

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO₂ 数据筛分及浓度特征研究 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O₃/H₂O₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀 鲍国栋, 左剑恶, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA 与柠檬酸复配洗修多重金属污染土壤效果研究 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N₂O 排放的关系 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N₂O 产生的不同过程及贡献 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素 B₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜力的影响

王聪^{1,2,3}, 沈健林^{1,2,*}, 郑亮^{1,4}, 刘杰云^{1,2,3}, 秦红灵¹, 李勇^{1,2}, 吴金水^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要: 以湖南典型红壤双季稻田系统为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法研究了水稻生长季基肥配施猪粪条件下 CH_4 和 N_2O 的排放特征, 并估算了排放的 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜力 (GWP)。结果表明, 与施用化肥处理相比, 猪粪化肥配施对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的季节变化模式无明显影响, 但影响其排放量大小。两个稻季, 猪粪替代 50% 化学氮肥处理 (1/2N + PM) CH_4 累积排放量较不施氮肥处理 (0N)、50% 化学氮肥处理 (1/2N)、100% 化学氮肥处理 (N) 分别提高 54.83%、33.85% 和 43.30% ($P < 0.05$); 1/2N + PM 处理 N_2O 累积排放量较 N 处理显著降低 67.50%, 较 0N 处理、1/2N 处理分别提高 129.43%、119.23% ($P < 0.05$)。水稻生长季 CH_4 是 GWP 的主要贡献者, 占 CH_4 和 N_2O 综合 GWP 的 99% 以上。1/2N + PM 处理的 GWP 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 且 1/2N + PM 处理单位产量 GWP 最高, 较 N 处理、1/2N 处理、0N 处理分别提高 58.21%、26.82%、20.63%。因此, 双季稻田猪粪替代部分化学氮肥较全部施用化学氮肥增加了双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应, 其对温室气体排放的影响需在区域温室气体排放清单中加以考虑。

关键词: 稻田; 猪粪; 氮肥; 甲烷; 氧化亚氮

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3120-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.08.040

Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH_4 and N_2O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping

WANG Cong^{1,2,3}, SHEN Jian-lin^{1,2}, ZHENG Liang^{1,4}, LIU Jie-yun^{1,2,3}, QIN Hong-ling¹, LI Yong^{1,2}, WU Jin-shui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Hunan 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Hunan 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: A field experiment was carried out to study the effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions, which were measured using the static chamber/gas chromatography method, and their global warming potentials in typical paddy fields with double-rice cropping in Hunan province. The results showed that the combined applications of pig manure and chemical fertilizers did not change the seasonal patterns of CH_4 and N_2O emissions from paddy soils, but significantly changed the magnitudes of CH_4 and N_2O fluxes in rice growing seasons as compared with sole application of chemical fertilizers. During the two rice growing seasons, the cumulative CH_4 emissions for the pig manure and chemical nitrogen (N) fertilizer each contributing to 50% of the total applied N (1/2N + PM) treatment were higher than those for the treatments of no N fertilizer (0N), half amount of chemical N fertilizer (1/2N) and 100% chemical N fertilizer (N) by 54.83%, 33.85% and 43.30%, respectively ($P < 0.05$), whilst the cumulative N_2O emissions for the 1/2N + PM treatment were decreased by 67.50% compared with N treatment, but increased by 129.43% and 119.23% compared with 0N and 1/2N treatments, respectively ($P < 0.05$). CH_4 was the dominant contributor to the global warming potential (GWP) in both rice growing seasons, which contributed more than 99% to the integrated GWP of CH_4 and N_2O emissions for all the four treatments. Both GWP and yield-scaled GWP for the treatment of 1/2N + PM were significantly higher than the other three treatments. The yield-scaled GWP for the treatment of 1/2N + PM was higher than those for the N, 1/2N and 0N treatments by 58.21%, 26.82% and 20.63%, respectively. Therefore, combined applications of pig manure and

收稿日期: 2013-12-02; 修订日期: 2014-02-10

基金项目: 科技部国际科技合作重大专项 (2011DFA30770); 国家重大基础研究计划项目 (2012CB417105); 国家自然科学基金重大项目 (41090283); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B03)

作者简介: 王聪 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态与农业环境, E-mail: mud_000@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jlshen@isa.ac.cn

chemical fertilizers in paddy fields would increase the GWP of CH₄ and N₂O emissions during rice growing seasons and this effect should be considered in regional greenhouse gases emissions inventory.

Key words: paddy field; pig manure; nitrogen fertilizer; CH₄; N₂O

CH₄ 和 N₂O 是两种重要的温室气体,对地球系统的能量收支和气候变化有重要影响^[1]. 在 100 a 时间尺度上,其单位质量的全球增温潜势(GWP)分别是 CO₂ 的 25 和 298 倍,对温室效应的贡献分别约为 14.3% 和 7.9%^[2]. 相关研究表明,受人类活动的影响,大气中 CH₄ 和 N₂O 浓度目前呈上升趋势,并分别以每年 0.6% 和 0.2%~0.3% 的速率增长^[3]. 稻田是最重要的人为 CH₄ 排放源之一,每年向大气排放的 CH₄ 占 CH₄ 总排放量的 15.0%~20.0%^[4],中国是水稻大国,稻田 CH₄ 的排放占世界稻田的 25.0% 左右^[5]. 且稻田排放的 N₂O 约占我国农田氮肥直接排放 N₂O 总量的 7.0%~11.0%^[6]. 因此,研究制定减缓稻田生态系统这两种温室气体排放的措施,对缓解气候变化有重要作用.

畜禽粪便还田是一种传统的土壤培肥方法,其与化学肥料配施可有效提高土壤碳库储量^[7~9]. 畜禽粪便肥料化后还田能够改良土壤,提高土壤肥力,畜禽粪便中不仅含有丰富的有机质,而且还含有较高的氮、磷、钾及硼、锌、钼等养分^[10],但诸多研究表明有机肥的施用会增加 CH₄ 的排放量^[11~13]. 而施用有机肥对稻田 N₂O 排放的影响尚不明确^[14]. 在亚热带稻区进行的大量研究表明,有机肥替代 40%~50% 氮肥,不仅可以稳定水稻产量、改善稻田土壤理化性质,还可以提高氮肥利用率,减少氮素的损失. 但有关亚热带稻区有机肥部分替代氮肥对 CH₄、N₂O 排放的影响少有研究. 随着我国畜禽规模化养殖程度的快速发展,畜禽粪便的排放量已高达每年 3.2×10^9 t^[15],畜禽粪便还田作为一种减少其因处置不当造成的环境氮磷污染和改良土壤理化性质的措施,已经越来越受到重视. 本研究通过设置不施氮肥、50% 氮肥、100% 氮肥(常规施肥)和猪粪有机肥替代 50% 氮肥(猪粪化肥配施)这 4 个处理,田间实地观测双季稻田 CH₄、N₂O 排放动态,旨在探明有机肥部分替代化肥是否能够减少稻田 CH₄、N₂O 排放的综合温室气体潜势,并探讨有机肥部分替代化肥影响稻田 CH₄、N₂O 排放的主要机制.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于湖南省长沙县金井镇中国科学院亚

热带农业生态研究所所长沙农业环境观测研究站(113°19'52"E,28°33'04"N),海拔 80 m,属于中亚热带季风气候,年平均气温 17.5℃,年平均降雨量为 1330 mm,降雨主要集中在每年 3~8 月,占年降雨量的 60% 以上,无霜期约 300 d. 试验田土壤系统分类名为铁聚水耕人为土(俗称:麻沙泥),母质为花岗岩风化物,耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质为:全氮含量 2.08 g·kg⁻¹,全磷含量 0.039 g·kg⁻¹,全钾含量 28.40 g·kg⁻¹,有机碳含量 18.90 g·kg⁻¹,容重 1.31 g·cm⁻³,pH 为 5.08. 土壤机械组成中砂砾、粉粒和黏粒的质量分数分别为 45.80%、28.60% 和 25.60%.

1.2 试验设计与方法

采用随机区组设计,设置 4 个处理:不施氮肥(0N)、50% 常规氮肥(1/2N)、常规氮肥(N)和猪粪替代 50% 常规氮肥(1/2N+PM). 每个处理 3 次重复,小区面积 35 m²(5 m×7 m). 各处理化学氮肥采用尿素,替代化肥的有机肥为取自试验点当地农户养猪场的鲜猪粪,一般在施用前两星期内备足鲜猪粪,混匀后取样测定猪粪中总 N、总 P 和总 K 含量. 磷肥采用过磷酸钙,钾肥采用氯化钾,处理间磷、钾施入量一致. 常规氮肥用量(以 N 计)早稻季为 120 kg·hm⁻²,晚稻季为 150 kg·hm⁻². 氮肥采用分次施用,N 处理按基肥:分蘖肥:穗肥比例 5:3:2 施用;1/2N 与 1/2N+PM 处理化学氮肥按基肥:分蘖肥比例 5:5 施用,猪粪则作基肥一次性施用. 磷肥、钾肥作基肥一次性施用,每季水稻施入磷(P₂O₅)、钾量(K₂O)分别为 40 kg·hm⁻²、100 kg·hm⁻². 其中 1/2N+PM 处理,化学磷、钾肥的施用抵扣猪粪提供的总 P 和总 K 养分. 稻田田间管理采用当地常规管理方式,各处理田间管理一致.

1.3 样品采集与测定方法

采用静态暗箱-气相色谱法采集测定 CH₄、N₂O 气体. 在每个小区,都有一个面积为 0.41 m² 嵌入土壤 20 cm 深的不锈钢框架静态箱底座,按移栽密度移栽秧苗(早稻:品种为湘早 45,25 穴·m⁻²,晚稻:品种为 T-优 207,20 穴·m⁻²). 静态暗箱底面积为 0.64 m×0.64 m,高 1 m,箱外包有泡沫塑料,防止阳光照射导致箱内温度变化过大. 采样在上午 09:00~11:00 进行,每周采集一次,施肥与搁田时

加至一周两次。采样前将静态暗箱放在不锈钢底座内,用水密封,箱顶两个 12 V 小风扇混匀箱内气体。使用 60 mL 注射器在 30 ~ 40 min 内每个箱子采 5 个气样并注入 12 mL 真空瓶内^[16]。通过温度计 (JM624, 中国) 测量箱顶和耕层 5 cm 深度温度。每次气体样品采集的同时使用 Eh 计 (DKK-TOA RM-30P, 日本) 和尺子测量耕层 5 cm 深度的氧化还原电位和水深。水稻收获时每小区随机取 5 个 1 m² 样方测籽粒产量。

使用气相色谱仪 (Agilent 7890D, 美国) 对气体样品进行测定,高纯氮为载气,柱温 55℃,氢火焰离子化检测器 (FID) 温度为 250℃,电子捕获检测器 (ECD) 温度为 350℃,通过 FID 测定 CH₄, ECD 测定 N₂O,并用体积比为 1:9 的 CO₂/N₂ 混合气作为尾吹,以减少样品中的 CO₂ 对 N₂O 测定的影响^[17]。

1.4 数据分析与处理

温室气体排放通量 [F , mg·(m²·h)⁻¹ 或 μg·(m²·h)⁻¹] 计算公式见式(1)^[16]。

$$F = M/V_0 \times (H - h/100) \times P/P_0 \times T_0/T \times dc/dt \quad (1)$$

式中, M 为待测气体相对分子质量 (g·mol⁻¹); V_0 为摩尔体积 (L·mol⁻¹), $V_0 = 22.4$ L·mol⁻¹; H 为箱高 (m), $H = 1$ m; h 为平均水深 (m); P_0 和 T_0 为理想气体标准状态下的空气压力 (101.3 kPa) 和气温 (273 K); P 和 T 为采样时的大气压力和平均气温 (K); dc/dt 为箱内目标气体浓度 (ppmv 或 ppbv) 随时间 (h) 变化的回归曲线斜率。

温室气体 (单季稻) 累积排放量 [E_c , kg·hm⁻² 或 g·hm⁻²] 计算公式见式(2)。

$$E_c = \left[\frac{F_1 + F_n}{2} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \right] \times 24 \times 0.01 \times a \quad (2)$$

式中, n 为单季稻期间观测次数; F_i 和 F_{i+1} 为第 i 次和 $i + 1$ 次采样时温室气体的排放通量 [mg·(m²·h)⁻¹ 或 μg·(m²·h)⁻¹], F_1 和 F_n 分别为第一次采样时温室气体的排放通量和最后一次采样时温室气体的排放通量; t_{i+1} 和 t_i 为第 $i + 1$ 次和 i 次采样的时间间隔 (d); a 为转化系数 (由于采样期间的天数小于单个稻季 (翻耕到收获) 天数,此系数将其转化为单个稻季的天数),早稻为 77/73,晚稻为 98/94。

稻季总累积排放量为分别求出两季稻累积排放量及两季稻之间 (早稻收获到晚稻季翻耕前,共 6 d) 的累积排放量 [E_{cf} , kg·hm⁻² 或 g·hm⁻²] 计算公式见式(3),再相加。

$$E_{cf} = \frac{E_{c1}}{77} \times 3 + \frac{E_{c2}}{98} \times 3$$

式中, E_{c1} 为早稻季累积排放量 (kg·hm⁻² 或 g·hm⁻²); E_{c2} 为晚稻季累积排放量 (kg·hm⁻² 或 g·hm⁻²); 77 和 98 分别为早稻季和晚稻季种植天数 (d); 两个 3 分别为两季稻间天数 (6 d) 的前 3 d 和后 3 d。

数据分析和处理采用 SPSS 19.0,处理间的多重比较 (统计显著水平为 $P < 0.05$) 采用 Duncan 法,模型构建采用 R 统计软件 (<http://www.r-project.org/>),作图采用 Origin 8.0 软件。

2 结果与分析

2.1 稻季 CH₄ 排放通量特征

如图 1,不同处理早、晚稻 CH₄ 排放通量有相似的季节变化规律,早、晚稻 CH₄ 排放分别主要集中在移栽后 43、52 d 内,呈现明显的单峰型,早、晚稻生长期 CH₄ 排放表现为晒田前集中排放,晒田期间降低,即使后期淹水,排放也很有限^[18]。早稻 CH₄ 排放通量变化平缓,强度低,持续时间短,变化范围在 0.09 ~ 8.94 mg·(m²·h)⁻¹; 晚稻 CH₄ 排放通量变化剧烈,强度大,持续时间长,变化范围在 -0.01 ~ 20.83 mg·(m²·h)⁻¹。早、晚稻 CH₄ 排放通量分别在移栽后第 43 d、6 ~ 13 d 达到排放峰值。两季稻 CH₄ 排放通量与 Eh 变化规律大致呈相反态势。

相关性分析表明,水稻生长季的 CH₄ 排放通量与土壤 Eh 呈极显著负相关,与土壤温度呈极显著正相关,各个处理均有此关系 (表 1); 综合各处理,生长季 CH₄ 累积排放通量与收获时水稻 (地上、地下) 生物量、产量相关性不显著 (表 2)。Eh 与土壤温度是对 CH₄ 排放通量起主导作用的环境因子,0N、1/2N、N、1/2N + PM 处理利用多元逐步线性回归建立的 CH₄ 排放通量 [F , mg·(m²·h)⁻¹] 模型分别为公式(4) ~ (7):

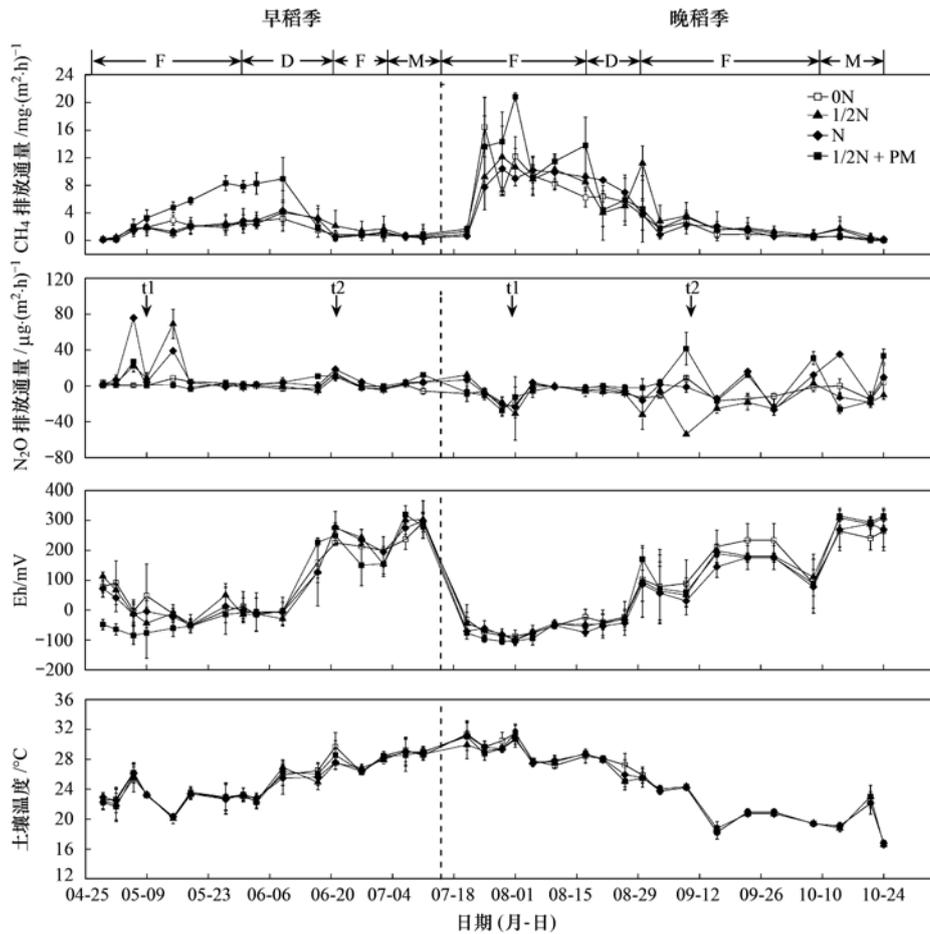
$$F = -2.94 - 0.02Eh + 0.30t \quad (R^2 = 0.51, P < 0.001, n = 35) \quad (4)$$

$$F = -4.81 - 0.01Eh + 0.37t \quad (R^2 = 0.41, P < 0.001, n = 35) \quad (5)$$

$$F = -3.36 - 0.01Eh + 0.30t \quad (R^2 = 0.51, P < 0.001, n = 35) \quad (6)$$

$$F = -4.78 - 0.02Eh + 0.43t \quad (R^2 = 0.44, P < 0.001, n = 35) \quad (7)$$

式中, Eh 为采样时耕层 5 cm 深度氧化还原电位 (mV), t 为采样时耕层 5 cm 深度平均温度 (°C)。



F. 淹水; D. 晒田; M. 湿润灌溉; t1. 分蘖肥; t2. 穗肥

图 1 CH₄ 和 N₂O 排放及 Eh 和土壤温度的变化动态

Fig. 1 Dynamics of CH₄ and N₂O emissions, soil Eh and soil temperature during rice growing seasons

表 1 不同处理水稻生长季 CH₄ 和 N₂O 排放通量与氧化还原电位 (Eh 值) 及土壤温度相关性分析¹⁾

Table 1 Correlations of CH₄ and N₂O fluxes in the rice seasons with oxidation-reduction potential (Eh) and soil temperature across the treatments

处理	CH ₄ 排放				N ₂ O 排放			
	Eh 值/mV		土壤温度/°C		Eh 值/mV		土壤温度/°C	
	r	P	r	P	r	P	r	P
0N	-0.676 **	<0.001	0.531 **	0.001	0.037	0.832	-0.181	0.298
1/2N	-0.565 **	<0.001	0.541 **	0.001	-0.113	0.518	-0.032	0.854
N	-0.663 **	<0.001	0.522 **	0.001	0.073	0.678	-0.195	0.263
1/2N + PM	-0.622 **	<0.001	0.477 **	0.004	0.116	0.507	-0.160	0.358

1) * 表示 0.05 水平显著; ** 表示 0.01 水平极显著

表 2 不同处理间 CH₄ 和 N₂O 累积排放量、CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势 (GWP)

与收获时水稻 (地上、地下) 生物量、产量相关性分析

Table 2 Correlations of seasonal cumulative CH₄ and N₂O emissions, global warming potentials (GWP) of CH₄ and N₂O emissions with ground, underground biomass and yield of rice for the treatments

处理间 相关分析结果	CH ₄ 排放				N ₂ O 排放				100 年的全球增温潜势 (GWP)			
	早稻季		晚稻季		早稻季		晚稻季		早稻季		晚稻季	
	r	P	r	P	P	r	P	P	r	P	r	P
地上生物量	-0.140	0.860	0.618	0.382	0.904	0.096	0.411	0.589	-0.105	0.895	0.646	0.354
地下生物量	0.592	0.408	0.762	0.238	0.663	0.337	0.520	0.480	0.621	0.379	0.798	0.202
产量	-0.249	0.751	0.586	0.414	0.897	0.103	0.505	0.495	-0.215	0.785	0.627	0.373

2.2 稻季 N_2O 排放通量特征

如图1,早稻季施基肥后第10 d,各施氮肥处理 N_2O 排放达到第一个峰值.施分蘖肥后第6 d除 $1/2N + PM$ 处理外,各施氮肥处理达到第二个峰值.晒田后第21 d各处理均出现峰值.收获前田间落干第4 d施氮肥处理产生峰值.

晚稻季施基肥后第4 d, $1/2N$ 与 N 处理 N_2O 排放达到第一个峰值.施分蘖肥后第5 d, $1/2N$ 、 N 和 $1/2N + PM$ 处理达到峰值.小区烤田结束复水后第4 d, $1/2N$ 与 N 处理达到峰值;复水后第10 d, $0N$ 与 $1/2N + PM$ 处理达到峰值.收获前田间落干第10 d各处理出现峰值.

相关性分析表明,各处理水稻生长季 N_2O 排放通量与 E_h 、土壤温度相关性不显著(表1);综合各处理, N_2O 累积排放通量与收获时水稻(地上、地下)生物量、产量相关性不显著(表2).

2.3 稻季 CH_4 和 N_2O 累积排放量及 N_2O 的排放因子

如表3,早稻季, $1/2N + PM$ 处理 CH_4 累积排放量显著高于 $0N$ 、 $1/2N$ 和 N 处理,分别高出128.11%、94.39%、110.81%.晚稻季, $1/2N + PM$ 处理与 N 、 $1/2N$ 处理 CH_4 累积排放量差异不显著,但显著高于 $0N$ 处理,分别高出 $0N$ 、 $1/2N$ 和 N 处理31.52%、14.20%、21.78%.综合两个稻季, $1/2N$

+ PM 处理 CH_4 累积排放量显著高于其他处理,分别高出 $0N$ 、 $1/2N$ 和 N 处理54.83%、33.85%、43.30%.

早稻季, N_2O 累积排放量表现为 $N > 1/2N > 1/2N + PM > 0N$,各处理均达到显著差异, $1/2N + PM$ 处理较 N 和 $1/2N$ 处理分别降低54.31%、35.29%.晚稻季, N_2O 累积排放量表现为 $1/2N + PM > N > 0N > 1/2N$, $1/2N + PM$ 处理与 N 处理差异不显著, $1/2N + PM$ 处理和 $0N$ 、 $1/2N$ 处理达到显著性差异, $1/2N + PM$ 处理较 N 、 $0N$ 、 $1/2N$ 处理高出24.73%、79.99%、90.26%.两个稻季, N_2O 累积排放量表现为 $1/2N + PM$ 处理较 N 处理降低67.50%,较 $0N$ 、 $1/2N$ 处理高出129.43%、119.23%,各处理均达到显著性差异.在等量氮素情况下 $1/2N + PM$ 处理可显著减少 N_2O 的排放.

如表3,早稻季,各处理表现为 $1/2N > N > 1/2N + PM$,各处理均达到显著差异.晚稻季表现为 $1/2N + PM > N > 1/2N$, $1/2N + PM$ 处理与 N 处理差异不显著,和 $1/2N$ 处理达到显著性差异.两个稻季, N_2O 排放因子表现为 $N > 1/2N + PM > 1/2N$,各处理均达到显著差异.各处理 N_2O 的排放因子均小于IPCC推荐的1%^[19].

表3 不同处理下早、晚稻季 CH_4 和 N_2O 累积排放量¹⁾

Table 3 Cumulative CH_4 and N_2O emissions during the early and late rice growing seasons across the treatments

稻季	处理	CH_4 累积排放量 / $kg \cdot hm^{-2}$	N_2O 累积排放量 / $g \cdot hm^{-2}$	排放因子 /%
早稻	$0N$	$31.74 \pm 5.93b$	$26.42 \pm 8.46d$	—
	$1/2N$	$37.25 \pm 1.66b$	$122.97 \pm 3.97b$	$0.10 \pm 0.00a$
	N	$34.36 \pm 15.40b$	$174.16 \pm 11.49a$	$0.08 \pm 0.01b$
	$1/2N + PM$	$72.42 \pm 11.18a$	$79.57 \pm 8.62c$	$0.03 \pm 0.00c$
晚稻	$0N$	$100.51 \pm 13.39b$	$-175.22 \pm 8.76b$	—
	$1/2N$	$115.75 \pm 10.86ab$	$-360.13 \pm 28.14c$	$-0.16 \pm 0.02b$
	N	$108.54 \pm 14.42ab$	$-46.59 \pm 21.97a$	$0.05 \pm 0.01a$
	$1/2N + PM$	$132.19 \pm 10.38a$	$-35.08 \pm 6.11a$	$0.06 \pm 0.00a$
两季	$0N$	$136.56 \pm 19.61b$	$-156.17 \pm 16.28c$	—
	$1/2N$	$158.00 \pm 12.44b$	$-239.02 \pm 29.80d$	$-0.04 \pm 0.01c$
	N	$147.56 \pm 30.11b$	$141.39 \pm 33.26a$	$0.07 \pm 0.01a$
	$1/2N + PM$	$211.48 \pm 18.39a$	$45.95 \pm 10.39b$	$0.05 \pm 0.00b$

1) 表内同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$); “—”无数据

2.4 稻季生物量、产量和 CH_4 与 N_2O 排放的全球增温潜势

如表4,两个稻季地上生物量表现为 $N > 1/2N + PM > 1/2N > 0N$,各处理均达到显著差异;地下生物量表现为 $1/2N + PM > N > 1/2N > 0N$, $1/2N + PM$ 处理和 N 处理差异不显著, $1/2N + PM$ 、 N 处理与 $1/2N$ 、 $0N$ 处理差异显著. $1/2N + PM$ 处理,未造成

产量的显著下降,但 $0N$ 处理或 $1/2N$ 处理会造成产量显著下降.从各处理 CH_4 和 N_2O 的综合GWP,可看出稻田生态系统 CH_4 是GWP的主要贡献者,占 CH_4 和 N_2O 综合GWP的99%以上;综合GWP表现为 $1/2N + PM > 1/2N > N > 0N$, $1/2N + PM$ 处理与其他处理达到显著差异, $1/2N$ 、 N 、 $0N$ 处理间的差异不显著.单位产量的GWP表现为 $1/2N + PM > 0N$

> 1/2N > N, 1/2N + PM 处理较 N、1/2N、0N 处理增高 58.21%、26.82%、20.63%。1/2N + PM 处理与 N 处理差异显著, 与 1/2N、0N 处理差异不显著, 1/2N、N、0N 处理间的差异不显著。各处理间 CH₄ 和 N₂O 的综合 GWP 与收获时水稻(地上、地下)生物量、产量相关性不显著(表 2)。

表 4 不同处理下双季稻田生物量、产量和 CH₄ 的 N₂O 的全球增温潜势(GWP)¹⁾

Table 4 Rice biomass, yield and global warming potentials (GWP) of CH₄ and N₂O emissions across the treatments

处理	100 年的全球增温潜势(GWP)			地上生物量 /t·hm ⁻²	地下生物量 /t·hm ⁻²	产量 /t·hm ⁻²	单位产量的 GWP (以 CO ₂ -eq 计) /kg·t ⁻¹
	CH ₄ (以 CO ₂ -eq 计)	N ₂ O(以 CO ₂ -eq 计)	总计(以 CO ₂ -eq 计)				
	/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²				
0N	3 414.01b	-46.54c	3 367.47b	13.02d	0.74c	8.88c	386.85ab
1/2N	3 949.90b	-79.57d	3 870.32b	16.66c	0.98b	10.55b	367.97ab
N	3 688.90b	42.13a	3 731.03b	19.88a	1.16a	12.59a	294.96b
1/2N + PM	5 286.92a	13.69b	5 300.61a	17.97b	1.21a	11.39ab	466.66a

1) 表内同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 影响双季稻 CH₄ 和 N₂O 产生与排放的因子

根据本研究水稻生长季 CH₄ 排放通量特征推断, 稻田淹水后由于土壤 Eh 下降, 产甲烷菌活性可能增强, 从而使 CH₄ 大量产生; 烤田期 CH₄ 排放急剧下降, 即使后期再次淹水排量也很有限, 可能是因为烤田使产甲烷菌活性受到了抑制。已有研究也表明, 水稻生长期排干水分能大量减少 CH₄ 排放, 主要是土壤干湿交替破坏了产甲烷菌的生存环境, 抑制了 CH₄ 的排放; 若烤田次数增多, 对 CH₄ 排放的抑制作用将更加显著^[20]。晚稻季较早稻季排放峰值来的早且更加剧烈, 可能由于晚稻期间温度较高, 产甲烷菌数量较多, 活性较强, 加之水稻生长较快, CH₄ 通过其导管向大气排放, 故晚稻较早稻排放峰值来的早, 且更剧烈。

本研究中双季稻氮肥最多投入为 270 kg·hm⁻², 远低于以往观测试验的施氮量^[21]。而稻田土壤矿质氮含量在施肥后 10 d 内由于水稻的吸收、氨挥发、径流流失而迅速降低^[22,23]。本试验早、晚稻烤田分别由施追肥后 22、17 d 后开始, 加之稻田长期处于还原状态, 反硝化作用使 N₂O 被还原为 N₂, 且积水越深 N₂O 向大气扩散越困难, 使 N₂O 排放明显减少^[24]。因此, 稻季出现大量 N₂O 负排放。

晚稻季各处理 N₂O 累积排放均为负值, 可能由于早稻季过后, 土壤中的无机氮含量低引起的。而 0N 处理 N₂O 排放显著大于 1/2N 处理, 可能由于 1/2N 处理的水稻植株较 0N 处理的长势好, 吸氮能力较强, 水稻吸收铵态氮较多^[25], 导致 1/2N 处理比 0N 处理土壤中的铵态氮较快减少(如晚稻季 2012 年 8 月 21 日土样 NH₄⁺-N 含量, 0N 和 1/2N 处理分别为 3.21 mg·kg⁻¹ 和 2.76 mg·kg⁻¹; 2012 年 8 月

30 日土样分别为 3.30 mg·kg⁻¹ 和 1.58 mg·kg⁻¹; 注: 数据未列出), 而稻田中的硝态氮极少, 故在晒田氧化与淹水还原条件下 N₂O 排放极少。

由不同处理间 CH₄ 和 N₂O 累积排放量、GWP 与收获时水稻(地上、地下)生物量、产量相关性不显著推断, 收获时水稻生物量并不是影响 CH₄ 和 N₂O 累积排放量、CH₄ 和 N₂O 综合 GWP 的主要因素。

3.2 猪粪有机肥替代 50% 氮肥对双季稻 CH₄ 和 N₂O 排放量的影响

本研究 1/2N + PM 处理的 CH₄ 排放量显著高于其他处理。由于猪粪中含有大量易分解有机物质(如蛋白质、脂肪类等), 提供了大量 CH₄ 前体, 增加了 CH₄ 排放^[26]。但也有研究表明长期有机肥配施化肥能显著提高土壤微生物碳氮量, 有利于土壤微生物分子多样性^[27], 提高稻田土壤甲烷氧化菌的多样性和丰富度, 具有显著降低稻田甲烷释放潜能^[28,29], 本研究 1/2N + PM 处理增加了 CH₄ 排放, 其长期效应有待证明。

早稻季, 1/2N + PM 处理较 N 处理显著降低了 N₂O 排放, 可能是由于微生物利用猪粪中大量易分解的碳和土壤中的氮素大量繁殖, 使土壤无机氮含量和氧化还原电位下降, N₂O 易被还原为 N^[14,30], 且猪粪在土壤中需要经过矿质化过程, 才能产生有效氮源, 减少 N₂O 的排放。晚稻季, 1/2N + PM 处理较 N 处理增加了 N₂O 排放, 可能由于晚稻季温度较高, 微生物活性强, 有机质分解快, 增加土壤中的有效氮, 增加 N₂O 的排放^[31]。就两季稻而言, 1/2N + PM 处理较 N 处理有效降低了 N₂O 排放。

鉴于猪粪有机肥肥力释放较化肥缓慢, 为使水稻在相应的生长期获得相应的养分, 本试验 N 处理与 1/2N、1/2N + PM 处理不同施肥时间的施肥量不同, 1/2N 与 1/2N + PM 处理化学氮肥按基肥: 分蘖

肥比例 5:5 施用,猪粪则作基肥一次性施用,而 N 处理按基肥:分蘖肥:穗肥比例 5:3:2 施用. 经过对两季水稻各施肥处理每次施肥(共 6 次)之后的一次 N_2O 、 CH_4 排放通量差异显著性分析得到:当各处理间 N_2O 排放通量出现显著差异时,其排放通量大小与当次施 N 量、已施入总 N 量不存在显著正相关关系或存在负相关关系;各处理间 CH_4 排放通量惟有第二次施肥后出现显著差异,且由于猪粪提供了大量 CH_4 前体,增加了 CH_4 排放,故并不能说明是由于 1/2N + PM 处理的不同时间施入不同量 N 使其 CH_4 排放显著增加. 因此,不同时间施氮量上的差别可能不是导致两种温室气体排放通量的主要原因.

3.3 稻季 N_2O 的排放因子

早稻季,1/2N 处理排放因子最大,可能是由于其施入氮量较少,加之早稻季气温低,土壤矿化产生的无机氮量也低,水稻长势较差,对肥料氮素的竞争减弱,从而为土壤硝化-反硝化微生物提供更多的反应底物,增加 N_2O 的排放. 晚稻季,1/2N 处理排放因子最小,可能由于晚稻季气温较高,土壤矿化产生的无机氮增加,水稻生长良好而对氮素的利用率高,从而使该处理的土壤氮素匮乏^[25],土壤有效氮源少, N_2O 排放少. 1/2N + PM 处理的猪粪作为替代部分化肥,能使投入的氮素缓慢释放,降低土壤有效氮含量,从而减少 N_2O 的排放,其排放因子较 N 处理显著降低.

3.4 稻季生物量、产量和 CH_4 与 N_2O 排放的全球增温潜势的比较

本研究中不施氮肥和少量施用氮肥显著降低了水稻(地上、地下)部分生物量,这可能是由于 0N、1/2N 处理较施全氮处理,土壤中的氮素较匮乏,导致生物量减少. 猪粪配施氮肥显著降低水稻地上部分生物量,可能由于猪粪肥效缓慢,对生物量的积累有一定影响. 不施氮肥或施用常规氮肥一半的氮肥能减少 N_2O 排放,但显著降低产量,由于产量的降幅高于 N_2O 排放的降幅,从而较常规施肥增加单位产量 GWP,反映出双季稻田水稻产量对施氮量的响应要比 N_2O 排放对施氮量的响应敏感. 猪粪配施氮肥保证了水稻的经济效益,显著降低了 N_2O 排放,但同时显著增加了 CH_4 排放,较常规施肥显著增加单位产量 GWP. 有研究表明每生产 1 t 纯 N、 P_2O_5 、 K_2O 将分别排放 0.81 t、0.11 t、0.08 t 的碳^[32],据此本研究 0N、1/2N、N、1/2N + PM 处理综合增温效应(以 CO_2 -eq 计)分别为 3 458.40、4 362.20、

4 623.86、5 734.20 $kg \cdot hm^{-2}$,1/2N + PM 处理最高. 但施用猪粪可以促进水稳性团粒结构的形成,增强土壤固碳效应、减少环境氮磷污染和改良土壤理化性质,其长期效应仍需验证^[33].

4 结论

(1) 双季稻田耕层 5 cm 深度 Eh 与 CH_4 排放通量有极高的负相关性,与 N_2O 排放通量没有显著相关性;耕层 5 cm 深度温度与 CH_4 排放通量有极高的正相关性,与 N_2O 排放通量没有显著相关性. 利用上述两个对 CH_4 排放通量起主导作用的环境因子,建立了预测 CH_4 排放通量的线性模型,分别能解释 0N、1/2N、N、1/2N + PM 处理 CH_4 排放通量变异的 51%、41%、51%、44%. 收获时水稻生物量并不是影响 CH_4 和 N_2O 累积排放量、 CH_4 和 N_2O 综合 GWP 的主要因素.

(2) 猪粪化肥配施处理双季水稻生长季 CH_4 累积排放量较不施氮肥、少量施用氮肥、常规施肥处理分别显著提高 54.83%、33.85% 和 43.30%;其 N_2O 累积排放量较常规施肥显著降低 67.50%,较不施氮肥、少量施用氮肥分别提高 129.43%、119.23%. 稻田温室气体 CH_4 占 CH_4 和 N_2O 的综合 GWP 的 99% 以上,配施猪粪的 GWP 显著高于其他处理,且单位产量 GWP 最高,较常规施肥、少量施用氮肥、不施氮肥分别提高 58.21%、26.82%、20.63%.

参考文献:

- [1] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**: 181-195.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing [EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wgl/ar4-wgl-chapter2.pdf>, 2007-11-17.
- [3] Simpson I J, Edwards G C, Thurtell G W. Variations in methane and nitrous oxide mixing ratios at the southern boundary of a Canadian boreal forest [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33** (7): 1141-1150.
- [4] Sass R L, Fisher F M Jr. Methane emissions from rice paddies: a process study summary [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **49**(1-3): 119-127.
- [5] 许黎,丁一汇,罗勇,等. 中国稻田甲烷排放减少[J]. *气候变化研究进展*, 2005, **1**(3): 126-128.
- [6] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8030-8042.

- [7] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析——基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(12): 2464-2475.
- [8] 吴乐知, 蔡祖聪. 基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算[J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1768-1774.
- [9] 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, **51**(7): 750-763.
- [10] Salinas-Garcia J R, Hons F M, Matocha J E, *et al.* Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by long-term tillage and nitrogen fertilization [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **25**(2): 182-188.
- [11] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同种类有机肥施用对一季稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1688-1694.
- [12] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(7): 143-148.
- [13] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, *et al.* A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2): doi: 10.1029/2004GB002401.
- [14] Pathak H, Bhatia A, Prasad S, *et al.* Emission of nitrous oxide from rice-wheat systems of Indo-Gangetic plains of India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, **77**(2): 163-178.
- [15] 姚丽贤, 李国良, 党志. 集约化养殖禽畜粪中主要化学物质调查[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(10): 1989-1992.
- [16] 王迎红. 陆地生态系统温室气体排放观测方法研究、应用及结果比对分析[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2005. 123-126.
- [17] Zheng X H, Mei B L, Wang Y H, *et al.* Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology[J]. *Plant and Soil*, 2008, **311**(1): 211-234.
- [18] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, **35**(4): 707-720.
- [19] IPCC. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Kanagawa: IGES, 2006.
- [20] 汤宏, 吴金水, 张杨珠, 等. 水分管理和秸秆还田对稻田甲烷排放及固碳的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(32): 264-270.
- [21] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区农林复合生态系统早稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量的时间变异[J]. 生态环境, 2006, **15**(1): 58-64.
- [22] Nishimura S, Sawamoto T, Akiyama H, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(2): doi: 10.1029/2003GB002207.
- [23] 李冬初, 徐明岗, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配合施用下双季稻田氮素形态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(2): 303-310.
- [24] 王振芬. 三江平原沼泽湿地不同水肥条件的 CH₄、N₂O 排放试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012. 4-6.
- [25] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. 中国水稻科学, 2002, **16**(3): 261-264.
- [26] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 7-12.
- [27] Zhang P J, Zheng J F, Pan G X, *et al.* Changes in microbial community structure and function within particle size fractions of a paddy soil under different long-term fertilization treatments from the Tai Lake region, China [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, **58**(2): 264-270.
- [28] 郑聚峰, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. 生态学报, 2008, **28**(10): 4864-4872.
- [29] 吕琴, 闵航, 陈中云. 长期定位试验对水稻田土壤甲烷氧化活性和甲烷排放通量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, **10**(6): 608-612.
- [30] Azam F, Müller C, Weiske A, *et al.* Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide-role of oxidizable carbon and applied nitrogen [J]. *Biology Fertility of Soils*, 2002, **35**(1): 54-61.
- [31] 胡霁堂. 植物营养学(下册)[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995. 170-172.
- [32] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **91**(1-3): 217-232.
- [33] Pan G X, Zhou P, Li Z P, *et al.* Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **131**(3-4): 274-280.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zelite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Reponses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-ni, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《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)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行