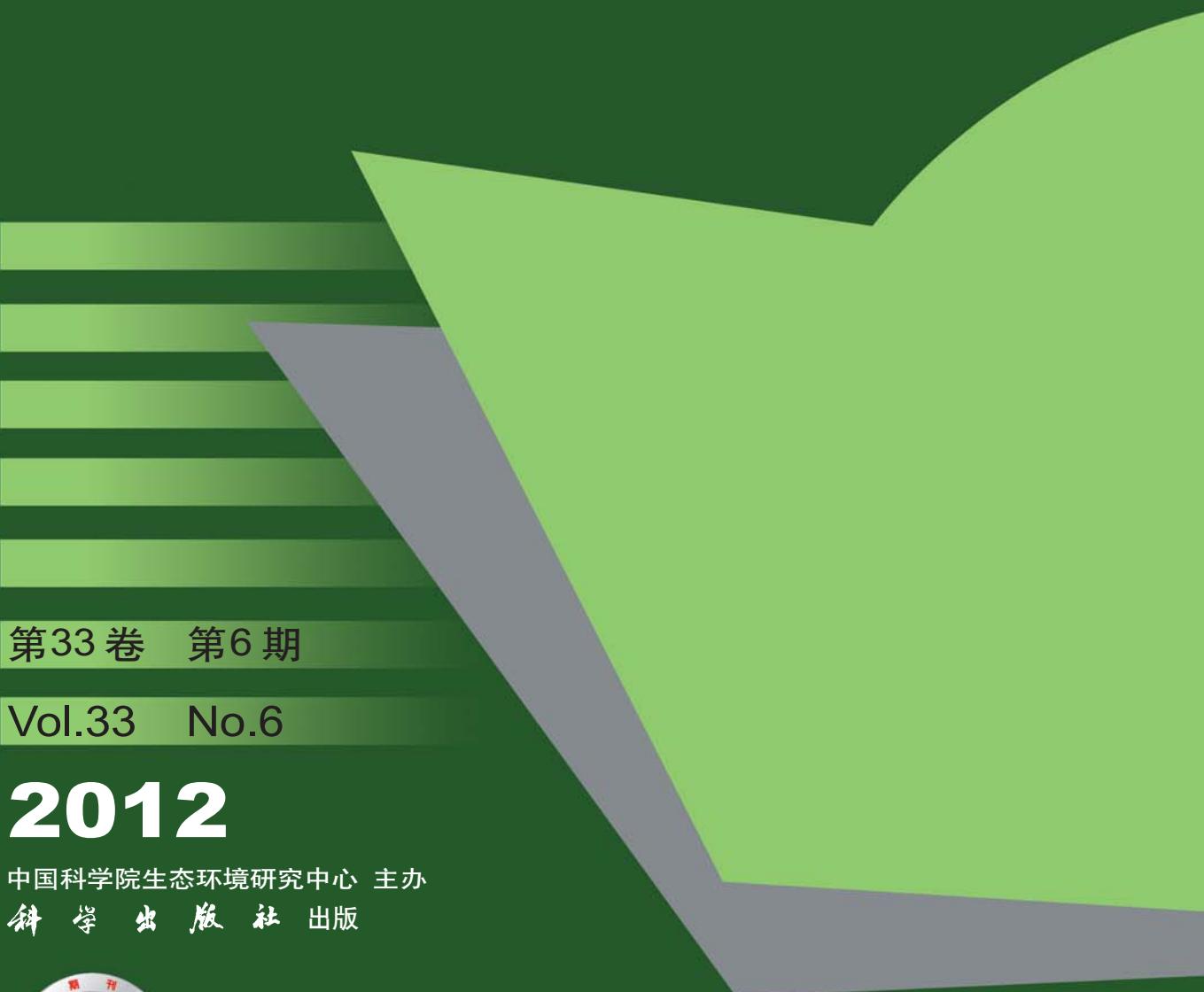


# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE



第33卷 第6期

Vol.33 No.6

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目 次

- 我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 ..... 曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花(1777)  
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 ..... 孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明(1784)  
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 ..... 孟晓云, 于兴修, 冯雪芹(1789)  
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 ..... 陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波(1795)  
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 ..... 邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许政英(1801)  
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 ..... 谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡(1808)  
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 ..... 苏丹, 蔡淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗(1816)  
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 ..... 赵建刚, 乔永民(1823)  
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 ..... 黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈金震, 江志兵(1832)  
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 ..... 王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂(1839)  
滩涂红树林种植-养殖耦合系统水产品中多环芳烃含量水平分析 ..... 陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏(1846)  
四溴双酚A在5种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 ..... 杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青(1852)  
五氯酚对稀有鮈卵黄蛋白原及p53的诱导效应 ..... 熊力, 马永鹏, 张晓峰, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰(1858)  
全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原mRNA水平的影响 ..... 程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明(1865)  
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 ..... 陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉宪(1871)  
MIEC中试实验对二级出水中有机物去除的3DEEM解析 ..... 杨建, 高金华, 常江(1878)  
XDLVO理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 ..... 姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽(1884)  
栅藻LX1在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 ..... 马红芳, 李鑫, 胡洪营, 于茵, 巫寅虎(1891)  
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 ..... 王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超(1897)  
合成氨废水短程反硝化特性研究 ..... 李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军(1902)  
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 ..... 李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌(1907)  
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 ..... 李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌(1913)  
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 ..... 袁光环, 周兴求, 伍健东(1918)  
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 ..... 史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏(1923)  
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 ..... 侯海攀, 潘文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽(1930)  
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 ..... 李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜(1936)  
南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 ..... 张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊(1944)  
深圳市郊区大气中PM<sub>2.5</sub>的特征分析 ..... 戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰(1952)  
餐饮业油烟的颗粒物分析 ..... 谭德生, 尹元成, 刘欣, 戴飞鸿(1958)  
Fe-MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>低温催化还原NO性能研究 ..... 刘荣, 杨志琴(1964)  
自然型氨基酸及其钾盐的CO<sub>2</sub>吸收和再生特性 ..... 晏水平, 陈竟翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林(1971)  
耕作方式对紫色水稻农田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪(1979)  
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 ..... 上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权(1987)  
添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中(1994)  
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 ..... 余立风, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹(2000)  
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 ..... 罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷(2006)  
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 ..... 张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林(2013)  
废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 ..... 施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川(2021)  
铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 ..... 王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保(2028)  
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 ..... 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成(2038)  
增施CO<sub>2</sub>对C3和C4植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 ..... 慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰(2046)  
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 ..... 乔琳, 赵宏, 王建龙(2052)  
A/O MBR处理生活污水效率与菌群多样性的关系 ..... 尹斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉(2061)  
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 ..... 吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮(2068)  
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 ..... 郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌(2075)  
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 ..... 卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明(2083)  
ToxTell生物传感器在Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>冲击活性污泥系统分析中的应用 ..... 王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清(2090)  
环境样品免疫检测基质效应分析与控制 ..... 盛建武, 何苗, 施汉昌(2095)  
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 ..... 张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东(2104)  
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 ..... 吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东(2110)  
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 ..... 韩智勇, 刘丹, 李启彬(2118)  
处理垃圾渗滤液的Fe/C空气阴极MFC性能研究 ..... 唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华(2125)  
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 ..... 龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云(2131)  
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 ..... 陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮(2139)  
《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822, 1857, 1896, 2138)

# 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

张军科<sup>1</sup>, 江长胜<sup>1, 2</sup>, 郝庆菊<sup>1, 2\*</sup>, 唐其文<sup>1</sup>, 程炳红<sup>1</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 陈璐豪<sup>1</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716)

**摘要:** 以位于西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站内 1990 年设立的长期免耕试验田为研究对象, 采用静态暗箱/气相色谱法, 对传统的冬水田平作(CT)及由其改良而成的水旱轮作(CTR)、厢作免耕(NTP)和垄作免耕(NTR)等农田生态系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放进行了连续 1 a 的田间原位观测研究。结果表明, 传统的 CT 处理中,  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  主要排放时期为水稻种植季, 该时期的持续时间仅占全年的 27.1%, 但 2 种温室气体的总排放量分别占全年的 77.6% 和 55.0%; 耕作制度改良后,  $\text{CH}_4$  排放降低而  $\text{N}_2\text{O}$  排放增加。不同耕作方式下  $\text{CH}_4$  的年平均排放通量[以  $\text{CH}_4$  计,  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]为 CT( $2.96 \pm 0.04$ ) > NTR( $1.83 \pm 0.21$ ) > NTP( $1.42 \pm 0.01$ ) > CTR( $0.96 \pm 0.09$ ), CT 处理的  $\text{CH}_4$  排放极显著高于 CTR 和 NTP 处理( $P < 0.01$ ), 显著高于 NTR 处理( $P < 0.05$ );  $\text{N}_2\text{O}$  的年平均排放通量[以  $\text{N}_2\text{O}$  计,  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]依次为 CTR( $123.6 \pm 47.1$ ) > NTR( $115.2 \pm 22.1$ ) > NTP( $100.5 \pm 25.8$ ) > CT( $81.3 \pm 13.5$ ), CTR 处理  $\text{N}_2\text{O}$  的排放显著高于 CT( $P < 0.05$ )。通过对不同时间尺度(20、100 及 500 a)2 种温室气体综合全球增温潜势(global warming potential, GWP)的计算, 可以发现, 改良后的 3 种耕作方式对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的综合 GWP 有一定的减排作用, 无论时间尺度长短, 4 种耕作处理全年所排放的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  所产生的综合 GWP 均为 CT > NTR > NTP > CTR。因此, 耕作方式的改良对紫色水稻土农田生态系统中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  综合 GWP 减排有着明显的效果。

**关键词:** 耕作制度;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ; 全球增温潜势(GWPs); 紫色水稻土

中图分类号: X144; X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1979-08

## Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil

ZHANG Jun-ke<sup>1</sup>, JIANG Chang-sheng<sup>1, 2</sup>, HAO Qing-ju<sup>1, 2</sup>, TANG Qi-wen<sup>1</sup>, CHENG Bing-hong<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, CHEN Lu-hao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-Point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** Using the static opaque chamber method, a field experiment, located in the Key Field Station for Monitoring of Eco-Environment of Purple Soil of the Ministry of Agriculture of China in the farm of Southwest University ( $30^{\circ}26'N$ ,  $106^{\circ}26'E$ ) in Chongqing, was conducted *in situ* for one year to study the effect of different tillage systems on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from agro-ecosystems in a purple paddy soil. In this paper, four tillage treatments including conventional tillage with rice only system (CT), conventional tillage with rotation of rice and rape system (CTR), no-till and plain culture with rotation of rice and rape system (NTP) and no-till and ridge culture with rotation of rice and rape system (NTR) were selected as research objectives. The results showed that the annual  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions were mainly occurred in the rice growing period, and were about 77.6% and 55.0% of the total annual of them emitted from this period. The total annual  $\text{CH}_4$  under CT was higher than that of other treatments. The annual average flux of  $\text{CH}_4$  [ $\text{CH}_4$ ,  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] order was CT ( $2.96 \pm 0.04$ ) > NTR ( $1.83 \pm 0.21$ ) > NTP ( $1.42 \pm 0.01$ ) > CTR ( $0.96 \pm 0.09$ ); the annual average flux of  $\text{N}_2\text{O}$  [ $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] order was CTR ( $123.6 \pm 47.1$ ) > NTR ( $115.2 \pm 22.1$ ) > NTP ( $100.5 \pm 25.8$ ) > CT ( $81.3 \pm 13.5$ ), and the total annual  $\text{N}_2\text{O}$  under CTR was higher than that of CT. The global warming potentials (GWPs) of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions under different tillage-cropping systems were assessed in an integrated way. The results showed that the integrated GWPs of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission were in the following sequence: CT > NTR > NTP > CTR, and CTR was the best treatment for decrease the integrated GWPs in this area.

**Key words:** tillage-cropping systems;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ; global warming potentials (GWPs); purple paddy rice soil

收稿日期: 2011-08-08; 修订日期: 2011-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40975095, 40805050, 41005069); 西南大学生态学重点学科“211 工程”三期建设项目

作者简介: 张军科(1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农田碳、氮循环, E-mail: xiangdulunyushh@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: haoqingju@163.com

$\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  是大气中仅次于  $\text{CO}_2$  的 2 种重要温室气体, 在 100 a 时间尺度上两者的单分子全球增温潜势(GWP)分别是  $\text{CO}_2$  的 25 和 298 倍, 因自工业化以来在大气中浓度的迅速增加而备受关注<sup>[1]</sup>. 许多研究指出, 稻田是大气  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的重要来源<sup>[2, 3]</sup>, 而有报道表明我国西南地区广泛分布的冬水田  $\text{CH}_4$  排放速率在全国乃至世界上已有的稻田  $\text{CH}_4$  排放速率中是最高的<sup>[4, 5]</sup>, 虽然其面积只占我国稻田面积的 12%, 但  $\text{CH}_4$  排放却占全国稻田  $\text{CH}_4$  总排放量的 45%<sup>[6]</sup>.

近年来, 随着人们对传统的冬水田年产量低、人力耗费高等缺点的认识, 一些较为新型的耕作方式逐渐受到推广与应用, 其中免耕和水旱轮作是 2 种主要耕作方式, 前者不但能降低耕作成本、提高水分利用效率、扩大复种面积<sup>[7]</sup>, 还能有效保护土壤免于侵蚀<sup>[8]</sup>, 有助于土壤生物活性的保持和土壤肥力的改善, 增加土壤的固碳能力<sup>[9, 10]</sup>; 而后者在冬季种植了作物, 因而, 相对于传统冬水田, 也能够有效提高年产量.

然而, 我国西南地区冬水田的传统耕作方式改变后, 对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放有什么影响? 目前还没有针对性的研究, 已有的少数研究也仅集中在冬水田改良为水旱轮作后  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[11, 12]</sup>. 本研究以 1990 年设立的长期免耕试验田为对象, 对传统冬水田平作和由冬水田改良为水旱轮作、厢作免

耕、垄作免耕等耕作制度后  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放进行了系统分析.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

稻田长期免耕定位试验点始于 1990 年, 设在西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站内, 该站位于西南大学实验农场, 位处东经 106°26', 北纬 30°26', 海拔 230 m, 年平均温度与降雨量分别为 18.3°C 和 1 150.4 mm. 主要降雨分布在 5~9 月, 年均日照为 1 276.7 h, 年均无霜期为 334 d. 土壤为紫色砂泥岩母质上发育的中性紫色水稻土, 其基本理化性质为: pH 7.1, 有机质 23.1 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 1.7 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.8 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾 22.7 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 120.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷 7.5 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 71.1 mg·kg<sup>-1</sup> 以及黏粒含量为 144.2 g·kg<sup>-1</sup>.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

本试验共设 4 个处理(表 1), 3 次重复, 共 12 个小区, 每试验小区面积为 20 m<sup>2</sup>, 所有小区为随机区组排列. 各处理的施肥量均为: N 125 kg·hm<sup>-2</sup>(尿素); P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg·hm<sup>-2</sup> (过磷酸钙); K<sub>2</sub>O 75 kg·hm<sup>-2</sup> (氯化钾). 每年油菜和水稻的施肥都是过磷酸钙作底肥一次施用; 尿素用量的 2/3 作底肥, 1/3 作追肥; 氯化钾底肥和追肥各半.

表 1 试验处理描述

Table 1 Description of experimental treatments

| 耕作方式  | 简称  | 种植方式   | 管理方式  |
|-------|-----|--------|---|
| 冬水田平作 | CT  | 中稻-冬水田 | 是当地传统的耕作方式, 每年三犁三耙翻耕植稻, 水稻收获后灌冬水. 残茬还田, 还田量为: 稻茬 2 748.0 ~ 3 301.5 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 杂草 1 912.5 ~ 3 154.5 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 总还田量为 4 660.5 ~ 6 456.5 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>   |
| 水旱轮作  | CTR | 中稻-油菜  | 翻耕种植水稻和油菜, 残茬还田量为: 稻茬 2 697.0 ~ 3 532.5 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 油菜残茬 768.0 ~ 987.0 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 杂草 6 217.5 ~ 8 004.0 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 总还田量为 9 682.5 ~ 12 523.5 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>                                    |
| 厢作免耕  | NTP | 中稻-油菜  | 全年免耕, 厢宽 85 cm, 沟宽 35 cm, 沟深 35 cm, 每小区 2 厢, 残茬还田量为: 稻茬 3 562.5 ~ 4 024.5 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 油菜残茬 742.5 ~ 940.5 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 杂草 8 746.5 ~ 10 011.0 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> , 总还田量 13 051.5 ~ 14 976.0 kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> |
| 垄作免耕  | NTR | 中稻-油菜  | 垄顶宽 25 cm, 沟宽 30 cm, 沟深 35 cm, 每小区作 5 垄, 全年不翻耕, 稻茬覆盖, 种植油菜, 稻茬、油菜残茬和杂草还田量同 NTP 处理   |

#### 1.2.2 气样采集与分析

本试验中气样采集利用静态暗箱法, 箱体均设计成分节组合式标准箱, 由顶箱、延长箱和底座组成. 顶箱和延长箱(尺寸都为长 50 cm、宽 50 cm、高

50 cm) 均由不锈钢制成, 外覆绝热材料; 当植株生长较高时, 可适时加延长箱. 顶箱上部有 2 个轴流扇, 用于混合箱内气体, 侧面安装有电源插头和气体样品接口. 底座(长 50 cm、宽 50 cm、高 20 cm) 由不

锈钢制成,上端有深3 cm、宽2 cm的密封水槽。采样时将顶箱或延长箱罩在底座上,用水密封。

采样频率为每周一次,每次控制在当天09:00~11:00间进行。扣箱后立刻用60 mL注射器采集第1次样品,每隔10 min取样1次,罩箱时间为30 min,共取4次样品,样品采集后分别转入20 mL的血清瓶中。为了尽量减少扰动,采样时通过插入采样箱内的F46采气管线站在离采样箱2 m外的离水面40 cm高的木桥上进行。采样的同时,利用JM624便携式测温表(天津立文电子有限公司生产),分别测量地下5 cm处温度、地表温度和箱内空气温度。

气样分析采用日本岛津GC-2014气相色谱仪进行,进样量为1 mL,  $\text{CH}_4$  用FID检测器,  $\text{N}_2\text{O}$  用ECD检测器。标准气体由中国计量科学研究院提供(浓度分别为 $\text{CH}_4 10.3 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和  $\text{N}_2\text{O} 407 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。根据4个气样浓度随采样时间的变化率,参照文献[13]方法计算排放通量。通过内插累加求得全年 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量和平均排放通量。

表2 不同时期CT处理 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放特征

Table 2 Emission of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in different stages under CT treatment

| 观测阶段   | 时间<br>/d | 种植<br>模式 | 采样<br>次数 | 平均排放通量<br>(以 $\text{CH}_4$ 计)<br>$/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ | 排放量<br>(以 $\text{CH}_4$ 计)<br>$/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ | 平均排放通量<br>(以 $\text{N}_2\text{O}$ 计)<br>$/\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ | 排放量<br>(以 $\text{N}_2\text{O}$ 计)<br>$/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ |
|--|----------|----------|----------|--|---|---|--|
| 休闲期(2009-10-30~2010-05-10、<br>2010-08-16~2010-10-29) | 266      | 休闲       | 39       | $0.91 \pm 0.20$  | $58.1 \pm 12.8$   | $50.4 \pm 6.7$  | $3.22 \pm 0.43$  |
| 水稻季(2010-05-11~2010-08-15)                           | 99       | 水稻       | 15       | $8.45 \pm 0.93$  | $200.7 \pm 22.1$  | $165.5 \pm 6.3$   | $3.93 \pm 0.15$  |

$\text{CH}_4$  在水稻季的集中排放主要是因为:①温度的差异。西南地区冬水田水稻生长季处于高温的夏秋季节,而休闲期则主要是在冬季。已有研究报道指出,在一定温度范围内,产 $\text{CH}_4$  菌随着温度的升高活性增强,并最终引起 $\text{CH}_4$  的加速排放;其次,温度可以通过影响水稻的呼吸和蒸腾作用而影响水稻植株对 $\text{CH}_4$  的传输,进而影响 $\text{CH}_4$  的排放<sup>[14]</sup>;再次,温度升高也能使土壤中 $\text{CH}_4$  气体通过水层的扩散率加快,减少了稻田 $\text{CH}_4$  的再氧化<sup>[15]</sup>。②水稻植株对农田中 $\text{CH}_4$  的排放的贡献。一方面,植株是稻田 $\text{CH}_4$  排放的重要通道,在整个水稻生长期通过植株排放的 $\text{CH}_4$  高达全季 $\text{CH}_4$  总排放量的90%<sup>[14]</sup>;另一方面,水稻植株会为产甲烷菌提供更多碳源,从而刺激稻田 $\text{CH}_4$  的产生与排放。

### 2.1.2 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放特征

表2中对CT处理水稻种植季和休闲期农田

### 1.2.3 统计分析

采用Excel 2003软件作图。试验数据统计分析采用SPSS 16.0软件,用ANOVA (analysis of variance, LSD检验法)进行方差分析,比较各处理间差异显著性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 传统冬水田平作制度下农田生态系统 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放特征

#### 2.1.1 $\text{CH}_4$ 的排放特征

表2中对当地传统的CT处理下水稻种植季和水稻收获后的休闲期农田 $\text{CH}_4$  平均排放通量和排放总量进行了计算。可以看出,全年CT处理中的 $\text{CH}_4$  排放主要集中在水稻种植季,虽然水稻季生长时间只占全年的27.1%,但该阶段 $\text{CH}_4$  排放量占全年总排放量的77.6%,而持续时间较长的休闲期的 $\text{CH}_4$  排放量占全年总排放量只有22.4%,这与江长胜等<sup>[11]</sup>的研究结果相似,他们通过对川中丘陵地区冬水田 $\text{CH}_4$  排放的研究发现,休闲期 $\text{CH}_4$  排放量在2003和2004年分别占全年总 $\text{CH}_4$  排放量的13.4%和32.9%。

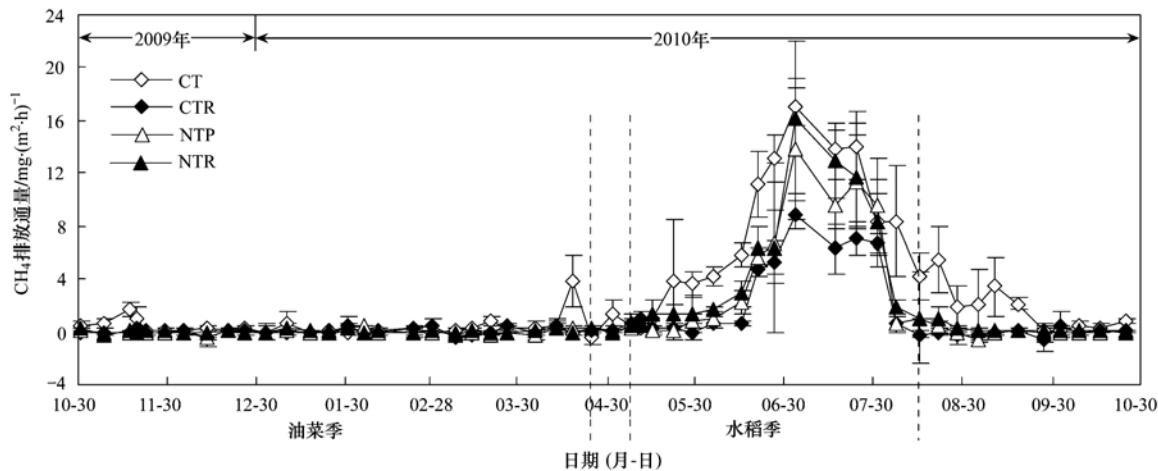
$\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量和总量进行了计算。从中可以看出,与 $\text{CH}_4$  的排放规律相似, $\text{N}_2\text{O}$  的排放也主要集中在水稻种植期,虽然水稻期的时间只占总采样期的27.1%,但其总排放量占总排放量的55.0%。

水稻季 $\text{N}_2\text{O}$  的平均排放通量是休闲期的3倍左右,可能是因为:①水稻季肥料的施用对土壤中 $\text{N}_2\text{O}$  的释放有着决定性作用,这已为诸多学者的研究所证实<sup>[3,16]</sup>。②温度差异。土壤中 $\text{N}_2\text{O}$  的释放主要是源于硝化与反硝化2个过程,而参与这些过程的微生物在很大程度上都受到温度的控制。Song等<sup>[17]</sup>研究了免耕方式下温度与 $\text{N}_2\text{O}$  释放的关系,他们的研究得出免耕方式下的 $Q_{10}$ 为1.30~2.91。在本试验中,冬季休闲期地下5 cm处平均温度为10.8°C,而水稻季地下5 cm处平均温度为23°C,因此,水稻生长季这种较高的温度对土壤中 $\text{N}_2\text{O}$  的排放有促进作用。

本研究发现, CT 处理休闲期  $N_2O$  排放占全年总排放量的近一半, 为 45.0%, 这一数值与前人的研究报道有一定差异。王毅勇等<sup>[18]</sup>在东北三江平原的研究认为水稻生长期是  $N_2O$  排放的主要时期, 休闲期  $N_2O$  排放显著减少, 冬季休闲期  $N_2O$  排放极其微弱, 几乎为零, 与该研究相比, 本研究中 CT 处理在冬季休闲期  $N_2O$  排放占较大比例, 其主要原因可能是: 在冬季休闲时, 虽然没有种植任何作物, 但是该处理中仍生长了大量的杂草以及刚进入休闲时农田中生长出了大量的再生稻, 这些植物对  $N_2O$  的排放有着重要的作用; 同时与北方地区的研究相比<sup>[18]</sup>, 本试验地处亚热带, 在冬季休闲期的温度较高, 试验期间的最低温度也大于 4℃, 因此温度对其的限制作用相对较小。

## 2.2 不同耕作方式下农田生态系统 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的排放特征

### 2.2.1 $CH_4$ 的排放特征



图中虚线用来分割不同的种植或休闲季节, 除标注的油菜季和水稻季外的两段时间分别为油菜和水稻收割后的休闲季, 下同

图 1 不同耕作制度农田  $CH_4$  排放通量(2009-10-30 ~ 2010-10-29)

Fig. 1 Seasonal variation of  $CH_4$  fluxes from cropland under different tillage systems

通过单因素方差分析可以得知, 在整个观测时期内, CT 处理的  $CH_4$  排放极显著高于 CTR 和 NTP 处理 ( $P < 0.01$ ), 显著高于 NTR ( $P < 0.05$ ), 而 CTR、NTP 和 NTR 处理之间没有显著差异, 各处理全年的平均排放通量 [ $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ] 为 CT ( $2.96 \pm 0.04$ ) > NTR ( $1.83 \pm 0.21$ ) > NTP ( $1.42 \pm 0.01$ ) > CTR ( $0.96 \pm 0.09$ )。

分别将油菜和水稻季单独比较可以发现, 在油菜季, CT 处理的  $CH_4$  排放极显著高于其他 3 种处理 ( $P < 0.01$ ), 各处理的平均排放通量 [ $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ] 为 CT ( $0.314 \pm 0.154$ ) > CTR ( $0.047 \pm 0.028$ ) > NTR ( $0.017 \pm 0.004$ ) > NTP ( $-0.036 \pm$

图 1 是整个观测时期内不同耕作处理下农田  $CH_4$  通量的季节变化动态。可以看出, 几种耕作处理的  $CH_4$  排放规律基本相同, 在油菜季的排放量都很低, 且长期维持在较低水平。主要排放时期为水稻季, 并在抽穗扬花期 (2010-07-03 ~ 2010-07-17) 各处理的  $CH_4$  排放都达到最大值, 这与王毅勇等<sup>[18]</sup>的研究一致, CT、CTR、NTP 和 NTR 处理在该时期出现的最大排放通量分别为  $17.11$ 、 $8.87$ 、 $13.85$  和  $16.22\ mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ , 这一排放通量范围与韩广轩等<sup>[12]</sup>的研究结果相似。在这一时期出现最大通量主要是因为, 这段时期温度较高, 水稻生长旺盛, 植物体具有最强的传输能力<sup>[14]</sup>, 同时微生物活动活跃, 根系分泌物及所施的化肥为甲烷菌的活动提供了碳源, 加之适宜的温度和淹水厌氧条件等多方面协同作用, 使  $CH_4$  排放达到高峰。而在该时期结束后的灌浆完熟期 (2010-07-18 ~ 2010-08-15), 排放通量逐渐降低, 在水稻收割后, 排放降到最低。

$0.003$ ), 可见 NTP 处理在该时期总体呈现为对  $CH_4$  的吸收; 在水稻季, CT 处理极显著高于 CTR 和 NTP ( $P < 0.01$ ), 显著高于 NTR ( $P < 0.05$ ), 各处理的平均排放通量 [ $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ] 为 CT ( $8.45 \pm 0.93$ ) > NTR ( $6.02 \pm 0.655$ ) > NTP ( $4.88 \pm 0.58$ ) > CTR ( $3.23 \pm 0.22$ ), 这与 Li 等<sup>[19]</sup>的研究结果相似, 其研究了双季稻农田在早稻采用传统耕作, 而晚稻分别采用传统耕作和免耕时  $CH_4$  的排放情况, 结果发现, 晚稻采用免耕时, 农田中  $CH_4$  的排放显著减少 ( $P < 0.05$ ), 传统耕作和免耕平均排放分别为  $6.57$  和  $3.04\ g \cdot m^{-2}$ , 因此, 免耕方式的应用对  $CH_4$  的减排有着重要的作用<sup>[20]</sup>。Shao 等<sup>[21]</sup>研究了传统的冬

水田(水稻)、垄免(水稻)、垄免(水稻-小麦)和轮作(水稻-小麦)这4种处理下  $\text{CH}_4$  的排放情况,结果发现,采用免耕和轮作后,农田中  $\text{CH}_4$  的排放有着显著降低,后3种处理中  $\text{CH}_4$  的累积排放分别只有传统冬水田的33.53%、63.30%和65.73%。

由此可见,将冬水田改为CTR、NTP和NTR后,对  $\text{CH}_4$  的减排具有积极的作用。这主要是因为,改良后的几种方式在水稻收获后都排水种植油菜,此时,土壤暴露在空气中,土壤氧化还原电位提高,一些还原性物质通过各种氧化过程而被转化为氧化态,土壤连续干燥的时间越长,这些还原物质的氧化就越彻底,第二年淹水还原这些物质所需的时间也就越长,土壤Eh下降到适合产甲烷菌活动范围的时间越长,从而延缓了稻田  $\text{CH}_4$  的排放;相反,长时间淹水土壤,土壤的氧化还原状况已经适合产甲烷菌生命活动的需要,只要有合适的温度、有机基质和其它营养物质的供应即可产生  $\text{CH}_4$ <sup>[22]</sup>;而在水稻季,NTP和NTR处理只有厢沟和垄沟内有水,仍有部分土壤高出水面保持干燥,从而缺乏有利于  $\text{CH}_4$  产生的厌氧条件,同时,免耕可以维持土壤的原状结

构,有利于提高  $\text{CH}_4$  氧化菌的氧化能力,从而降低了  $\text{CH}_4$  的排放量<sup>[23]</sup>,因而其中  $\text{CH}_4$  排放要低于CT处理。

## 2.2.2 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放特征

图2是不同耕作处理下  $\text{N}_2\text{O}$  通量的季节变化动态。可以看出,在整个观测时期内,几种耕作处理中  $\text{N}_2\text{O}$  的排放都呈现出明显的脉冲排放,这主要是施肥、烤田以及降雨等人为或自然因素引起的。2009年11月28日和2010年5月13日是2次主要的施肥日期,因此在随后的短期内,几种耕作处理都出现了较大的排放量,尤其是11月28的施肥,使CTR、NTP都出现了排放的峰值,NTR也出现了一个小的排放峰值;另一方面,这2个阶段分别处于油菜的苗期(2009-10-30~2010-01-09)和水稻的返青期(2010-05-11~2010-05-22),作物的植株较小,对施入农田中的肥料极为有限,因此大量的肥料会转换为  $\text{N}_2\text{O}$  进入大气;2010年7月30日,对农田进行了烤田,可以看出在烤田后短期内,几种耕作处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放波动幅度加大,都出现了几次明显的排放高值。

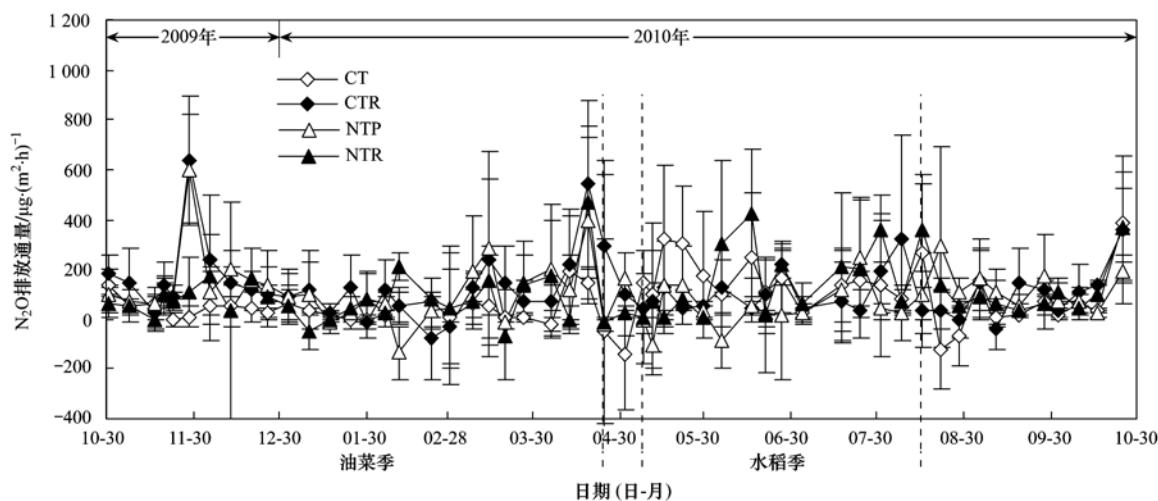


图2 不同耕作制度农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量(2009-10-30~2010-10-29)

Fig. 2 Seasonal variation in  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from cropland under different tillage systems

通过单因素方差分析可以得知,在整个观测时期内,CTR处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量显著高于CT处理( $P < 0.05$ ),各处理全年的平均排放通量[ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]为CTR( $123.6 \pm 47.1$ )>NTR( $115.2 \pm 22.1$ )>NTP( $100.5 \pm 25.8$ )>CT( $81.3 \pm 13.5$ )。

分别将油菜季和水稻季单独比较可以发现,在油菜季,CT极显著低于CTR( $P < 0.01$ ),显著低于NTP处理( $P < 0.05$ ),各耕作处理的平均排放通量

[ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]为CTR( $136.2 \pm 56.3$ )>NTP( $119.1 \pm 43.6$ )>NTR( $88.3 \pm 32.6$ )>CT( $42.8 \pm 15.6$ );而在水稻季,NTP极显著低于CT( $P < 0.01$ ),显著低于NTR( $P < 0.05$ ),各耕作处理的平均排放通量[ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]为CT( $165.5 \pm 6.3$ )>NTR( $161.8 \pm 16.4$ )>CTR( $112.1 \pm 13.9$ )>NTP( $56.5 \pm 8.1$ )。因此,在水稻种植期间,NTR对土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  排放没有抑制作用,而NTP对抑制土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  的排放有着很明显的作用;同时可以看出,CT

处理在油菜季的排放最低,而在水稻季的排放最高。就整个观测时期而言,免耕和水旱轮作对农田中  $N_2O$  排放有着明显的促进作用,这与许多学者的研究结果一致。Zhang 等<sup>[24]</sup>对比了免耕和传统施肥条件下农田中  $N_2O$  的排放,结果发现在 2 个生长季中,免耕方式下  $N_2O$  的排放比传统耕作分别高了 32% 和 47%,可能是因为,免耕农田中较高的土壤有机碳和更强的反硝化作用。江长胜等<sup>[11]</sup>对川中丘陵地区不同耕作制度下稻田 2003~2004 年  $N_2O$  的排放研究发现,水稻~小麦轮作和水稻~油菜轮作下的  $N_2O$  排放量分别是传统冬水田的 3.7 和 4.5 倍。

本试验中,改良后的几种耕作方式农田  $N_2O$  的排放都有所增加,主要原因可能是:①改良后的耕作土壤保持干旱的时间要长于 CT 处理,尤其是冬季,CT 一直淹水,而其他处理则处于土壤干湿交替状态,有利于  $N_2O$  产生和排放;②农田中  $N_2O$  的产生主要是好养条件时的硝化和厌氧时的反硝化过程产生,其中后者为产  $N_2O$  的主要过程<sup>[25]</sup>,而免耕方式的应用增加了土壤容重,使土壤的通气条件变差,由

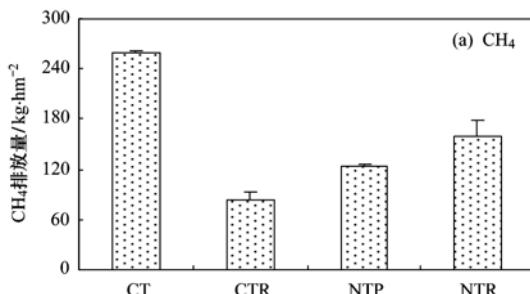


图 3 不同耕作处理  $CH_4$  和  $N_2O$  的年排放量

Fig. 3 Annual total  $CH_4$  and  $N_2O$  emission under different tillage systems

$N_2O$  的全年排放量 ( $kg \cdot hm^{-2}$ ) 依次为 CTR ( $10.83 \pm 4.13$ ) > NTR ( $10.09 \pm 1.94$ ) > NTP ( $8.80 \pm 2.26$ ) > CT ( $7.12 \pm 1.18$ ) [图 3(b)],因此,改良后的几种耕作方式中  $N_2O$  的排放都有不同程度的增加。

通过对比不同耕作制度下  $CH_4$  和  $N_2O$  的排放顺序,可以看出,尽管 CTR 处理中  $N_2O$  的排放总量最高,但有效地降低了  $CH_4$  的排放,且该处理中 2 种温室气体排放的此消彼长的关系最为明显,主要是因为与 2 种温室气体产生环境差异有关,如  $O_2$  供应和水分等条件,这与其他学者的研究结果相似<sup>[11]</sup>。

#### 2.4 不同耕作方式下 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的全球增温潜势 (GWP)

此形成的厌氧环境极为有利于施入农田中氮肥的反硝化产  $N_2O$  过程<sup>[20]</sup>。③CT 处理在冬季休田,不种植任何作物,而其他 3 种处理在冬季都种植了油菜,其间施肥所引起的  $N_2O$  排放不容忽视;同时,免耕中  $N_2O$  的排放明显高于 CT 还可能是因为这种耕作方式下施肥方式发生了变化,在免耕农田中肥料通常施加在土壤表层,没有与土壤进行混合,因此在大量的肥料就会暴露在空气与阳光下,很容易发生硝化反应生成  $N_2O$ ,进入大气<sup>[24]</sup>。

#### 2.3 不同耕作方式下 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的年排放量

图 3 是对全年 4 种耕作方式下农田  $CH_4$  和  $N_2O$  排放总量的计算结果。由图 3(a)可以看出,CT 处理的  $CH_4$  排放远高于其他 3 种处理,全年排放量 ( $kg \cdot hm^{-2}$ ) 依次为 CT ( $259.3 \pm 35.0$ ) > NTR ( $160.3 \pm 18.4$ ) > NTP ( $124.4 \pm 0.9$ ) > CTR ( $84.1 \pm 7.9$ )。由此可见,改良后的 3 种耕作处理都有效的降低了农田中  $CH_4$  的排放,其中 CTR 的减排作用最为明显,排放量仅为传统 CT 处理的  $1/3$  左右,CTR 对  $CH_4$  的这种减排作用与许多对相似地区的研究结果一致<sup>[11,12]</sup>。

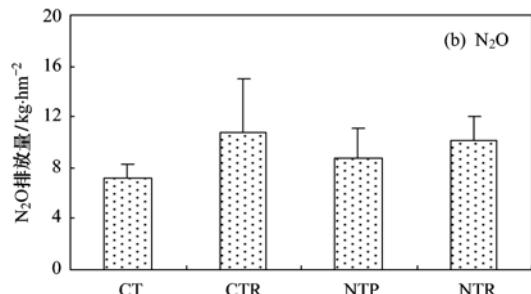


Fig. 3 Annual total  $CH_4$  and  $N_2O$  emission under different tillage systems

根据 IPCC 报告提供的数据,在 20 a 时间尺度上,单位质量的  $CH_4$  和  $N_2O$  的 GWP 分别为  $CO_2$  的 72 和 289 倍;100 a 时间尺度上,分别对应为  $CO_2$  的 25 倍和 298 倍;500 a 时间尺度上,分别对应为  $CO_2$  的 7.6 倍和 153 倍<sup>[1]</sup>。表 3 是在整个观测时期内,不同耕作制度下所排放的  $CH_4$  和  $N_2O$  换算为等 GWP 的平均  $CO_2$  量。

对 2 种温室气体在不同时间尺度上 GWP 的计算可以看出(表 3), $CH_4$  对全球变暖的贡献明显大于  $N_2O$ ,这与 Ahmad 等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,该学者还同时研究了  $CO_2$  的 GWP,发现其值位于  $CH_4$  和  $N_2O$  之间,顺序为  $CH_4 > CO_2 > N_2O$ ,这在一定程度上弥补了本研究的不足。

表3 不同耕作制度农田排放的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的 $\text{GWP}(\text{CO}_2 \text{量})/\text{t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ Table 3 Corresponding  $\text{CO}_2$  equivalents of the  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission under different tillage systems/ $\text{t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 

| 耕作方式 | 项目                                 | 时间尺度/a |       |      |
|------|------------------------------------|--------|-------|------|
|      |                                    | 20     | 100   | 500  |
| CT   | $\text{CH}_4$                      | 51.35  | 17.83 | 5.42 |
|      | $\text{N}_2\text{O}$               | 2.04   | 2.10  | 1.08 |
|      | $\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ | 53.39  | 19.93 | 6.50 |
| CTR  | $\text{CH}_4$                      | 16.68  | 5.79  | 1.76 |
|      | $\text{N}_2\text{O}$               | 3.10   | 3.20  | 1.64 |
|      | $\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ | 19.79  | 8.99  | 3.40 |
| NTP  | $\text{CH}_4$                      | 24.70  | 8.58  | 2.61 |
|      | $\text{N}_2\text{O}$               | 2.52   | 2.60  | 1.34 |
|      | $\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ | 27.22  | 11.18 | 3.94 |
| NTR  | $\text{CH}_4$                      | 31.71  | 11.01 | 3.35 |
|      | $\text{N}_2\text{O}$               | 2.89   | 2.98  | 1.53 |
|      | $\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ | 34.60  | 13.99 | 4.88 |

无论时间尺度长短, 4 种耕作处理全年所排放的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  所产生的综合 GWP 都为 CT > NTR > NTP > CTR. 这也与 Ahmad 等<sup>[20]</sup>的研究的结果较为相似, 他计算了 100 a 尺度上 3 种温室气体的 GWP, 发现免耕方式下的 GWP 比传统耕作下降低了 12%, 其值分别为 23.4 和 26.0  $\text{t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ .

4 种耕作处理的年产量 ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 分别为 NTP (10.09) > NTR (9.69) > CTR (9.09) > CT (7.35), 以最短时间尺度即 20 a 计算单位产量 2 种温室气体的 GWP, 可以得知每  $\text{t}$  产量的 GWP [ $\text{t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] 顺序为 CT (7.26) > NTR (3.57) > NTP (2.70) > CTR (2.18). 因此, 改良后的耕作处理不仅促进了粮食的增产增收, 还有效地降低了综合 GWP 和单位产量的 GWP, 其中 CTR 处理的减排综合效果最为明显. 随着时间尺度的增加,  $\text{CH}_4$  的贡献逐渐降低, 而  $\text{N}_2\text{O}$  的贡献逐渐加大. 总体而言, CTR 处理是适合该地区较为有效的减排这 2 种温室气体的最佳耕作方式.

$\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  是仅次于  $\text{CO}_2$  最为重要的 2 种温室气体, 虽然两者在总的温室气体中所占比例低于  $\text{CO}_2$ , 但其增温潜力远大于  $\text{CO}_2$ , 因此其在全球变暖中的作用极为重要. OECD 指出<sup>[26]</sup>, 农业活动是这 2 种温室气体的重要排放源, 对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的贡献率分别为 39% 和 60%. 可见, 如果能合理的对农业进行管理, 这对于未来全球温室气体的减排有着重要的作用. 而耕作方式的变化是农业管理中的重要一环, 它的变化对农田生态系统的温室气体排放带来了巨大影响, 近年来也成为各国学者研究的焦点, 本

研究只是耕作方式影响的一个方面, 其影响的其他方面, 如对农田土壤肥力、土壤水分、氧化还原电位等的影响对整个生态系统也有着重要的意义, 因此, 对于这些重要的影响, 还需要进一步深入研究.

### 3 结论

(1) 我国西南地区紫色水稻土农田中, 传统的 CT 处理下,  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放主要集中在水稻季, 该时期的持续时间仅占全年的 27.1%, 但 2 种温室气体的总排放分别占了全年的 77.6% 和 55.0%.

(2) CT 处理的  $\text{CH}_4$  排放极显著高于 CTR 和 NTP 处理 ( $P < 0.01$ ), 显著高于 NTR ( $P < 0.05$ ), CTR 处理对农田中  $\text{CH}_4$  的减排作用最明显.

(3) 在整个观测时期内, CTR 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放显著高于 CT 处理 ( $P < 0.05$ ); CT 处理在油菜季的排放最低, 而在水稻季的排放最高.

(4) 通过对全年的 2 种温室气体的排放总量计算, 可以得知, CTR 处理在最有效地减排  $\text{CH}_4$  的同时, 明显地促进了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放; 通过对不同时间尺度 2 种温室气体 GWP 的计算可以发现, 改良后的 3 种处理都有一定的减排作用, 其中 CTR 处理减排效果最为明显, 同时耕作方式的改良使得产量有了明显提高.

(5) 然而, 本研究只是针对改良后耕作方式对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放以及产量的影响, 而其他方面的影响还有待进一步研究.

### 参考文献:

- [1] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, (eds.). Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 211-213.
- [2] Ma J, Ma E D, Xu H, et al. Wheat straw management affects  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from rice fields [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(5): 1022-1028.
- [3] Almaraz J J, Mabood F, Zhou X M, et al. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in Southwestern Quebec [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1): 113-119.
- [4] Cai Z C, Tsuruta H, Gao M, et al. Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field [J]. Global Change Biology, 2003, 9(1): 37-45.
- [5] 魏朝富, 高明, 黄勤, 等. 耕种制度对西南地区冬水田甲烷排放的影响 [J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 157-165.
- [6] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展 [J]. 土壤, 1999, 3

- (5) : 266-269.
- [7] Karasov C. Spare the plow, save the soil [J]. Environmental Health Perspectives, 2002, **110**(2) : A75.
- [8] Tullberg J. Reduce soil damage for more sustainable crop production [J]. Nature, 2010, **466**(7309) : 920.
- [9] Carvalho J L N, Cerri C E P, Feigl B J, et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon [J]. Soil & Tillage Research, 2009, **103**(2) : 342-349.
- [10] López-Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment [J]. Soil & Tillage Research, 2009, **104**(2) : 278-284.
- [11] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 [J]. 环境科学, 2006, **27**(2) : 207-213.
- [12] 韩广轩, 朱波, 江长胜, 等. 川中丘陵区稻田甲烷排放及其影响因素 [J]. 农村生态环境, 2005, **21**(1) : 1-6.
- [13] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N<sub>2</sub>O emission from Chinese croplands [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, **18**(2) : GB2018, doi: 10.1029/2003GB002167.
- [14] 王明星. 中国稻田甲烷排放 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 124-128, 142-173.
- [15] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, **35**(5) : 663-669.
- [16] Jassal R S, Black T A, Roy R, et al. Effect of nitrogen fertilization on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes, and soil and bole respiration [J]. Geoderma, 2011, **162**(1-2) : 182-186.
- [17] Song C C, Zhang J B. Effects of soil moisture, temperature, and nitrogen fertilization on soil respiration and nitrous oxide emission during maize growth period in northeast China [J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2009, **59**(2) : 97-106.
- [18] 王毅勇, 陈卫卫, 赵志春, 等. 三江平原寒地稻田CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放特征及排放量估算 [J]. 农业工程学报, 2008, **24**(10) : 170-176.
- [19] Li D M, Liu M Q, Cheng Y H, et al. Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China [J]. Soil & Tillage Research, 2011, **113**(2) : 77-81.
- [20] Ahmad S, Li C F, Dai G Z, et al. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China [J]. Soil & Tillage Research, 2009, **106**(1) : 54-61.
- [21] Shao J A, Huang X X, Gao M, et al. Response of CH<sub>4</sub> emission of paddy fields to land management practices at a microcosmic cultivation scale in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, **17**(4) : 691-698.
- [22] 蔡祖聪, 徐华, 卢维盛, 等. 冬季水分管理方式对稻田CH<sub>4</sub>排放量的影响 [J]. 应用生态学报, 1998, **9**(2) : 171-175.
- [23] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 等. 保护性耕作对农田碳效应影响研究进展 [J]. 中国农业科学, 2009, **42**(12) : 4275-4281.
- [24] Zhang J S, Zhang F P, Yang J H, et al. Emissions of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>, and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, **140**(1-2) : 164-173.
- [25] Mkhabela M S, Madani A, Gordon R, et al. Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure [J]. Soil & Tillage Research, 2008, **98**(2) : 187-199.
- [26] OECD. Environmental indicators for agriculture methods and results [M]. Paris: Executive Summary, 2000. 1-53.

### CONTENTS

|   |  |
|---|--|
| Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China .....  | CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, et al. (1777)          |
| Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China ..... | SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, et al. (1784)           |
| Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunnan Lake Watershed .....  | MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)               |
| Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline .....                                    | CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, et al. (1795)       |
| Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone .....              | DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, et al. (1801)      |
| Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River .....                                 | XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, et al. (1808)    |
| Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland .....            | SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, et al. (1816)           |
| Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China .....   | ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)                         |
| Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea .....                                | HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, et al. (1832)         |
| Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdrawal of Zhe-Min Coastal Current .....   | WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, et al. (1839)  |
| PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System .....                     | CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, et al. (1846)       |
| Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu .....   | YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, et al. (1852)   |
| Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow ( <i>Gobiocypris rarus</i> ) .....                                    | XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, et al. (1858)      |
| Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish ( <i>Brachydanio rerio</i> ) .....                             | CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, et al. (1865)            |
| Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter .....  | TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, et al. (1871)              |
| Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM .....                         | YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)                   |
| Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach: Effect of Calcium Ions .....   | YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, et al. (1884)           |
| Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LXI in Aquaculture Wastewater .....                   | MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, et al. (1891)            |
| Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process .....   | WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, et al. (1897)        |
| Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process .....                                      | LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, et al. (1902)               |
| Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor .....   | LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, et al. (1907)                |
| Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters .....   | LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, et al. (1913)                  |
| Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment .....   | YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)          |
| Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition .....  | SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, et al. (1923)                   |
| Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability .....   | HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, et al. (1930)          |
| Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China .....   | LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, et al. (1936)   |
| Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City .....  | ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, et al. (1944)           |
| Characterization of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in the Suburb of Shenzhen .....   | DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, et al. (1952)                 |
| Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission .....  | TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, et al. (1958)       |
| Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Catalyst .....                                       | LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)                                |
| CO <sub>2</sub> Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt .....  | YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, et al. (1971)    |
| Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil .....                                | ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, et al. (1979)  |
| Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows .....                             | SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, et al. (1987)         |
| Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers .....                  | SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, et al. (1994)              |
| Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production .....                                  | YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, et al. (2000)         |
| Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil .....   | LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, et al. (2006)           |
| Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain .....                               | ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, et al. (2013)      |
| Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings .....  | SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, et al. (2021)         |
| Effect of Cr (VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake .....   | WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, et al. (2028)  |
| Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi .....                                   | YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, et al. (2038) |
| Effect of CO <sub>2</sub> Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant .....                                   | MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, et al. (2046)         |
| Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis .....   | QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)                   |
| Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR .....  | KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montche Leon Monthero, et al. (2061) |
| Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil .....   | WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)                    |
| Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City .....  | HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, et al. (2075)      |
| Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose .....  | BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, et al. (2083)           |
| Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor .....   | WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, et al. (2090)            |
| Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples .....  | SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)                 |
| Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma .....  | ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, et al. (2104)         |
| Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis .....   | WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LIU Sheng-yong, et al. (2110)      |
| Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill .....  | HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)                      |
| Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate .....   | TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, et al. (2125)                 |
| Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis .....                                      | LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, et al. (2131)             |
| Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis .....  | CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, et al. (2139)         |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主编：欧阳自远

副主编：赵景柱 郝吉明 田刚

编委：(按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田刚 田静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄霞  
黄耀 鲍强 潘纲 潘涛 魏复盛

## 环境科学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

|   |   |                                  |                  |  |
|---|---|----------------------------------|------------------|--|
| 主 | 管 | 中国科学院                            | Superintended    | by Chinese Academy of Sciences   |
| 主 | 办 | 中国科学院生态环境研究中心                    | Sponsored        | by Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                     |
| 协 | 办 | (以参加先后为序)                        | Co-Sponsored     | by Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection                                |
|   |   | 北京市环境保护科学研究院                     |                  | School of Environment, Tsinghua University   |
|   |   | 清华大学环境学院                         |                  |  |
| 主 | 编 | 欧阳自远                             | Editor-in -Chief | OUYANG Zi-yuan   |
| 编 | 辑 | 《环境科学》编辑委员会                      | Edited           | by The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE)                                   |
|   |   | 北京市2871信箱(海淀区双清路18号,邮政编码:100085) |                  | P. O. Box 2871, Beijing 100085, China  |
|   |   | 电话:010-62941102,010-62849343     |                  | Tel:010-62941102,010-62849343; Fax:010-62849343  |
|   |   | 传真:010-62849343                  |                  | E-mail:hjkx@rcees.ac.cn  |
|   |   | E-mail:hjkx@rcees.ac.cn          |                  | http://www.hjkx.ac.cn  |
|   |   | http://www.hjkx.ac.cn            |                  |  |
| 出 | 版 | 科学出版社                            | Published        | by Science Press   |
|   |   | 北京东黄城根北街16号                      |                  | 16 Donghuangchenggen North Street,   |
|   |   | 邮政编码:100717                      |                  | Beijing 100717, China  |
| 印 | 刷 | 北京北林印刷厂                          | Printed          | by Beijing Bei Lin Printing House  |
| 装 | 订 |                                  | Distributed      | by Science Press   |
| 发 | 行 | 科学出版社                            |                  | Tel:010-64017032   |
|   |   | 电话:010-64017032                  |                  | E-mail:journal@mail.sciencep.com   |
|   |   | E-mail:journal@mail.sciencep.com |                  |  |
| 订 | 购 | 全国各地邮局                           | Domestic         | All Local Post Offices in China  |
| 购 | 处 | 中国国际图书贸易总公司                      | Foreign          | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China |
| 国 | 外 | (北京399信箱)                        |                  |  |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行