相关,相关系数分别为 -0.9990 ( $n=5$ )、-0.9479 ( $n=5$ ),均达到显著水平。如果以早、晚 2 季不同养鸭处理下的 CH<sub>4</sub> 排放通量季节均值为依变量,以田面水中溶解氧含量季节均值为变量,其回归方程为: $Y=-1.5276X+14.7707$ ,相关系数  $R$  为 -0.9390 ( $n=8$ )。经相关系数显著性  $T$  检验, $T$  值为 -6.6891, ( $t(0.001,8)=4.1568$ )。表明相关性达到 0.001 显著性水平,二者呈真实线性负相关关系。对回归方程常数  $b_0, b_1$  分别进行显著性分析,其  $T$  值分别为 13.1975、-6.6893,显著性均达到了 0.001 水平。因此,如果提高水层中溶氧含量就能降低稻田甲烷排放量。

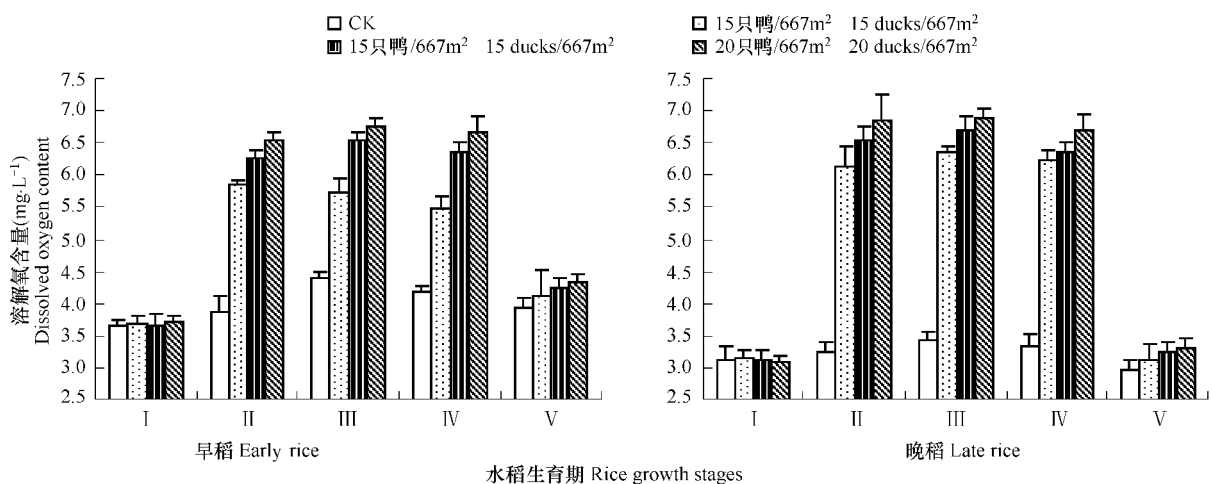


图 1 稻田水层溶解氧含量季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of dissolved oxygen content in paddy water layer

\* I, II, III, IV, V 分别表示分蘖始期、分蘖盛期、抽穗期、齐穗期与成熟期 I, II, III, IV, V mean the begin tillering stage, the full tillering stage, the heading stage, the full heading stage and the ripening stage, respectively

### 2.4 养鸭数量对稻田土产甲烷细菌种群数量的影响

表 3,表 4 表明,早、晚稻期间稻田土壤产甲烷菌数量变化不同。早稻期间随生育期进程产甲烷细菌数量增加,在孕穗期达到最大值,然后下降;晚稻在分蘖盛期达到最大,然后一直下降。这种变化规律与稻田甲烷排放的季节变化相一致。稻-鸭种养系统中的土壤产甲烷菌种群数量明显低于对照,而且牧鸭数量越多的田

块产甲烷细菌种群数量越少。早稻田土壤 20 只鸭/667m<sup>2</sup>、15 只鸭/667m<sup>2</sup>、10 只鸭/667m<sup>2</sup>处理分别低于对照 38.9%~51.6%, 22.2%~35%, 11.1%~20.9%; 晚稻田土壤 20 只鸭/667m<sup>2</sup>、15 只鸭/667m<sup>2</sup>、10 只鸭/667m<sup>2</sup>处理分别低于 CK 69.8%~90.2%, 23.5%~50.6%, 2.7%~30.9%。统计分析结果表明, 稻-鸭复合生态种养中不同养鸭处理与 CK 土壤中产甲烷细菌种群数量的差异均达极显著性水平。

CH<sub>4</sub>排放通量与土壤产甲烷细菌数量之间线性回归分析结果表明, 早、晚稻 4 个处理各生育期 CH<sub>4</sub>排放通量与产甲烷细菌数量呈正相关。早稻期间, CH<sub>4</sub>排放通量(Y)与产甲烷细菌数量(X, 10<sup>5</sup>个)间的相关系数 R 为 0.7798 (n=20), 相关程度达到了 0.001 的极显著水平, 其线性回归方程为: Y=11.4949+0.5088X; 晚稻期间, CH<sub>4</sub>排放通量(Y)与产甲烷细菌数量(X, 10<sup>5</sup>个)的相关系数 R 为 0.8037 (n=20), 相关程度达到了 0.001 的极显著水平, 其线性回归方程为: Y=12.9218+0.0558X; 如果以早、晚 2 季不同养鸭数量季节平均甲烷排放通量与产甲烷细菌数量均值进行相关性分析, 回归方程为: Y=0.0325X+5.1760, 相关系数 R 为 0.7046 (n=8), 相关显著性 T 检验达到 0.05 水平。进而对常数 b<sub>0</sub>、b<sub>1</sub> 进行 T 检验, 均达到了 0.05 显著水平。因此, CH<sub>4</sub>排放通量与产甲烷细菌数量呈真实的线性正相关关系。

表 3 2005 年早稻不同生育期土壤中产甲烷菌种群数量 (10<sup>8</sup> cfu/g<sub>干土</sub>)

Table 3 Population of Methanogen at different growing stages for early rice

处理(只鸭/667m <sup>2</sup> ) Treatment(ducks 667m <sup>2</sup> )	返青期 Living stage	分蘖盛期 Active tillering stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	黄熟期 Ripening stage
	05-06	05-22	06-05	06-20	07-10
CK	0.46a	1.8a	25.4aA	1.6aA	2.9a
10	0.48a	1.6a	20.1bB	1.2bB	2.5a
15	0.42a	1.4ab	16.5cBC	0.8cC	2.6a
20	0.47a	1.1b	12.3dC	0.6cC	2.4a

\* 以上数据均为 3 个小区的平均值, 处理间的差异分析采用 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 The data were the average values of three blocks and differences test between treatments were analyzed by LSD method; Values with different letters in the same column meant significant difference at 0.05 levels and the capital letters at 0.01 level, the same below

表 4 2005 年晚稻不同生育期土壤中产甲烷菌种群数量 (10<sup>8</sup> cfu/g<sub>干土</sub>)

Table 4 Population of Methanogen at different growing stages for late rice

处理(只鸭/667m <sup>2</sup> ) Treatment(ducks 667m <sup>2</sup> )	返青期 Living stage	分蘖盛期 Active tillering stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	黄熟期 Ripening stage
	07-25	08-10	09-02	09-25	10-15 日
CK	6.67a	302.07aA	23.62aA	5.48aA	5.51aA
10	6.47a	293.78aA	16.30bB	5.38aA	2.20bB
15	6.98a	231.14bB	11.66cC	1.77bB	1.79bB
20	6.78a	91.10cC	2.32dD	0.84cB	0.28cC

### 3 讨论

稻田养鸭显著减少了稻田甲烷的排放通量, 特别是甲烷排放高峰期的排放量<sup>[6,17,18]</sup>。其机理在于通过鸭子的活动影响土壤环境, 改善了土壤的还原状况, 降低了还原物质含量; 增加了水体的溶解氧含量, 提高土壤氧化还原电位, 减少产甲烷细菌种群数量, 制约产甲烷菌活性, 降低甲烷产生率, 从而减少甲烷排放量。

土壤 Eh 是衡量土壤还原状况的重要指标。一般地, 只有土壤 Eh 值降到 -150mV 时, 才有甲烷气体产生, 低于 -200mV 时显著提高甲烷产生率<sup>[19~21]</sup>。稻-鸭复合生态系统中, 土壤氧化还原状况较为复杂。一方面鸭粪及残余饲料在淹水条件下分解耗氧将导致土壤还原程度增强; 另一方面鸭子在田间的觅食等活动, 搅动水体和土壤, 起到中耕的作用, 稻田水体和土壤中溶解氧含量增加<sup>[22,23]</sup>, 促进活性有机还原物质的氧化。研究表明稻田养鸭明显改善稻田土壤氧化还原状况<sup>[3]</sup>。本研究没有对土壤 Eh 值进行系统测定, 但相关研究证明, 稻田养鸭显著提高了土壤 Eh 值<sup>[6]</sup>。因此, 稻田养鸭增加了土壤有机质含量<sup>[3]</sup>, 但有机质只有在转化为

产甲烷细菌可利用的基质,并且有足够的产甲烷细菌数量与活性的前提下产生足量的甲烷气体才有多余的甲烷气体排放到大气中。正因为鸭子的活动显著提高了水体溶解氧含量<sup>[18]</sup>,影响有机质的分解和土壤还原状况,致使土壤还原物质含量降低。产甲烷菌的数量、甲烷生产的潜力与土壤的 Eh 呈显著负相关<sup>[21]</sup>。相关研究表明,稻田甲烷排放与土壤还原物质含量呈正相关<sup>[6]</sup>,与甲烷细菌数量变化表现出较强的一致性<sup>[17]</sup>。因此产甲烷细菌数量随溶解氧含量的升高减少,活性受到抑制,导致甲烷产生量减少;同时甲烷氧化菌是土壤氧化甲烷的重要因素,分子氧是影响甲烷氧化菌的数量与活性的重要因素之一<sup>[24]</sup>。虽然本研究中未对土壤中甲烷氧化菌数量变化进行观测,但水体与土壤中氧含量增加可能会导致 CH<sub>4</sub>氧化量增加,从而减少 CH<sub>4</sub>排放量。因此,稻鸭共育减排甲烷的关键因素在于鸭子活动提高了水层与土壤溶解氧含量。

稻鸭生态复合系统减少甲烷排放<sup>[6,10]</sup>,本研究进一步证实了这个结论。稻鸭共育模式中养鸭数量越多,水层溶解氧含量越高,土壤中还原物质含量减少越多,产甲烷细菌种群数量越少,从而土壤中甲烷气体生成量减少,氧化量增多,排放量显著减少。因此,稻田养鸭减排甲烷,同时养鸭数量越多,减排甲烷气体效果越好。如果从环境保护的角度考虑,单位面积稻田养鸭数量越多有利于减排稻田甲烷。但是,稻田是以水稻生产为主体,通过立体种养模式增加附属产品以提高经济效益。养鸭越多,影响水稻生长和造成水稻产量显著减少。从经济效益的角度分析,稻鸭共育模式中以 15 只鸭/667m<sup>2</sup>为最佳选择<sup>[11]</sup>。因此,综合考虑水稻生产、经济和生态效益,稻鸭共育模式中以 15~20 只鸭/667m<sup>2</sup>为适宜承载范围。

#### References:

- [ 1 ] Huang H, Wang H, Hu Z Y, *et al.* Theory analysis and practice process of rice-duck farming ecological project. *Crop Research*, 2003, 17(4): 189 - 191.
- [ 2 ] Ran M L, Chen J, Gu Y C, *et al.* Advance and development of raising ducks in the paddy fields in China. *Chinese Journal of Animal Science*, 1993, 29(5): 58 - 59, 61.
- [ 3 ] Yang Z H, Huang H, Wang H. Paddy soil quality of a wetland rice-duck complex ecosystem. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2): 117 - 121.
- [ 4 ] Wang H, Huang H, Yang Z H, *et al.* Integrated benefits of paddy rice-duck complex ecosystem. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(4): 23 - 26, 44.
- [ 5 ] Zhang J E, Zhao M Y, Chen J, *et al.* Effects of integrated rice-duck farming system on the growth of rice. *Ecologic Science*, 2005, 24(2): 117 - 119.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Quan G M, Zhang J E, Huang Z X, *et al.* Review on the ecological effects of integrated rice-duck farming system. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5): 360 - 365.
- [ 8 ] Zhang J E, Lu J X, Zhang G H, *et al.* Study on the function and benefit of rice-duck agroecosystem. *Ecologic Science*, 2002, 21(1): 6 - 10.
- [ 9 ] Wang Q S, Huang P S, Zhen R H, *et al.* Effect of rice-duck mutualism on nutrition ecology of paddy field and rice quality. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 639 - 645.
- [ 10 ] Huang Y, Wang H, Huang H, *et al.* Characteristics of methane emission from wetland rice-duck complex ecosystem. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2005, 105: 181 - 193.
- [ 11 ] Dai Z M, Yang H S, Zhang X Z, *et al.* The Research on the benefit of Yunnan rice-duck intergrowth model and its comprehensive evaluation (Part 3). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(4): 265 - 267.
- [ 12 ] Fu Z Q, Huang H, Chen C, *et al.* Effect of irrigation depths on methane emission in rice-duck complex ecosystems. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2006, 32(6): 632 - 636.
- [ 13 ] Fu Z Q, Huang H, He B L, *et al.* Correlation between rice plant aerenchyma system and methane emission from paddy field. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(9): 1458 - 1467.
- [ 14 ] Lao J S. *Soil agricultural chemistry analysis handbook*. Beijing: Agricultural Press, 1988. 123 - 428.
- [ 15 ] Microorganism room of institute of soil science of Chinese Academy of Sciences, *Soil Microbe Research Methods*. Beijing: Science Press, 1985. 54 - 90.
- [ 16 ] Xu G X, Zheng H Y. *Soil microorganism analysis method handbook*. Beijing: Agricultural Press, 1986. 102 - 136.

- [17] Deng X, Liao X L, Huang H. Studies on amount of methanogens in the rice-duck agroecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1696—1700.
- [18] Deng X, Liao X L, Huang H, *et al.* Study on the effects of rice-duck complex planting and breeding pattern on the amount of methanogens. *Environment Pollution and Control*, 2004, 26(5): 393—395, 398.
- [19] Gao S, Tanji K K, Scardaci S C, Chow A T. Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice-growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 805—817.
- [20] Masscheleyn P H, DeLaune R D, Patrick Jr W H. Methane and nitrous oxide emissions from laboratory measurements of rice soil suspension: Effect of soil oxidation-reduction status. *Chemosphere*, 1993, 26: 251—260.
- [21] Wang Z P, DeLaune R D, Masscheleyn P H, Patrick Jr W H. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 382—385.
- [22] Gan D X, Huang H, Jiang T J, *et al.* Decrease in CH<sub>4</sub> emission and its mechanism in no-tillage rice-duck complex system. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(2): 1—6.
- [23] 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.
- [24] Min H, Chen Z Y, Chen M C. Effect of environmental factors on methane oxidizing activity in paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 686—692.

#### 参考文献:

- [1] 黄璜, 王华, 胡泽友, 等. 稻鸭种养生态工程的理论分析与实践过程. *作物研究*, 2003, 17(4): 189—191.
- [2] 冉茂林, 陈静, 谷义成, 等. 我国稻田养鸭的发展及研究现状. *中国畜牧杂志*, 1993, 29(5): 58—59, 61.
- [3] 杨志辉, 黄璜, 王华. 稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究. *土壤通报*, 2004, 35(2): 117—121.
- [4] 王华, 杨志辉, 黄璜, 等. 湿地稻-鸭复合生态系统综合效益研究. *农村生态环境*, 2003, 19(4): 23—26, 44.
- [5] 章家恩, 赵美玉, 陈进. 鸭稻共作方式对水稻生长的影响. *生态科学*, 2005, 24(2): 117—119.
- [6] 黄璜, 杨志辉, 王华, 等. 湿地稻-鸭复合系统的 CH<sub>4</sub> 排放规律. *生态学报*, 2003, 23(5): 929—934.
- [7] 全国明, 章家恩, 黄兆祥, 等. 稻鸭共作系统的生态学效应研究进展. *生态农业科学*, 2005, 21(5): 360—365.
- [8] 章家恩, 陆敬雄, 张光辉, 等. 鸭稻共作生态农业模式的功能与效益分析. *生态科学*, 2002, 21(1): 6—10.
- [9] 王强盛, 黄丕生, 甄若宏, 等. 稻鸭共作对稻田营养生态及稻米品质的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 639—645.
- [11] 戴志明, 杨华松, 张曦, 等. 云南稻-鸭共生模式效益的研究及综合评价(三). *中国农学通报*, 2004, 20(4): 265—267.
- [12] 傅志强, 黄璜, 陈灿, 等. 稻-鸭复合系统中灌水深度对甲烷排放的影响. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 32(6): 632—636.
- [13] 傅志强, 黄璜, 廖晓兰, 等. 水稻植株通气系统与稻田甲烷排放相关性研究. *作物学报*, 2007, 33(9): 1458—1467.
- [14] 劳家桢主编, *土壤农化分析手册*. 北京: 农业出版社, 1988. 123—428.
- [15] 中科院南京土壤研究所微生物室编著, *土壤微生物研究方法*. 北京: 科学出版社, 1985. 54—90.
- [16] 徐光辉, 郑洪元. *土壤微生物分析方法手册*. 北京: 农业出版社, 1986. 102—136.
- [17] 邓晓, 廖晓兰, 黄璜. 稻-鸭复合生态系统产甲烷细菌数量. *生态学报*, 2004, 24(8): 1696—1700.
- [18] 邓晓, 廖晓兰, 黄璜, 等. 湿地稻-鸭复合生态种养对甲烷菌种群数量影响的研究. *环境污染与防治*, 2004, 26(5): 393—395, 398.
- [22] 甘德欣, 黄璜, 蒋廷杰, 等. 免耕稻-鸭复合系统减少甲烷排放及其机理研究. *农村生态环境*, 2005, 21(2): 1—6.
- [23] 王纛, 雷慰慈. 稻田种养模式生态效益研究. *生态学报*, 2000, 20(2): 311—316.
- [24] 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. *土壤学报*, 2002, 39(5): 686—692.



表 1 早稻不同养鸭数量甲烷排放量计算表

处理 (只鸭/667m <sup>2</sup> ) Treatments (ducks/667m <sup>2</sup> )	分蘖始期			分蘖盛期			拔节孕穗			抽穗齐穗			成熟期		
	Begin tillering stage			Active tillering stage			Booting stage			Heading stage			Ripening stage		
	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )
10	8.2	1.17	8.2	15.7	2.26	20.4	3.43	14.2	2.55	12.4	3.71	13.11bB			
15	8.1	1.16	8.1	12.0	1.73	16.8	2.82	11.9	2.16	13.3	3.98	11.85cC			
20	8.7	1.25	8.7	10.5	1.51	15.1	2.54	11.9	2.15	13.6	4.07	11.52cC			
CK	7.6	1.09	7.6	18.2	2.61	27.8	4.66	18.5	3.32	14.5	4.34	16.03aA			

\* 以上数据均为3个小区的平均值,处理间的差异分析采用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 The data were the average values of three blocks and differences test between treatments were analyzed by LSD method. Values with different letters in the same column mean significant difference at 0.05 levels and the capital letters at 0.01 level; The same below

表 2 晚稻不同养鸭数量甲烷排放量计算表

处理 (只鸭/667m <sup>2</sup> ) Treatments (ducks/667m <sup>2</sup> )	分蘖始期			分蘖盛期			拔节孕穗			抽穗齐穗			成熟期		
	Begin tillering stage			Active tillering stage			Booting stage			Heading stage			Ripening stage		
	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )	排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放量 CH <sub>4</sub> emission amount (g/m <sup>2</sup> )
10	17.8	2.56	17.8	26.7	4.80	13.9	3.68	12.2	3.22	10.2	3.30	17.56bB			
15	18.4	2.65	18.4	18.4	3.31	11.6	3.07	12.6	3.34	9.6	3.09	15.46cC			
20	18.2	2.62	18.2	16.6	2.98	9.8	2.58	10.7	2.83	9.2	2.98	13.99dD			
CK	19.8	2.85	19.8	37.9	6.82	18.2	4.81	13.3	3.51	10.4	3.37	21.35aA			