

展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 2009 稻鸭复合系统的温室气体排放及其温室效应[J]. 环境科学学报, 29(2): 420-426

Zhan M, Cao C G, Wang J P, et al. 2009 Greenhouse gas emissions from an integrated rice-duck system and its Global Warming Potentials (GWPs) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(2): 420-426

# 稻鸭复合系统的温室气体排放及其温室效应

展茗, 曹凑贵\*, 汪金平, 李成芳, 袁伟玲

华中农业大学作物栽培与生理生态研究中心, 武汉 430070

收稿日期: 2008-03-20 修回日期: 2008-08-06 录用日期: 2008-12-12

**摘要:** 利用密闭箱技术和碱液吸收法, 通过田间试验研究了稻鸭复合系统土壤  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的排放规律及其温室效应. 结果表明: ①在水稻生长期,  $\text{CH}_4$  分别在分蘖期和抽穗期出现 2 个排放高峰, 平均排放通量养鸭处理为  $(7.68 \pm 0.74) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 常规淹水稻田 (对照) 为  $(9.53 \pm 0.40) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ;  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量呈现出在稻田淹水期间保持较低值, 在稻田落干后迅速升高的趋势, 平均排放通量养鸭处理为  $(0.092 \pm 0.073) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 对照为  $(0.082 \pm 0.074) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ; 而  $\text{CO}_2$  的排放则在分蘖期和成熟期田面水逐渐落干后呈现 2 个排放峰, 养鸭处理和对照的平均排放通量分别为  $(121.20 \pm 4.21) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  和  $(107.53 \pm 3.92) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . ②稻田养鸭显著地降低了  $\text{CH}_4$  的排放, 水稻整个生育期间排放量为  $18.41 \text{ g m}^{-2}$ , 比对照减少 19.3%; 而显著地提高了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 整个生育期间排放量为  $0.2 \text{ g m}^{-2}$ , 比对照增加了 10%; 养鸭稻田土壤  $\text{CO}_2$  的总排放量为  $273.66 \text{ g m}^{-2}$ , 对照为  $245.73 \text{ g m}^{-2}$ , 两者之间没有显著性的差异. ③  $\text{CH}_4$  是引起稻田温室气体综合温室效应的主体, 其贡献率在 60% 左右, 相对于常规稻作, 稻田养鸭能有效降低甲烷的温室效应, 使其温室气体的综合温室效应显著降低, 说明在中国南部稻鸭共作是一个减缓全球温室效应的可行措施.

**关键词:** 稻鸭复合系统; 温室气体; 排放通量; 温室效应 (GWPs)

文章编号: 0253-2468(2009)02-426-07 中图分类号: X511 文献标识码: A

## Greenhouse gas emissions from an integrated rice-duck system and its Global Warming Potentials (GWPs)

ZHAN Ming, CAO Cougui\*, WANG Jinping, LI Chengfang, YUAN Weiling

Crop Physiology and Production Center (CPCC), Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

Received 20 March 2008 received in revised form 6 August 2008 accepted 12 December 2008

**Abstract** Calculating comprehensive Global Warming Potentials (GWPs) of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  help to evaluate the contribution of integrated paddy ecosystems in mitigating greenhouse gas emissions. Emissions of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  were measured from the soil of an integrated rice paddy/duck pond system using alkali absorption in a closed chamber. Results indicated ① Emission flux of  $\text{CH}_4$  showed two peaks at the middle tillering stage and the heading stage of rice development. The average flux of  $\text{CH}_4$  for the rice-duck system (RD) reached  $(7.68 \pm 0.74) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , while it was  $(9.53 \pm 0.40) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  for the conventional system (CK). The emission flux of  $\text{N}_2\text{O}$  was lower during the flooded stage then abruptly increased after drainage during rice ripening. The average flux of  $\text{N}_2\text{O}$  was  $(0.092 \pm 0.073) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  for RD and  $(0.082 \pm 0.074) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  for CK. The emission flux of  $\text{CO}_2$  had two peaks at the tillering stage and the ripening stage of the rice with average flux of  $(121.20 \pm 4.21) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  for RD and  $(107.53 \pm 3.92) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  for CK, but the difference between the two systems was not statistically significant. ② Raising ducks in the paddy field could reduce  $\text{CH}_4$  emission significantly. The total emission of  $\text{CH}_4$  was  $18.41 \text{ g m}^{-2}$  during rice growth stage, 19.3% lower than CK. But the total emission of  $\text{N}_2\text{O}$  of RD was  $0.2 \text{ g m}^{-2}$ , 10% more than CK. There was no significant difference of total  $\text{CO}_2$  emission between RD ( $273.66 \text{ g m}^{-2}$ ) and CK ( $245.73 \text{ g m}^{-2}$ ). ③  $\text{CH}_4$  contributed about 60% to comprehensive GWPs based on paddy greenhouse gases. Contrasted with CK, RD could effectively decrease GWP of  $\text{CH}_4$ , thus mitigating the comprehensive GWP of the integrated rice-duck system.

**Keywords** integrated rice-duck system; greenhouse gases emission flux; Global Warming Potential (GWP)

基金项目: 国家重大科技专项资助项目 (No 2004BA520A02)

Supported by the National Foundation of Key Science of China (No 2004BA520A02)

作者简介: 展茗 (1973-), 女, 博士生, E-mail: zhanming@mail.hzau.edu.cn; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: ccgu@mail.hzau.edu.cn

Biography: ZHAN Ming (1973-), female, Ph.D. candidate; \* Corresponding author; E-mail: ccgu@mail.hzau.edu.cn

## 1 引言 (Introduction)

大气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和  $\text{N}_2\text{O}$  是重要的温室气体,对全球气候变暖起着至关重要的作用. 水稻是世界主要的粮食作物之一,占粮食作物面积的 1/3 其生产过程中产生的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体在全球温室气体的预算中具有重要作用 (Yang *et al.*, 2003), 其中稻田甲烷排放是重要的人工源之一, 平均每年甲烷的排放量为 60 Tg 占甲烷总排放量的 17% 左右 (Donald *et al.*, 2002). 稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的平均排放速率小于旱地, 但其排放量不容忽视, 尤其是稻田水稻生长期采用间歇灌溉水分管理措施, 更加大了稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放 (Tsumuta *et al.*, 1997). 已有很多研究表明, 稻田温室气体的排在很大程度上受稻田管理措施和稻田环境的影响 (Adhya 2000; Guo, 2007), 通过改善稻田管理措施可减少稻田温室气体的排放 (Pathak *et al.* 2007).

稻鸭共作生态系统是一种综合利用的稻鸭种养生态农业模式 (王纓等, 2000). Huang等 (2005)、Xiang等 (2006) 和刘小燕等 (2006) 研究报道, 与常规稻作相比, 稻田养鸭提高了土壤氧化还原电位, 因此, 降低了稻田  $\text{CH}_4$  的排放. Zhang等 (2008) 对稻鸭共作系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放进行研究后指出, 稻鸭共作系统施用化肥时, 其  $\text{N}_2\text{O}$  的排放大于施用有机肥; 同时, 由于鸭子的活动, 清晨和下午稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量大. 然而, 目前对稻鸭共作稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  三种温室气体的综合研究很少. 因此, 本研究通过田间试验考察稻鸭共作系统  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的排放规律及其温室效应, 旨在为评价稻鸭共作系统的生态与环境效应, 推广稻鸭共作技术提供理论依据.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 试验地点和土壤

试验于 2007年 5~ 9月在华中农业大学试验农场进行. 实验地土壤为第四纪黄土性沉积物发育的水稻土, 耕层土壤厚 20 cm, 下为 10 cm 厚的犁底层; 地下水位常年深埋在 1.5m 以下. 其基本肥力性质如下: 全 N 为  $1.09\text{g kg}^{-1}$ , 全 P 为  $1.17\text{g kg}^{-1}$ , 有机质为  $16.76\text{g kg}^{-1}$ , 硝态氮为  $12.1\text{mg kg}^{-1}$ , 铵态氮为  $0.52\text{mg kg}^{-1}$ , 土壤 pH 值为 6.8 前作油菜.

### 2.2 试验材料

中稻品种: 两优培九 (*Oryza sativa* L.); 鸭子为本地麻鸭 (*Tadorna*).

### 2.3 田间设置及管理

2.3.1 试验设计 试验设 2 个处理: ①为不放鸭处理 (CK); ②为放 6 只 20 日龄雏鸭处理 (RD), 以每公顷放养 450 只鸭为标准. 小区面积为  $140\text{m}^2$  ( $10\text{m} \times 14\text{m}$ ), 各小区随机区组设计, 3 次重复.

2.3.2 田间管理 前作油菜收获后, 清理残茬. 于 5 月 25 日田间整地时并于泡田后 4d 表施基肥 (尿素)  $225\text{kg hm}^{-2}$  (以 N 计), 在水稻生长期不再追肥. 5 月 31 日移栽, 9 月 8 日收割.

小区间用泥巴砌成田埂, 埂高 20 cm, 覆上地膜, 防止肥水串流. 田间开挖围沟, 深 30 cm, 宽 40 cm. 对于养鸭处理, 小区以 4 指规格尼纶丝网沿田滕围隔, 围网高度为 0.6~ 0.8 m, 以防鸭逃走. 各小区均实行淹灌 (无沟处水深 10 cm). 水稻移栽后半个月放 6 只雏鸭. 在养鸭小区一角落放置一鸭棚, 以便鸭子休憩和喂食 (其目的为防止饲料进入稻田土壤和水体; 饲料为农家肉鸡花料, 碳水化合物饲料, 主要组分为玉米 60.2%、豆粕 27%、鱼粉 2%、菜粕 4%、棉粕 3%、磷酸氢钙 1.3%、石粉 1.2%、食盐 0.3%、添加剂 1%); 8 月 20 日收鸭, 此后稻田不再灌溉. 在水稻全生育期, 常规小区除不放鸭, 其它农艺措施均与养鸭小区一致.

### 2.4 测定和分析方法

2.4.1 甲烷与氧化亚氮采集及测定 采用密闭箱-气相色谱法测定稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量. 采样箱大小为  $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 110\text{cm}$ . 为防止采样对水体和土体的扰动, 在田埂和采样箱间搭建一跳板. 水稻移栽后, 每个月采样 4 次; 每次从早上 9:00 对 2 个处理同时采样. 采样时间分别为关箱后的 0 & 16 & 24 min. 每次抽样 20 mL 用 Shimadzu GC-14B 气相色谱仪分析气样中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  浓度.  $\text{CH}_4$  的检测条件: 色谱柱温度为  $75^\circ\text{C}$ ; 检测器 (FID) 温度为  $180^\circ\text{C}$ ; 载气  $\text{N}_2$  ( $> 99.999\%$ ), 流速为  $2\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 燃气  $\text{H}_2$  ( $> 99.99\%$ ), 流速为  $30\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 助燃气为空气, 流速为  $300\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 进样量为 1 mL, 流速为  $40\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ .  $\text{N}_2\text{O}$  的检测条件: 色谱柱温度为  $65^\circ\text{C}$ ; 检测器 (ECD) 温度为  $300^\circ\text{C}$ ; 进样器的温度为  $100^\circ\text{C}$ ; 载气氩甲烷 (95% 氩气 + 5% 甲烷), 流速为  $40\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 进样量为 1 mL, 流速为  $40\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ .  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  流通量根据下面方程计算 (Zheng *et al.*, 1998):

$$F = \rho h \frac{dC}{dt} \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中,  $F$  是气体流通量 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $\rho$  是标准状

态下气体密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $h$  是箱高 (m);  $dC/dt$  为采样箱内气体浓度变化率,  $T$  为采样过程中采样箱内的平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

2.4.2 土壤呼吸的测定 土壤呼吸量的测定采用原位静态碱液吸收法 (孟凡乔等, 2006). 测定前 1 天, 将自制的铁丝架安放在水稻宽行中间, 以免减少人为对水体和土壤的干扰造成的影响. 测定时把装有 NaOH 溶液的吸收瓶 (内径 7cm, 高 10cm) 置于高出田间水面约 2cm 的铁丝架上, 然后将内径为 20cm、高 30cm、一端密封的硬质塑料圆筒轻轻地垂直插入水稻行间土壤内 5cm 深, 防止漏气. 24h 后, 取出吸收瓶, 密封后立即送至实验室用盐酸滴定剩余的 NaOH 的量, 折算出吸收的  $\text{CO}_2$  量.

土壤呼吸量的计算公式为:

$$R_{\text{CO}_2} = 22(V_0 - V) c / (A \cdot t) \quad (2)$$

式中,  $R_{\text{CO}_2}$  为以  $\text{CO}_2$  表示的土壤呼吸量 ( $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ );  $V_0$  为空白滴定时消耗的盐酸体积 (mL);  $V$  为样品滴定时消耗的盐酸体积 (mL);  $c$  为盐酸浓度 ( $\text{mol L}^{-1}$ ); 22 为从容积到质量的换算系数;  $A$  为测

定的土壤呼吸面积 ( $\text{m}^2$ );  $t$  为测定的时间 (h).

2.4.3 采样及数据分析 采样方式为 S 形 5 点采样法,  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  采集从 6 月 1 日至 9 月 7 日, 每隔 7~9d 采 1 次样. 田面水样从 6 月 16 日至 8 月 20 日, 每隔约 15d 采 1 次样, 用 50 mL 医用注射器, 不扰动土层, 抽取田面水, 注入 250 mL 集水瓶, 采集后立即送回实验室进行分析. 田面水溶解氧 (DO) 浓度采用碘量法测定 (国家环保局, 1989).

试验结果均以每次测得的 3 次重复分析的平均值与标准差来表示, 试验数据采用 SPSS 11.5 软件统计分析.

### 3 结果 (Results)

#### 3.1 田面水 DO 含量的变化

由表 1 看出, 相对于 CK, 稻田养鸭后, RD 田面水 DO 浓度明显增加. 在稻田养鸭期间, CK 和 RD 田面水 DO 浓度平均值分别为 ( $5.61 \pm 0.67$ )  $\text{mg L}^{-1}$  和 ( $6.73 \pm 1.31$ )  $\text{mg L}^{-1}$ , RD 田面水 DO 浓度平均值是 CK 的 1.20 倍 ( $p < 0.01$ ).

表 1 稻田 DO 浓度动态变化

Table 1 Floodwater DO concentrations for the different treatments

处理 Treatments	DO 浓度 / ( $\text{mg L}^{-1}$ )					平均值 Mean
	06-16	07-08	07-23	08-06	08-20	
CK	4.74 ± 0.35	5.53 ± 0.30	6.23 ± 0.60	5.98 ± 0.31	5.55 ± 0.73	5.61 ± 0.67 <sup>A</sup>
RD	4.72 ± 0.25	6.95 ± 0.64	7.54 ± 0.71	8.18 ± 0.46	6.24 ± 0.44	6.73 ± 1.31 <sup>B</sup>

注: 同一列大写字母表示 1% 显著水平; 小写字母表示 5% 显著水平. 下同.

Note: The capital letters in a column indicate significant differences at the 1% level; the small letters indicate significant differences at the 5% level. The same below.

#### 3.2 水稻生物量和产量

从表 2 可看出, CK 和 RD 处理各时期的生物量差异不显著. RD 的小区实收产量为  $7450 \text{ kg hm}^{-2}$ ,

与 CK ( $7490 \text{ kg hm}^{-2}$ ) 之间差异不显著. 这表明, 稻田养鸭并没有影响水稻的产量形成.

表 2 不同处理水稻的生物量和产量

Table 2 Rice biomass and yield of different treatments

处理 Treatment	生物量 / ( $10^3 \text{ kg hm}^{-2}$ )					产量 / ( $10^3 \text{ kg hm}^{-2}$ )	
	06-10	06-24	07-10	07-24	08-06		09-07
CK	0.47 ± 0.06 <sup>a</sup>	2.04 ± 0.30 <sup>a</sup>	6.58 ± 0.62 <sup>a</sup>	9.36 ± 1.24 <sup>a</sup>	14.08 ± 1.38 <sup>a</sup>	15.36 ± 1.57 <sup>a</sup>	7.49 ± 0.88 <sup>a</sup>
RD	0.54 ± 0.07 <sup>a</sup>	2.16 ± 0.21 <sup>a</sup>	6.93 ± 1.01 <sup>a</sup>	8.85 ± 0.91 <sup>a</sup>	13.46 ± 1.18 <sup>a</sup>	16.17 ± 1.63 <sup>a</sup>	7.45 ± 0.81 <sup>a</sup>

#### 3.3 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 排放通量

从图 1a 可看出, 水稻移栽初期  $\text{CH}_4$  排放少, 此后  $\text{CH}_4$  排放通量逐渐升高, 在 6 月 24 至 8 月 13 日期间则保持相对较大值, 在稻田落干后下降至较低值. 对照 (CK) 和养鸭处理 (RD) 的甲烷排放通量均在分蘖期和抽穗期出现了 2 个高峰值; 另外, 在水稻

返青后的 1 周内 (6 月 9 日 ~ 16 日), CK 和 RD 的甲烷排放均出现了 1 个小高峰, 可能是前作油菜残留的根茬腐解为甲烷时产生提供了丰富的底物所致 (郑循华等, 1997). 从 6 月 16 日至 8 月 20 日, 尤其是稻鸭共作的前 1 个多月期间, 养鸭处理甲烷的排放通量明显比对照低. 在水稻全生育期, CK 和 RD

平均  $\text{CH}_4$  排放通量分别为  $(9.53 \pm 0.40)$   $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $(7.68 \pm 0.74)$   $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 与处理 CK 相比, 处理 RD 甲烷平均排放通量显著降低了 19% ( $p < 0.05$ ).

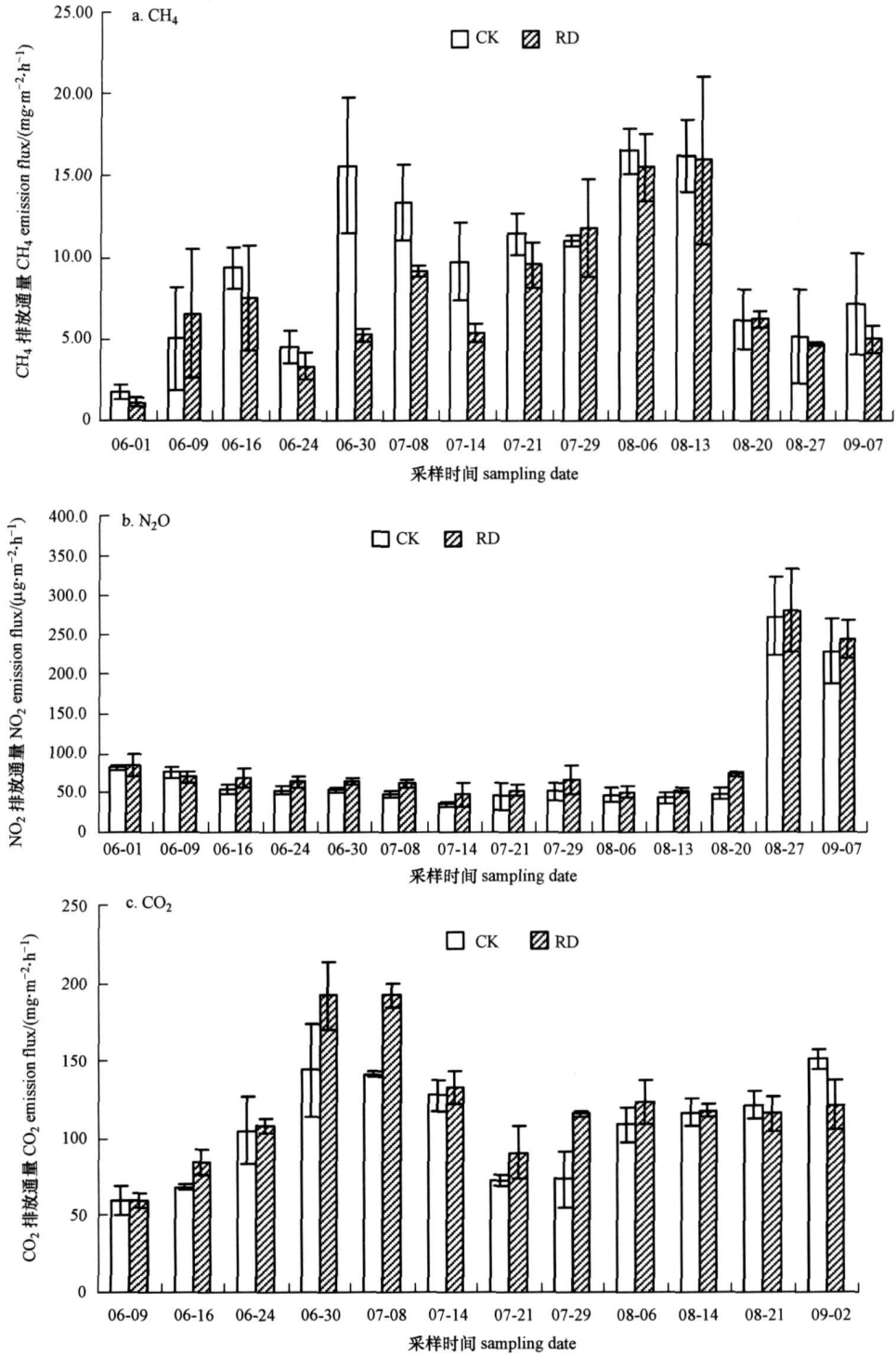


图 1 水稻不同生育期土壤温室气体排放通量的季节变化 (a  $\text{CH}_4$ , b  $\text{N}_2\text{O}$ , c  $\text{CO}_2$ )

Fig 1 Seasonal  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emission fluxes from soil during rice growth (a  $\text{CH}_4$ , b  $\text{N}_2\text{O}$ , c  $\text{CO}_2$ )

图 1b 所示的是水稻生育期间  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的季节变化. 在 8 月 20 日前,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量保持着较低值, 而 8 月 20 后,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量迅速升高, 并在 8 月 27 日达到最大值. 在水稻全生育期, 处理 RD 和

CK  $N_2O$  平均排放通量分别为 ( $0.092 \pm 0.073$ ) 和 ( $0.082 \pm 0.074$ )  $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ; 与处理 CK 相比, 处理 RD  $N_2O$  平均排放通量显著增加了 13% ( $p < 0.01$ ).

如图 1c 所示, 移栽初期, 稻田土壤  $CO_2$  排放少, 此后逐渐升高, 在水稻分蘖初期和盛期土壤呼吸排放量达到高峰期, 后略有降低, 在成熟期又有所增加. 在稻鸭共作期间 (6月 16日至 8月 20日), RD 的土壤  $CO_2$  排放通量为  $128.55 mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , 比 CK 显著增加  $22.06 mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$  ( $p < 0.01$ ). 在水稻全生育期间, 处理 CK 和 RD 土壤  $CO_2$  平均排放通量分别为 ( $107.53 \pm 3.92$ )  $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$  和 ( $121.20 \pm 4.21$ )  $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , RD 土壤  $CO_2$  平均排放通量是 CK 的 1.13 倍 ( $p > 0.05$ ).

### 3.4 稻田 $CH_4$ 、 $N_2O$ 和 $CO_2$ 排放量

表 3 水稻不同生育阶段稻田温室气体排放量

Table 3 Cumulative amounts of greenhouse gas emitted from paddy fields in different growth stages of rice

温室气体	处理 Treatments	移栽~放鸭前 Rice transplanted~ Duck introduced	放鸭始~收鸭 Duck introduced~ Duck harvested	收鸭~收获 Duck harvested~ Rice harvested	总量 Total
$CH_4$	RD	1.70 <sup>a</sup>	14.52 <sup>b</sup>	2.19 <sup>a</sup>	18.41 <sup>b</sup>
	CK	1.81 <sup>a</sup>	18.46 <sup>a</sup>	2.53 <sup>a</sup>	22.81 <sup>a</sup>
$N_2O$	RD	0.025 <sup>a</sup>	0.096 <sup>b</sup>	0.082 <sup>a</sup>	0.20 <sup>a</sup>
	CK	0.025 <sup>a</sup>	0.077 <sup>a</sup>	0.075 <sup>a</sup>	0.18 <sup>b</sup>
$CO_2$	RD	21.60 <sup>a</sup>	203.62 <sup>A</sup>	48.43 <sup>b</sup>	273.66 <sup>a</sup>
	CK	21.55 <sup>a</sup>	168.68 <sup>B</sup>	55.49 <sup>a</sup>	245.73 <sup>a</sup>

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 稻田温室气体排放的季节动态

本研究中甲烷的排放分别在分蘖期和抽穗期出现 2 个排放高峰, 这与前人的研究结果较一致 (Huang *et al.*, 2005; 郑循华等, 1997). 在 7 月上中旬, 水稻处于分蘖期, 水稻植株呼吸旺盛, 通过水稻植株的排放是甲烷排放的主要途径, 因此, 甲烷的排放处于较高水平. 此后, 虽然土壤有机质含量有所降低, 但随着水稻的生长, 根系逐渐壮大, 根系分泌物增加 (林匡飞等, 2000), 供产甲烷细菌群生长的基质增加; 同时, 在此期间, 气温在 30~40°C 间波动, 为产甲烷菌最佳繁殖温度 (侯爱新等, 1997), 因此, 有大量甲烷的排放. 水稻成熟后期, 稻田落干, 土壤的通气性增强, 土壤厌氧环境被破坏, 厌氧细菌繁殖受抑制, 因此, 甲烷排放减少. 本研究表明, 在淹水期间由于氧的缺乏,  $N_2O$  释放量低; 而稻田排干提高了土壤的通气性, 导致其释放高峰出现. 前

表 3 显示的是  $CH_4$ 、 $N_2O$  和  $CO_2$  在水稻不同生育阶段的累积释放量. 施肥后 2 周和稻田排干后, 2 个处理  $CH_4$ 、 $N_2O$  和  $CO_2$  的释放量几乎相等, 这是由于没鸭子的缘故. 在稻鸭共作期间 (6月 16日至 8月 20日), CK 和 RD 的  $CH_4$  释放量分别为  $18.46 g \cdot m^{-2}$  和  $14.52 g \cdot m^{-2}$ , RD  $CH_4$  释放量较 CK 显著下降 21% ( $p < 0.05$ ); 而处理 CK 和 RD  $N_2O$  释放量分别为  $0.077 g \cdot m^{-2}$  和  $0.096 g \cdot m^{-2}$ , RD  $N_2O$  释放量较 CK 显著增加了 25% ( $p < 0.01$ ); 处理 CK 和 RD 的  $CO_2$  释放量分别为  $168.68 g \cdot m^{-2}$  和  $203.62 g \cdot m^{-2}$ , 两者之间差异极显著 ( $p < 0.01$ ). 在水稻全生育期内, 处理 RD  $CH_4$ 、 $N_2O$  和  $CO_2$  释放总量分别为  $18.41$ 、 $0.20$  和  $273.66 g \cdot m^{-2}$ , 是 CK 的  $0.81$  ( $p < 0.05$ )、 $1.11$  ( $p < 0.05$ ) 和  $1.11$  ( $p < 0.1$ ) 倍.

人已做过类似的报道 (Xu *et al.*, 1997; Xiong *et al.*, 2002). 如图 1c 所示, 在水稻移栽初期, 土壤  $CO_2$  排放少, 此后到了分蘖盛期 (7月上中旬), 土壤  $CO_2$  排放量达到高峰期, 随后有所降低, 在稻田落干后又有所增加. 这是因为水稻处于分蘖期时, 水稻植株向土壤的输氧能力增强, 根系生长旺盛, 呼吸量大, 同时温度适宜土壤微生物的繁殖, 使得土壤呼吸作用增强; 又因水稻的生长, 分泌物的增加, 使得分蘖期土壤微生物的活动加剧, 因此, 促进了土壤  $CO_2$  的排放 (梁巍等, 2003). 而在水稻成熟期, 田面水层降低渐至落干, 土壤含水量减少, 排水后水层对  $CO_2$  传输的阻碍得以消除 (Miyata *et al.*, 2000; 朱咏莉等, 2007); 同时, 成熟期田面水层的减少后, 土壤的通气性增强, 好气微生物开始活跃, 加上气温仍然偏高, 这些条件均有利于土壤呼吸作用的增强, 因此, 即使在水稻生长末期, 土壤呼吸仍比较强.

### 4.2 稻田养鸭对稻田温室气体排放的影响

从图 1 及表 3 可知, 相对于处理 CK, RD 处理显

著地降低了  $\text{CH}_4$  的排放而显著提高了  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  的排放, 这可能与鸭子的活动有关. 第一, 本研究组 (汪金平等, 2006) 和其他学者的研究 (王华等, 2003) 表明, 稻田养鸭抑制了稻田杂草、浮游生物和其它需氧有机生物生长, 被水体生物所消耗的溶解氧减少, 水体 DO 浓度增加 (表 1). 鸭子栖息和活动加速了土壤与大气的交换, 增加了土壤与氧气接触的机会, 改善了土壤的氧化还原状况, 使土壤  $E_h$  值升高 (黄璜等, 2003; 王华等, 2003), 甲烷氧化菌的活性提高, 促使土壤产生的  $\text{CH}_4$  被较快地氧化, 导致  $\text{CH}_4$  排放量降低; 同时促进了土壤微生物的好氧呼吸, 促进了土壤  $\text{CO}_2$  排放的增加. 第二, 鸭子对杂草、藻类和水稻的无效分蘖的消化排除, 减少了因其腐烂分解后的甲烷排放量 (Huang *et al.*, 2005); 同时增强了根活力, 对水稻的生长有明显的促进作用 (禹盛苗等, 2005), 使得水稻根系分泌物和脱落物不断增加, 为微生物提供了充足的能源和营养源, 再加上较高的温度, 因而, 土壤呼吸作用增强. 第三, 稻田淹水期间, 水溶性  $\text{N}_2\text{O}$  扩散和传输缓慢, 使得  $\text{N}_2\text{O}$  释放量少; 而鸭的活动搅动了水体和土壤, 使得水溶性  $\text{N}_2\text{O}$  扩散加快, 促进了  $\text{N}_2\text{O}$  释放. 第四, 鸭的粪便含有高浓度的  $\text{NH}_4^+$ , 落入土壤后迅速被硝化; 同

时, 鸭的粪便含有丰富的 C、N 源, 为土壤反硝化和土壤微生物提供了物质和能源 (Rochette *et al.*, 2000), 因此,  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  释放增加.

#### 4.3 稻鸭复合系统温室气体的温室效应

大气中某一气体的温室效应为该气体释放量与增温系数的乘积, 而增温系数为单位质量的该气体引起的温室效应对应于相同效应的  $\text{CO}_2$  的质量. 在 100a 的时间尺度上,  $\text{CH}_4$  与  $\text{N}_2\text{O}$  的增温系数分别为 23 和 296 (IPCC, 2001). 根据稻鸭复合系统  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  释放量, 评估该系统排放的温室气体的温室效应 (见表 4). CK 的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  增温潜势分别占总增温潜势的 64%、30%、6%, 而 RD 处理分别占 56%、36%、8%, 可见稻田生态系统的增温效应主要是由  $\text{CH}_4$  引起的. 处理 CK 和 RD 温室气体的综合增温潜势分别为  $8225.61 \text{ kg } \text{hm}^{-2}$  和  $7633.25 \text{ kg } \text{hm}^{-2}$ , 处理 RD 综合增温潜势比 CK 显著降低  $592.24 \text{ kg } \text{hm}^{-2}$  ( $p < 0.05$ ). 结果表明, 相对于常规稻作, 稻鸭共作能有效地降低温室气体的温室效应. 如上所述, 在中国南部, 稻鸭共作是一个能减缓全球温室效应的稻作措施.

表 4 稻鸭共作生态系统温室气体的温室效应

Table 4 GWPs based on  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emissions from paddy fields in the rice-duck system

处理 Treatments	$\text{CH}_4$		$\text{N}_2\text{O}$		$\text{CO}_2$		综合增温潜势 Integrated GWPs $/(\text{kg } \text{hm}^{-2})$
	排放量 Emission amounts $/(\text{g } \text{m}^{-2})$	增温潜势 GWP $/(\text{kg } \text{hm}^{-2})$	排放量 Emission amounts $/(\text{g } \text{m}^{-2})$	增温潜势 GWP $/(\text{kg } \text{hm}^{-2})$	排放量 Emission amounts $/(\text{g } \text{m}^{-2})$	增温潜势 GWP $/(\text{kg } \text{hm}^{-2})$	
RD	18.41 <sup>b</sup>	4295.05 <sup>b</sup>	0.20 <sup>a</sup>	600.26 <sup>a</sup>	273.66 <sup>a</sup>	2737.94 <sup>a</sup>	7633.25 <sup>b</sup>
CK	22.81 <sup>a</sup>	5247.83 <sup>a</sup>	0.18 <sup>b</sup>	519.26 <sup>b</sup>	245.73 <sup>a</sup>	2458.53 <sup>a</sup>	8225.61 <sup>a</sup>

## 5 结论 (Conclusions)

1) 在水稻全生育期,  $\text{CH}_4$  的排放分别在分蘖期和抽穗期出现 2 个排放高峰;  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量在稻田淹水期间保持较低值, 而在稻田落干后迅速升高;  $\text{CO}_2$  的排放分在分蘖期和成熟期田面水逐渐落干后呈现 2 个排放峰.

2) 由于鸭子的活动, 相对于处理 CK, RD 处理显著地降低了  $\text{CH}_4$  的排放, 水稻整个生育期间排放量为  $18.41 \text{ g } \text{m}^{-2}$ , 比对照减少 19.3%. 而显著地提高了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 水稻整个生育期间排放量为  $0.2 \text{ g } \text{m}^{-2}$ , 比对照增加了 10%. 在稻鸭共作期间, RD 显著提高了土壤  $\text{CO}_2$  的排放量, 比对照增加了

20.7%, 但对整个生育期  $\text{CO}_2$  排放量影响不显著.

3) 处理 CK 和 RD 温室气体的综合增温潜势分别为  $8225.61 \text{ kg } \text{hm}^{-2}$  和  $7633.25 \text{ kg } \text{hm}^{-2}$ , 处理 RD 综合增温潜势显著比 CK 低  $592.24 \text{ kg } \text{hm}^{-2}$ . 这表明, 相对于常规稻作, 稻鸭共作主要能有效降低甲烷的增温效应, 从而使其综合增温效应降低.

责任作者简介: 曹奏贵, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态学和作物栽培及农业区域发展方面的研究.

#### 参考文献 (References):

- A dhyat K, Bhaati K, Mohanty S R, *et al.* 2000 Methane emission from rice fields at Cuttack, India [J]. *Nutr Cycl Agroecosys* 58: 95-105

- W uebbles D J, Hayhoe K. 2002 Atmospheric methane and global change [J]. *Earth-Science Reviews* 2002, 57: 177—210
- Guo J P, Zhou C D. 2007 Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142: 270—277
- 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰, 等. 1997 稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放关系及其微生物学机理和一些影响因子 [J]. *应用生态学报*, 8(3): 270—274
- Hou A X, Chen G X, Wu J *et al* Relationship between  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from rice field and its microbiological mechanism and impacting factors [J]. *Chinese J Appl Ecol* 8(3): 270—274 (in Chinese)
- 黄璜, 杨志辉, 王华, 等. 2003 湿地稻鸭复合系统的  $\text{CH}_4$  排放规律 [J]. *生态学报*, 23(5): 929—934
- Huang H, Yang Z H, Wang H, *et al* 2003 A study on the pattern of methane emission in wetland rice-duck complex ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica* 23(5): 929—934 (in Chinese)
- Huang Y, Wang H, Huang H, *et al* 2005 Characteristics of methane emission from wetland rice-duck complex ecosystem [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 105: 181—193
- IPCC. 2001 Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 12—14
- 梁巍, 岳进, 吴吉力, 等. 2003 微生物生物量 C、土壤呼吸的季节性变化与黑土稻田甲烷排放 [J]. *应用生态学报*, 14(12): 2278—2280
- Liang W, Yue J, Wu J L, *et al* 2003 Seasonal variations of soil microbial biomass respiration rate and  $\text{CH}_4$  emission in black earth rice fields [J]. *Chinese J Appl Ecol* 14(12): 2278—2280 (in Chinese)
- 林匡飞, 项雅玲, 姜达炳, 等. 2000 湖北地区稻田甲烷排放量及控制措施的研究 [J]. *农业环境保护*, 19(5): 267—270
- Lin K F, Xiang Y L, Jiang D B, *et al* 2000 Methane emission flux from paddy fields and its control in Hubei [J]. *Agro-environmental Protection*, 19(5): 267—270 (in Chinese)
- 刘小燕, 黄璜, 杨治平, 等. 2006 稻鸭鱼共栖生态系统  $\text{CH}_4$  排放规律研究 [J]. *生态环境*, 15(2): 265—269
- Liu X Y, Huang H, Yang Z P, *et al* 2006 Methane emission from rice-duck-fish complex ecosystem [J]. *Ecol Environ* 15(2): 265—269 (in Chinese)
- 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 2006 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律 [J]. *环境科学学报*, 26(6): 992—999
- Meng F Q, Guan G H, Zhang Q Z, *et al* 2006 Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantia* 26(6): 992—999 (in Chinese)
- Miyata A, Leuning R, Denmead O T, *et al* 2000 Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field [J]. *Agric For Meteorol* 102: 287—303
- Pathak H, Wassmann R. 2007 Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture I Generation of technical coefficients [J]. *Agricultural Systems* 94: 807—825
- Rochette P, van Bochove E, Prevost D, *et al* 2000 Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year II Nitrous oxide fluxes and mineral nitrogen [J]. *Soil Sci Soc Am J* 64: 1396—1403
- 国家环保局. 1989 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 246—248
- SEPA. 1989 Methods for examination of water and wastewater [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 246—248 (in Chinese)
- Tsunata H, Kanda K, Hirose T. 1997 Nitrous oxide emission from a rice paddy field in Japan [J]. *Nutri Cycl Agroecosyst* 49: 51—58
- 王华, 黄璜, 杨志辉, 等. 2003 湿地稻鸭复合生态系统综合效益研究 [J]. *农村生态环境*, 3: 23—26, 44
- Wang H, Huang H, Yang Z H, *et al* 2003 Integrated benefits of rice-duck complex ecosystem [J]. *Rural Eco-Environ* 19: 23—26, 44 (in Chinese)
- 汪金平, 曹凑贵, 金晖, 等. 2006 稻鸭共育对稻田水生生物群体的影响 [J]. *中国农业科学*, 39(10): 2001—2008
- Wang J P, Cao C G, Jin H, *et al* 2006 Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields [J]. *Sci Agric Sinica* 39(10): 2001—2008 (in Chinese)
- 王纓, 雷慰慈. 2000 稻田种养模式生态效益研究 [J]. *生态学报*, 20(2): 311—316
- Wang Y, Lei W C. 2000 Studies on ecological benefits of planting and breeding model in rice fields [J]. *Acta Ecologica Sinica* 20(2): 311—316 (in Chinese)
- Xiang P A, Huang H, Huang M, *et al* 2006 Studies on technique of reducing methane emission in a rice-duck ecological system and the evaluation of its economic significance [J]. *Sci Agric Sinica* 5(10): 758—766
- Xiang Z Q, Xing G X, Tsunata H, *et al* 2002 Measurement of nitrous oxide emissions from two rice-based cropping systems in China [J]. *Nutri Cycl Agroecosyst* 64: 125—133
- Xu H, Xing G, Cai Z, *et al* 1997 Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China [J]. *Nutri Cycl Agroecosyst* 49: 23—28
- Yang S S, Liu C M, Lai C M, *et al* 2003 Estimation of methane and nitrous oxide emission from paddy fields and uplands during 1990—2000 in Taiwan [J]. *Chemosphere*, 52: 1295—1305
- 禹盛苗, 欧阳由男, 张秋英, 等. 2005 稻鸭共育复合系统对水稻生长与产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 16(7): 1252—1256
- Yu S M, Ouyang Y N, Zhang Q Y, *et al* 2005 Effects of rice-duck farming system on *Oryza sativa* growth and its yield [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(7): 1252—1256 (in Chinese)
- Zhang J E, Ouyang Y, Huang Z X. 2008 Characterization of nitrous oxide emission from a rice-duck farming system in South China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 54(2): 167—172
- Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al* 1998 Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields [J]. *Advances in Atmospheric Science* 15(4): 569—579
- 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 1997 华东稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放 [J]. *大气科学*, 21(2): 231—237
- Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al* 1997  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  Emissions from Rice Paddy Fields in Southeast China [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* 21(2): 232—237 (in Chinese)
- 朱咏莉, 吴金水, 朱博宇, 等. 2007 排水措施对稻田  $\text{CO}_2$  通量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 26(6): 2206—2210
- Zhu Y L, Wu J S, Zhu B Y, *et al* 2007 Effects of drainage on carbon dioxide flux in rice paddy field [J]. *J Agro-Environ Sci* 26(6): 2206—2210 (in Chinese)