

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

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

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郭伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳苳湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放特征及品种筛选研究

傅志强^{1,2}, 朱华武¹, 陈灿¹, 黄璜^{1,2*}

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 农业部多熟制作物栽培学与耕作学重点开放实验室, 长沙 410128)

摘要: 通过大田小区实验, 采用静止箱-气相色谱法对早晚两季水稻品种 CH_4 与 N_2O 排放通量进行了观测. 结果表明, 早稻 CH_4 排放季节变化呈单峰模式, N_2O 排放呈双峰模式; 晚稻 CH_4 与 N_2O 排放季节变化均呈单峰模式. CH_4 、 N_2O 季节平均排放通量品种间均存在显著差异 ($P < 0.05$). 早稻品种 CH_4 、 N_2O 季节平均排放通量极差分别为 $0.58 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $5.89 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 晚稻为 $4.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $5.70 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 早稻品种温室气体排放的增温潜势、单位产量增温潜势极差分别为 $2.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.097 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 晚稻分别为 $2256 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 增温潜势、单位产量增温潜势比较, 常规稻 > 超级杂交稻 > 杂交稻. 早稻无水稻种植区 CH_4 、 N_2O 季节排放通量分别是水稻种植区的 27.1% ~ 31.8%、33.6% ~ 88.3%; 晚稻分别是 23.8% ~ 28.8%、38.6% ~ 45.3%. 早稻适宜种植品种为陆两优 819、金优 402、湘早籼 24 号, 晚稻品种为岳优 9113、湘晚籼 12 号.

关键词: 水稻; CH_4 ; N_2O ; 排放特征; 品种选择; 增温潜势

中图分类号: X144; X171.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2475-07

Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields

FU Zhi-qiang^{1,2}, ZHU Hua-wu¹, CHEN Can¹, HUANG Huang^{1,2}

(1. College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Multi-cropping Cultivation and Farming System, Ministry of Agriculture, Changsha 410128, China)

Abstract: Methane and nitrous oxide emission fluxes of rice cultivars in the double cropping rice fields were measured by static chamber-gas chromatography in field experiments. The results showed a single-peak pattern in seasonal variations of methane emission and a double-peak pattern in variations of nitrous oxide emission for the early season rice, and a single-peak pattern in variations of both methane and nitrous oxide emission for the late season rice. There was significant difference among the rice cultivars in the average emission fluxes of methane and nitrous oxide during the whole growing season. The ranges for the methane and nitrous oxide average emission fluxes were $0.58 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $5.89 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ for the early-season rice cultivars, and $4.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $5.70 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ for the late-season rice, respectively. The ranges of GWP (global warming potential) contributed by the amount of greenhouse gases emission and GWP per unit yield of rice cultivars were $2.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $0.097 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for the early-season rice cultivars, and $2256 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $0.28 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for the late-season rice cultivars, respectively. The GWP and GWP per unit yield of rice types were sorted in a descending order; traditional rice > the super hybrid rice > the hybrid rice. For the early season rice, the methane and nitrous oxide emission fluxes of the blank region without rice were 27.1% - 31.8% and 33.6% - 88.3% of those measured for the region with rice planted, respectively, whereas the corresponding percentages for the late season rice were 23.8% - 28.8% and 38.6% - 45.3%, respectively. Based on these results, Luliangyou No. 819, Jinyou No. 402 and Xiangzaoxian No. 24 were selected as suitable early-season rice cultivars, whereas Yueyou No. 9113 and Xiangwanxian No. 12 should be chosen for late-season rice planting.

Key words: rice; methane; nitrous oxide; emission characteristics; cultivar selection; GWP

甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是稻田排放的 2 种主要温室气体. 来源于稻田的 CH_4 占大气 CH_4 总来源的 8% ~ 13%^[1]; 在干湿交替的水分条件下, 稻田有较高的 N_2O 排放^[2,3], 稻田排放的 N_2O 约占中国农田总排放的 7% ~ 11%^[4]. 水稻植株是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要植物载体, 植株通气组织对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的贡献率分别为 83% ~ 84% 和 75% ~ 86%^[5]. 水稻品种是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要因素之一, 不同水稻品种间 CH_4 排放量差异显著^[6~13]. 目前, 一些科研工作者研究了

CH_4 排放量与植株生物量、根系特性的相关性, 认为高生物量能导致低甲烷排放, 而且根系分泌物数量与质量是影响甲烷排放的重要因素^[6~8, 12]. 稻田生态系统 N_2O 排放研究侧重于土壤水分管理、氮肥施用以及土壤温度等对 N_2O 产生与排放的影响机制^[14~18].

收稿日期: 2011-09-15; 修订日期: 2011-11-01

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2008BAD95B02); 国家科技支撑计划项目(2011BAD16B01)

作者简介: 傅志强(1968~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为农作制及农业生态, E-mail: zqf_cis@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hh863@126.com

研究稻田 CH_4 与 N_2O 的最终目的是为寻找最优的减排措施,以减少稻田温室气体排放. 种植固碳能力强和 CH_4 、 N_2O 排放能力弱的水稻品种,实现高产低 CH_4 、 N_2O 排放的双重目标,这是一种值得研究的经济可行、环境友好的潜在减排模式. 但关于水稻 CH_4 排放与植株生物学特性之间的关系有不同的结论,造成品种间 CH_4 排放差异的机制还不很明确,有待于进一步系统研究. 对不同水稻品种 CH_4 和 N_2O 排放通量的同步监测较少,品种对 N_2O 排放的影响未见研究报道. 本实验以湖南双季稻区主栽水稻品种为研究对象,通过观测不同水稻品种大田生长期 CH_4 和 N_2O 排放通量及其变化特征,比较品种间的差异,分析差异产生原因,以期为南方稻田减排温室气体提供品种选择,为进一步探讨品种间 CH_4 、 N_2O 排放差异形成机制提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 供试品种

早稻品种:超级杂交稻(ESHR):株两优 211、陆两优 819; 杂交稻(EHR):T 优 705、金优 402; 常规稻(ETR):湘早籼 17 号、湘早籼 24 号、湘早籼 45 号. 生育期 105 ~ 110 d. 晚稻品种:超级杂交稻(LSHR):丰源优 299; 杂交稻(LHR):威优 227、岳优 9113; 常规稻(LTR):玉柱香、湘晚籼 13 号、湘晚籼 12 号、玉针香. 生育期 118 ~ 125 d.

1.2 实验地概况

实验地点位于湖南省长沙县干杉镇稻田增碳与温室气体减排实验基地($28^{\circ}08'18''\text{E}$, $113^{\circ}12'0''\text{N}$), 海拔 42 m, 年平均温度为 17.1°C , 年降水量 1 500 mm, 年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5\,300 \sim 6\,500^{\circ}\text{C}$, 为湖南典型的双季稻生产区. 土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土, 化学性状: 土壤 pH 6.1, 有机质 $33.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾 $8.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $163 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $9.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.3 实验设计

早、晚稻组合各 7 个, 每个品种 3 次重复, 共计 21 个实验小区, 随机区组排列, 每个小区面积 10 m^2 , 实验田块面积 300 m^2 . 每个小区放置取样箱底座一个, 取样箱底座在移栽前 2 d 固定在各小区内, 定点取样. 同时在每个区组内布置一个空白区域, 底座内不种水稻(空白), 用于同步观测无植株土壤温室气体排放通量. 每个区组四周田埂用塑料薄膜覆盖, 并把下边扎入 25 cm 深泥层, 每个区组设一个进

水口与排水口. 区组间留有 0.5 m 过道. 早稻于 3 月 27 日播种, 4 月 28 日移栽, 7 月 15 日收获, 晚稻于 6 月 15 日播种, 7 月 19 日移栽, 10 月 18 日收获. 栽植规格为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 常规稻每穴 4 苗, 杂交稻每穴 2 苗. 实验区四周设保护行. 早稻每个区组施基肥: 尿素 3 kg, 过磷酸钙 3.5 kg, 钾肥 2 kg; 5 月 8 日施追肥: 每区组尿素 1 kg. 晚稻移栽前每个区组施基肥: 尿素 2 kg, 过磷酸钙 3 kg, 钾肥 1.5 kg, 每个区组于 7 月 24 日追施尿素 1 kg. 病虫害防治根据实际情况进行. 水稻生长前期浅水促蘖, 早稻于 5 月 24 日 ~ 6 月 5 日、晚稻于 8 月 15 日 ~ 8 月 26 日排水晒田, 烤田后至成熟期采用“浅湿灌溉”方式, 黄熟期自然落干.

1.4 采样与分析

采用密闭静态箱测定, 采样箱为圆柱体, 箱底直径 55 cm, 高 120 cm, 于水稻栽插前将不锈钢底座固定于土壤中, 测定时加水注入底槽, 防止箱内外气体交换, 水稻移栽后每 4 ~ 5 d 采样一次. 每次采样时间固定在上午 09:00 ~ 10:00, 采样时间分别是罩上采样箱后的 0、10、20、30 min, 每次抽取 45 mL 气体样品. 气体样品采用 Agilent 7890A 气相色谱仪分析, 检测器 FID(CH_4) 和 ECD(N_2O), 检测温度 200°C , 柱温 50°C , 标准气体由国家标准物质中心提供. 测定方法参见文献[19]. 收获时, 每个小区单独脱粒, 晒干后称重, 测定各小区实际产量.

1.5 数据处理

根据 4 个气样浓度随采样时间的变化率, 参照文献[20,21] 方法计算排放通量. 稻田各生育期 CH_4 累计排放量 = $\sum_{i=1}^n F_i \times D_n$, 式中, F_i 为不同生育期内 CH_4 、 N_2O 平均排放通量, D_n 为不同生育期的天数. 全生育期排放总量为各生育期排放量之和, 季节排放通量均值是排放总量与大田生长天数之比[19]; 单位产量温室气体排放量是全生育排放总量与产量之比. 稻田 CH_4 与 N_2O 排放量增温潜势(global warming potentials, GWP, CO_2 的 GWP 为 1) 按照 100 a 时间尺度的换算系数分别为 25 和 298 来计算[22]. 实验结果均以 3 次重复的平均值表示, 采用 Office Excel2003 软件计算数据, 采用 DPS 3.01 软件分析数据, 多重比较采用 LSR 法.

2 结果与分析

2.1 早稻品种 CH_4 和 N_2O 排放特征及品种效应

2.1.1 早稻品种 CH_4 和 N_2O 排放季节变化

图 1 是早稻 CH₄ 气体排放通量季节变化. 从中可知,早稻移栽后 CH₄ 排放通量逐步增加,峰值出现在移栽后 24 d 左右,排放通量达到 7.41 ~ 10.89 mg·(m²·h)⁻¹. 5 月 25 日开始排水晒田,其后测得的 CH₄排放通量显著下降,晒田期间的甲烷排放通量变化幅度仅为 1.39 ~ 7.13 mg·(m²·h)⁻¹. 晒田后浅水灌浆以及后期排水收获,CH₄ 排放通量均较少,且一直呈下降趋势. 无水稻种植(空白)区 CH₄排放通量为水稻种植区的 28.6% ~ 58.8%,晒田期间仅为 3.2% ~ 9.8%,复水到收获期为 50% ~ 90%.

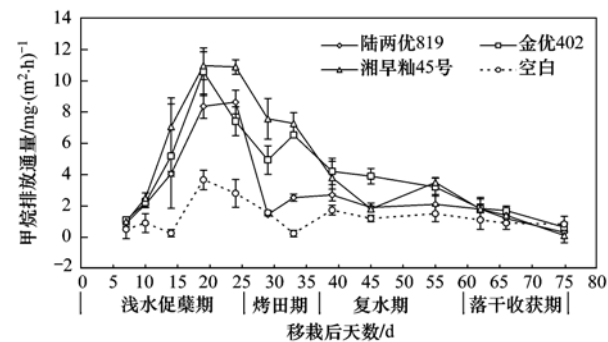


图 1 早稻甲烷排放通量季节变化
Fig. 1 Seasonal variation in CH₄ emission of early season rice

由图 2 可知,在水稻浅水促蘖期,N₂O 的排放通量较低,但呈递增趋势,在移栽后 30 d 左右即排水晒田期间出现峰值,达到 10.02 ~ 58.46 μg·(m²·h)⁻¹,常规稻排放通量比杂交稻、超级杂交稻均大. 晒田后复浅水,3 种类型水稻的 N₂O 排放通量均减少,最低值为 1.00 μg·(m²·h)⁻¹. 在落干收获期又出现了增排的趋势,超级杂交稻排放通量大于杂交稻、常规稻. 空白区 N₂O 季节排放通量低于

水稻种植区,在浅水促蘖期间,N₂O 排放通量均较低,与水稻种植区差异很小;在排放高峰期,空白处 N₂O 排放通量是超级杂交稻、常规稻和杂交稻的 5.7%、5.8% 和 37.4%;晒田后浅水灌浆时期,空白处 N₂O 排放通量减少;落干收获期,空白处 N₂O 排放通量是水稻种植区的 49.7% ~ 84.5%.

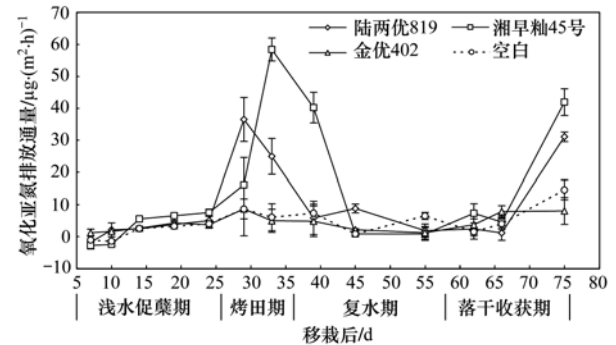


图 2 早稻氧化亚氮排放通量季节变化
Fig. 2 Seasonal variation in N₂O emission flux of early season rice

2.1.2 早稻品种 CH₄ 和 N₂O 排放量比较

水稻品种 CH₄ 排放通量间差异显著(表 1),T 优 705 最大,金优 402 最小,极差为 0.58 mg·(m²·h)⁻¹; CH₄ 季节排放总量、CH₄ 排放增温潜势以 T 优 705 最大,金优 402 最小,CH₄ 排放总量、增温潜势极差分别为 11.47 kg·hm⁻²、287 kg·hm⁻². 超级杂交稻、杂交稻 CH₄ 季节排放通量分别比常规稻低 0.14 mg·(m²·h)⁻¹、0.02 mg·(m²·h)⁻¹; CH₄ 季节排放总量和增温潜势均以常规稻最高,杂交稻次之,超级杂交稻最低,极差分别为 1.65 kg·hm⁻²、41 kg·hm⁻². 空白区 CH₄ 季节平均排放通量、季节排放总量、增温潜势均占水稻种植区的 27.1% ~ 31.8%.

表 1 不同早稻品种 CH₄ 和 N₂O 排放量比较¹⁾

Table 1 Comparison of CH ₄ and N ₂ O emission fluxes among the early-season rice cultivars												
温室气体		ESHR			EHR			ETR				空白
		Var. 1	Var. 2	均值	Var. 3	Var. 4	均值	Var. 5	Var. 6	Var. 7	均值	
CH ₄	I	3.61bc	3.50c	3.55	3.91a	3.33d	3.62	3.66bc	3.51c	3.74b	3.64	1.06
	II	71.09	68.81	69.95	76.99	65.52	71.25	72.09	69.15	73.55	71.60	20.82
	III	1 777	1 720	1 749	1 925	1 638	1 781	1 802	1 729	1 839	1 790	520
N ₂ O	I	7.27a	3.61bc	5.44	2.64c	1.63d	2.13	4.32b	4.93b	7.52a	5.59	1.88
	II	0.143	0.071	0.107	0.052	0.032	0.042	0.085	0.097	0.148	0.111	0.037
	III	43	21	32	15	10	13	25	29	44	33	11

1) I、II、III 分别表示:季节排放均值[CH₄, mg·(m²·h)⁻¹; N₂O, μg·(m²·h)⁻¹]; 季节排放总量(kg·hm⁻²)、增温潜势(kg·hm⁻²); Var. 1、Var. 2、Var. 3、Var. 4、Var. 5、Var. 6、Var. 7 分别代表水稻品种:株两优 211、陆两优 819、T 优 705、金优 402、湘早籼 17 号、湘早籼 24 号、湘早籼 45 号; 同一行不同字母表示差异显著(P<0.05)

水稻品种 N₂O 排放量差异显著,季节排放通量均值以湘早籼 45 号最高,金优 402 最低,极差为

5.89 μg·(m²·h)⁻¹; N₂O 排放总量及增温潜势以湘早籼 45 号最大,金优 402 最小,极差分别为:0.116

kg·hm⁻²、34 kg·hm⁻²; N₂O 季节平均排放通量、总量与增温潜势均以常规稻最大,超级杂交稻次之,杂交稻最小,极差分别为: 3.46 μg·(m²·h)⁻¹、0.069 kg·hm⁻²、20 kg·hm⁻². 空白区季节平均排放通量、总量与增温潜势均占水稻种植区的 33.6%~88.3%. 计算甲烷和氧化亚氮排放量的总增温潜势,水稻品种以 T 优 705 最高,金优 402 最低,极差为 292 kg·hm⁻²; 常规稻>杂交稻>超级杂交稻,极差 42 kg·hm⁻²; 无水稻区是水稻种植区的 29.1%~29.8%.

2.1.3 早稻单位产量 CH₄ 和 N₂O 排放量品种差异比较

由表 2 可知,早稻品种产量以金优 402 最高,T

优 705 最低,两者相差 1 056 kg·hm⁻²; 单位产量 CH₄ 排放量品种间存在显著差异,T 优 705 显著高于金优 402,极差为 3.85 g·kg⁻¹. 单位产量 CH₄ 排放量杂交稻>超级杂交稻>常规稻,极差为 0.47 g·kg⁻¹. 单位产量 N₂O 排放量品种间存在显著差异,株两优 211 显著高于金优 402,极差为 18.29 mg·kg⁻¹; 超级杂交稻 单位产量 N₂O 排放量最大,常规稻次之,杂交稻最小,极差为 10.63 mg·kg⁻¹. 单位产量增温潜势,品种排序为 T 优 705>株两优 211>湘早籼 45 号>湘早籼 17 号>陆两优 819>湘早籼 24 号>金优 402,极差为 0.097 kg·kg⁻¹. 杂交稻、超级杂交稻>常规稻,极差为 0.05 kg·kg⁻¹.

表 2 不同早稻品种单位产量 CH₄ 和 N₂O 排放量比较¹⁾

Table 2 Comparison of CH₄ and N₂O emission fluxes per unit yield among the early-season rice cultivars

单位产量温室气体排放量	ESHR			EHR			ETR			均值
	Var. 1	Var. 2	均值	Var. 3	Var. 4	均值	Var. 5	Var. 6	Var. 7	
实际产量/kg·hm ⁻²	6 151	6 133	6 142	5 651	6 707	6 179	6 262	6 522	6 411	6 392
单位产量 CH ₄ 排放量/g·kg ⁻¹	11.56b	11.22b	11.39	13.62a	9.77c	11.53	11.51b	10.60bc	11.47b	11.06
单位产量 N ₂ O 排放量/mg·kg ⁻¹	22.76a	11.41c	17.10	8.85d	4.47e	6.47	14.37bc	15.33b	23.40a	14.86
单位产量增温潜势/kg·kg ⁻¹	0.296	0.284	0.290	0.343	0.246	0.290	0.292	0.270	0.294	0.285

1) Var. 1、Var. 2、Var. 3、Var. 4、Var. 5、Var. 6、Var. 7 分别代表水稻品种:株两优 211、陆两优 819、T 优 705、金优 402、湘早籼 17 号、湘早籼 24 号、湘早籼 45 号; 同一行不同字母表示差异显著(P<0.05)

2.2 晚稻品种 CH₄ 和 N₂O 排放特征与品种效应

2.2.1 晚稻 CH₄ 和 N₂O 季节排放特征

由图 3 可知,晚稻 CH₄ 排放季节变化呈现单峰模式,即在水稻移栽后 26 d 达到全生育期排放最大值,然后开始下降. 在排水晒田期 CH₄ 排放通量均表现出较低的水平,特别在排水收获时期,CH₄ 排放通量<1 mg·(m²·h)⁻¹. 7 个水稻品种中,在排放通量峰值时期,湘晚籼 13 号排放通量最大,丰源优 299 次之,玉针香排放通量最低. 空白区 CH₄ 排放通量是种植区的 23.8%~28.8%,特别在排放高峰期,空白区 CH₄ 排放通量是水稻种植区的 14%~23%.

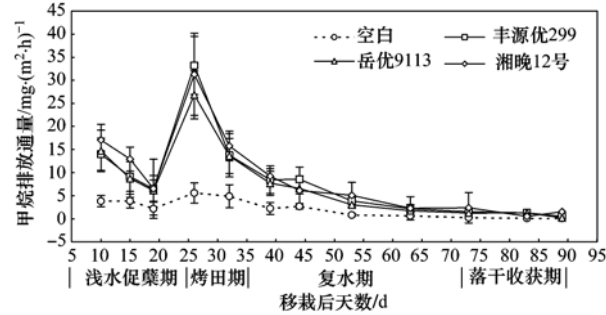


图 3 晚稻甲烷排放通量季节变化

Fig. 3 Seasonal variation in CH₄ emission flux of late season rice

由图 4 可知,N₂O 排放季节变化呈现单峰状态,

在排水晒田期间 N₂O 排放通量增加,在水稻移栽后 44 d,即排水晒田后期、复水初期达到了全生育期的最大值 26.70 μg·(m²·h)⁻¹. 在复水后期到排水收获时,N₂O 排放通量均较高,但呈下降变化趋势. 常规稻的排放峰值高于杂交稻与超级杂交稻,极差为 6.10 μg·(m²·h)⁻¹. 空白区的 N₂O 排放通量与水稻种植区差异明显,空白区 N₂O 排放通量是种植区的 38.6%~45.3%. 特别在排放高峰期仅是水稻种植区的 9.5%~13.7%.

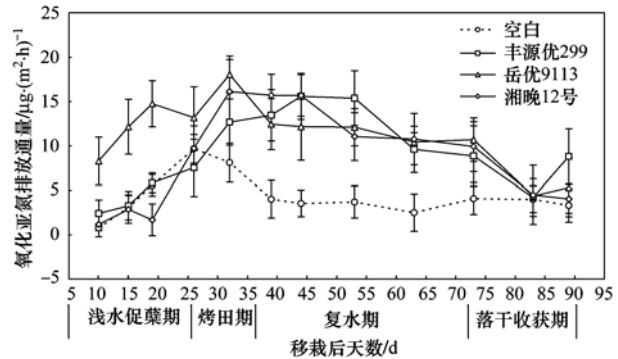


图 4 晚稻氧化亚氮排放通量季节变化

Fig. 4 Seasonal variation in N₂O emission flux of late season rice

2.2.2 晚稻品种 CH₄ 和 N₂O 排放量比较

由表 3 可知,水稻品种 CH₄ 排放通量季节均值间存在显著差异,湘晚籼 13 号最高,岳优 9113 最

低,极差为 4.06 mg·(m²·h)⁻¹; 常规稻 > 超级杂交稻 > 杂交稻,极差为 1.64 mg·(m²·h)⁻¹,常规稻比超级杂交稻、杂交稻分别高出 9.9%、17.4%。常规稻、超级杂交稻、杂交稻比无水稻种植区分别高出 7.17、6.23、5.53 mg·(m²·h)⁻¹,分别比空白区域高出 76.2%、73.5% 和 69.7%。CH₄ 排放总量比较,湘晚籼 13 号最高,比最低的岳优 9113 高出 89.98 kg·hm⁻²; 常规稻 > 超级杂交稻 > 杂交稻,极差为 35.74 kg·hm⁻²,与空白区相比,分别增加排放 153.14、132.95、118.00 kg·hm⁻²。

N₂O 排放通量季节均值品种间存在显著差异,

以湘晚籼 13 号最大,湘晚籼 12 号最小,极差为 5.70 μg·(m²·h)⁻¹; 杂交稻 > 常规稻 > 超级杂交稻,极差为 1.55 μg·(m²·h)⁻¹,杂交稻分别比常规稻、超级杂交稻高出 3.1%、14.9%。N₂O 排放总量比较,最高的湘晚籼 13 号比最低的湘晚籼 12 号高出 0.109 kg·hm⁻²; 杂交稻 > 常规稻 > 超级杂交稻,极差为 0.033 kg·hm⁻²。杂交稻、常规稻、超级杂交稻 N₂O 排放通量分别比无水稻种植空白区域分别高出 6.39、6.07、4.84 μg·(m²·h)⁻¹,空白区 N₂O 排放通量仅为杂交稻、常规稻、超级杂交稻的 38.6%、39.8% 和 45.3%。

表 3 不同晚稻品种温室气体排放量比较¹⁾

Table 3 Comparison of greenhouse gas emission fluxes among late-season rice cultivars											
温室气体		LSHR		LHR		LTR					空白
		Var. 1	Var. 2	Var. 3	均值	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7	均值	
CH ₄	I	8.47bc	7.84c	7.69c	7.77	7.69c	11.90a	9.24b	8.80bc	9.41	2.24
	II	180.82	167.52	164.28	165.87	164.36	254.26	197.41	188.02	201.01	47.87
	III	4 520	4 188	4 105	4 147	4 109	6 356	4 935	4 700	5 052	1 197
N ₂ O	I	8.85c	8.36 c	12.44a	10.40	11.29b	12.77a	7.70d	8.57c	10.08	4.01
	II	0.189	0.179	0.266	0.222	0.241	0.273	0.164	0.183	0.215	0.086
	III	56	53	79	66	72	81	49	55	64	25

1) I、II、III 分别表示:季节排放均值[CH₄, mg·(m²·h)⁻¹; N₂O, μg·(m²·h)⁻¹]、季节排放总量(kg·hm⁻²)、增温潜势(kg·hm⁻²); Var. 1、Var. 2、Var. 3、Var. 4、Var. 5、Var. 6、Var. 7 分别代表晚稻品种丰源优 299、威优 227、岳优 9113、玉柱香、湘晚籼 13 号、湘晚 12 号、玉针香; 同一行不同字母表示差异显著(P<0.05)

CH₄、N₂O 的总增温潜势以湘晚籼 13 号最高,玉柱香最低,极差为 2 256 kg·hm⁻²,常规稻 > 超级杂交稻 > 杂交稻,极差为 903 kg·hm⁻²。无水稻种植区的增温潜势是水稻种植区的 23.8%~28.9%。

2.2.3 晚稻单位产量 CH₄ 和 N₂O 排放量比较

从表 4 可知,品种间单位产量 CH₄ 排放量存在显著差异.以实际产量计算所得单位产量排放量为依据进行品种排序:湘晚籼 13 号 > 玉针香 > 湘晚籼 12 号 > 玉柱香 > 威优 227 > 丰源优 299 > 岳优 9113,极差为 11.27 g·kg⁻¹,常规稻品

种分别比超级杂交稻、杂交稻高出 5.91、6.16 g·kg⁻¹.品种单位产量 N₂O 排放量间存在显著差异.品种排序为:岳优 9113 > 湘晚籼 13 号玉柱香 > 玉针香 > 威优 227 > 丰源优 299 > 湘晚籼 12 号,极差为:12.83 mg·kg⁻¹; 常规稻品种比超级杂交稻、杂交稻分别高出 5.91、6.16 mg·kg⁻¹.单位产量增温潜势以湘晚籼 13 号最高,比岳优 9113 高出 32.6%; 常规稻品种分别比超级杂交稻、杂交稻高出 20.0% 和 21.3%,极差为 0.17 kg·kg⁻¹。

表 4 晚稻单位产量温室气体排放量¹⁾

Table 4 Greenhouse gas emission fluxes per unit yield of the late season rice									
单位产量温室气体排放量	LSHR		LHR		LTR				
	Var. 1	Var. 2	Var. 3	均值	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7	均值
实际产量/kg·hm ⁻²	7 683	7 053	7 193	7 133	6 885	7 455	6 895	6 265	6 825
单位产量 CH ₄ 排放量/g·kg ⁻¹	23.54de	23.75d	22.84e	23.29	24.59d	34.11a	28.63c	30.01b	29.45
单位产量 N ₂ O 排放量/mg·kg ⁻¹	24.60cd	25.38c	36.98a	31.17	36.05a	36.62a	23.79d	29.21b	31.50
单位产量增温潜势/kg·kg ⁻¹	0.601	0.599	0.582	0.593	0.632	0.861	0.723	0.762	0.753

1) Var. 1、Var. 2、Var. 3、Var. 4、Var. 5、Var. 6、Var. 7 分别代表晚稻品种丰源优 299、威优 227、岳优 9113、玉柱香、湘晚籼 13 号、湘晚 12 号、玉针香; 同一行不同字母表示差异显著(P<0.05)

3 讨论

3.1 CH₄ 与 N₂O 排放特征

早稻 CH₄ 排放季节变化呈单峰模式,与彭世彰等^[23]的结果相同.早稻 CH₄ 排放通量在分蘖盛期出现峰值,是植株通气系统发达、根系分泌物增加以及

气温升高等因素综合作用的结果^[24]. 与秦晓波等^[25]的结果不完全一致,可能由于气候存在年际差异以及实验田土壤特性不同所致. N_2O 排放呈双峰模式. 排水晒田期间出现第一个峰值,主要原因是烤田后提高了土壤通气性,适宜的土壤水分增强了硝化细菌酶活性,反硝化作用中 N_2O 还原酶活性受到抑制,导致其排放通量出现峰值^[26,27]; 落干收获期间,田面无水,改善了土壤通透性,有助于处于蓄积态的 N_2O 排放,从而出现较高的排放通量^[28].

晚稻 CH_4 排放季节变化呈单峰模式,在移栽后 26 d 左右达到峰值. 主要是由于气温高、土壤有机质含量丰富,同时通过冒气泡、气液扩散和植株 3 条路径有效排放,促使 CH_4 排放通量出现峰值^[29]. N_2O 排放季节变化也呈单峰模式,在排水晒田后复水初期出现峰值. 排水晒田降低了土壤水分,促进了硝化作用,有利于 N_2O 生成与排放而出现排放峰值. 同时,本研究中 CH_4 与 N_2O 排放表现出互为消长的变化规律,这与前人研究结果较一致^[21,30].

3.2 CH_4 与 N_2O 排放量品种间差异比较

不同水稻品种间 CH_4 排放通量间存在显著差异,这与前人研究结果较一致^[10,11]. 一般情况下,稻田 CH_4 排放和水稻的植物总重量呈反比关系^[7]. 本研究证实常规稻品种 CH_4 平均排放通量高于杂交稻品种,而杂交稻品种地上部生物量、产量高于常规稻. 但相同基因型品种间 CH_4 排放量存在差异,而且常规稻中有低排放的品种,杂交稻中有较高排放的品种. 因此,作者认为造成品种 CH_4 排放通量差异产生的原因是受水稻植株通气组织的影响,又与根系和根际土壤特性密切关联,只有把水稻植株与根际土壤区域作为一个系统来研究才能完整揭示差异产生的机制.

稻田 N_2O 排放主要受土壤水分状况以及氮肥施用等方面的影响. 关于水稻植株地上部对 N_2O 排放的影响研究不多,普遍认为水稻植株通过影响土壤水分状况以及吸收土壤氮素而影响 N_2O 排放. 本研究发现,在相同的水肥管理条件下,不同水稻品种间 N_2O 排放通量存在显著差异. 其原因可能是不同品种传输能力以及对土壤氮素吸收能力不同,根系活力、泌氧能力以及根系分泌物数量与质量存在差异,因而影响稻田土壤中 N_2O 的产生与排放. 但品种 CH_4 和 N_2O 排放差异形成机制还有待进一步研究.

3.3 水稻种植对 CH_4 和 N_2O 排放的影响

本研究发现,早稻通过植株排放的 CH_4 和 N_2O

占总体的 68.2% ~ 72.9%、11.7% ~ 66.4%; 晚稻通过植株排放的 CH_4 和 N_2O 占总体的 71.2% ~ 76.2%、54.7% ~ 61.4%. 因此,植株是影响 CH_4 和 N_2O 排放的重要因素之一. 这与人研究结果较一致^[5]. 植株传输 CH_4 能力既与水稻品种的生理形态特征以及水稻生长期紧密相关,又与根系生物量以及地上部分生物量关联. 不同水稻品种具有生理形态特征上的差异可能导致了品种植株传输能力上的差异,因而影响到稻田 CH_4 与 N_2O 的排放.

3.4 早晚稻品种选择

水稻品种选择既要满足高产稳产以确保粮食安全的现实需要,又要考虑稻田高效固碳与减排温室气体的要求,但稻田 CH_4 与 N_2O 排放存在互为消长关系. 因此,本研究系统观测早晚季能合理搭配的不同水稻品种 CH_4 和 N_2O 排放通量,计算出全生育期排放总量. 通过比较季节平均排放通量、增温潜势以及单位产量增温潜势 3 个指标,以确定早、晚两季适宜种植的水稻品种是合理的. 本研究认为,超级杂交早稻选用陆两优 819、杂交早稻选用金优 402、常规早稻选用湘早籼 24 号、杂交晚稻选用岳优 9113、常规晚稻用湘晚籼 24 号为宜. 但本实验得出的不同基因型间比较结果受样本容量小的局限,其结论的科学性还有待于进一步研究. 同时,由于高产水稻品种层出不穷,通过大田实测方式来筛选适宜品种难度大. 因此建立高产低排放的水稻品种评价指标,为筛选品种提供简易方法有待于进一步研究.

4 结论

(1) 早稻 CH_4 排放呈单峰模式,在分蘖期达到峰值, N_2O 排放呈双峰模式,分别在烤田期和落干收获期出现峰值; 晚稻 CH_4 与 N_2O 排放季节变化呈单峰模式,分别在分蘖盛期和烤田后复水初期出现峰值.

(2) 水稻种植显著促进了稻田 CH_4 和 N_2O 排放; 水稻品种间 CH_4 、 N_2O 排放通量均存在差异. 这种差异既存在于同一基因型水稻品种间,也存在于不同水稻类型间. 品种间 CH_4 、 N_2O 排放差异形成机制还需进一步研究.

(3) 本实验认为,早晚两季水稻品种适宜搭配模式为:早稻陆两优 819 和晚稻岳优 9113 (湘晚籼 12 号)、早稻金优 402 和晚稻岳优 9113 (湘晚籼 12 号)、早稻湘早籼 24 号和晚稻岳优 9113.

致谢:实验过程中得到了湖南农业大学农学院 07 级农学专业学生陈劲、叶彬同学、湖南省土壤肥

料研究所彭华、吴家梅等同志的大力帮助, 谨致谢忱。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment [R]. New York, Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [2] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, **196**(1): 7-14.
- [3] Xu H, Xing G X, Cai Z C, *et al.* Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **49**(1-3): 23-28.
- [4] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: dependence on water regime [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8030-8042.
- [5] Yu K W, Wang Z P, Chen G X. Nitrous oxide and methane transport through rice plants[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **24**(3): 341-343.
- [6] Aulakh M S, Bodenbender J, Wassmann R, *et al.* Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, **58**(1-3): 367-376.
- [7] Lindau C W, Bollich P K, DeLaune R D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1995, **54**(1-2): 109-114.
- [8] Wang B J, Neue H U, Samonte H P. Effect of cultivar difference ('IR72', 'IR65598' and 'Dular') on methane emission[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, **62**(1): 31-40.
- [9] 任丽新, 王庚辰, 张仁健, 等. 成都平原稻田甲烷排放的实验研究[J]. *大气科学*, 2002, **26**(6): 731-743.
- [10] 邵可声, 李震. 水稻品种以及施肥措施对稻田甲烷排放的影响[J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 1996, **32**(4): 505-513.
- [11] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响[J]. *作物学报*, 1999, **25**(4): 441-446.
- [12] 傅志强, 黄璜, 何保良, 等. 水稻植株通气系统与稻田 CH₄ 排放相关性研究[J]. *作物学报*, 2007, **33**(9): 1458-1467.
- [13] Jia Z J, Cai Z C, Tsuruta H. Effect of rice cultivar on CH₄ production potential of rice soil and CH₄ emission in a pot experiment[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, **52**(3): 341-348.
- [14] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, **37**(4): 499-505.
- [15] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, **37**(4): 482-489.
- [16] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N₂O 排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(5): 540-543.
- [17] Ma J, Li X L, Xu H, *et al.* Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, **45**(5): 359-367.
- [18] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, **18**(5): 1-5.
- [19] 石生伟, 李玉娥, 秦晓波, 等. 不同施肥处理对红壤晚稻田 CH₄ 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(2): 103-108.
- [20] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 181-195.
- [21] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K I. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: automated methane monitoring[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(2): 255-267.
- [22] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [23] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH₄ 排放规律的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 9-13.
- [24] 林匡飞, 项雅玲, 姜达炳, 等. 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*, 2000, **19**(5): 267-270.
- [25] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 长期施肥对湖南稻田甲烷排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2006, **27**(1): 19-22.
- [26] Xu H, Xing G X, Cai Z C, *et al.* Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **49**(1-3): 23-28.
- [27] Xiong Z Q, Xin G X, Tsuruta H, *et al.* Measurement of nitrous oxide emissions from two rice-based cropping systems in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64**(1-2): 125-133.
- [28] 黄树辉, 吕军, 曾光辉. 水稻烤田期间 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(6): 1084-1090.
- [29] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001.
- [30] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 758-764.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

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

国内外公开发行人