

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

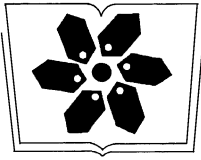
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 5 期      2012 年 3 月 (半月刊)

## 目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征 .....	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应 .....	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响 .....	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例 .....	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化 .....	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析 .....	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征 .....	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性 .....	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响 .....	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响 .....	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性 .....	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征 .....	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究 .....	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数 .....	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性 .....	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响 .....	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响 .....	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征 .....	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机腐熟度 .....	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析 .....	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素 .....	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究 .....	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响 .....	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力 .....	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法 .....	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹 .....	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例 .....	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例 .....	邓晓红, 徐中民 (1587)
<b>专论与综述</b>	
台风对森林的影响 .....	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展 .....	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展 .....	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义 .....	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展 .....	黎慧娟, 彭静静 (1633)
<b>问题讨论</b>	
锡林郭勒盟生态脆弱性 .....	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
<b>研究简报</b>	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布 .....	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



**封面图说:** 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101230115

唐海明,肖小平,帅细强,汤文光,林叶春,汤海涛,杨光立. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响. 生态学报, 2012, 32(5): 1481-1489.

Tang H M, Xiao X P, Shuai X Q, Tang W G, Lin Y C, Tang H T, Yang G L. Effects of different winter covering crops cultivation on methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emission fluxes from double-cropping paddy field. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1481-1489.

## 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和 氧化亚氮排放的影响

唐海明<sup>1</sup>, 肖小平<sup>1,\*</sup>, 帅细强<sup>2</sup>, 汤文光<sup>1</sup>, 林叶春<sup>3</sup>, 汤海涛<sup>1</sup>, 杨光立<sup>1</sup>

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2. 湖南省气象科学研究所, 长沙 410007;

3. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193)

**摘要:** 研究双季稻收获后填闲种植不同冬季作物在其生长季节内  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放特征, 对合理利用冬闲稻田, 发展冬季作物生产及合理评价不同种植模式具有重要意义。采用静态箱-气相色谱法对冬季免耕直播黑麦草、紫云英、油菜以及翻耕移栽油菜和冬闲的双季稻田中甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 和氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 排放进行了分析。结果表明: 在冬季作物生长期,  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量和总排放量均表现为翻耕移栽油菜 > 免耕直播黑麦草 > 免耕直播油菜 > 免耕直播紫云英 > 冬闲。不同冬季作物稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  总排放量与对照 (冬闲) 的差异均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ); 翻耕移栽油菜的双季稻田中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量最高, 分别达  $2.989 \text{ g/m}^2$  和  $0.719 \text{ g/m}^2$ 。翻耕移栽油菜稻田的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  温室效应总和也最大, 为  $2893.92 \text{ kg CO}_2/\text{hm}^2$ ; 免耕直播黑麦草和免耕直播油菜处理次之, 而免耕直播紫云英处理最低。种植不同冬季作物促进了稻田生态系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。

**关键词:** 双季稻田; 冬季作物;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ; 排放; 温室效应

## Effects of different winter covering crops cultivation on methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emission fluxes from double-cropping paddy field

TANG Haiming<sup>1</sup>, XIAO Xiaoping<sup>1,\*</sup>, SHUAI Xiqiang<sup>2</sup>, TANG Wenguang<sup>1</sup>, LIN Yechun<sup>3</sup>, TANG Haitao<sup>1</sup>, YANG Guangli<sup>1</sup>

1 Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China

2 Meteorological Science Institute of Hunan Province, Changsha 410007, China

3 College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract:** Methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) are two important trace gases, which are considered to have 15—30 and 150—200 times more radioactively active than  $\text{CO}_2$ , respectively. It is well known that agricultural soils are the major sources of atmospheric  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$ . IPCC (2007) revealed that global warming potentials (GWPs) of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  are different. Previous researches have investigated some factors that affect the rates of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission fluxes, such as soil properties, climate, water regime, organic matter incorporation and plant physiology. However, the effects of different winter covering crops cultivation on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission fluxes from double-cropping paddy fields is unclear. So the quantitative and possible mechanisms dependence of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission fluxes from double-cropping paddy fields on different winter covering crops cultivation is still far from being understood. Hence, the static chamber-gas chromatography (GC) technique with manual method was chosen to identify the effects of different winter covering crops cultivation

基金项目: 国家“十一五”科技支撑资助项目 (2008BAD95B02)

收稿日期: 2011-01-23; 修订日期: 2011-06-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hntfsxping@163.com

(including no-tillage ryegrass and double rice cropping ( $T_1$ ), no-tillage Chinese milk vetch and double rice cropping ( $T_2$ ), tillage rape and double rice cropping ( $T_3$ ), no-tillage rape and double rice cropping ( $T_4$ ) and fallow and double rice cropping (CK)) on  $CH_4$  and  $N_2O$  emission fluxes from double-cropping paddy fields in subtropical regions of China ( $28^{\circ}08'18''$  N,  $113^{\circ}12'0''$  E). The results showed that the fluxes and emission of  $CH_4$  and  $N_2O$  was varied with different winter covering crops cultivation patterns, and generally followed the series  $T_3 > T_1 > T_4 > T_2 > CK$ , and ANOVA revealed that the emission fluxes of  $CH_4$  and  $N_2O$  were significantly ( $P < 0.01$ ) more from the four treatments during the whole growth stage than that of fallow and double rice cropping (CK). In addition, 2.284, 1.073, 2.989, 1.731 and 0.668  $g/m^2$   $CH_4$  emission fluxes were observed from the treatment of  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  and CK during the whole growth stage of winter covering crops, respectively.  $CH_4$  emissions during the whole growth stage under  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  and  $T_4$  treatments were increased by 241.92%, 60.63%, 347.46% and 159.13%, respectively. Similarly, the treatments of  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  and CK had also the  $N_2O$  emission during the winter covering crops whole growth stage with 0.588, 0.479, 0.719, 0.544 and 0.342  $g/m^2$ , respectively.  $N_2O$  emissions during the whole growth stage under  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  and  $T_4$  treatments were increased by 71.93%, 40.06%, 110.23% and 59.06%, respectively. The treatments of  $T_3$ ,  $T_1$  had not only the largest  $CH_4$  emissions during the winter covering crops whole growth stage with 2.989 and 2.284  $g/m^2$ , but also the largest  $N_2O$  emissions with 0.719 and 0.588  $g/m^2$  from double-cropping paddy fields, respectively. Our study also indicated that GWPs of  $CH_4$  and  $N_2O$  from double-cropping paddy fields was varied with different winter covering crops and followed the general series  $T_3 > T_1 > T_4 > T_2 > CK$ . The treatment of  $T_3$  also had the largest GWPs of  $CH_4$  and  $N_2O$  from double-cropping paddy fields with 2893.92  $kg CO_2/hm^2$ , while  $T_1$  and  $T_4$  had the secondly GWPs of  $CH_4$  and  $N_2O$  from double-cropping paddy fields with 2326.49 and 2056.75  $kg CO_2/hm^2$ , and the  $T_2$  had the lowest GWPs of  $CH_4$  and  $N_2O$  from double-cropping paddy fields with 1698.05  $kg CO_2/hm^2$ , respectively. Our results clearly demonstrate that  $CH_4$  and  $N_2O$  emission from double-cropping paddy fields were significantly promoted by planting different winter covering crops in double paddy field ecosystem. Further studies investigating the regulated factors of  $CH_4$  and  $N_2O$  emissions from double-cropping paddy fields is therefore warranted.

**Key Words:** double cropping paddy field; winter covering crop;  $CH_4$ ;  $N_2O$ ; emission fluxes; global warming potentials

大气中温室气体浓度的增加是导致全球变暖的主要因素,甲烷( $CH_4$ )和氧化亚氮( $N_2O$ )是大气中两种重要的温室气体,对地球系统的能量收支和地球气候变化有重要影响<sup>[1]</sup>。 $CH_4$ 和 $N_2O$ 单位分子的增温潜能分别是 $CO_2$ 的25和298倍<sup>[2]</sup>,其气体浓度分别以每年约1%和0.2%—0.3%的速度增长<sup>[3]</sup>。水稻是世界主要的粮食作物之一,占粮食作物面积的1/3,其生产过程中伴随着 $CH_4$ 和 $N_2O$ 等温室气体的产生,稻田在全球温室气体的预算中具有重要作用<sup>[4]</sup>。因此,稻田温室气体的排放是目前农田环境的研究热点。

稻田耕作释放的 $CH_4$ 约占大气 $CH_4$ 总来源的8%—13%,全球稻田 $CH_4$ 年总排放量达30 Tg(20—40 Tg)<sup>[5-8]</sup>。近年来,约57%的中国稻田在水稻生长期采用间隙灌溉的水管理措施,更加大了稻田 $N_2O$ 的排放<sup>[9]</sup>。目前,有关稻田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的研究大多集中在水稻生长期内,对冬闲稻田温室气体排放的研究较少<sup>[10-11]</sup>,而对不同冬季覆盖作物在其生长季节内稻田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放影响进行系统的研究迄今未见报道。农田冬季覆盖作物是农业可持续发展的重要组成部分,它有利于提高土壤质量、土壤养分利用和作物产量、减少土壤侵蚀和化学径流,并且能抑制杂草生长<sup>[12-13]</sup>。据不完全统计,我国南方稻区约有冬闲田 $2 \times 10^7$   $hm^2$ ,其中,油菜约 $5.89 \times 10^6$   $hm^2$ ,紫云英约 $1.86 \times 10^6$   $hm^2$ ,黑麦草约 $7.67 \times 10^5$   $hm^2$ <sup>[14]</sup>。若能充分利用稻田冬、春自然资源,可增加冬季稻田绿色作物覆盖度,减少冬季裸露,增加单位面积生物产量和土壤有机碳,抑制硝态氮淋溶,增加碳氮蓄积,有利于确保粮油作物生产安全。为此,本文选择南方稻区4种具有代表性的冬季作物,以冬闲-双季稻为对照,初步探讨了免耕直播黑麦草-双季稻、免耕直播紫云英-双季稻、翻耕移栽油菜-双季稻和免耕直播油菜-双季稻4种冬季覆盖作物在其生长季节内稻田的 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放特征,旨在合理利用冬闲稻

田,发展冬季覆盖作物生产及合理评价不同种植模式提供科学依据。

## 1 材料与方

### 1.1 试验地概况

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡(28°08'18" N,113°12'0" E),海拔 42 m。试验土壤为第四纪红壤母质发育的红黄泥。试验前耕层土壤基础养分性状为:有机质 30.0 g/kg,全氮 1.99 g/kg,全磷 0.63 g/kg,全钾 8.1 g/kg,碱解氮 177.0 mg/kg,有效磷 23.5 mg/kg,速效钾 126.0 mg/kg,pH 值 5.2。试验地属亚热带季风性湿润气候,年均气温 17.1 °C,年均降水量 1500 mm,≥10 °C 活动积温 5300—6500 °C,无霜期 270—310 d。冬季作物生长期降水、平均气温和土壤温度情况见图 1。

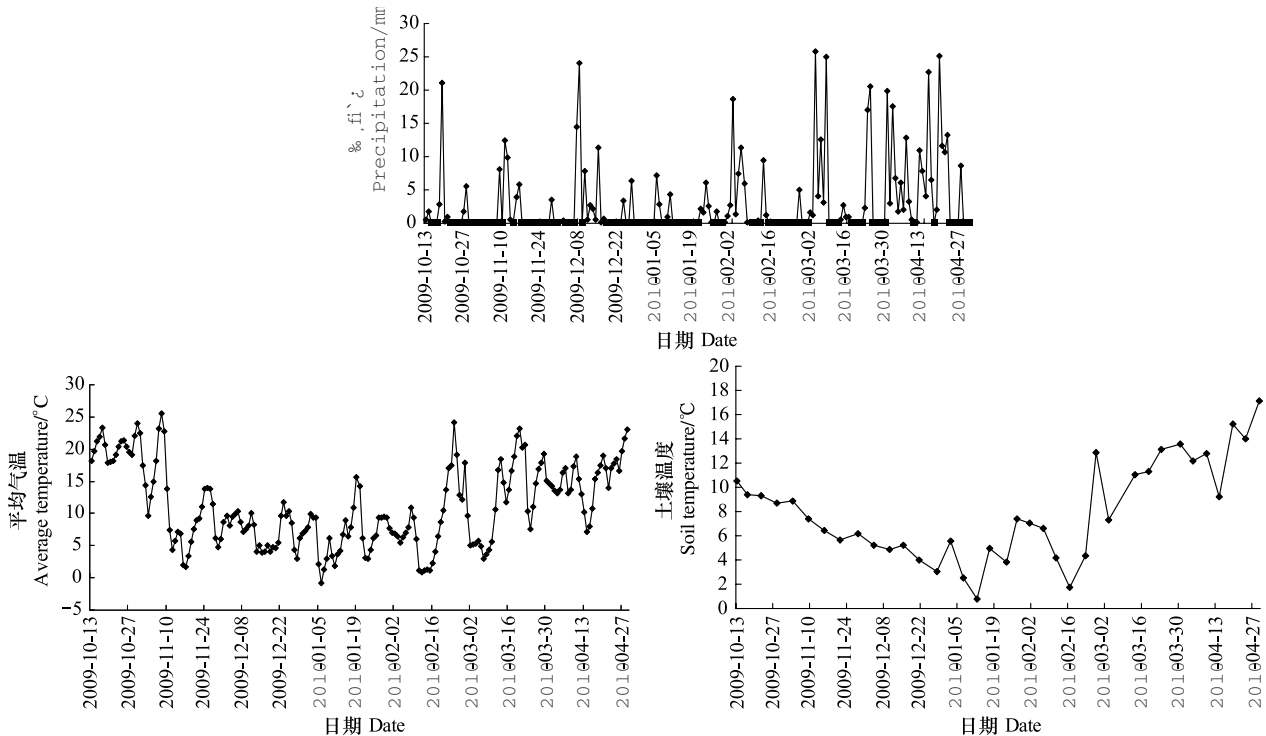


图 1 研究区冬季作物生长期降水量、平均气温和土壤温度变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of precipitation, average temperature and soil temperature during growth period of winter crop in the study area

### 1.2 试验设计及田间管理

试验设 5 个处理:冬闲-双季稻(CK)、免耕直播黑麦草-双季稻( $T_1$ )、免耕直播紫云英-双季稻( $T_2$ )、翻耕移栽油菜-双季稻( $T_3$ )和免耕直播油菜-双季稻( $T_4$ ),每处理 3 次重复,随机区组排列,小区面积 24.2 m<sup>2</sup>。小区四周加设保护行,小区间采用完全阻渗处理,即小区四周和田埂用塑料膜(厚 0.06 mm)围墙,至土表下 25—30 cm 深,以防止侧渗对试验的影响。冬季作物黑麦草供试品种为“多花黑麦草超高”,紫云英供试品种为“宁波大桥”,油菜供试品种均为“湘杂油 7 号”。冬季作物播种和移栽前,基肥均施 N 75 kg/hm<sup>2</sup> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45 kg/hm<sup>2</sup>。冬季作物具体的肥料用量及田间管理措施见表 1。

### 1.3 气样采集与测定

用静态暗箱-气相色谱法采集 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 气体。采样箱由 5 mm 厚 PVC 板制成,规格为 50 cm × 50 cm × 120 cm,外部包有海绵和锡箔纸,以防止太阳照射导致箱内气温变化过大。分别在冬季作物播种和移栽后,于各处理稻田安装静态箱底座,底座入土 5 cm,底座内分别含生长的冬季作物。分别在冬季作物播种和移栽后的第 2 天开始进行气体采集,以后每隔 7 d 采集 1 次。每次采样时间为 9:00—11:00,取样时将采样箱垂直安放在底座凹槽内并用水密封,保证箱内气体与大气不进行气体交换。箱盖上装有 2 个 12 V 小风扇,采样前将

箱内顶部风扇打开,使箱内气体混和均匀。盖箱之后的 0、10、20 和 30 min 采样,用 50 mL 注射器从箱中抽取气体,通过旋转三通阀转移到 0.5 L 气体采样袋,备测。

表 1 双季稻田冬季作物生长期田间管理措施

Table 1 Different management practices during growth period of winter crop in double cropping paddy field

日期 Date	管理措施 Field management practices
2009-10-08	黑麦草和紫云英播种,播种量分别为 22.5 和 37.5 kg/hm <sup>2</sup>
2009-10-12	翻耕移栽油菜进行移栽和免耕直播油菜进行播种(移栽密度为 5.4×10 <sup>4</sup> 株/hm <sup>2</sup> ,播种量为 3.0 kg/hm <sup>2</sup> )
2009-11-25	各处理均追施 N 55.2 kg/hm <sup>2</sup>
2009-12-01	紫云英追施 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 32.4 kg/hm <sup>2</sup>
2010-02-05	油菜追施 N 55.2 kg/hm <sup>2</sup> ;黑麦草第 1 次刈割后,追施 N 55.2 kg/hm <sup>2</sup>
2010-03-07	黑麦草第 2 次刈割后,追施 N 55.2 kg/hm <sup>2</sup>
2010-04-23	冬季作物翻压(冬闲田杂草、黑麦草和紫云英还田量分别为 694.05、22500.0、22500.0 kg/hm <sup>2</sup> )
2010-04-30	油菜收获后,部分秸秆直接翻压还田(还田量均为 7500.0 kg/hm <sup>2</sup> )

各冬季作物还田量均为鲜重

采用经改装的气相色谱(Agilent 7890A,美国)和自动进样器测定 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 浓度,检测器分别是火焰离子检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD),进样口温度分别为 200 °C 和 330 °C。分离材料为 PQ 填充柱,柱温 55 °C。标准气体由国家标准物质中心提供(CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 标气浓度分别为 1.87 mg/kg、314.0 mg/kg,标气测量值的变异程度分别为 3.03%、2.64%)。

#### 1.4 数据处理

稻田 CH<sub>4</sub>(mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 和 N<sub>2</sub>O(μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 排放通量的计算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$F = \rho h [273.15 / (273.15 + T)] dC / dt$$

式中, $F$  为排放通量; $\rho$  为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 标准状态下的密度(0.714 kg/m<sup>3</sup> 和 1.964 kg/m<sup>3</sup>); $h$  为经过水层高度调整后采样箱顶部距水面的实际高度(m); $dC/dt$  为采样过程中采样箱内 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的浓度变化率; $T$  为采样箱内的平均温度(°C)。

根据气样浓度与时间的关系曲线计算 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放通量<sup>[16]</sup>,然后计算冬季作物整个生长期 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放总量<sup>[17]</sup>(平均通量值与冬季作物整个生长期总小时数的乘积)。

数据处理、相关分析采用 Excel 2003 软件进行,方差分析和多重比较采用 DPS 3.11(Data Processing System for Practical Statistics)软件进行,多重比较采用 Duncan 新复极差法。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬季作物生长期稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量的动态

由图 2 可以看出,在冬季作物生长前期,由于气温较低,植株生长缓慢,稻田表现为对大气 CH<sub>4</sub> 微弱的吸收,表现为 CH<sub>4</sub> 汇;随着气温的升高和作物的生长,各处理稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量逐渐增加,在次年 2 月上旬和下旬,各处理稻田 CH<sub>4</sub> 均出现了排放峰;在 3 月上旬,各处理稻田 CH<sub>4</sub> 出现了一个排放高峰。在冬季作物整个生长期,不同处理稻田 CH<sub>4</sub> 的平均排放通量表现为翻耕移栽油菜(T<sub>3</sub>)>免耕直播黑麦草(T<sub>1</sub>)>免耕直播油菜(T<sub>4</sub>)>免耕直播紫云英(T<sub>2</sub>)>冬闲(CK)。

### 2.2 冬季作物生长期稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量的动态

不同冬季覆盖作物对冬闲期稻田 N<sub>2</sub>O 排放具有一定影响。在冬季作物生长前期,不同处理稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量表现为 T<sub>3</sub>>T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>T<sub>4</sub>>CK;在生长后期,则表现为 T<sub>3</sub>>T<sub>4</sub>>T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>CK(图 3)。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理均于 2009 年 12 月 1 日出现一个 N<sub>2</sub>O 排放高峰;在次年 2 月 9 日,T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理稻田出现了一个 N<sub>2</sub>O 排放高峰;3 月 12 日,T<sub>1</sub> 处理稻田又出现一个 N<sub>2</sub>O 排放高峰。

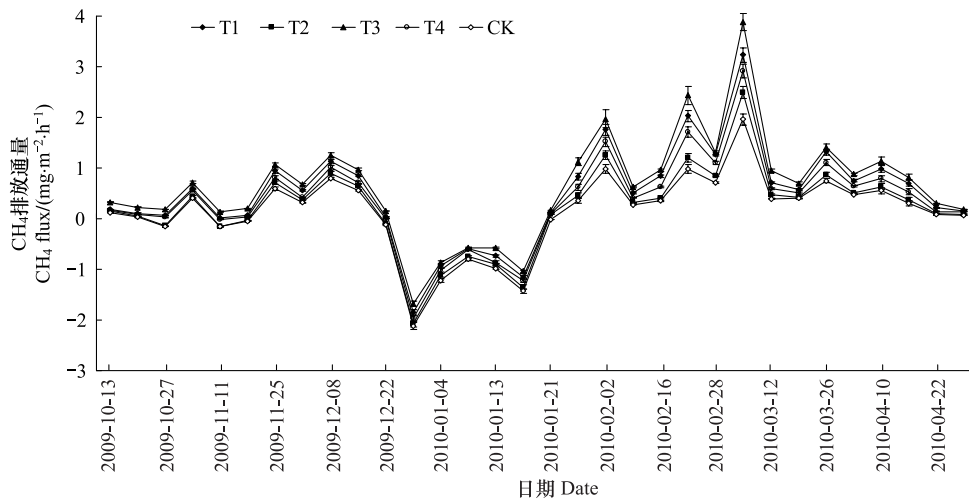


图2 冬季作物生长期不同冬季覆盖作物下稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的动态

Fig. 2 Dynamic of  $\text{CH}_4$  flux in rice fields during growth period under different winter cover crops

$T_1$ : 免耕直播黑麦草-双季稻;  $T_2$ : 免耕直播紫云英-双季稻;  $T_3$ : 翻耕移栽油菜-双季稻;  $T_4$ : 免耕直播油菜-双季稻; CK: 冬闲-双季稻.

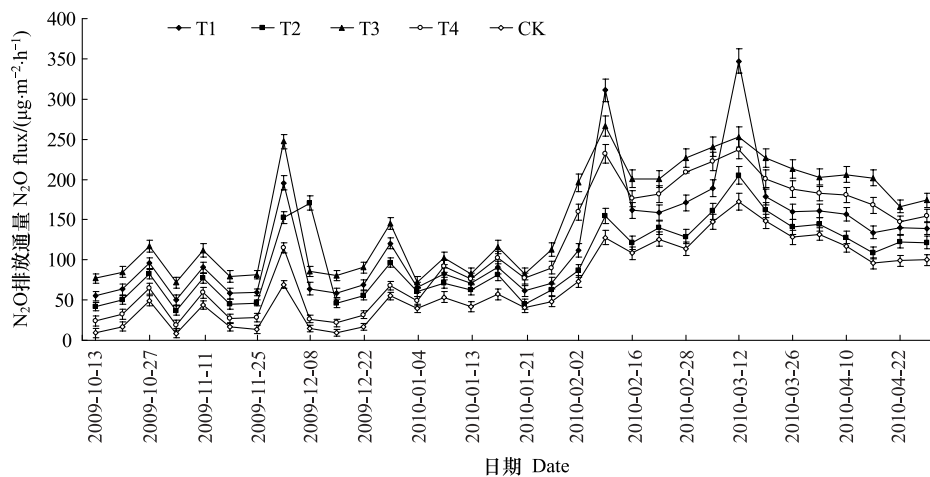


图3 冬季作物生长期不同冬季覆盖作物下稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的动态

Fig. 3 Dynamic of  $\text{N}_2\text{O}$  flux in rice fields during growth period under different winter cover crops

$T_1$ : 免耕直播黑麦草-双季稻;  $T_2$ : 免耕直播紫云英-双季稻;  $T_3$ : 翻耕移栽油菜-双季稻;  $T_4$ : 免耕直播油菜-双季稻; CK: 冬闲-双季稻.

### 2.3 冬季作物生长期稻田生态系统 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量

在冬季作物整个生长期,各处理稻田  $\text{CH}_4$  总排放量均显著高于对照,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  处理稻田的  $\text{CH}_4$  总排放量分别为 2.284、1.073、2.989 和 1.731  $\text{g}/\text{m}^2$ , 分别比对照增加 241.92%、60.63%、347.46% 和 159.13%, 不同处理间的差异均达极显著水平 ( $P < 0.01$ ); 各处理稻田的  $\text{CH}_4$  总排放量表现为  $T_3 > T_1 > T_4 > T_2$  (表 2)。

冬季作物生长期,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  处理稻田的  $\text{N}_2\text{O}$  总排放量均明显高于对照, 分别比对照高 0.246、0.137、0.377 和 0.202  $\text{g}/\text{m}^2$ , 分别比对照增加 71.93%、40.06%、110.23% 和 59.06%, 不同处理间的差异均达极显著水平 ( $P < 0.01$ ); 各处理稻田的  $\text{N}_2\text{O}$  总排放量表现为  $T_3 > T_1 > T_4 > T_2$  (表 2)。

### 2.4 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 综合温室效应分析

稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  产生和排放是不同耕作制度、土壤特性、气候特征和田间管理措施等综合影响下的产物。由表 3 可以看出, 冬季作物生长期稻田  $\text{CH}_4$  总排放量以  $T_3$  和  $T_1$  处理最高,  $T_4$  和  $T_2$  处理次之; 冬季作物生长期稻田  $\text{N}_2\text{O}$  总排放量以  $T_3$  和  $T_1$  处理最高, 分别为 0.719、0.588  $\text{g}/\text{m}^2$ ,  $T_4$  (0.544  $\text{g}/\text{m}^2$ ) 和  $T_2$  (0.479  $\text{g}/\text{m}^2$ ) 处

理次之。

稻田生态系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  气体排放对全球变暖具有重要影响,通常用增温潜势(GWPs, $\text{CO}_2$  的 GWPs 为 1)来表示相同质量的不同温室气体对温室效应增强的相对辐射效应。对于 100 a 时间尺度的气候变化, $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  气体的 GWPs 分别为 25 和 298<sup>[2]</sup>。本研究中  $T_3$  处理稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  温室效应总和最大,为 2893.92 kg  $\text{CO}_2/\text{hm}^2$ ;  $T_1$  和  $T_4$  处理次之,分别为 2326.49 和 2056.75 kg  $\text{CO}_2/\text{hm}^2$ ;  $T_2$  处理最低,为 1698.05 kg  $\text{CO}_2/\text{hm}^2$ (表 3)。

### 3 讨论

#### 3.1 冬季作物生长期稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量的动态

稻田甲烷的排放受施肥类型、施肥技术、作物品种、轮作方式的影响<sup>[18-19]</sup>。白小琳等<sup>[20]</sup>研究表明,冬闲季稻田  $\text{CH}_4$  排放极少,各处理  $\text{CH}_4$  排放均接近于零。本研究结果表明,冬闲稻田的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量在测定前期维持在较低水平,12 月下旬后  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量明显升高; $\text{CH}_4$  排放通量在晚稻收获后表现为负排放或净吸收,这与刘惠等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。耕作方式对土壤的生态环境有着重要的影响,通过影响土壤的物理性状、化学性质和生物学过程直接或间接地影响着  $\text{CH}_4$  排放<sup>[21]</sup>。本研究表明,与翻耕比较,稻田免耕种植冬季作物能减少  $\text{CH}_4$  排放,这与前人的研究结果较为一致<sup>[22-24]</sup>。其原因可能是耕作破坏了土壤原有结构,降低了土壤对  $\text{CH}_4$  的氧化<sup>[25]</sup>,降低土壤  $\text{CH}_4$  汇集的强度<sup>[22-23]</sup>;同时,稻田免耕条件下,更多的毛孔连贯在一起,更多的有利甲烷氧化菌繁殖的生态位存在,使得免耕稻田对  $\text{CH}_4$  吸收强于常规翻耕稻田<sup>[26]</sup>。在本研究中,翻耕移栽油菜采取育苗移栽,移栽后植株能迅速恢复生长,保持旺盛的生长,地下和地上部分代谢活动强于其它处理,增加了稻田  $\text{CH}_4$  的排放;在黑麦草不同生长阶段,黑麦草采取免耕直播,生长前期植株地下和地上部分生长较慢,稻田  $\text{CH}_4$  的排放量较少,在翌年 2 月上旬以后,由于对其进行二次刈割,每次刈割后均追施氮肥,促进了地上部和地下部生长,植株代谢较强,呼吸旺盛,促进了稻田  $\text{CH}_4$  的排放;免耕直播油菜和免耕直播紫云英在不同的生长阶段,植株长势弱于翻耕移栽油菜和免耕直播黑麦草,但仍能进行正常的生理活动,也有部分  $\text{CH}_4$  排放,但其排放量低于翻耕移栽油菜和免耕直播黑麦草。在冬季作物整个生长期,各处理稻田  $\text{CH}_4$  平均排放通量和总排放量均表现为翻耕移栽油菜>免耕直播黑麦草>免耕直播油菜>免耕直播紫云英>冬闲,这可能与不同冬季作物的种类、生长及生理活动强弱有关。对冬季作物的生物学产量统计结果表明,翻耕移栽油菜、免耕直播黑麦草、免耕直播油菜、免耕直播

表 2 不同冬季覆盖作物下生长期稻田生态系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量

Table 2  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from rice fields during whole growth stages of different winter cover crops (mean $\pm$ SE)

处理 Treatments	排放量 Emission/(g/m <sup>2</sup> )	
	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$
$T_1$	2.284 $\pm$ 0.066bB	0.588 $\pm$ 0.017bB
$T_2$	1.073 $\pm$ 0.031dD	0.479 $\pm$ 0.014cC
$T_3$	2.989 $\pm$ 0.086aA	0.719 $\pm$ 0.021aA
$T_4$	1.731 $\pm$ 0.050cC	0.544 $\pm$ 0.016bBC
CK	0.668 $\pm$ 0.019eE	0.342 $\pm$ 0.010dD

$T_1$ :免耕直播黑麦草-双季稻; $T_2$ :免耕直播紫云英-双季稻; $T_3$ :翻耕移栽油菜-双季稻; $T_4$ :免耕直播油菜-双季稻;CK:冬闲-双季稻;同列不同大、小写字母分别表示差异达极显著( $P<0.01$ )和显著水平( $P<0.05$ )

表 3 不同冬季作物覆盖下稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的温室效应

Table 3 GWPs of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  from rice field under different winter cover crops

处理 Treatments	$\text{CH}_4$ 排放量	$\text{N}_2\text{O}$ 排放量	$\text{CH}_4$ 温室效应	$\text{N}_2\text{O}$ 温室效应	总温室效应
	$\text{CH}_4$ emission /(g/m <sup>2</sup> )	$\text{N}_2\text{O}$ emission /(g/m <sup>2</sup> )	GWPs of $\text{CH}_4$ /(kg $\text{CO}_2/\text{hm}^2$ )	GWPs of $\text{N}_2\text{O}$ /(kg $\text{CO}_2/\text{hm}^2$ )	GWPs of $\text{CH}_4$ and $\text{N}_2\text{O}$ /(kg $\text{CO}_2/\text{hm}^2$ )
$T_1$	2.284	0.588	571.80	1754.69	2326.49 bB
$T_2$	1.073	0.479	268.63	1429.42	1698.05 dC
$T_3$	2.989	0.719	748.30	2145.62	2893.92 aA
$T_4$	1.731	0.544	433.36	1623.39	2056.75 cB
CK	0.668	0.342	167.23	1020.59	1187.82 eD

$T_1$ :免耕直播黑麦草-双季稻; $T_2$ :免耕直播紫云英-双季稻; $T_3$ :翻耕移栽油菜-双季稻; $T_4$ :免耕直播油菜-双季稻;CK:冬闲-双季稻;同列不同大、小写字母分别表示差异达极显著( $P<0.01$ )和显著水平( $P<0.05$ )



紫云英和冬闲田杂草的生物产量(地下和地上部分的干重总和)分别为 12134.10、8552.25、5336.55、3816.75 和 694.05 kg/hm<sup>2</sup>,与稻田 CH<sub>4</sub> 排放顺序一致,这可能是造成各处理间 CH<sub>4</sub> 排放差异的主要原因。

土壤的 N<sub>2</sub>O 主要是由土壤微生物的硝化和反硝化过程所产生。作物种类不同,土壤 N<sub>2</sub>O 的排放量也不同。陈书涛等<sup>[27]</sup>研究表明,作物类型显著影响农田 N<sub>2</sub>O 排放,种植作物促进了农田生态系统 N<sub>2</sub>O 的排放。李虎等<sup>[28]</sup>研究表明,耕作土壤比免耕土壤能产生和排放更多的 N<sub>2</sub>O,采用免耕 N<sub>2</sub>O 排放量减少 5.2%。封克等<sup>[29]</sup>认为,机械搅动可在短期内增加 N<sub>2</sub>O 的排放。本研究中,在冬季作物的各个生长阶段,各处理均于 2009 年 12 月 1 日出现一个 N<sub>2</sub>O 排放高峰,这可能是由于 11 月 25 日对各种冬季作物进行追施尿素所致;2010 年 2 月 9 日,免耕直播黑麦草、翻耕移栽油菜和免耕直播油菜稻田均出现了一个 N<sub>2</sub>O 排放高峰,这可能是由于 2 月 5 日对翻耕移栽油菜和免耕直播油菜追施了尿素、黑麦草进行第 1 次刈割后追施尿素所致;3 月 12 日,免耕直播黑麦草稻田又出现一个 N<sub>2</sub>O 排放高峰,这可能是由于 3 月 7 日对黑麦草进行第 2 次刈割后施用尿素所致。在冬季作物生长期,稻田出现不同的 N<sub>2</sub>O 排放高峰,这可能是每次对不同冬季作物施用氮肥(尿素)后为土壤硝化及反硝化的进行提供了丰富的氮素基础,使稻田释放出大量的 N<sub>2</sub>O,这与 Zou 等<sup>[30]</sup>研究结论一致。不同处理稻田 N<sub>2</sub>O 平均排放通量和总排放量均表现为翻耕移栽油菜>免耕直播黑麦草>免耕直播油菜>免耕直播紫云英>冬闲,这可能与冬季作物播种或移栽前稻田的耕作方式、不同冬季作物植株的生长发育、生物学特性及氮肥施用有关。在冬季作物各生长发育阶段,翻耕移栽油菜稻田 N<sub>2</sub>O 排放量为最大,大于其它处理,这可能是由于翻耕改变了土壤结构和通透性,促进了土壤硝化和反硝化过程;同时,采用育苗移栽,移栽至大田后能迅速恢复生长,植株生理代谢旺盛,且在全生育期追施两次氮肥,增加了稻田 N<sub>2</sub>O 排放;免耕直播油菜和黑麦草采用免耕直播,在其生育期追施了两次氮肥,促进了稻田部分 N<sub>2</sub>O 排放,受播种前耕作方式和植株生长的影响,其排放量低于翻耕移栽油菜;紫云英由于采用免耕直播的方式,植株长势较弱,虽有部分 N<sub>2</sub>O 排放,但其排放量低于其它处理。冬季作物在生长后期,各处理稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量均大于生长前期,这可能是由于气温逐渐增加,有利于土壤微生物的活动、冬季作物根系和地上部分生理活动的增强,从而促进了稻田 N<sub>2</sub>O 排放,这与 Hara 等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。在本试验中,晚稻收获后,水稻秸秆全部移至稻田外后种植冬季作物,稻田冬闲期间无稻草覆盖,CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放受秸秆还田的影响较少,耕作措施和作物的生理活动是造成各处理 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放差异的主要原因。

### 3.2 冬季覆盖作物对综合温室效应的影响

本研究的各处理中,翻耕移栽油菜处理的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合温室效应最大,免耕直播黑麦草和免耕直播油菜次之,免耕直播紫云英最低,这与不同处理稻田 CH<sub>4</sub> 的平均排放通量表现一致;与不同处理稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量表现略有差异,这可能是在播种和移栽前稻田采用不同的耕作方式、冬季作物在不同生育时期的生长速度变化及各时期追施肥料原因所致。冬季作物整个生长期,各处理间 GWP 存在极显著差异,这可能与各处理稻田的耕作方式、冬季作物的生长速度及追施肥料用量的差异等因素有关。考虑到既要提高稻田全年综合生产能力和经济效益,又要减少稻田温室气体的排放,建议在长江中下游双季稻区可因地制宜地发展免耕直播紫云英-双季稻、免耕直播油菜-双季稻和免耕直播黑麦草-双季稻。本文仅针对 4 种不同冬季覆盖作物在其生长季节内稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的温室效应总和进行了初步分析比较,未综合考虑当地的实际生产情况,特别是将不同冬季覆盖作物还田后对水稻的生物学和经济学产量等方面的影响,尚需深入研究。

本文在相应肥水措施条件下,只对 4 种不同冬季覆盖作物在其生长季节内稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放影响进行了初步探讨,尚需对影响稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的相关因素作进一步研究。

## 4 结论

不同冬季覆盖作物对冬闲期稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放具有明显的影响,与冬闲稻田相比,种植冬季作物促进了稻田生态系统 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放。在冬季作物生长期,各处理稻田 CH<sub>4</sub> 平均排放通量和总排放量均表现为翻耕移栽油菜>免耕直播黑麦草>免耕直播油菜>免耕直播紫云英>冬闲,这可能与不同冬季作物的生长及生理活动强弱、生物产量的差异有关;同时,受各处理播种和移栽前稻田所采用的不同耕作方式、冬季作物植

株的生长速度变化及生物学特性的影响,不同处理稻田  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量和总排放量均表现为翻耕移栽油菜>免耕直播黑麦草>免耕直播油菜>免耕直播紫云英>冬闲。

种植冬季作物种类的不同与其对综合温室效应的影响关系密切。在不同的冬季作物,受稻田不同的耕作方式、植株生长及肥料等因素的综合影响,翻耕移栽油菜处理的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  综合温室效应最大,免耕直播黑麦草和免耕直播油菜次之,免耕直播紫云英最低。

#### References:

- [ 1 ] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India. *Chemosphere*, 2003, 51(3): 181-195.
- [ 2 ] Bhatia A, Pathak H, Jain N, Singh P K, Singh A K. Global warming potential of manure amended soils under rice-wheat system in the Indo-Gangetic plains. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(37): 6976-6984.
- [ 3 ] Vergé X P C, De Kimpe C, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2/4): 255-269.
- [ 4 ] Tian G M, He Y F, Li Y X. Effect of water and fertilization management on emission of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in paddy soil. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(3): 294-298.
- [ 5 ] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Zheng H. Researches on the greenhouse gas leakage and net mitigation potentials of soil carbon sequestration measures in croplands. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4993-5006.
- [ 6 ] Matthews R B, Wassmann R, Knox J W, Buendia L V. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia. IV. Upscaling to national levels. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 201-217.
- [ 7 ] Minami K, Neue H U. Rice paddies as a methane source. *Climatic Change*, 1994, 27(1): 13-26.
- [ 8 ] Cai Z C, Kang G D, Tsuruta H, Mosier A. Estimate of  $\text{CH}_4$  emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 66-71.
- [ 9 ] Xing G X.  $\text{N}_2\text{O}$  emission from cropland in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2/3): 249-254.
- [ 10 ] Liu H, Zhao P, Sun G C, Lin Y B, Rao X Q, Wang Y S. Characteristics of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from winter-fallowed paddy fields in hilly area of South China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 57-62.
- [ 11 ] Hu L F, Li L, Chen F, Ye T L, Yang G L. Effect of different tillage on methane emissions in paddy field. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1216-1219.
- [ 12 ] Rittera W F, Scarborough R W, Chimsida A E M. Winter cover crops as a best management practice for reducing nitrogen leaching. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 34(1/2): 1-15.
- [ 13 ] Hermawan B, Bomke A A. Effects of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation. *Soil and Tillage Research*, 1997, 44(1/2): 109-120.
- [ 14 ] Yin C M, Xie X L, Wang K R. Ecological effect of straw mulch on wintry fallow paddy. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2162-2168.
- [ 15 ] Qin X B, Li Y E, Liu K Y, Wan Y F. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments. *Transaction of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 143-148.
- [ 16 ] Parashar D C, Gupta P K, Rai J, Sharma R C, Singh N. Effect of soil temperature on methane emission from paddy fields. *Chemosphere*, 1993, 26(1/4): 247-250.
- [ 17 ] Singh J S, Singh S, Raghubanshi A S, Saranath S, Kashyap A K. Methane flux from rice/wheat agroecosystem as affected by crop phenology, fertilization and water level. *Plant and Soil*, 1996, 183(2): 323-327.
- [ 18 ] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. *Biogeochemistry*, 1989, 7(1): 33-53.
- [ 19 ] Kerdchoechuen O. Methane emission in four rice varieties as related to sugars and organic acids of roots and root exudates and biomass yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 108(2): 155-163.
- [ 20 ] Bai X L, Zhang H L, Chen F, Sun G F, Hu Q, Li Y. Tillage effects on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from double cropping paddy field. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 282-289.
- [ 21 ] Oorts K, Mereckx R, Gréhan E, Labreuche J, Nicolardot B. Determinants of annual fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95(1/2): 133-148.
- [ 22 ] Harada H, Kobayashi H, Shindo H. Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: life-cycle inventory analysis. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(5): 668-677.

- [23] Wu F L, Zhang H L, Li L, Chen F, Huang F Q, Xiao X P. Characteristics of CH<sub>4</sub> emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2703-2709.
- [24] Li C F, Cao C G, Wang J P, Zhai Z B, Mei S H. CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Emissions from paddy soils and assessment of carbon budget in different tillage systems. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2482-2488.
- [25] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53(1): 29-39.
- [26] Hutsch B W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 284-292.
- [27] Chen S T, Huang Y, Zheng X H, Chen Y Q. Nitrous oxide emission from cropland and its driving factors under different crop rotations. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2053-2060.
- [28] Li H, Wang L G, Qiu J J. Studies of N<sub>2</sub>O emissions from croplands and strategies for reducing N<sub>2</sub>O emission. *Soils and Fertilizers Sciences China*, 2007, (5): 1-5.
- [29] Feng K, Yin S X. Effects of soil factors on N<sub>2</sub>O formation and emission. *Progress in Soil Science*, 1995, 23(6): 35-40.
- [30] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, Wang Y S. Quantifying direct N<sub>2</sub>O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: dependence on water regime. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(37): 8030-8042.
- [31] O'Hara G W, Daniela R M. Rhizobial denitrification: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(1): 1-9.

#### 参考文献:

- [4] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响. *土壤与环境*, 2002, 11(3): 294-298.
- [5] 逯非, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 郑华. 农田土壤固碳措施的温室气体泄漏和净减排潜力. *生态学报*, 2009, 29(9): 4993-5006.
- [10] 刘惠, 赵平, 孙谷畴, 林永标, 饶兴权, 王跃思. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 57-62.
- [11] 胡立峰, 李琳, 陈阜, 叶桃林, 杨光立. 不同耕作制度对南方稻田甲烷排放的影响. *生态环境*, 2006, 15(6): 1216-1219.
- [14] 尹春梅, 谢小立, 王凯荣. 稻田冬闲期间覆盖稻草的生态效应. *生态学报*, 2009, 29(4): 2162-2168.
- [15] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 万运帆. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 143-148.
- [20] 白小琳, 张海林, 陈阜, 孙国峰, 胡清, 李永. 耕作措施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 排放的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 282-289.
- [23] 伍芬琳, 张海林, 李琳, 陈阜, 黄凤球, 肖小平. 保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应. *中国农业科学*, 2008, 41(9): 2703-2709.
- [24] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 翟中兵, 梅少华. 不同耕作方式下稻田土壤 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放及碳收支估算. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2482-2488.
- [27] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 陈玉泉. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2053-2060.
- [28] 李虎, 王立刚, 邱建军. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放和减排措施的研究进展. *中国土壤与肥料*, 2007, (5): 1-5.
- [29] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素. *土壤学进展*, 1995, 23(6): 35-40.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake ..... CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)

Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets .....  
..... ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)

Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular  
mycorrhizal fungi ..... YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)

Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert  
area ..... CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)

Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks .....  
..... ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)

Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated  
broadleaved mixed forest ..... LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)

Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau,  
China ..... XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)

Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth .....  
..... WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)

Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland .....  
..... HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)

Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants .....  
..... ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)

Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou ...  
..... WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)

Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats .....  
..... ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)

The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature .....  
..... FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)

The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River .....  
..... MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)

Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves .....  
..... HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)

Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission fluxes from double-  
cropping paddy field ..... TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)

Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert .....  
..... ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)

Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir .....  
..... NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)

Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids .....  
..... LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)

Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon  
and nitrogen isotope analysis ..... LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)

Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ..... ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)

Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) .....  
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)

The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* .....  
..... CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)

Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae) .....  
..... ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)

A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island .....  
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)

The carbon footprint of food consumption in Beijing ..... WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)

Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province .....  
..... FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)

A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river  
basin ..... DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)

**Review and Monograph**

A review of the effect of typhoon on forests ..... LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)

Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems .....  
..... ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)

Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species .....  
..... XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)

Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters .....  
..... YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)

Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms .....  
..... LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)

**Discussion**

Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China ..... XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)

**Scientific Note**

Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica .....  
..... LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

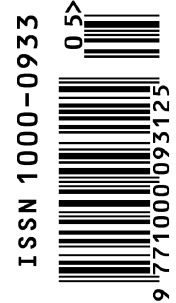
第 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

<b>编 辑</b>	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	<b>Edited by</b>	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
<b>主 编</b>	冯宗炜	<b>Editor-in-chief</b>	FENG Zong-Wei
<b>主 管</b>	中国科学技术协会	<b>Supervised by</b>	China Association for Science and Technology
<b>主 办</b>	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	<b>Sponsored by</b>	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
<b>出 版</b>	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	<b>Published by</b>	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
<b>印 刷</b>	北京北林印刷厂	<b>Printed by</b>	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
<b>发 行</b>	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	<b>Distributed by</b>	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
<b>订 购</b>	全国各地邮局	<b>Domestic</b>	All Local Post Offices in China
<b>国外发行</b>	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	<b>Foreign</b>	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
<b>广告经营 许 可 证</b>	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元