

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 邱小琼, 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, 郑伟 (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 *Paracoccus versutus* 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 CH₄ 和 N₂O 排放特征及品种筛选研究 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜 (2475)

闽江河口短叶茳芰湿地 CH₄ 和 N₂O 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)

闽江河口短叶茳芏湿地 CH₄ 和 N₂O 排放对氮输入的短期响应

牟晓杰^{1,4}, 刘兴土^{1,2*}, 仝川², 孙志高³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 2. 福建师范大学地理科学学院亚热带湿地研究中心, 福州 350007; 3. 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用静态箱-气相色谱法, 研究了氮输入对闽江河口短叶茳芏湿地 CH₄ 和 N₂O 排放通量的短期影响. 结果表明, 高氮输入在不同采样时间均促进了湿地 CH₄ 排放, 低氮输入在不同时间则具有不同的变化特征. 与对照处理相比, 低氮和高氮 2 种处理分别使湿地 CH₄ 排放通量增加了 -44.35% ~ 1057.35% 和 7.15% ~ 667.37%. 外源氮输入在 24 h 内对湿地 N₂O 排放通量具有明显的正激发效应, 最高可增加 171.60 倍和 177.79 倍, 但在 8 d 后, 氮输入对湿地 N₂O 排放的激发效应减弱甚至消失. 氮输入在短时间内对湿地土壤 Ec、pH 和 Eh 均未产生显著影响. 湿地 CH₄ 排放通量在对照处理下仅与 5 cm Eh 存在显著负相关, 在低氮处理下仅与 10 cm 地温呈显著负相关, 在高氮处理下则与 5 cm Ec、0、5 cm pH 以及 0、5、10 cm 土壤 Eh 均呈显著相关性, 而 N₂O 排放通量在不同处理下与湿地气温、地温、盐度、pH 和 Eh 等环境因子均不存在显著相关性. 研究表明, 探讨氮输入对湿地温室气体排放的影响应考虑其时间变异性.

关键词: CH₄; N₂O; 氮输入; 滨海湿地; 闽江口

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2482-08

Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH₄ and N₂O Effluxes from *Cyperus malaccensis* Marsh in the Min River Estuary

MOU Xiao-jie^{1,4}, LIU Xing-tu^{1,2}, TONG Chuan², SUN Zhi-gao³

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Research Centre of Wetlands in Sub-tropical Regions, College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Using static chamber-GC techniques, the short-term effects of nitrogen input on the emission fluxes of CH₄ and N₂O from a *Cyperus malaccensis* wetland were determined. The results showed that the emission of CH₄ was increased by high nitrogen input at all sampling times, whereas the low nitrogen input exhibited different variation characteristics at different time points. Compared to the control treatment, the CH₄ emission flux in the two nitrogen input treatments (N1, N2) was increased by -44.35% - 1057.35% and 7.15% - 667.37%, respectively. The input of exogenous nitrogen had positive priming effect on N₂O emission flux within 24 hours, increased by up to 171.60 folds and 177.79 folds, respectively. After 8 days, the priming effect by the nitrogen input weakened or disappeared. There was no significant effect of nitrogen input on the Ec, pH and Eh of soil at different depths in the salt marsh during the experiment. In the control treatment, the CH₄ emission flux was negatively correlated solely with Eh of soil at 5 cm depth, whereas in the N1 treatment, it was negatively correlated solely with soil temperature at 10 cm depth. In the N2 treatment, there was negative correlation between the CH₄ emission flux and Ec of soil at 5 cm depth, pH of soil at 0, 5 cm depths, and Eh of soil at 0, 5, 10 cm depths. However, no significant correlation between the N₂O emission flux and the environmental variables in the wetland was found. This study indicated that the temporal variability should be taken into consideration when examining the effects of nitrogen input on the emission of greenhouse gases in the wetlands.

Key words: CH₄; N₂O; nitrogen input; coastal wetland; Min River estuary

CH₄ 和 N₂O 是大气中 2 种重要的温室气体, 虽然它们在大气中的含量低于 CO₂, 但在 100 年时间尺度上其单位质量的全球增温潜势约为 CO₂ 的 23 倍和 296 倍^[1]. 据估计, 大气中每年有 15% ~ 30% 的 CH₄、80% ~ 90% 的 N₂O 来源于生态系统的自然

排放^[2]. 随着人类氮 (N) 排放的日益增加, 外源 N

收稿日期: 2011-08-31; 修订日期: 2012-01-16

基金项目: 国家重大科学研究计划项目 (2012CD956100)

作者简介: 牟晓杰 (1982 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学, E-mail: xjmou@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lxtmxh@163.com

输入逐渐成为生态系统温室气体产生和消耗过程的重要影响因子之一^[3],其通过改变土壤 N 状况及 N 循环速率、影响植物生长和凋落物分解、改变土壤生物数量和活性等从而影响生态系统 CH_4 和 N_2O 排放^[4]. 湿地是 CH_4 最大的天然排放源,据估计,全球湿地 CH_4 年排放量为 100 ~ 200 $\text{Tg}^{[5]}$,占全球 CH_4 年排放量的 20% 左右^[6]. N_2O 是仅次于 CO_2 和 CH_4 的温室气体,其在大气中的浓度正以每年 0.26% 的速度递增^[7]. 由于 N_2O 在大气中的寿命可达 150 a,又因其与 O_3 层破坏和酸沉降息息相关,所以它对全球环境的影响是长期的和潜在的^[8,9].

滨海湿地处于海洋和陆地的交错地带,具有巨大的生态系统服务功能,对人类社会的可持续发展起着重要作用. 然而, N 沉降的增加造成河口、江湖等水域 N 富集,并引起和将引起一系列严重的生态问题,已经成为科学家和公众关注的热点^[10,11]. 滨海河口湿地不仅受大气 N 沉降的影响,而且河流流域内人类生产、生活活动产生的含 N 物质通过河流大量排放入海,也会对河口湿地生态系统造成严重影响. 据估计,当前全球由河流排放入海的可溶性有机和无机氮 (DIN 和 DON) 总量为 30 ~ 36 $\text{Mt}\cdot\text{a}^{-1}$,其中 DON 占了 31% ~ 37%^[12],并且未来仍有不断增加的趋势^[13]. 因此,研究氮输入对滨海河口湿地的影响具有重要的现实意义. 目前,国外关于氮输入对天然滨海湿地 CH_4 和 N_2O 排放的影响开展了较多相关研究^[14,15],而国内该方面的相关研究多集中在我国的三江平原淡水沼泽湿地^[16~20],关于滨海河口湿地的相关研究还鲜见报道. 在时间尺度上,关于氮输入的生态影响有长期、短期等不同尺度的研究. 由于滨海河口湿地具有脆弱性、敏感性和动态性的特点,研究其对氮输入的短期响应就显得非常重要.

闽江河口湿地是我国闽江流域最大的天然湿地,是候鸟迁徙的重要驿站地、越冬地和庇护所. 闽江河口滨岸滩涂湿地作为闽江入海河段与东海相互作用形成的重要生态类型,承接来自闽江中上游带来的大量含氮物质. 据统计,2009 年闽江口为无机氮和活性磷酸盐污染较为严重的区域,闽江氮磷污染物排海总量为 19 927 $\text{t}^{[21]}$. 目前,关于氮输入对闽江河口湿地温室气体排放影响的研究还未见报道. 因此,本研究以闽江河口土著优势植物短叶茳芏 (*Cyperus malaccensis*) 盐沼湿地为对象,分析湿地 CH_4 和 N_2O 排放对氮输入的短期响应特征,结果对于深入开展和探讨人类活动影响下滨海河口湿地生态系统碳、氮循环过程及其维持机制等具有重要

意义.

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

实验于 2011 年 4 月 29 日 ~ 5 月 7 日在福建省长乐市闽江河口湿地自然保护区面积最大的鳝鱼滩湿地进行. 鳝鱼滩湿地 ($26^{\circ}00'36'' \sim 26^{\circ}03'42''\text{N}$, $119^{\circ}34'12'' \sim 119^{\circ}40'40''\text{E}$) 地处闽江入海口,分布于琅岐岛与长乐市潭头-文岭-梅花之间的梅花水道中偏潭头-梅花一侧,是闽江泥沙淤积形成的河口潮滩,面积 3 120 hm^2 . 潮汐属正规半日潮,气候暖热湿润,年均气温 19.13 $^{\circ}\text{C}$,年降雨量 1 346 mm 左右^[22]. 芦苇 (*Phragmites australis*)、短叶茳芏和蘆草 (*Scirpus triqueter*) 是该区域的土著优势挺水植物,近年来,互花米草 (*Spartina alterniflora*) 入侵迅速,已形成许多明显的大面积入侵斑块. 本研究在鳝鱼滩湿地中西部五门闸附近的中偏高潮滩内进行,该区短叶茳芏群落、芦苇群落与互花米草群落呈斑块状镶嵌分布. 在短叶茳芏群落选择一个典型研究样区进行实验布设.

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

实验选取闽江河口短叶茳芏湿地为研究对象,在实验样地内随机选取 9 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的研究小区,设置对照、低氮和高氮 3 个氮处理水平,每个处理 3 个重复. 2011 年 4 月 29 日上午 10:00 以 1 000 mL NH_4NO_3 水溶液的形式进行氮输入处理,氮输入量分别为 $3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (N_1) 和 $6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (N_2),对照处理 (N_0) 施入等量的水,分别在氮输入后的 0、3、24 和 192 h 进行样品采集.

1.2.2 气样采集与分析

CH_4 和 N_2O 气体采集采用静态箱法. 采样箱由有机玻璃制成,采用标准式组合设计,由箱体和底座 2 部分组成,箱体规格为 $35\text{ cm} \times 35\text{ cm} \times 100\text{ cm}$,底座为 $35\text{ cm} \times 35\text{ cm} \times 50\text{ cm}$. 采样时,箱体和底座间用水密封. 实验于当日 10:00 开始,样品采集采用 100 mL 注射器,在 30 min 时间段内每 10 min 采集 1 次样品 (共采集 4 个气体样品),气体样品置于 0.5 L 的铝塑复合气袋中,36 h 内在实验室用 Agilent 7890 气相色谱仪同时分析 CH_4 和 N_2O 气体浓度. 30 min 内采集的 4 个气体样品浓度与采样时间间隔存在线性相关关系,所有样品的相关系数均在 $R^2 > 0.95$ 时才视为有效.

1.2.3 环境因子测定

同步观测 1.5 m 气温和箱温的变化,并在样品采集后 0.5 h 内观测不同深度(0、5、10 和 15 cm)地温、电导率(E_c)、pH 和氧化还原电位(Eh). pH 和氧化还原电位(Eh)采用 IQ150 便携式 pH/氧化还原电位/温度计(IQ Scientific Instruments, USA)测定,盐度采用 2265FS 便携式电导盐分计(Spectrum Technologies Inc, USA)测定,气温采用便携式气象仪(Kestrel-3500, USA)测定.

1.2.4 通量计算

CH_4 和 N_2O 排放通量采用下式计算:

$$J = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中, J 为气体通量 [$mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$], dc/dt 为采样时气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率, M 为被测气体摩尔质量 ($g \cdot mol^{-1}$), P 为采样点气压 (Pa), T 为采样时绝对温度 (K), V_0 、 P_0 和 T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积 ($mL \cdot mol^{-1}$)、空气气压 (Pa) 和绝对温度 (K), H 为地面以上采样箱高 (m).

1.2.5 数据统计与分析

运用 Origin 7.5 和 SPSS 13.0 软件对数据进行作图、计算和相关分析.

2 结果与分析

2.1 环境因子变化特征

2.1.1 温度

采样期间短叶荳芰湿地的气温、箱温和不同深度地温的变化趋势较为一致(图 1),各温度参数之间的差异性达到极显著性水平($P < 0.001$). 湿地环境温度在 4 个采样时间之间的差异并不显著($P > 0.05$),在不同采样时间,湿地环境温度均表现为箱温 $>$ 气温 $>$ 0 cm 地温 $>$ 5 cm 地温 $>$ 10 cm 地温.

2.1.2 电导率、pH 和氧化还原电位

图 2(a) 为短叶荳芰湿地不同土壤深度的 E_c 变化特征,除了在第 24 h,在各处理下,湿地土壤 E_c 均随深度增加而逐渐减低,第 3 次采样由于前 1 d 晚上下雨,淡水的输入使得土壤 E_c 表现为 0 cm $<$ 5 cm $>$ 10 cm. 采样期间,短叶荳芰湿地不同深度土壤的 pH 介于 5.13 ~ 6.96 之间[图 2(b)],湿地土壤呈弱酸性条件,而湿地土壤的氧化还原电位则在 2.93 ~ 110.15 之间[图 2(c)],说明湿地土壤的氧化性较强. 氮输入在不同采样时间对湿地土壤 E_c 、pH 和 Eh 的影响不尽相同,但其对不同土层的 E_c 、pH 和 Eh 均未产生显著影响($P > 0.05$).

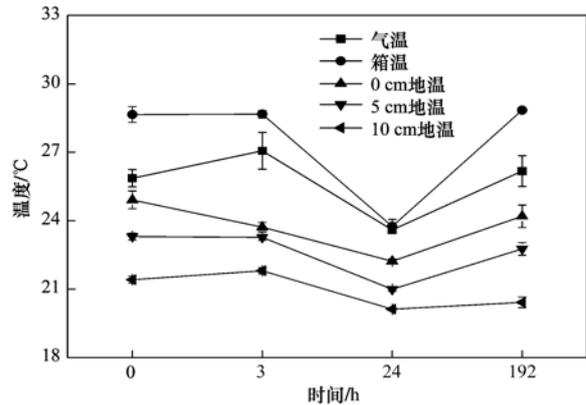


图 1 湿地环境温度变化

Fig. 1 Variation of environmental temperatures in the *C. malaccensis* wetland

2.2 湿地 CH_4 排放通量对 N 输入的响应

图 3 是氮输入后不同时间闽江河口短叶荳芰湿地 CH_4 排放通量的变化. 从中可知,短叶荳芰湿地在不同采样时间均表现为 CH_4 的排放源,排放通量介于 23.66 ~ 938.95 $ug \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 之间. 低氮处理在施氮 0 和 24 h 后对短叶荳芰湿地 CH_4 排放通量表现为促进作用,与对照处理相比分别增加了 1057.35% 和 108.07%,而在施氮后 3 和 192 h 则表现为抑制作用,分别降低了 42.28% 和 44.35%. 比较而言,高氮输入在不同采样时间均促进了湿地 CH_4 排放,其增加幅度分别为 667.37%、7.15%、3.09% 和 312.28%. 方差分析表明,氮输入处理和采样时间对 CH_4 排放通量均未产生显著影响($P > 0.05$).

2.3 湿地 N_2O 排放通量对 N 输入的响应

图 4 是氮输入后不同时间闽江河口短叶荳芰湿地 N_2O 排放通量的变化. 从中可知,短叶荳芰湿地在实验期间表现为 N_2O 的弱源/弱汇,排放通量介于 -5.83 ~ 32.64 $ug \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 之间. 低氮和高氮两种处理在施氮后 0、3 和 24 h 对短叶荳芰湿地的 N_2O 排放通量均表现为促进作用,与低氮处理相比高氮处理的促进作用稍高,但二者之间并没有显著差异($P > 0.05$). 在 24 h 内,随着时间的增加 N 输入对湿地 N_2O 排放的促进作用逐渐增大,与对照处理相比分别增加了 10.83、17.55、171.60 倍和 11.40、18.40、177.79 倍,这说明氮输入在短时间内对湿地 N_2O 排放具有明显的正激发效应. 但是 8 d 后,氮输入处理的 N_2O 排放通量与对照处理相比并没有显著差异($P > 0.05$),氮输入对湿地 N_2O 排放的激发效应消失甚至表现为抑制.

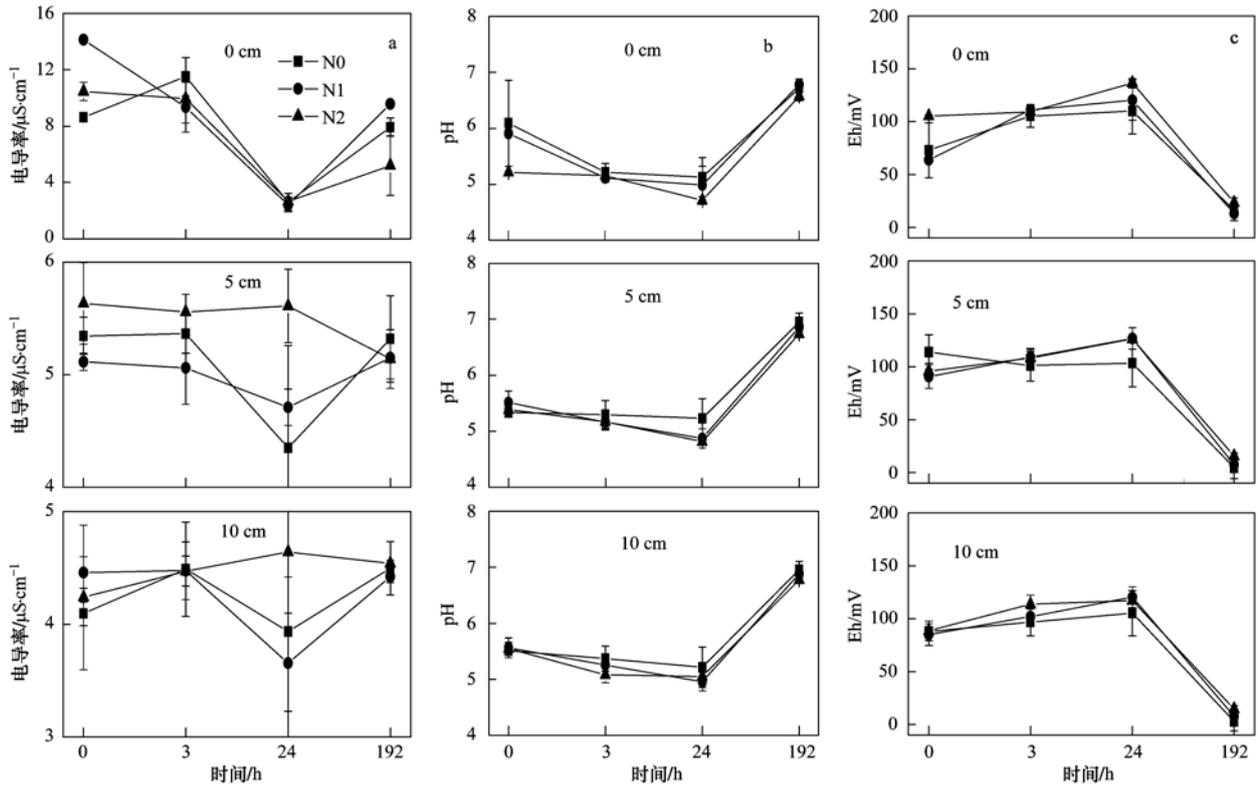


图2 短叶茳芩湿地土壤电导率、pH 和 Eh 变化

Fig. 2 Variations of electrical conductivity, pH and Eh of soil at 0, 5 and 10 cm soil depths in the *C. malaccensis* salt marsh under different nitrogen levels

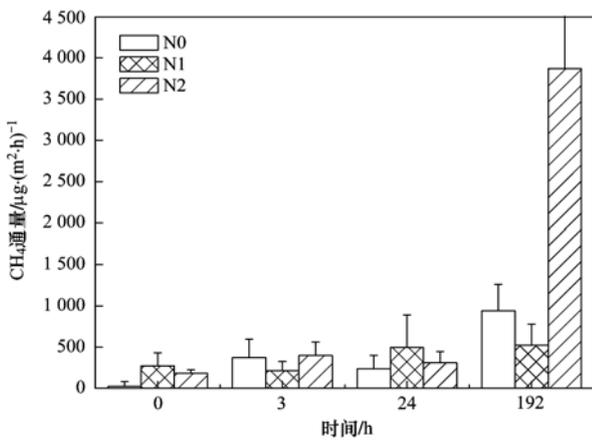


图3 湿地 CH₄ 排放通量变化

Fig. 3 Variation of CH₄ emission flux from the *C. malaccensis* wetland

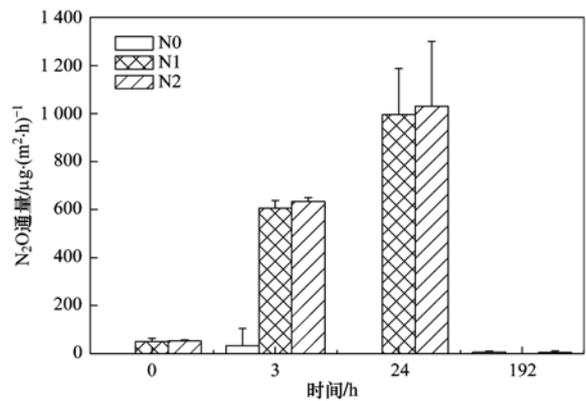


图4 湿地 N₂O 排放通量变化

Fig. 4 Variation of N₂O emission flux from the *C. malaccensis* wetland

3 讨论

3.1 氮输入对湿地 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

3.1.1 氮输入对湿地 CH₄ 排放的影响

河口潮滩湿地为 CH₄ 的重要排放源^[15,23,24], 而 CH₄ 的排放通量主要取决于 CH₄ 产生和氧化过程的相对平衡. 本项研究发现, 氮输入在短时间内总体

上促进了闽江河口短叶茳芩湿地的 CH₄ 排放. 许多研究也表明氮输入的增加可明显促进湿地的 CH₄ 排放. 张丽华等^[16] 的研究发现, 氮输入增加了生长季沼泽湿地的 CH₄ 排放通量, 氮输入处理的 CH₄ 排放总量为对照处理的 2.5 倍. 宋长春等^[18] 的研究也发现, 氮输入促进了三江平原淡水沼泽湿地的 CH₄ 排放通量, 与对照处理相比, 其排放通量增加了

145%,且主要与植物生长、有机质分解、根系分泌功能及湿地温度和水文状况有关。甲烷氧化菌在氧化 CH_4 和硝化细菌氧化 NH_4^+ 时需要相同的微生物酶参与, NH_4^+ 的输入可通过增加硝化细菌数量而抑制甲烷氧化菌的生长及活性,导致二者对酶的竞争,从而抑制 CH_4 氧化^[25,26]。同时, NH_4^+ 氧化过程中产生的 NO_2^- 会对甲烷营养菌产生毒害作用,从而减少土壤对大气 CH_4 的氧化吸收^[27]。另外, NO_3^- 及与 NO_3^- 结合的阳离子都对甲烷营养菌具有直接的毒害作用^[28],从而抑制 CH_4 氧化。本研究中,低氮处理在施氮后3 h和192 h对 CH_4 排放的抑制作用主要与不同采样时间的环境因子变化、植物吸收利用状况、植物传输作用、土壤 CH_4 营养菌活性等因素有关。

3.1.2 氮输入对湿地 N_2O 排放的影响

土壤硝化-反硝化作用是 N_2O 产生的关键过程,与土壤有效氮的供应状况关系密切^[3],氮输入的增加通常引起 N_2O 排放通量的显著增加。本研究发现,短叶茳芩湿地的 N_2O 排放通量在24 h内均显著高于对照处理,Muñoz-Hincapié等^[29]对波多黎各红树林(*Rhizophora mangle*)沉积物 N_2O 通量对N添加响应的研究也发现,随着 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量的增加, N_2O 通量逐渐增加,Aelion等^[30]对美国南卡罗来那滨海平原 N_2O 排放的研究也表明,随着 NO_3^- -N浓度的增加, N_2O 产生速率和转化效率均增加。文献[16,18]对我国三江平原淡水沼泽湿地的研究也发现氮输入对湿地 N_2O 排放通量具有明显促进作用。总体而言,导致短叶茳芩湿地的 N_2O 排放通量显著增加的原因主要有如下3个方面:①氮元素是影响闽江河口短叶江芩湿地植物生长的重要限制性因子^[31],在受氮限制的生态系统中,植物根系与土壤微生物间对氮存在激烈的竞争,随着外源氮输入的增加,可被硝化细菌和反硝化细菌利用的

有效氮增加,作为硝化和反硝化过程的反应底物增多,从而促进了土壤 N_2O 的排放^[32]。②氮输入还能够通过增加土壤中的 NO_2^- 浓度促进硝化细菌反硝化作用,从而增加 N_2O 排放^[33]。③氮输入可能导致湿地植株N供给过剩,使植物直接排放的 N_2O 增加^[16]。然而,施氮8 d后氮输入对 N_2O 排放通量的影响并不显著,因为输入的氮主要被植物吸收利用了,而存留在土壤中的N很少,不足以改变土壤硝化和反硝化速率,所以对土壤 N_2O 排放的影响不明显。因为 N_2O 排放通量与土壤N循环速率显著相关,氮输入只有在提高土壤有效N含量,促进土壤硝化、反硝化作用强度时才会明显影响土壤 N_2O 的排放量^[34]。Moseman-Valtierra等^[15]对*Spartina patens*盐沼湿地的研究也得到了相似的变化规律,氮输入(NaNO_3)在1 h内显著增加了湿地的 N_2O 排放通量,但是施氮2 d后氮输入处理与对照处理之间的差异性消失。另外,湿地 N_2O 排放还与N的矿化速率以及土壤自身养分状况等因素密切相关。

3.2 环境因子对 CH_4 和 N_2O 排放通量的影响

3.2.1 温度

温度是影响湿地温室气体排放的重要环境因子,温度主要通过影响土壤微生物的活性以及植株的 CH_4 和 N_2O 传输与释放能力从而影响生态系统 CH_4 和 N_2O 排放。本研究发现,在对照处理下, N_2O 排放通量与各温度参数均呈正相关关系,而氮输入处理下的 N_2O 排放通量则与各温度参数均呈负相关关系(表1)。低氮处理下 CH_4 排放通量与温度参数的相关关系也与对照相反(10 cm地温除外)。除 CH_4 排放通量在低氮处理下与10 cm地温存在显著的负相关关系($R = -0.973, P < 0.05$)外,其他情况下温度对 CH_4 和 N_2O 排放的影响均不显著,原因可能与观测时间较短,温度的变化幅度不大有关。

表1 温度与 CH_4 和 N_2O 通量的Pearson相关及显著性分析¹⁾

Table1 Pearson correlation and significance analysis between CH_4 or N_2O fluxes and the temperatures

气体	处理	气温	箱温	地表温度	5 cm地温	10 cm地温
CH_4	对照	0.288	0.297	0.038	0.052	-0.37
	低氮	-0.608	-0.480	-0.435	-0.686	-0.973*
	高氮	0.237	0.361	0.227	0.105	-0.429
N_2O	对照	0.722	0.431	0.042	0.478	0.664
	低氮	-0.574	-0.824	-0.918	-0.720	-0.220
	高氮	-0.570	-0.821	-0.917	-0.717	-0.216

1) *表示 $P < 0.05$

3.2.2 电导率

盐分是影响滨海湿地诸生态过程的重要环境因子。本研究中湿地土壤盐分随深度增加而逐渐降低,

这主要与表层土壤经常受海水浸渍有关。盐分主要通过影响微生物活性和植物活动从而间接影响 CH_4 排放,盐分条件对 CH_4 产生潜力具有一定的抑制作

用^[35,36]. 盐分对 N₂O 排放的影响则主要通过影响湿地硝化-反硝化细菌的活性以及湿地氮周转而进行. 高盐分不利于土壤氮素转化, 且盐分越高抑制越明显^[37]. Smith 等^[38] 研究也发现, 墨西哥湾不同盐分沉积物的 N₂O 排放通量存在很大差异, 淡水沼泽最大, 盐分较低盐沼次之, 盐分较高盐沼最低. 本研究中, 氮输入并没有对土壤盐分产生显著影响, 湿地 CH₄ 和 N₂O 排放通量与盐分变化之间并没有呈现前述的对应变化规律, 主要因为滨海河口湿地特殊的地理位置使其盐分条件受潮汐、河流和降雨等的

影响较大, 输入的少量氮肥在短期内不足以对其盐分含量产生显著影响有关. 相关分析表明, 湿地 CH₄ 和 N₂O 排放通量在对照处理下与各层土壤 Ec 均呈正相关关系, 而在低氮处理下则与各层土壤 Ec 呈负相关关系, 高氮处理下湿地 CH₄ 和 N₂O 排放通量与各层土壤 Ec 的相关关系并不一致. 除 CH₄ 排放通量在高氮处理下与 5 cm 土壤 Ec 存在显著负相关关系 ($R = -0.996, P < 0.05$) 外, 其他情况下湿地两种温室气体排放通量与土壤 Ec 的相关性均不显著 (表 2).

表 2 电导率、pH 和 Eh 与 CH₄ 和 N₂O 通量的 Pearson 相关及显著性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation and significance analysis between CH₄ or N₂O fluxes and electrical conductivity, pH and Eh

气体	处理	Ec			pH			Eh		
		0 cm	5 cm	10 cm	0 cm	5 cm	10 cm	0 cm	5 cm	10 cm
CH ₄	对照	0.114	0.240	0.711	0.573	0.919	0.887	-0.737	-0.963 *	-0.885
	低氮	-0.569	-0.360	-0.554	0.379	0.434	0.433	-0.366	-0.443	-0.429
	高氮	-0.339	-0.996 **	0.288	0.957 *	0.952 *	0.945	-0.954 *	-0.960 *	-0.951 *
N ₂ O	对照	0.745	0.461	0.721	-0.331	-0.104	-0.109	0.250	0.046	0.113
	低氮	-0.841	-0.901	-0.786	-0.897	-0.806	-0.801	0.903	0.795	0.801
	高氮	-0.441	0.545	0.624	-0.764	-0.789	-0.783	0.769	0.775	0.778

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.2.3 pH

土壤 pH 是影响温室气体排放的关键因子. 绝大多数土壤微生物适应中性或微碱性的条件, 并对土壤 pH 的变化较为敏感^[39]. 土壤 pH 主要从 3 个方面影响最终的 CH₄ 排放^[5]: ① 有机质分解过程; ② CH₄ 的产生过程; ③ CH₄ 的氧化过程. 研究表明, 产 CH₄ 菌可以忍受的 pH 范围为 5.5 ~ 9.0, 最适 pH 范围为 6.8 ~ 7.2^[5]. 本研究中, 前 3 次采样土壤 pH 在 4.71 ~ 6.09 之间, 不在产 CH₄ 菌活动的最适 pH 范围内, 所以 CH₄ 排放通量相对较低, 而最后一次采样土壤 pH 接近于 7, 适宜土壤产 CH₄ 菌的活动, 所以此时 CH₄ 排放通量相对较高. N₂O 是反硝化作用的中间产物, N₂O 最终还原为 N₂ 的程度主要由 N₂O 还原酶的活性决定, 而 N₂O 还原酶的活性一般随 pH 值的增加、NO₃⁻-N 浓度和氧分压的降低而增加^[40]. 本研究第 4 次采样时土壤 pH 升高, 而 N₂O 排放通量降低, 可能与 pH 升高增加了 N₂O 还原酶的活性, 从而增加了反硝化产物中 N₂: N₂O 有关. 氮输入并没有显著改变湿地不同层次土壤的 pH, 主要因为河口湿地的外界环境因素比较复杂, 输入的少量 N 肥在短时间内不足以显著改变土壤的 pH. 相关分析表明, 短叶茳芩湿地的 CH₄ 排放通量与不同土层的 pH 均呈正相关关系, 且高氮处理下短叶茳芩湿地的 CH₄ 排放通量与 0 和 5 cm 土壤 pH 之间

的相关性达到显著性水平 ($R = 0.957, P < 0.05$; $R = 0.952, P < 0.05$), 而湿地的 N₂O 排放通量则与不同土层的 pH 均呈负相关关系, 但相关性并不显著 ($P > 0.05$).

3.2.4 氧化还原电位

土壤中 CH₄ 和 N₂O 的生成与氧化还原电位密切相关. Kralova 等^[41] 的研究发现, 土壤悬液的 Eh 为 0 mV 时 N₂O 排放量最大, 进一步降低 Eh 将使 N₂O 排放量减少, 而使反硝化速率和 N₂ 排放增加. 本研究中施氮处理下湿地 N₂O 排放通量的变化与这一规律较为相似, 在前 3 次采样中, 湿地 Eh 在 63.9 ~ 136.7 之间, 并且随着时间的增加不同土层的 Eh 均不断增大, 而湿地 N₂O 排放通量也随时间增加而逐渐增大, 施氮 8 d 后湿地各层土壤 Eh 均大幅降低, 而 N₂O 排放通量也表现为类似变化规律, 甚至表现为负值. 刘景双等^[42] 的研究也表明, Eh 是决定沼泽湿地 N₂O 生产的关键因子, 并且决定了 N₂O 的长期排放模式. CH₄ 的生成一般需要较低的氧化还原电位, 因为土壤中的产甲烷菌只有在严格厌氧条件下才具有产甲烷活性^[5]. 本研究中施氮 8 d 后湿地各层土壤的 Eh 最低, 湿地 CH₄ 的排放量也最高, 这可能与土壤还原性的增加促进了土壤中产甲烷菌的活性有关. 氮输入在不同时间对湿地土壤 Eh 的影响均不显著, 如前所述主要因为影响河口湿

地 Eh 的因素比较复杂,输入的少量 N 肥在短时间内不足以显著改变土壤的 Eh. 相关分析表明,短叶茳芰湿地的 CH₄ 排放通量与不同土层的 Eh 均呈负相关关系,且高氮处理下湿地的 CH₄ 排放通量与 0、5 和 10 cm 土壤 Eh 之间的相关性均达到显著性水平 ($R = -0.954, P < 0.05$; $R = -0.960, P < 0.05$; $R = -0.951, P < 0.05$). 而湿地 N₂O 排放通量则与不同土层的 Eh 均呈正相关关系,但相关性并不显著 ($P > 0.05$).

3.3 氮输入对 CH₄ 和 N₂O 排放的时间变异性

本研究表明,氮输入对湿地 CH₄ 和 N₂O 排放的影响具有明显的时间变异性,特别是 N₂O 排在 24 h 内表现出明显的正激发效应,但在 8 d 后影响却并不显著. Moseman-Valtierra 等^[15]对 *Spartina patens* 盐沼湿地的研究也发现,氮输入处理在 1 h 内显著增加了湿地的 N₂O 排放通量,但是施氮 2 d 后氮输入处理与对照处理之间的差异性消失. 可见,氮输入后观测时间的不同对研究结论会具有直接影响. 目前,关于氮输入对生态系统温室气体排放的研究所采取的观测时间不尽一致,包括在氮输入后 1 h 内^[15]、3~4 d^[16,17]、1 个月^[18]等进行观察,得到的观测结论也不尽一致. 氮输入生态影响的时间变异性主要因为植物、动物、微生物对外源物质的响应和适应需要一个时间过程,外源物质在生态系统中的消解、转化或累积也将随时间而异,最终导致生态系统对外源物质输入的自我调节和适应的时间变异,氮输入生态影响的时间变异性还与外源氮的输入量、输入频次、生态系统底质状况以及环境因子等具有密切关系. Bradford 等^[43]认为通过一次性大量输入或分几次大量输入氮肥来模拟氮输入对生态系统影响的研究不太准确,因为实际情况下氮元素是通过高频率少量输入的方式进行的. 鉴于此,笔者认为建立温室气体排放通量与氮输入量、土壤理化性质变化以及各种环境因子之间的时间序列经验或机理模型或许可以更准确地评估和预测氮输入对生态系统温室气体排放的影响,从而为全球气候变化研究以及国家减排政策的制定提供可靠的数据支持.

4 结论

(1) 低氮输入在施加后的不同时间对湿地 CH₄ 排放的影响并不一致,高氮处理在施加后的不同时间均促进了湿地 CH₄ 排放. 与对照处理相比,低氮和高氮 2 种处理分别使短叶茳芰湿地 CH₄ 排放通量增加了 -44.35% ~ 1057.35% 和 7.15% ~

667.37%.

(2) 2 种氮处理在 24 h 内对湿地 N₂O 排放均具有明显的促进作用,而 8 d 后促进作用消失甚至产生微弱的抑制. 氮输入最高可使湿地 N₂O 排放通量增加 171.60 倍和 177.79 倍.

(3) 氮输入在短时间内对湿地土壤 Ec、pH 和 Eh 均未产生显著影响. 湿地 CH₄ 排放通量在对照处理下仅与 5 cm Eh 存在显著负相关,在低氮处理下仅与 10cm 地温呈显著负相关,高氮处理下则与 5 cm Ec、0、5 cm pH 以及 0、5、10 cm 土壤 Eh 均呈显著相关性,而 N₂O 排放通量在不同处理下与湿地气温、地温、盐度、pH 和 Eh 等环境因子均不存在显著相关性.

(4) 氮输入对湿地 CH₄ 和 N₂O 排放的影响具有明显的时间变异性,氮输入后的观测时间不同对研究结论影响较大,今后应注意加强该方面的研究.

致谢:福建师范大学地理学院的黄佳芳、张永勋、杨平、张子川、何清华、章文龙、雍石泉、林德华、马永跃、李旭伟等同学在野外实验过程中给予了很大的支持和帮助,在此表示诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Science Basis: Chapter 4. Atmosphere Chemistry and Greenhouse Gases [A]. Cambridge: Cambridge University Press UK, 2001.
- [2] IPCC. Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change [A]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [3] Butterbach-Bahl K, Gasche R, Breuer L, et al. Fluxes of NO and N₂O from temperate forest soils: impact of forest type, N deposition and of liming on the NO and N₂O emissions [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 48(1-2): 79-90.
- [4] 张炜, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2309-2319.
- [5] 王德宣, 丁维新, 王毅勇. 若尔盖高原与三江平原沼泽湿地 CH₄ 排放差异的主要环境影响因素 [J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 63-67.
- [6] Ding W X, Cai Z C, Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(5): 751-759.
- [7] IPCC. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing [A]. In: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [8] Prinn R G, Cunnold D M, Rasmussen R, et al. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from ten years of ALE-GAGE data [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(D11): 18369-18385.
- [9] 戴树桂. 环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 73-

- 74.
- [10] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. 生态学报, 2003, **23**(9): 1891-1900.
- [11] 宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 等. 川西南常绿阔叶林凋落物分解及养分释放对模拟氮沉降的响应[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(10): 2167-2172.
- [12] Boyer E W, Howarth R W, Galloway J N, *et al.* Riverine nitrogen export from the continents to the coasts [J]. *Biogeochemical Cycles*, 2006, **20**: GB1S91.
- [13] Nixon S W. Coastal marine eutrophication—a definition, social causes, and future concerns[J]. *Ophelia*, 1995, **41**: 199-219.
- [14] Liikanen A, Ratilainen E, Saarnio S, *et al.* Greenhouse gas dynamics in boreal, littoral sediments under raised CO₂ and nitrogen supply[J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(3): 500-511.
- [15] Moseman-Valtierra S, Gonzalez R, Kroeger K D, *et al.* Short-term nitrogen additions can shift a coastal wetland from a sink to a source of N₂O[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(26): 4390-4397.
- [16] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 沼泽湿地 CO₂、CH₄、N₂O 排放对氮输入响应[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(8): 1112-1118.
- [17] Zhang L H, Song C C, Wang D X, *et al.* Effects of exogenous nitrogen on freshwater marsh plant growth and N₂O fluxes in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(5): 1080-1090.
- [18] 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 等. 淡水沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量年际变化及其对氮输入的响应[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2369-2375.
- [19] 葛瑞娟, 宋长春, 侯翠翠, 等. 氮输入对小叶章不同生长阶段土壤 CH₄ 氧化的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **31**(8): 1097-1102.
- [20] 李英臣, 宋长春, 刘德燕, 等. 不同氮输入梯度下草甸沼泽土反硝化损失和 N₂O 排放[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(9): 1103-1107.
- [21] 福建省海洋与渔业厅. 2009 年福建省海洋环境状况公报 [EB/OL]. http://www.fjof.gov.cn/_xxgk/sjgg/hjzltb/index.html?id=1021. 2010-11-10.
- [22] 郑彩红, 曾从盛, 陈志强, 等. 闽江河口区湿地景观格局演变研究[J]. 湿地科学, 2006, **4**(1): 29-34.
- [23] 杨红霞, 王东启, 陈振楼, 等. 长江口崇明东滩潮间带甲烷 (CH₄) 排放及其季节变化[J]. 地理科学, 2007, **27**(3): 408-413.
- [24] 仝川, 曾从盛, 王维奇, 等. 闽江河口芦苇潮汐湿地甲烷通量及主要影响因素[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(1): 207-216.
- [25] King G M, Schnell S. Effect of increasing atmospheric methane concentration on ammonium inhibition of soil methane consumption[J]. *Nature*, 1994, **370**(6487): 282-284.
- [26] Hütsch B W. Methane oxidation in soils of two long-term fertilization experiments in Germany [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, **28**(6): 773-782.
- [27] King G M, Schnell S. Ammonium and nitrite inhibition of methane oxidation by *Methylobacter albus* Bg8 and *Methylosinus trichosporium* Ob3b at low methane concentrations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, **60**(10): 3508-3513.
- [28] Reay D S, Nedwell D B. Methane oxidation in temperate soils: effects of inorganic N [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**(12): 2059-2065.
- [29] Muñoz-Hincapié M, Morell J M, Corredor J E. Increase of nitrous oxide flux to the atmosphere upon nitrogen addition to red mangroves sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **44**(10): 992-996.
- [30] Aelion C M, Shaw J N, Wahl M. Impact of suburbanization on ground water quality and denitrification in coastal aquifer sediments [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1997, **213**(1): 31-51.
- [31] 曾从盛, 张林海, 仝川. 闽江河口湿地短叶茳芏氮、磷含量与积累量季节变化[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(5): 788-794.
- [32] Venterea R T, Groffman P M, Verchot L V, *et al.* Nitrogen oxide gas emissions from temperate forest soils receiving long-term nitrogen inputs [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(3): 346-357.
- [33] Wrage N, Velthof G L, Laanbroek H J, *et al.* Nitrous oxide production in grassland soils; assessing the contribution of nitrifier denitrification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(2): 229-236.
- [34] Bowden R D, Steudler P A, Melillo J M, *et al.* Annual nitrous oxide fluxes from temperate forest soils in the northeastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**(D9): 13997-14005.
- [35] Magenheimer J F, Moore T R, Chmura G L, *et al.* Methane and carbon dioxide flux from a macrotidal salt marsh, Bay of Fundy, New Brunswick [J]. *Estuaries and Coasts*, 1996, **19**(1): 139-145.
- [36] 卢昌义, 叶勇, 林鹏, 等. 海南海莲红树林土壤 CH₄ 的产生及其某些影响因素[J]. 海洋学报, 1998, **20**(6): 132-138.
- [37] 李建兵, 黄冠华. 盐分对粉壤土氮转化的影响[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 98-103.
- [38] Smith C J, DeLaune R D, Patrick W H Jr. Nitrous oxide emission from Gulf Coast wetlands [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, **47**(10): 1805-1814.
- [39] Wang Z P, Lindau C W, Delaune R D, *et al.* Methane emission and entrapment in flooded rice soils as affected by soil properties [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, **16**(3): 163-168.
- [40] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, *et al.* Soils, a sink for N₂O? A review [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(1): 1-17.
- [41] Kralova M, Masscheleyn P H, Lindau C W, *et al.* Production of dinitrogen and nitrous oxide in soil suspensions as affected by redox potential [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1992, **61**(1-2): 37-45.
- [42] 刘景双, 王金达, 李仲根, 等. 三江平原沼泽湿地 N₂O 浓度与排放特征初步研究[J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 33-39.
- [43] Bradford M A, Wookey P A, Ineson P, *et al.* Controlling factors and effects of chronic nitrogen and sulphur deposition on methane oxidation in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**(1): 93-102.

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 Jiashan	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 ₂ O 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 ₂ O 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