

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 ..... 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)  
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 ..... 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)  
鄂东典型工业城市大气 PM<sub>10</sub> 中元素浓度特征和来源分析 ..... 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)  
常州夏秋季 PM<sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶特征及来源 ..... 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)  
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 ..... 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)  
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 ..... 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)  
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 ..... 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)  
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 ..... 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)  
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 ..... 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)  
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 ..... 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)  
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 ..... 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)  
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 ..... 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)  
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 ..... 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)  
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 ..... 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)  
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 ..... 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)  
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 ..... 肖丽微, 朱波 (4580)  
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 ..... 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)  
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 ..... 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)  
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 ..... 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)  
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 ..... 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)  
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) ..... 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)  
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 ..... 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)  
流态对生物添加强化硝化效果的影响 ..... 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)  
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 ..... 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)  
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 ..... 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)  
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)  
污水处理厂 CANON 工艺小试 ..... 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)  
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 ..... 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)  
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 ..... 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)  
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 ..... 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)  
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 ..... 张玉, 万方, 周集体 (4706)  
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 ..... 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)  
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 ..... 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)  
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 ..... 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)  
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 ..... 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)  
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 ..... 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)  
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 ..... 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)  
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 ..... 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)  
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的短期影响 ..... 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)  
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)  
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 ..... 周燕, 卢新卫 (4800)  
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 ..... 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)  
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 ..... 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)  
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 ..... 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)  
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 ..... 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)  
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 ..... 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)  
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 ..... 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)  
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 ..... 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)  
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 ..... 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)  
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 ..... 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)  
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 ..... 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)  
环境模型中敏感性分析方法评述 ..... 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)  
《环境科学》征稿简则(4662) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

# 模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的短期影响

李冬冬<sup>1,2</sup>, 仝川<sup>1,2,3</sup>, 谭立山<sup>1,2</sup>, 陈坤龙<sup>1,2</sup>, 孙东耀<sup>1,2</sup>, 黄佳芳<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007; 3. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

**摘要:** 为了评价氮沉降对我国亚热带河口区淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的影响, 在福建闽江口道庆洲淡水感潮短叶茳芰沼泽湿地, 设置对照 CK [0 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>] 及 3 个梯度的氮沉降处理: N1 [24 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>]、N2 [48 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>] 和 N3 [96 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>], 采用静态箱-气相色谱法测定短叶茳芰湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量, 并同步观测相关环境因子. 结果表明, ① 与对照相比, N1 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量增加 20.30%, N2 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量减少 10.05%, N3 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量增加 4.06%, 除了 12 月的 N2、N3 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量与对照间有显著差异外 ( $P < 0.05$ ), 其它时间各处理间 CO<sub>2</sub> 排放通量差异性不显著 ( $P > 0.05$ ). ② 与对照相比, N1 处理 CH<sub>4</sub> 排放通量提高 64.51%, N2 处理 CH<sub>4</sub> 排放通量提高 30.23%, N3 处理 CH<sub>4</sub> 排放通量提高 80.57%, 但是各处理间 CH<sub>4</sub> 排放通量的差异性未达到显著水平 ( $P > 0.05$ ). ③ CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度具有显著的正线性相关关系 ( $P < 0.05$ ), 与土壤 EC、土壤 pH 的相关性不显著 ( $P > 0.05$ ).

**关键词:** 氮沉降; CO<sub>2</sub> 通量; CH<sub>4</sub> 通量; 淡水感潮沼泽; 闽江河口

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4782-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704165

## Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary

LI Dong-dong<sup>1,2</sup>, TONG Chuan<sup>1,2,3</sup>, TAN Li-shan<sup>1,2</sup>, CHEN Kun-long<sup>1,2</sup>, SUN Dong-yao<sup>1,2</sup>, HUANG Jia-fang<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effects of nitrogen deposition on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from a *Cyperus malaccensis* marsh in the Min River estuary at Daoqingzhou, Fujian, static chamber-gas chromatography (GC) techniques were used. CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes at a control (CK) [0 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>], N1 [24 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>], N2 [48 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>], and N3 [96 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>] were measured and analyzed and the related environmental factors were recorded. The results show that, ① compared to the control treatment, the effects of nitrogen deposition on the CO<sub>2</sub> fluxes for N1 and N3 increased by 20.30% and 4.06%, respectively, whereas the CO<sub>2</sub> fluxes for N2 reduced by 10.05%, furthermore, the CO<sub>2</sub> fluxes under different treatments were not significantly different ( $P > 0.05$ ), except for the N2 and N3 treatments in December ( $P < 0.05$ ). ② Compared to the control treatment, the effects of nitrogen deposition on CH<sub>4</sub> fluxes at N1, N2, and N3 were increased by 64.51%, 30.23%, and 80.57%, respectively, whereas the CH<sub>4</sub> fluxes under different treatments were not significantly different ( $P > 0.05$ ). ③ There was significant positive correlation between CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes and soil temperature ( $P < 0.05$ ), however, the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes were not significant with regards to soil pH and soil EC ( $P > 0.05$ ).

**Key words:** nitrogen deposition; CO<sub>2</sub> fluxes; CH<sub>4</sub> fluxes; tidal freshwater marsh; Minjiang River estuary

全球变暖已成为全人类共同关注的问题, 大气中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等温室气体浓度不断升高是导致这一问题的主要原因<sup>[1]</sup>. CO<sub>2</sub> 是大气中最主要的温室气体, 其增温效应对全球变暖的贡献率约为 63%; CH<sub>4</sub> 是大气中含量第二的温室气体, 但其增温潜势却是 CO<sub>2</sub> 的 15 ~ 30 倍, 对全球变暖的贡献率约为 18%<sup>[2,3]</sup>. 研究表明, 天然湿地是全球重要的 CO<sub>2</sub> 的汇和 CH<sub>4</sub> 的源<sup>[4~6]</sup>, 开展其温室气体排放的研究十分必要. 近几十年来, 一方面, 伴随着土地利用方式的急剧变化、矿物燃料燃烧不断增加, 人类向大气

中排放的含氮化合物越来越多, 大气氮沉降量急剧增加<sup>[7,8]</sup>. 另一方面, 农田中大量含氮化肥的施用以及植物固氮向生态系统输入的氮素也在逐渐增多, 明显改变着陆地生态系统碳、氮循环<sup>[9,10]</sup>. 中国氮

收稿日期: 2017-04-17; 修订日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371127); 福建省科技计划重点项目(2014R1034-1); 福建省基金青年创新项目(2015J05081); 福建师范大学校级创新团队项目(IRTL1205)

作者简介: 李冬冬(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态与环境, E-mail: lidongdong15@126.com

\* 通信作者, E-mail: wahugeo@fjnu.edu.cn

沉降也经历了一个快速增长的过程, 而且有不断发展的趋势<sup>[11]</sup>. 过量氮沉降会导致土壤酸化、土壤碳氮储存失衡等严重问题<sup>[12]</sup>.

河口沼泽湿地不仅受大气氮沉降的影响, 河流流域内人类生产、生活活动产生的含氮物质通过河流大量排入海, 对河口沼泽湿地也会产生严重影响<sup>[13]</sup>. 进入湿地系统各种形态的氮素, 必将影响生物地球化学循环过程, 进而引起 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量发生变化<sup>[14]</sup>. 关于氮沉降对湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量影响的研究多集中于森林、草地、水稻田以及内陆一些天然沼泽湿地<sup>[15-18]</sup>, 关于氮沉降对河口沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量影响的研究鲜见报道.

作为我国东南沿海重要的河口湿地之一, 闽江河口沼泽湿地承接闽江径流携带的大量含氮物质. 目前, 关于氮沉降对我国亚热带河口淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量影响的研究还鲜见报道. 本文以闽江河口道庆洲短叶茳芩 (*Cyperus*

*malaccensis*) 淡水感潮沼泽湿地为研究对象, 探讨氮沉降对河口感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的影响. 本研究成果对于认识氮沉降对河口沼泽湿地碳循环过程的影响具有重要的现实意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省长乐市营前镇黄石村附近的闽江河口道庆洲湿地 (25°57'21.4"N、119°24'25.6"E). 气候温暖湿润, 年均气温 19.6°C, 年均降水量 1 346 mm, 为典型的亚热带海洋性季风气候<sup>[19]</sup>. 闽江口为开放式感潮河口, 潮汐属正规半日潮<sup>[20]</sup>, 短叶茳芩是闽江河口广泛分布的土著种, 一般 3 月初进入生长期, 6~9 月为生长旺盛期, 11 月后趋于缓慢直至停止生长<sup>[21]</sup>. 本研究在道庆洲湿地分布的典型淡水感潮短叶茳芩沼泽湿地选择典型、环境条件均一的群落进行氮沉降实验布设, 样地土壤的基本理化性质见表 1.

表 1 道庆洲沼泽湿地土壤基本理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Soil physicochemical properties of the Daoqingzhou wetland

样地	pH	EC /mS·cm <sup>-1</sup>	容重 /g·cm <sup>-3</sup>	含水率/%	TN /g·kg <sup>-1</sup>	TC /g·kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N /mg·kg <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /mg·kg <sup>-1</sup>
道庆洲	5.45 ± 0.08	0.25 ± 0.03	0.70 ± 0.02	101.70 ± 3.02	2.08 ± 0.23	21.36 ± 2.14	45.17 ± 11.41	0.31 ± 0.24

1) 表中数值为均值 ± 标准差; n = 4

### 1.2 实验设计

在选定短叶茳芩湿地范围内, 布设 1 条 20 m × 1 m 与岸平行的实验样带, 将其平分为 3 个处理样区 (作为 3 个重复), 样区之间间距 2 m. 在每个处理样区内等间距设置 4 个 1 m × 1 m 的处理小区, 基于短叶茳芩的生长周期, 选择生长末期和衰老期的 10~12 月, 开展氮沉降对沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量短期影响的实验. 以遼超普等<sup>[22]</sup> 报道我国东南沿海地区以及东部地区大气氮素湿沉降量 [3~4.5 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>] 和李爱萍等<sup>[23]</sup> 报道位于福建闽江口区域范围内的福州地区大气氮素湿沉降量 [5 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>] 为基础, 倍增 2~3 倍、4~5 倍和 8~10 倍, 设置对照 CK [0 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>] 及 3 个梯度的氮沉降处理: N1 [24 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>]、N2 [48 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>] 和 N3 [96 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>]. 将 3 个氮沉降处理需要施入的 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 量平均分配到 12 个月份中, 从 2016 年 10~12 月份, 将每月分配的 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 量加蒸馏水配置成 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 溶液, 在各试验日相同时刻使用喷壶向氮沉降处理静态箱底座内

土壤表面喷洒 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 溶液, 对照样地则喷洒相同量的蒸馏水. 每月选择 1 个小潮日样地出露地表时段喷洒溶液, 将喷洒后潮水影响降到最低, 以提高溶液的有效性<sup>[24]</sup>.

### 1.3 气体采集与测定

使用静态暗箱法进行气样采集, 静态箱由 PVC 板制作而成, 分为底座和顶箱 2 部分. 底座尺寸为: 35 cm × 35 cm × 40 cm, 顶箱的尺寸为: 35 cm × 35 cm × 120 cm, 顶箱内部顶端安装小风扇混合箱内气体, 侧面安装温度计测量箱内温度, 并安装丁基胶塞采气孔. 底座插入土壤 35 cm, 并长期固定, 防止溶液侧向流失与交叉影响, 顶端设有环形水槽出露地表 5 cm. 仅在每月施加溶液的第 2 d 采集一次气样, 10~12 月每月采集一次, 共采集 3 次. 采样时, 将静态箱顶箱罩在底座之上, 往底座水槽加水密封, 分别在盖箱后 0、15、30 和 45 min 用 60 mL 带三通阀的注射器抽取 40 mL 气体打入气袋. 将所采样品运回实验室, 用气相色谱仪 (Shimadzu GC-2010, Japan) 测定气样中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 浓度. 根据以下公式

计算排放到大气环境中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  通量:

$$F = \frac{M}{V} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot H \cdot \left( \frac{273}{273 + T} \right)$$

式中,  $f$ : 温室气体通量 [ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ];  $M$ :  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  的摩尔质量 ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $V$ : 标准状态下的气体摩尔体积 ( $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $dc/dt$ :  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  的浓度变化率;  $T$ : 采样箱内温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $H$ : 采样箱的箱高 (m). 测量的浓度数据只有在线性回归系数  $R^2 > 0.9$ <sup>[25]</sup>, 才视为有效数据并用于计算温室气体通量.

#### 1.4 环境因子测定

采气时测定静态箱内 10 cm 的土壤温度、pH 值、电导率以及箱温等指标. 土壤 pH 值采用 IQ150 便携式 pH 计 (IQ Scientific Instruments, USA) 测定, 土壤温度与电导率采用 2265FS 便携式温度/电导计 (Spectrum Technologies Inc, USA) 测定, 箱温用静态箱侧部装有的温度计测定, 含水率用烘干法测定, 容重用环刀法进行测定.

#### 1.5 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 19.0 统计分析软件对测定数据进行计算和分析, 采用 Origin 8.0 软件进行作图. 其中, 用 Microsoft Excel 2003 软件对原始数据的平均值及标准差进行计算. 用 SPSS 19.0 统计分析软件中单因素方差分析 (ANOVA) 对不同处理间温室气体排放通量的差异性进行检验, 用 SPSS 19.0 统计分析软件中的 Pearson 相关分析对排放通量与环境因子之间的相关关系进行统计分析.

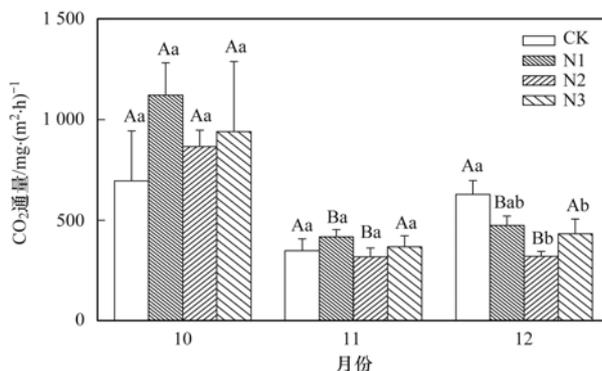
## 2 结果与分析

### 2.1 模拟氮沉降对湿地 $\text{CO}_2$ 排放通量的影响

道庆洲沼泽湿地  $\text{CO}_2$  排放通量在不同氮沉降处理下随时间具有相似的变化特征, 总体上以 10 月最高, 11、12 月通量有所下降 (图 1), 尤其是 N1、N2 处理, 10 月通量显著高于 11、12 月. 数据分析显示, 道庆洲沼泽湿地 CK、N1、N2 和 N3 处理  $\text{CO}_2$  排放通量平均值分别为 ( $557.67 \pm 93.05$ )、( $670.85 \pm 123.39$ )、( $501.61 \pm 95.30$ ) 和 ( $580.31 \pm 137.92$ )  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 在 10、11 月, 氮沉降处理对湿地  $\text{CO}_2$  排放通量无显著影响 ( $P < 0.05$ ); 在 12 月, N2、N3 处理  $\text{CO}_2$  排放通量显著低于对照处理组 ( $P < 0.05$ ).

### 2.2 模拟氮沉降对湿地 $\text{CH}_4$ 排放通量的影响

道庆洲沼泽湿地  $\text{CH}_4$  排放通量在不同处理下均具有明显的时间变化, 表现出随温度降低而下降



不同小写字母代表同月份不同处理差异显著, 不同大写字母代表同一处理不同月份差异显著, 下同

图 1 氮沉降对  $\text{CO}_2$  排放通量的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen deposition on  $\text{CO}_2$  fluxes from the *Cyperus malaccensis* marsh

的趋势, 尤其是 N2 处理在 11、12 月显著低于 10 月 ( $P < 0.05$ , 图 2). 道庆洲沼泽湿地 CK、N1、N2 和 N3 处理  $\text{CH}_4$  平均排放通量分别为 ( $9.66 \pm 2.93$ )、( $15.90 \pm 3.74$ )、( $12.59 \pm 3.07$ ) 和 ( $17.45 \pm 4.83$ )  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 与对照相比, N1 处理湿地  $\text{CH}_4$  平均排放通量提高 64.5%, N2 处理湿地  $\text{CH}_4$  平均排放通量提高 30.2%, N3 处理湿地  $\text{CH}_4$  平均排放通量提高 80.6%. 但总体来看, 不同氮沉降处理  $\text{CH}_4$  排放通量与对照间的差异性均未达到显著水平 ( $P > 0.05$ ).

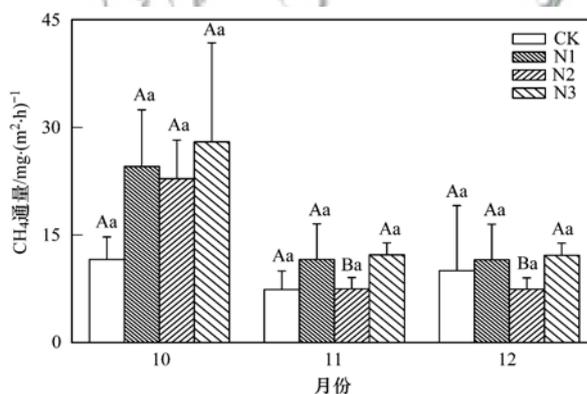


图 2 氮沉降对  $\text{CH}_4$  排放通量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen deposition on  $\text{CH}_4$  fluxes from the *Cyperus malaccensis* marsh

### 2.3 环境因子变化特征及与 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 排放通量的关系

道庆洲沼泽湿地土壤温度在各处理下的变化规律较为一致, 大体表现为随时间不断下降的趋势 [图 3(a)]. 方差分析显示, 土壤温度在各处理间的差异性不显著 ( $P > 0.05$ ). 土壤 EC 变化特征和土壤温度的变化规律基本相似, 大致也呈现随时间不

断降低的趋势[图 3(b)]. 土壤 EC 变化范围为 0.19~0.53 mS·cm<sup>-1</sup>,各处理间差异性不显著( $P > 0.05$ ). 土壤 pH 的变化特征正好与土壤温度、EC 变化规律相反,表现出随时间逐渐上升的趋势[图 3(c)]. CK、N1、N2 和 N3 的土壤 pH 平均值分别为  $5.37 \pm 0.08$ 、 $5.28 \pm 0.09$ 、 $5.27 \pm 0.09$  和  $5.29 \pm 0.09$ ,不同处理间土壤 pH 差异性也不显著( $P > 0.05$ ). 对道庆洲沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度 10~12 月总的的数据进行回归分析,显示:N1、N2 和 N3 的 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤温度分别具有极显著( $P < 0.01$ ,表 2)和显著的正线性相关关系( $P <$

0.05,表 2); N2 和 N1、N3 的 CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度分别具有极显著( $P < 0.01$ ,表 2)和显著的正线性相关关系( $P < 0.05$ ,表 2). 相关分析显示,道庆洲沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度均具有显著的正线性相关关系( $P < 0.05$ ),土壤温度是影响 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的主要环境因子,且氮沉降使它们之间的相关性加强. 对 10~12 月土壤 EC、pH 与 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量总数据之间进行相关分析显示,除了个别处理之间存在显著( $P < 0.05$ ,图 4)和极显著( $P < 0.01$ ,图 4)相关外,其他处理与 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量间的相关性均不显著( $P > 0.05$ ).

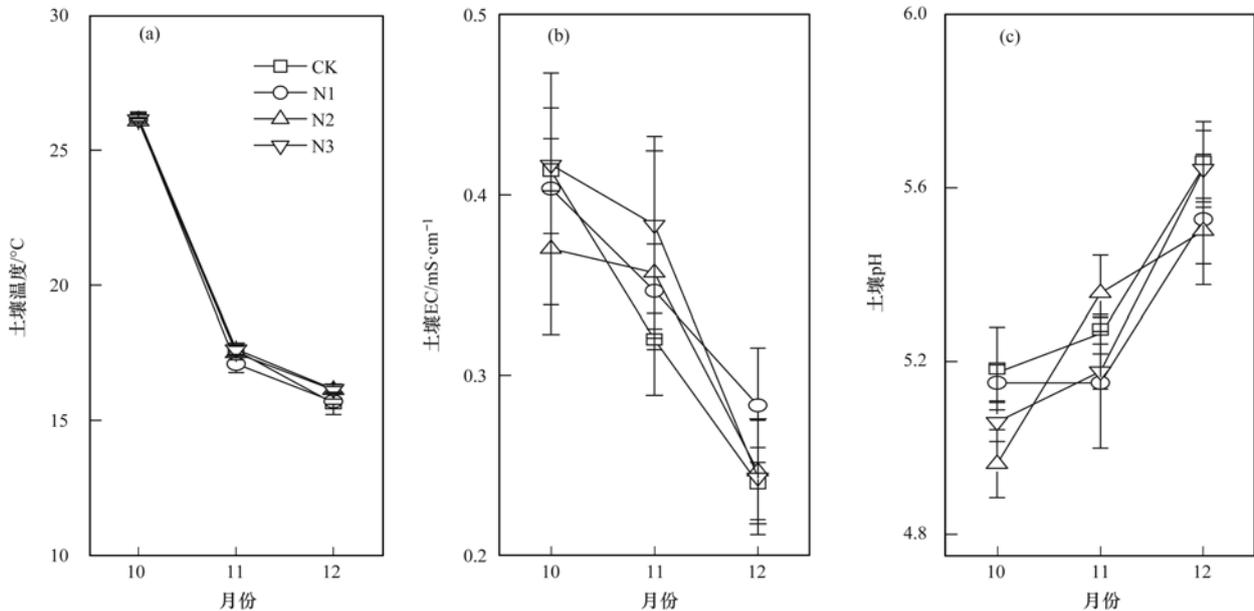


图 3 氮沉降处理下湿地土壤环境因子的变化

Fig. 3 Variations of soil environmental factors under nitrogen deposition in the *Cyperus malaccensis* marsh

表 2 湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度的回归分析<sup>1)</sup>

Table 2 Regression and significance analysis between CO<sub>2</sub> or CH<sub>4</sub> flux and soil temperature in the *Cyperus malaccensis* marsh

温室气体	处理	回归方程	R <sup>2</sup>	P
CO <sub>2</sub>	CK	$y = 346.84e^{0.0186x}$	0.035	0.297
	N1	$y = 100.09e^{0.091x}$	0.832	0.896 **
	N2	$y = 52.007e^{0.1073x}$	0.896	0.956 **
	N3	$y = 132.06e^{0.0648x}$	0.242	0.625 *
CH <sub>4</sub>	CK	$y = 0.249e^{0.1521x}$	0.214	0.177
	N1	$y = 2.2515e^{0.0884x}$	0.371	0.592 *
	N2	$y = 0.928e^{0.121x}$	0.761	0.843 **
	N3	$y = 4.7876e^{0.0547x}$	0.174	0.526 *

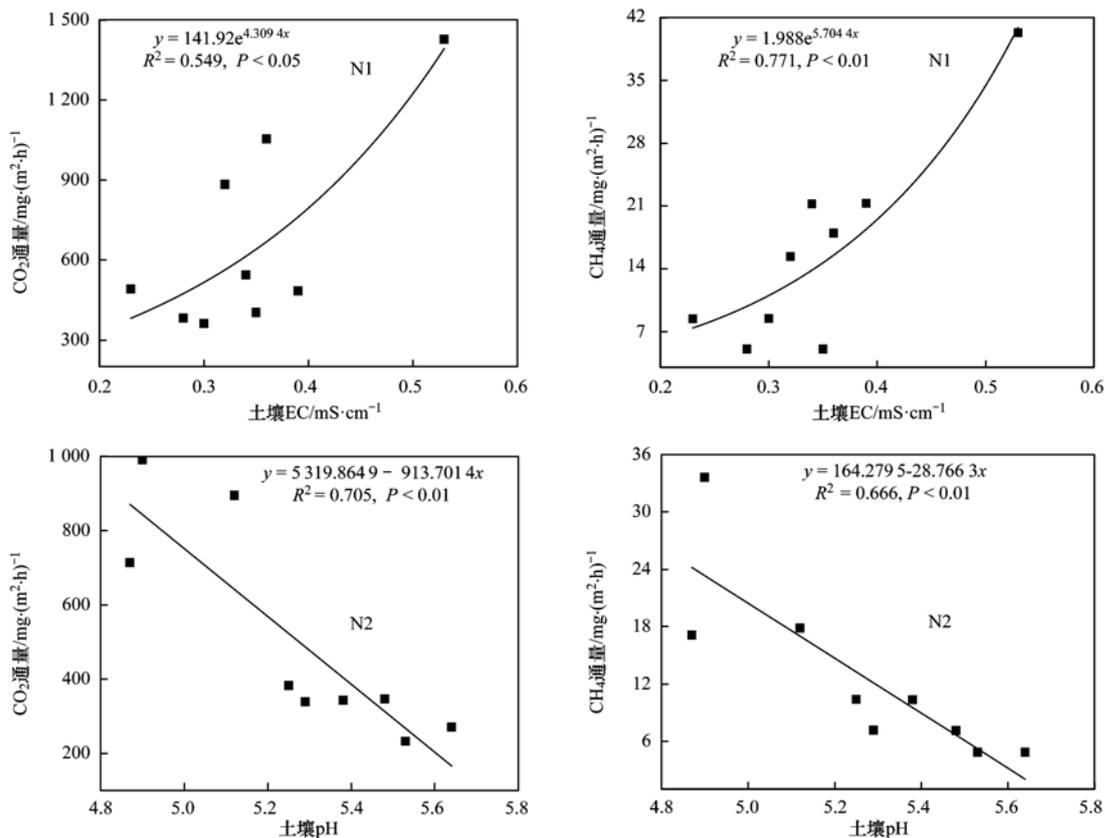
1) \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关

### 3 讨论

#### 3.1 氮沉降对 CO<sub>2</sub> 排放通量的影响

关于氮沉降对湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量的影响已有较多报道,但是结论不一. 本研究中氮沉降在前 2

个月对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量的影响不显著,这与先前的一些研究结果较为一致<sup>[26,27]</sup>. 这是因为,土壤中易被微生物利用的 C 量是土壤微生物对外加 N 固持的一个关键因素,土壤 C 含量在一定程度上决定着土壤总 N 矿化和净有机 N 固持量<sup>[28]</sup>. 在土壤有机 C 含量保持不变时,施 N 不会显著增加 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[29]</sup>. 而且施加的 N 主要是以无机的形式存在于土壤中,没有真正进入湿地系统循环过程,土壤中 N 循环速率没有发生明显变化,从而对 CO<sub>2</sub> 排放不会产生显著影响<sup>[30]</sup>. 然而,也有研究表明氮沉降通过提高湿地生态系统生产力,提升土壤有机质含量和微生物活性<sup>[31]</sup>; 增强土壤酶活性,增加可溶性有机碳含量<sup>[32]</sup>; 消除氮在微生物新陈代谢上的限制作用加快微生物分解速率,从而促进湿地 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[33]</sup>. 而本研究发现氮沉降第 3 个月, N2、N3 处理显著抑制了湿地 CO<sub>2</sub> 排

图4 土壤 EC、pH 与 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的关系Fig. 4 Relationship between CO<sub>2</sub> or CH<sub>4</sub> fluxes and soil EC and pH

放. 主要原因为, 氮沉降会限制微生物对土壤中有有效 C 的利用, 进而减少土壤 CO<sub>2</sub> 的排放<sup>[34]</sup>; 氮沉降还会限制木质素分解酶的活性, 与木质素结合生成更稳定、难以矿化的有机物, 抑制有机碳矿化, 从而减少 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[35]</sup>.

### 3.2 氮沉降对 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响

湿地 CH<sub>4</sub> 产生、氧化与传输过程最终决定了其排放通量的变化, 氮沉降通过影响以上过程进而对 CH<sub>4</sub> 通量产生作用<sup>[36]</sup>. 有研究表明, 氮沉降可通过增加湿地 CH<sub>4</sub> 产生而促进 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[37]</sup>; 也有研究表明, 氮沉降会通过促进植物根系泌氧而增加 CH<sub>4</sub> 氧化, 进而减少 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[38,39]</sup>, 而本研究中氮沉降在短期内对淡水感潮湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响不显著. Zhang 等<sup>[40]</sup> 发现氮沉降在植物快速生长的 6、7 月显著提高了湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量, 原因为氮沉降一方面通过促进根系生长进而增加产 CH<sub>4</sub> 底物, 促进 CH<sub>4</sub> 产生; 另一方面植物生长提高了 CH<sub>4</sub> 传输速率从而增加 CH<sub>4</sub> 排放. 而本研究中, 氮沉降实验在 10~12 月进行, 此时植物已经成熟甚至进入衰老期, 氮沉降对植物生长没有产生显著的促进作用, 因而对 CH<sub>4</sub> 产生与植物传输无显著影响. 宋长春

等<sup>[41]</sup> 的研究表明到了 9 月, 植物生长相对停滞, 氮沉降对 CH<sub>4</sub> 排放无显著影响. 这是因为短叶茳芰湿地 CH<sub>4</sub> 氧化能力从 6~11 月呈现逐渐降低的趋势, 尤其到了秋冬季节, CH<sub>4</sub> 氧化能力已十分微弱<sup>[42]</sup>. 本研究中, 氮沉降实验于 10~12 月开展, 已处于氧化能力较弱的秋冬季节, 氮沉降处理可能对其氧化能力的影响也较为微弱. 因此, 总体上表现为氮沉降对湿地 CH<sub>4</sub> 排放无显著影响.

### 3.3 环境因子对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的影响

土壤温度是影响 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量变化特征的主要环境因素, 本研究中道庆洲淡水沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度具有显著的正相关关系. 土壤温度升高时, 对植物根系呼吸和土壤微生物生物活性均有促进作用, 从而使土壤中产生的 CO<sub>2</sub> 增多<sup>[43]</sup>. 同时, 土壤温度也会影响土壤中 CO<sub>2</sub> 传输过程, CO<sub>2</sub> 排放速率随土壤温度升高而增强<sup>[44]</sup>. 此外, 较高的土壤温度还会提高微生物的分解速率, 进而释放更多的 CO<sub>2</sub><sup>[45]</sup>. 土壤温度对湿地 CH<sub>4</sub> 排放的影响主要表现在对产 CH<sub>4</sub> 菌活性的刺激, 进而增加了湿地 CH<sub>4</sub> 产生, 同时还通过抑制 CH<sub>4</sub> 氧化菌的生长及其功能发挥, 降低湿地 CH<sub>4</sub> 氧

化速率<sup>[46]</sup>, 最终使 CH<sub>4</sub> 产生速率增加, 促进 CH<sub>4</sub> 排放。同时, 随着土壤温度升高, 土壤微生物活性增强, 植物生长旺盛, 根系有机物释放量增加, 减少了土壤有机碳的积累量, 进而促进 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[47]</sup>。本研究中土壤 EC、土壤 pH 与道庆洲淡水沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量基本不相关, 这主要与实验时间短、氮沉降处理样地土壤理化性质变化不显著有关。实际上, 除了上述提到的土壤温度、土壤 EC、土壤 pH 等环境因子外, 微生物活性、菌落状况、生物量、植被差异、土壤粒径、含水率、容重等生物和非生物因素也会对温室气体的产生、排放具有一定影响。因此, 探究多因子耦合作用下长时间的温室气体排放特征及其机制将是今后研究的方向。

#### 4 结论

(1) 氮沉降在短期内对淡水沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量的影响, 前 2 个月对通量无显著影响, 第 3 个月, N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 处理显著抑制了 CO<sub>2</sub> 排放通量。

(2) 氮沉降在短期内对淡水感潮沼泽湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量无显著影响。

(3) 道庆洲沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度具有显著的正线性相关关系, 与土壤 EC、土壤 pH 之间的相关性不显著。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 邓湘雯, 杨晶晶, 陈槐, 等. 森林土壤氧化(吸收)甲烷研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 577-583.  
Deng X W, Yang J J, Chen H, *et al.* Advances in the research of methane oxidation in forest soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 577-583.
- [4] Bartlett K B, Crill P M, Sass R L, *et al.* Methane emissions from tundra environments in the Yukon-Kuskokwim delta, Alaska [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(D15): 16645-16660.
- [5] Moosavi S C, Crill P M, Pullman E R, *et al.* Controls on CH<sub>4</sub> flux from an Alaskan boreal wetland [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 287-296.
- [6] Song C C, Yan B X, Wang Y S, *et al.* Fluxes of carbon dioxide and methane from swamp and impact factors in Sanjiang Plain, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(24): 2749-2753.
- [7] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892.
- [8] Liu X J, Song L, Chune H E. Nitrogen deposition as an important nutrient from the environment and its impact on ecosystems in China [J]. Journal of Arid Land, 2010, 2(2): 137-143.
- [9] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [10] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 等. 青藏高原高寒草甸土壤 CO<sub>2</sub> 排放对模拟氮沉降的早期响应 [J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2687-2696.  
Zhu T H, Cheng S L, Fang H J, *et al.* Early responses of soil CO<sub>2</sub> emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [11] Liu X J, Duan L, Mo J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [12] Ochoa-Hueso R, Arróniz-Crespo M, Bowker M A, *et al.* Biogeochemical indicators of elevated nitrogen deposition in semiarid Mediterranean ecosystems [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(9): 5831-5842.
- [13] 牟晓杰, 刘兴土, 全川, 等. 闽江河口短叶荇菜湿地 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放对氮输入的短期响应 [J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2482-2489.  
Mou X J, Liu X T, Tong C, *et al.* Short-term effects of exogenous nitrogen on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O effluxes from *Cyperus malaccensis* marsh in the Min River estuary [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2482-2489.
- [14] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响 [J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1257-1263.  
Zhang L H, Song C C, Wang D X. Effects of nitrogen fertilization on carbon balance in the freshwater marshes [J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1257-1263.
- [15] Urban N R, Eisenreich S J. Nitrogen cycling in a forested Minnesota bog [J]. Canadian Journal of Botany, 1988, 66(3): 435-449.
- [16] Ambus P, Robertson G P. The effect of increased N deposition on nitrous oxide, methane and carbon dioxide fluxes from unmanaged forest and grassland communities in Michigan [J]. Biogeochemistry, 2006, 79(3): 315-337.
- [17] 石英尧, 石扬娟, 申广勒, 等. 氮肥施用量和节水灌溉对稻田甲烷排放量的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(2): 471-472.  
Shi Y Y, Shi Y J, Shen G L, *et al.* Effect of different nitrogenous fertilizer level on the release of methane [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(2): 471-472.
- [18] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放对氮输入响应 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1112-1118.  
Zhang L H, Song C C, Wang D X. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions to the atmosphere upon nitrogen addition in the swamp wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(8): 1112-1118.
- [19] 刘剑秋. 闽江河口湿地研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

- Liu J Q. Research of Minjiang River estuary wetland [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [20] 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): 29-35.  
Zheng C H, Zeng C S, Chen Z Q, *et al.* A Study on the changes of landscape pattern of estuary wetlands of the Minjiang River [J]. Wetland Science, 2006, **4**(1): 29-35.
- [21] 黄敏参. 咸草植物形态解剖及生理生态特性初步探讨[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.  
Huang M C. Primary study on the morphological anatomy and eco-physiological characteristics of *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2008.
- [22] 遆超普, 颜晓元. 基于氮排放数据的中国大陆大气氮素湿沉降量估算[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(8): 1606-1611.  
Ti C P, Yan X Y. Estimation of atmospheric nitrogen wet deposition in China Mainland from based on N emission data [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(8): 1606-1611.
- [23] 李爱萍, 黄广华, 高人, 等. 福州、建瓯和武夷山大气氮/硫湿沉降特征分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2015, **10**(3): 33-40.  
Li A P, Huang G H, Gao R, *et al.* Atmospheric wet nitrogen and sulfur depositions of Fuzhou, Jian'ou and Wuyishan in Fujian [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2015, **10**(3): 33-40.
- [24] 全川, 柳铮铮, 曾从盛, 等. 模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降对河口潮汐湿地甲烷排放通量的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(3): 302-308.  
Tong C, Liu Z Z, Zeng C S, *et al.* Effects of simulated sulfate deposition on  $\text{CH}_4$  fluxes from tidal wetland in the Min River estuary [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(3): 302-308.
- [25] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W, *et al.* Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(5): 737-748.
- [26] Wigand C, Brennan P, Stolt M, *et al.* Soil respiration rates in coastal marshes subject to increasing watershed nitrogen loads in southern New England, USA [J]. Wetlands, 2009, **29**(3): 952-963.
- [27] Kivimäki S K, Sheppard L J, Leith I D, *et al.* Long-term enhanced nitrogen deposition increases ecosystem respiration and carbon loss from a *Sphagnum bog* in the Scottish Borders [J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, **90**: 53-61.
- [28] Flanagan P W, Van Cleve K. Nutrient cycling in relation to decomposition and organic-matter quality in taiga ecosystems [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1983, **13**(5): 795-817.
- [29] Fenn M E, Poth M A, Aber J D, *et al.* Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies [J]. Ecological Applications, 1998, **8**(3): 706-733.
- [30] Johnson D W, Cheng W, Burke I C. Biotic and abiotic nitrogen retention in a variety of forest soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(4): 1503-1514.
- [31] Alm J, Schulman L, Walden J, *et al.* Carbon balance of a boreal bog during a year with an exceptionally dry summer [J]. Ecology, 1999, **80**(1): 161-174.
- [32] Song Y Y, Song C C, Li Y C, *et al.* Short-term effect of nitrogen addition on litter and soil properties in *calamagrostis angustifolia* freshwater marshes of northeast China [J]. Wetlands, 2013, **33**(3): 505-513.
- [33] Bragazza L, Freeman C, Jones T, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, **103**(51): 19386-19389.
- [34] Söderström B, Bååth E, Lundgren B. Decrease in soil microbial activity and biomasses owing to nitrogen amendments [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1983, **29**(11): 1500-1506.
- [35] 李英臣, 宋长春, 刘德燕, 等. 草甸沼泽土壤硝化-反硝化作用和有机碳矿化对氮输入响应[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(3): 135-138, 157.  
Li Y C, Song C C, Liu D Y, *et al.* Response of nitrification-denitrification and carbon mineralization to nitrogen input in meadow marsh soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, **23**(3): 135-138, 157.
- [36] 胡敏杰, 邹芳芳, 任鹏, 等. 河口滩涂湿地  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  排放通量对氮硫负荷增强的响应[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1359-1368.  
Hu M J, Zou F F, Ren P, *et al.* Effects of enrichment of nitrogen and sulfate load on  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  fluxes from different tidal flat wetlands in the Min River estuary [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(4): 1359-1368.
- [37] Schimel J. Global change: rice, microbes and methane [J]. Nature, 2000, **403**(6768): 375-377.
- [38] Bodelier P L E, Roslev P, Henckel T, *et al.* Stimulation by ammonium-based fertilizers of methane oxidation in soil around rice roots [J]. Nature, 2000, **403**(6768): 421-424.
- [39] Zhang Y H, Ding W X, Cai Z C, *et al.* Response of methane emission to invasion of *Spartina alterniflora* and exogenous N deposition in the coastal salt marsh [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(36): 4588-4594.
- [40] Zhang L H, Song C C, Wang D X, *et al.* The variation of methane emission from freshwater marshes and response to the exogenous N in Sanjiang Plain Northeast China [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(19): 4063-4072.
- [41] 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 等. 淡水沼泽湿地  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  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.  
Song C C, Zhang L H, Wang Y Y, *et al.* Annual dynamics of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization [J]. Environmental Science, 2006, **27**(12): 2369-2375.
- [42] 黄佳芳. 闽江河口短叶荳蔻湿地甲烷产生、氧化、传输与排放研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.  
Huang J F. Methane production, oxidation, transport and emission in *Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bockl. marsh of the Min River estuary [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013.
- [43] Eliasson P E, McMurtrie R E, Pepper D A, *et al.* The response of heterotrophic  $\text{CO}_2$  flux to soil warming [J]. Global Change Biology, 2005, **11**(1): 167-181.
- [44] Tang J W, Baldocchi D D, Qi Y, *et al.* Assessing soil  $\text{CO}_2$  efflux using continuous measurements of  $\text{CO}_2$  profiles in soils with small solid-state sensors [J]. Agricultural and Forest Meteorology,

- 2003, **118**(3-4): 207-220.
- [45] 全川, 鄂焱, 廖稷, 等. 闽江河口潮汐沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量特征[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2830-2840.  
Tong C, E Y, Liao J, *et al.* Carbon dioxide emission from tidal marshes in the Min River estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(12): 2830-2840.
- [46] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(4): 604-608.
- Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(4): 604-608.
- [47] 杜慧娜, 谢文霞, 赵全升, 等. 胶州湾大沽河口湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量特征[J]. 湿地科学, 2016, **14**(1): 44-49.  
Du H N, Xie W X, Zhao Q S, *et al.* Characteristics of CH<sub>4</sub> emission fluxes in Wetlands of Dagu River estuary of Jiaozhou Bay [J]. *Wetland Science*, 2016, **14**(1): 44-49.

---

## 《环境科学》连续 5 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2016 年 11 月 22 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2016 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》再获“2016 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 5 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

## CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin .....	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China .....	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM <sub>10</sub> Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province .....	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> Measurements During Summer and Fall in Changzhou .....	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou .....	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China .....	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China .....	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn .....	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China .....	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics .....	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin .....	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer .....	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China .....	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu .....	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China .....	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region .....	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China .....	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios .....	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances .....	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water .....	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions .....	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites .....	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation .....	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor .....	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants .....	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System .....	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature .....	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System .....	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO <sub>3</sub> /Fe(III) EDTA .....	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province .....	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area .....	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment .....	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil .....	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1 .....	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing .....	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary .....	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation .....	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China .....	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert .....	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields .....	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems .....	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock .....	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil .....	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features .....	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex .....	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products .....	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste .....	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste .....	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models .....	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)