

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                              |                                                                   |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM <sub>2.5</sub> 的源贡献分析····· | 李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)                                               |
| 华北地区乡村站点(曲周)夏季PM <sub>2.5</sub> 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····       | 陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)                                          |
| 成都市大气PM <sub>2.5</sub> 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····                  | 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)                               |
| 不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····                               | 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)                                     |
| 北京地区大气消光特征及参数化研究·····                                        | 陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)                                 |
| 光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····                                         | 郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)                                |
| 遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····                                       | 尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)                     |
| 我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····                                    | 张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)                              |
| 太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····                                        | 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)                             |
| 基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····                                   | 王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)                                           |
| 河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····                           | 杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)                                      |
| 石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····                                    | 陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)                                       |
| 长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····                             | 白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)                                      |
| 三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····                              | 王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)                                 |
| 湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····                               | 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)                                      |
| 水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····                                      | 李邵龙, 陈道毅 (3683)                                                   |
| 城市道路径流的排污特征·····                                             | 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)                               |
| 杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····                                      | 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)                            |
| 海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····                               | 杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)                                           |
| 天然有机物和电解质对水中C <sub>60</sub> 凝聚行为的影响·····                     | 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)                                           |
| 铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····                              | 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)                                      |
| 污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····                                        | 金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)                                               |
| 微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····                                   | 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)                           |
| 倒置A <sup>2</sup> /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····               | 王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)                                |
| 高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····                            | 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)                                    |
| 苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····                                  | 李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)                                         |
| 驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····                        | 宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)                           |
| 苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····                                     | 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)                                  |
| 连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····                          | 鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)                                   |
| FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····                                  | 马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)                                 |
| 污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····                              | 刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)                                 |
| 残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····                           | 贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)                                          |
| 大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····                                      | 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)                                |
| 缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····                              | 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)                                          |
| 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····                                    | 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)                                          |
| 坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····                              | 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)                                     |
| 不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····                                   | 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)                     |
| 有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····                                    | 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)                                       |
| 改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····                           | 陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)                                     |
| 菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····                                   | 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)                                     |
| 血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····                             | 李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)                       |
| 生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····                         | 唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)                             |
| 虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····                     | 高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878) |
| 纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····                                        | 刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)                                |
| 黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····                                      | 陈亚楠, 袁玲 (3892)                                                    |
| 发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····                                  | 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)                   |
| 搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····                            | 高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)                                           |
| COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····                                    | 李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)                                       |
| 养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····                     | 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)                            |
| 土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····                                     | 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)                                          |
| 《环境科学》征订启事 (3553)                                            |                                                                   |
| 《环境科学》征稿简则 (3589)                                            |                                                                   |
| 信息 (3705, 3755, 3763, 3800)                                  |                                                                   |

# 河口盐度梯度下短叶茳芏沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征

杨平<sup>1,3</sup>, 张子川<sup>1</sup>, 杜威宁<sup>1</sup>, 黄佳芳<sup>2,3,4</sup>, 仝川<sup>2,3,4\*</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理研究所, 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; 4. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007)

**摘要:**以闽江口短叶茳芏沼泽湿地为研究对象,沿半咸水至淡水的盐度梯度采集土壤样品,测定分析样品间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度及其主要理化指标,探讨了河口沼泽湿地间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度的时空特征及其影响因子。结果表明:①夏季鳝鱼滩、蝙蝠洲和下洋洲湿地间隙水  $\text{CH}_4$  浓度均值分别为 331.18、299.94 和 638.58  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 冬季均值分别为 9.04、266.67 和 322.68  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 呈现夏季显著高于冬季的时间动态特征 ( $P < 0.05$ ); ②沿半咸水至淡水的盐度梯度,间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度呈现递增的空间分布特征; ③土壤间隙水  $\text{CH}_4$  浓度与土温、DOC 呈显著正相关关系,与土壤 pH、盐分和间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  浓度呈显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ), 河口盐度梯度下短叶茳芏沼泽湿地间隙水  $\text{CH}_4$  浓度时空特征是土壤理化性质和潮汐等综合作用的结果。

**关键词:**间隙水; 溶解性  $\text{CH}_4$ ; 时空特征; 盐度梯度; 短叶茳芏沼泽湿地; 闽江口

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3633-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.10.011

## Porewater Dissolved Methane in *Cyperus malaccensis* Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary

YANG Ping<sup>1,3</sup>, ZHANG Zi-chuan<sup>1</sup>, DU Wei-ning<sup>1</sup>, HUANG Jia-fang<sup>2,3,4</sup>, TONG Chuan<sup>2,3,4\*</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Institute of Geography, 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; 4. Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Physicochemical properties of soil and dissolved methane concentrations of porewater in the sediments of the *Cyperus malaccensis* marshes along a salinity gradient in the Minjiang River estuary were evaluated, and the spatial-temporal characteristics and main impact factors were discussed. The average concentrations of dissolved methane in porewater were 331.18, 299.94 and 638.58  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively in the Shanyutan, Bianfuzhou and Xiayangzhou wetlands in summer. In the winter, they were 9.04, 266.67 and 322.68  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. The dissolved methane concentration in porewater was higher in summer than those in winter ( $P < 0.05$ ). Overall, the concentrations of dissolved methane in porewater showed an increasing trend from brackish to freshwater marshes. Multivariate statistics analysis showed that the concentrations of dissolved methane in porewater was positively correlated with soils temperature and DOC ( $P < 0.05$ ), but negatively correlated with soils pH, salinity, and the concentrations of porewater  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Cl}^-$ . Spatial-temporal distribution of porewater dissolved methane in estuarine marshes represents a final result of multiple factors, including soil physicochemical properties and hydrodynamic condition.

**Key words:** porewater; dissolved methane; spatial-temporal characteristics; salinity gradient; *Cyperus malaccensis* marsh; Minjiang River estuary

据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的《第五次评估报告》显示,2011 年全球  $\text{CH}_4$  平均浓度比工业革命前 (1750 年) 增加了 150%, 百年增温潜势是  $\text{CO}_2$  的 25 倍, 对全球气候变暖的贡献率约 20%<sup>[1]</sup>。天然湿地作为全球大气  $\text{CH}_4$  的主要排放源而受关注<sup>[2~4]</sup>, 每年向大气排放的甲烷为 187 ~ 224Tg, 占全球甲烷总排放量的 15% ~ 40%<sup>[1]</sup>。

河口潮汐沼泽湿地是全球天然湿地重要组成部分, 是大气环境中  $\text{CH}_4$  不可忽视的自然源。盐度为

入海河口区一个重要的环境因子, 盐度变化通过改变湿地土壤理化性质和微生物群落结构及数量<sup>[5]</sup>直接影响到河口区潮汐沼泽湿地甲烷代谢过程。在海平面上升、盐水入侵加剧的背景下, 河口区盐度

收稿日期: 2015-04-06; 修订日期: 2015-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371127); 福建师范大学校级创新团队项目 (IRTL1205); 福建省基本科研专项重点项目 (2014R1034-1)

作者简介: 杨平 (1986 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学循环, E-mail: yangping528@sina.cn

\* 通讯联系人, E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

梯度下潮汐沼泽湿地  $\text{CH}_4$  排放已引起科学家的关注. DeLaune 等<sup>[6]</sup>对美国路易斯安那州 Barataria 流域的研究发现,沼泽湿地  $\text{CH}_4$  排放沿咸水至淡水的盐度呈现递增趋势,最大排放量出现在夏季,其时空特征与土壤盐度、间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度密切相关. Bartlett 等<sup>[7]</sup>对美国维吉尼亚东部 York 河口和 Poffenbarger 等<sup>[8]</sup>发表的综述文章也均得到类似结论. 然而,关于盐度变化对河口区潮汐沼泽湿地土壤间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  的研究相对较少,更鲜见对于其在盐度梯度下的时空变化特征及影响因素的研究. 系统探究盐度梯度下土壤间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  的规律与机制,是深入认识海水入侵背景下河口区潮汐沼泽湿地土壤  $\text{CH}_4$  动态时空异质性、准确评估影响河口湿地  $\text{CH}_4$  排放的主要机制及应对与调控湿地  $\text{CH}_4$  排放等问题具有重要的科学价值.

本研究按盐度梯度选择闽江河口区中游段到入海口 3 个典型的湿地(下洋洲、蝙蝠洲和鳝鱼滩),以上 3 个湿地上均分布有短叶茳芏潮汐沼泽,进而探讨闽江河口区盐度梯度下短叶茳芏沼泽湿地土壤间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度的时空分布特征及其主要影响因子,以期为今后深入理解亚热带河口盐度梯度下沼泽湿地甲烷动态的时空异质性及其对未来海平面变化的响应提供基础数据和参考价值.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于闽江河口区,气候暖热湿润,年均温  $19.7^\circ\text{C}$ , 年均降水日数 153 d, 年均降水量 1 346 mm,降水多发生在 3~9 月. 闽江河口段潮汐特征表现为口外正规半日潮,口内非正规半日浅海潮<sup>[9]</sup>. 从河口海滨段向上游方向依次分布鳝鱼滩湿地、蝙蝠洲湿地和下洋洲湿地(图 1). 鳝鱼滩湿地是闽江河口区面积最大潮汐湿地,主要土著优势植物群落为短叶茳芏(*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bockl. )和芦苇(*Phragmites australis*),其中短叶茳芏沼泽集中分布于鳝鱼滩湿地中西部,并较接近堤岸一侧,表层土壤电导率为  $1.68 \sim 7.65 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (2011 年 10 月~2012 年 6 月,下同). 蝙蝠洲湿地受潮汐影响也较大,表层土壤电导率为  $1.26 \sim 3.27 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,短叶茳芏和芦苇同样是其主要优势植物. 下洋洲湿地位于闽江北港河道与南港交汇处,地势低平,主要优势植物为短叶茳芏,表层土壤电导率为  $0.31 \sim 0.42 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ . 分布在鳝鱼滩湿地近堤岸侧和蝙蝠洲湿地的短叶茳芏湿地为半

咸水潮汐沼泽,分布在下洋洲短叶茳芏湿地为淡水潮汐沼泽.

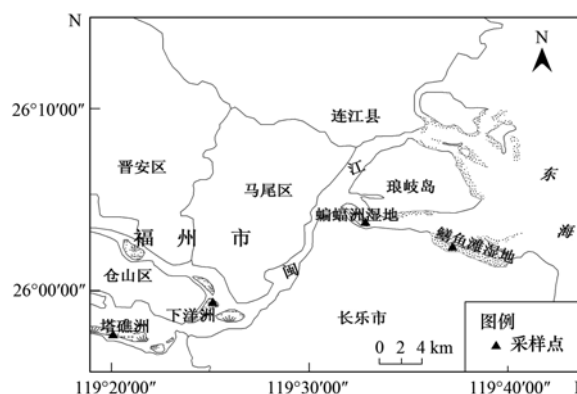


图 1 研究区和采样点位置

Fig. 1 Map of the study area and the sampling sites

### 1.2 样品采集

2012 年 2 月(冬季)和 6 月(夏季)在落潮后时段采集土壤样品. 在以上 3 个湿地分布的短叶茳芏群落典型地段,分别沿着海岸线或河岸线平行方向随机布设 3 个取样点(样点间距约 5 m),每个取样点用直径为 5.5 cm 不锈钢采样器钻取深度为 0 cm~50 cm 土芯,按 10 cm 间隔分层,并将各层土样装入相应样品采集袋,立刻运回实验室  $4^\circ\text{C}$  冷藏,供各项土壤理化指标的测定. 土壤间隙水通过对土壤样品离心获得.

### 1.3 土壤和间隙水理化指标的测定

原位用 IQ150 便携式 pH/温度计(IQ Scientific Instruments, USA)测定土壤 pH 值和温度,用 2265FS 便携式电导计(Spectrum Technologies Inc., USA)测定土壤电导率,并以此表征土壤盐度<sup>[10]</sup>. 土壤水溶解性有机碳(DOC)采用去离子水浸提并用 TOC 分析仪(TOC Vcph, Shimadzu, 日本)测定,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[11]</sup>.

采用离心法获得土壤间隙水样,间隙水用针头式过滤器过滤,并分装保存. 间隙水中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  浓度采用连续流动分析仪(SKALAR San++, 荷兰)测定, $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  浓度采用 ICS-2100 离子色谱仪(DIONEX, USA)测定.

### 1.4 间隙水溶解性 $\text{CH}_4$ 浓度的测定

利用顶空平衡-气相色谱法测定间隙水中溶解性  $\text{CH}_4$  浓度<sup>[12]</sup>. 用气密性注射器向 5 mL 顶空瓶中注入 2 mL 高纯  $\text{N}_2$ ( $>99.999\%$ ),同时排除等体积水样,使瓶内形成顶空. 室温下将样品瓶剧烈振荡 30 min,静置 5 min,待瓶内气-液两相达到平衡,抽取 2 mL 顶空气体注入岛津 G-2014 气相色谱仪测定

CH<sub>4</sub> 浓度,根据以下公式计算土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度:

$$c = [(c_H \times V_H)/22.4]/V_P$$

式中,*c* 为溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度(μmol·L<sup>-1</sup>),*c<sub>H</sub>* 为顶空瓶上部空间气体中的 CH<sub>4</sub> 浓度(μL·L<sup>-1</sup>),*V<sub>H</sub>* 为顶空瓶上部空间体积(mL),*V<sub>P</sub>* 为顶空瓶间隙水体积(mL).

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2003 对原始数据进行处理和绘图.利用 SPSS 17.0 统计软件包中 One-Way ANOVA LSD 法检验相同季节不同沼泽湿地土壤理化指标及间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度差异的显著性;利用 Independent-Samples *T* 检验法分析同一沼泽湿地不同季节土壤理化指标及间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度差异的显著性;间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度与主要理化指标间的相关性采用 SPSS 17.0 中 Pearson 相关性分析法分析.采用多元回归法中的逐步回归法(Stepwise)探析影响土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度时

空特征的主要环境因子.以上统计分析中,显著性水平 α=0.05,图中误差线均为标准误.

2 结果与分析

2.1 土壤和间隙水的理化特征

沿着半咸水至淡水的盐度梯度,土壤 pH 和电导率均逐渐增加,空间分布和月份间变化差异均达到显著性水平(表 1).土壤 DOC 含量空间差异不显著,但季节间差异性显著,呈现夏季(6 月)显著高于冬季(2 月)的特征.鳊鱼滩短叶茳芏湿地 SOC 含量显著低于其它 2 个湿地,且月份间差异亦显著.水解氮沿着半咸水至淡水的盐度梯度,夏季和冬季分别呈现递增和递减趋势.土壤间隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 离子浓度沿着上述盐度梯度亦呈现明显的空间分布规律,且鳊鱼滩湿地 2 种离子浓度均显著高于其它沼泽湿地(表 2).3 个沼泽湿地土壤间隙水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度无显著性差异.

表 1 各样地土壤的理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Soil physicochemical characteristics of each sampling sites

| 采样点 | 采样时间 | 土温<br>/℃       | pH            | 电导率<br>/mS·cm <sup>-1</sup> | DOC<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | SOC<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 水解氮<br>/mg·kg <sup>-1</sup> |
|-----|------|----------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 鳊鱼滩 | 夏季   | 26.50 ± 0.29aA | 6.38 ± 0.08aA | 2.90 ± 0.33aA               | 50.32 ± 16.52aA             | 24.58 ± 0.59aA             | 62.49 ± 8.15aA              |
|     | 冬季   | 13.77 ± 0.12aB | 7.58 ± 0.03aB | 3.97 ± 0.44aA               | 11.66 ± 4.52aB              | 20.45 ± 0.81aB             | 123.39 ± 11.12aB            |
| 蝙蝠洲 | 夏季   | 26.50 ± 0.14aA | 5.42 ± 0.09bA | 1.61 ± 0.12bA               | 44.53 ± 10.23aA             | 28.97 ± 3.57bA             | 77.63 ± 17.00aA             |
|     | 冬季   | 13.39 ± 0.18aB | 7.02 ± 0.06bB | 1.95 ± 0.13bA               | 4.96 ± 1.25aB               | 29.03 ± 3.49bA             | 111.25 ± 27.44aA            |
| 下洋洲 | 夏季   | 29.77 ± 0.15bA | 4.76 ± 0.08cA | 0.40 ± 0.01cA               | 69.15 ± 13.04aA             | 33.88 ± 1.32bA             | 87.30 ± 14.25aA             |
|     | 冬季   | 14.16 ± 0.14bB | 6.29 ± 0.14cB | 0.34 ± 0.01cB               | 6.62 ± 0.91aB               | 24.69 ± 3.04bB             | 108.37 ± 19.55aA            |

1) DOC、水解氮及冬季的 SOC 均为 0~10 和 40~50 cm 的平均值 ± 标准误,其它理化指标均为 0~50 cm 的平均值 ± 标准误;同一列数据标注不同小写字母表示相同季节不同采样点差异性显著,同一列数据标注不同大写字母表示同一采样点不同季节差异性显著(*P* < 0.05, *n* = 15)

表 2 各样地土壤间隙水离子的浓度<sup>1)</sup>

Table 2 Concentrations of ions in soil porewater of each sampling sites

| 采样点 | 观测时间 | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N<br>/mmol·L <sup>-1</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N<br>/mmol·L <sup>-1</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>/mmol·L <sup>-1</sup> | Cl <sup>-</sup><br>/mmol·L <sup>-1</sup> |
|-----|------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 鳊鱼滩 | 夏季   | 0.16 ± 0.04aA                                            | 0.46 ± 0.07aA                                            | 6.00 ± 1.35aA                                          | 55.88 ± 12.42aA                          |
|     | 冬季   | 0.22 ± 0.03aA                                            | 1.20 ± 0.35abB                                           | 3.39 ± 0.77aA                                          | 53.47 ± 8.99aA                           |
| 蝙蝠洲 | 夏季   | 0.13 ± 0.01aA                                            | 0.72 ± 0.04bA                                            | 3.305 ± 1.21bA                                         | 20.82 ± 5.03bA                           |
|     | 冬季   | 0.20 ± 0.03aA                                            | 0.66 ± 0.09bA                                            | 1.31 ± 0.43bcA                                         | 24.35 ± 3.18bA                           |
| 下洋洲 | 夏季   | 0.16 ± 0.02aA                                            | 1.13 ± 0.05cA                                            | 0.20 ± 0.07cA                                          | 1.19 ± 0.25cA                            |
|     | 冬季   | 0.23 ± 0.03aA                                            | 2.33 ± 0.65aA                                            | 0.23 ± 0.47cA                                          | 4.39 ± 1.17cB                            |

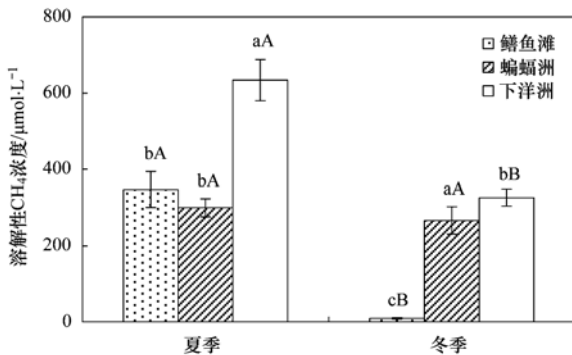
1) 表中数据为 0~10 和 40~50 cm 的平均值 ± 标准误, *n* = 6; 同一列数据标注不同小写字母表示相同季节不同湿地间差异性显著,同一列数据标注不同大写字母表示同一湿地不同季节差异性显著(*P* < 0.05, *n* = 6)

2.2 土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度的时间动态

土壤间隙水溶解性甲烷 CH<sub>4</sub> 浓度冬夏两季差异较显著,夏季土壤间隙水溶解性甲烷 CH<sub>4</sub> 浓度高于冬季(图 2).鳊鱼滩、蝙蝠洲和下洋洲短叶茳芏湿地夏季间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度均值分别为

(331.18 ± 46.96)、(299.94 ± 23.31) 和 (638.58 ± 53.85) μmol·L<sup>-1</sup>; 3 个沼泽湿地冬季间隙水溶解性甲烷 CH<sub>4</sub> 浓度均值分别为 (9.04 ± 1.83)、(266.67 ± 36.00) 和 (322.68 ± 22.36) μmol·L<sup>-1</sup>. 鳊鱼滩和下洋洲短叶茳芏湿地夏季间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度

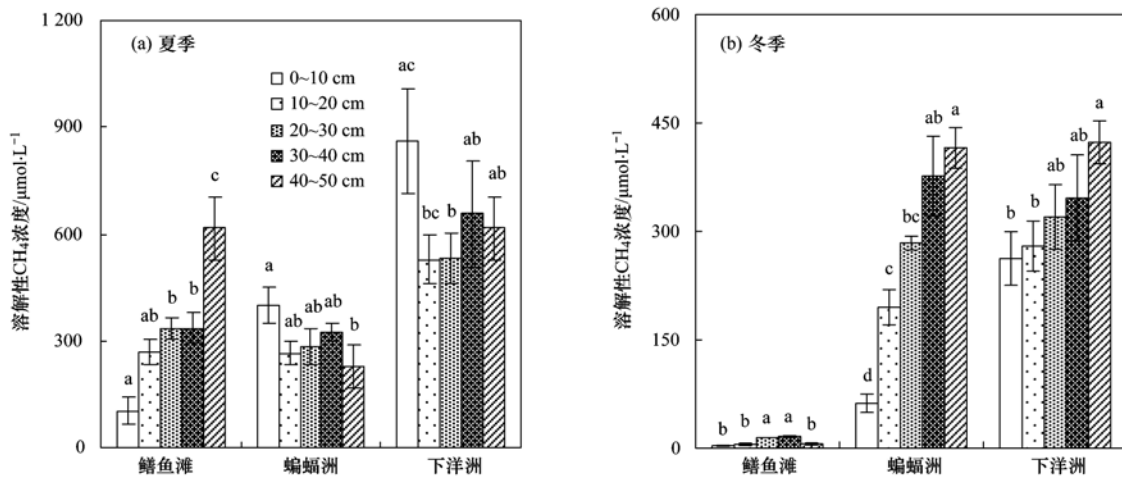
均极显著高于冬季 ( $P < 0.001$ ), 而蝙蝠洲湿地夏季与冬季的孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度无显著差异 ( $P > 0.05$ ).



不同小写和大写字母分别表示相同季节不同湿地, 以及同一湿地不同季节差异性显著

图2 3个沼泽湿地土壤孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度的时空变化

Fig. 2 Spatial-temporal patterns of dissolved methane concentrations of the porewater in three marshes



不同小写表示同一湿地不层次间差异性显著

图3 沼泽湿地土壤孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度的垂直剖面特征

Fig. 3 Vertical profile patterns of dissolved methane concentrations of the porewater in three marshes

### 3 讨论

#### 3.1 土壤孔隙水溶解性 $\text{CH}_4$ 浓度时空特征

不同季节沼泽湿地土壤溶解性  $\text{CH}_4$  浓度因土壤理化性质差异而呈现显著的时间动态特征. Kelley 等<sup>[13]</sup>对美国 White Oak 河口潮汐河岸湿地研究发现, 土壤孔隙水  $\text{CH}_4$  浓度 5~9 月逐渐增加, 季节变化显著, 在温暖的夏季浓度相对较高. 杨文燕等<sup>[14]</sup>对三江平原毛果苔草沼泽湿地研究发现, 湿地孔隙水  $\text{CH}_4$  浓度 6~10 月具有明显季节变化, 最大值出现在 7 月, 最小值出现在 10 月, 这种季节模式与土温、DOC 浓度呈显著正相关关系. 本研究中, 3

#### 2.3 土壤孔隙水溶解性 $\text{CH}_4$ 浓度空间变化

沿着半咸水至淡水的盐度梯度, 河口沼泽湿地孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度呈现明显的水平空间变化特征 (图2). 夏季, 下洋洲湿地孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度显著高于其它湿地 ( $P < 0.05$ ), 呈现下洋洲湿地 > 鳊鱼滩湿地 > 蝙蝠洲湿地的变化趋势; 冬季, 河口沼泽湿地孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度随盐度梯度的空间变化规律更加明显, 呈现下洋洲湿地 > 蝙蝠洲湿地 > 鳊鱼滩湿地, 且差异性均达到显著性水平 ( $P < 0.05$ ).

湿地孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度亦呈现明显的垂直剖面空间变化特征 (图3). 夏季, 鳊鱼滩湿地孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度从表层至 50 cm 深处呈现增加趋势, 而蝙蝠洲和下洋洲湿地均在表层出现最大值, 随后呈现降低-增加-降低的垂直变化特征. 冬季, 鳊鱼滩湿地孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度呈先增加后降低的趋势, 在 20~30 cm 深处达到最大值; 蝙蝠洲和下洋洲湿地均呈现随深度变化持续增加的特征.

个沼泽湿地土壤孔隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度亦均呈现夏季高于冬季的特征, 且鳊鱼滩和下洋洲湿地夏冬季溶解性  $\text{CH}_4$  浓度差异性均达到显著性水平 ( $P < 0.05$ , 图3). 这种时间动态特征主要受以下因素的影响: 首先, 与不同季节沼泽湿地土温度变化密切相关. 夏季沼泽湿地土温较高 (均值 27.59℃), 土壤或孔隙水中微生物活动更加旺盛, 其代谢产物溶解性  $\text{CH}_4$  会相应增加<sup>[15,16]</sup>. 其次, 冬夏季土壤 pH 值和 DOC 浓度存在差异是引起上述时间变化特征的另一重要因素 (表1). 相对于冬季土壤的酸碱环境 (pH 均值为 6.96) 和底物供给能力, 夏季土壤适宜的酸性环境 (pH 均值为 5.52) 和充足的底物供

给状况更有利于产甲烷菌的厌氧代谢活动<sup>[14,17]</sup>。最后,盐度在影响河口潮汐湿地间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度时间动态特征中扮演重要角色。在盐度较高湿地中,产甲烷菌活性受到盐胁迫的次级反应和毒害作用而被抑制<sup>[18,19]</sup>,其甲烷产生能力相对较低。本研究中,盐度(电导率表征)变化对冬季的鳊鱼滩湿地影响尤其显著。对比其他观测点,冬季鳊鱼滩湿地土壤间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度显著较低( $P < 0.01$ ,见图 2 和表 1,其主要原因可能与该观测点土壤较高盐度对产甲烷菌活性及其代谢能力形成更显著的抑制作用有关[图 4(c)和表 1]。

沼泽湿地土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度亦存在显著的空间变化。Kelley 等<sup>[13]</sup>对美国 White Oak 河口潮汐河岸湿地和 Van der Nat 等<sup>[20]</sup>对西欧 Scheldt 河口淡水沼泽湿地研究均发现,土壤空隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度呈现从表层至中层逐渐升高,达到最大值后随深度增加逐渐降低的垂直剖面分布特征。杨文燕等<sup>[14]</sup>对高纬度内陆淡水沼泽的研究也得出同样结论,指出这种垂直剖面特征与孔隙水 DOC、DON 浓度变化存在显著正相关关系。而 Wilson 等<sup>[21]</sup>对美国东南沿海 Newport News 沼泽研究发现土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度呈现随深度增加而升高的特征。本研究中,沼泽湿地土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度垂直剖面特征随季节变化而呈现差异,鳊鱼滩湿地 CH<sub>4</sub> 浓度夏季和冬季分别呈现随深度增加而上

升和先增加后降低的趋势(图 3),这种分布特征总体上与 pH 值垂直变化显著相关(夏季:  $r = -0.320$ ,  $P < 0.05$ ; 冬季:  $r = -0.843$ ,  $P < 0.0001$ )。蝙蝠洲和下洋洲湿地溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度夏季和冬季均分别呈现下降-上升-下降和随深度增加而上升的特征(图 3),这种垂直变化特征除与酸碱度变化密切相关外,与不同季节不同土层温度、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度的变化存在显著差异有关( $P < 0.05$ )。在水平空间分布上,短叶茳苳沼泽土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度规律较为一致,整体上均呈现沿着半咸水至淡水的盐度梯度逐步增加的趋势(图 2),这与土壤酸碱度和盐度及间隙水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 浓度沿上述盐度梯度逐步递减的趋势相吻合(表 1 和表 2)。

与国内外其它沼泽湿地相比(表 3),闽江河口短叶茳苳沼泽湿地间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度要低于纬度偏北的内陆和河口淡水沼泽湿地,与三江平原毛果苔草泥炭湿地的间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度相当,但要高于同一研究区域的芦苇沼泽湿地。从表 3 中还可发现:①淡水沼泽或泥炭湿地间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度高于盐沼湿地;②地处海口海滨段的沼泽湿地因受潮汐等水动力作用影响,其土壤间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度相对较低;③沼泽湿地土壤间隙 CH<sub>4</sub> 浓度的空间差异与植物种类相关联,优势种为维管束植物(如芦苇、互花米草)沼泽湿地其 CH<sub>4</sub> 浓度相对较低。

表 3 本研究与其它湿地土壤溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度的比较

Table 3 Comparison of our findings with other studies

| 研究区域                             | 湿地类型      | 优势植物                                              | 研究时段                                   | 溶解性 CH <sub>4</sub> 浓度 <sup>1)</sup><br>/μmol·L <sup>-1</sup> | 文献   |
|----------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|
| 美国, Newport News                 | 沼泽湿地      | 香蒲 <i>Typha latifolia</i> L.                      | 1985-04 ~ 1986-03                      | 672.59                                                        | [21] |
| 美国, White Oak River              | 潮汐淡水沼泽    | 金鱼藻 <i>Ceratophyllum</i> and <i>Najas</i>         | 1990-10 ~ 1991-11                      | 513.50                                                        | [13] |
| 美国, Duplin River 和 Satilla River | 潮汐沼泽      | 互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>                 | 2000-09 ~ 2003-01                      | 114.52                                                        | [22] |
| 伯利兹, Twin Cays                   | 红树林沼泽     | 红树林 <i>Rhizophora mangle</i>                      | 2002-08 ~ 2002-09<br>2003-04 ~ 2003-05 | 10.12                                                         | [23] |
| 西欧, Scheldt Estuary              | 淡水沼泽      | 蔗草和芦苇 <i>S. lacustris</i> and <i>P. australis</i> | 1994-01 ~ 1995-06                      | 200.01                                                        | [20] |
| 中国, 三江平原                         | 泥炭湿地      | 毛果苔草 <i>Carex lasiocarp</i>                       | 2004-06 ~ 2004-10                      | 439.14                                                        | [14] |
| 中国, 闽江口                          | 沼泽湿地      | 芦苇 <i>P. australis</i>                            | 2007-01 ~ 2007-12                      | 56.61                                                         | [24] |
| 中国, 闽江口                          | 沼泽湿地(微咸水) | 短叶茳苳 <i>C. malaccensis</i>                        | 2012-02 和 2012-06                      | 226.71                                                        | 本研究  |
| 中国, 闽江口                          | 沼泽湿地(淡水)  | 短叶茳苳 <i>C. malaccensis</i>                        | 2012-02 和 2012-06                      | 480.63                                                        | 本研究  |

1) 溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度为采样时段的平均值

3.2 环境因素对土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 的影响

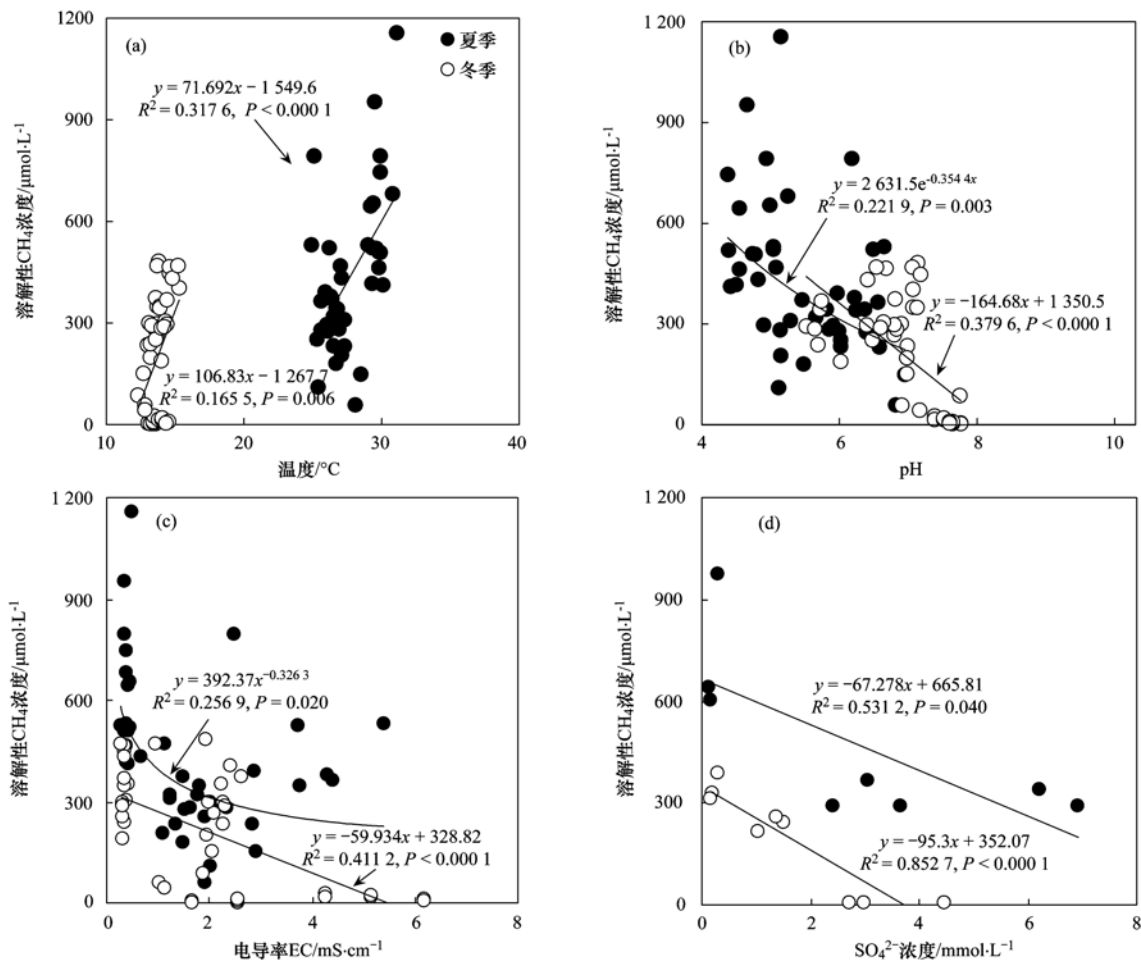
温度是控制湿地土壤产甲烷能力呈现时间动态变化的重要因子之一。在一定温度范围内(2 ~ 39℃)土壤产甲烷能力随温度升高而增加<sup>[25,26]</sup>,但其季节性变化受温度影响的程度具有不确定性。

Sawyer 等<sup>[26]</sup>对美国东北部缅因州 Lowes Cove 研究发现,温度对沉积物产甲烷能力季节性变化的解释程度不到 50%。Bergman 等<sup>[27]</sup>研究认为,土壤产甲烷能力时间动态受到温度和底物联合作用影响,即温度对产甲烷的影响取决于底物供给情况<sup>[14,27]</sup>。

湿地土壤中高的产甲烷速率与高的 DOC 或 SOC 浓度密切相关<sup>[14,28,29]</sup>. 本研究中,土壤间隙水  $\text{CH}_4$  浓度与土温、DOC 分别呈现显著 ( $P < 0.05$ ) 和极显著 ( $P < 0.001$ ) 正相关关系[图 4(a)、4(b)和表 3],与 pH 呈现极显著负相关关系[图 4(b)],且 3 个沼泽湿地夏季的土温、DOC 浓度和 pH 值差异均达到显著水平(表 1). 由此可推断,土温、DOC 及 pH 等环境因素对短叶茳芰沼泽湿地土壤间隙水  $\text{CH}_4$  浓度时间动态特征具有重要影响.

沿着半咸水至淡水的盐度梯度,沼泽湿地土壤间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  浓度呈现明显递增趋势(图 2),这一空间分布特征与土壤 pH、盐分和间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  浓度存在显著负相关关系[图 4(c)、图(d)和表 4],表明这些环境因素是影响土壤间隙水  $\text{CH}_4$  浓度呈现上述空间分布特征(尤其是水平空间分布)的主要因素,其影响机制主要表现为: ①pH

通过作用于产甲烷菌活性和甲烷产生途径来影响土壤产甲烷能力<sup>[30]</sup>; ②盐分和  $\text{Cl}^-$  主要通过渗透胁迫、离子毒害、营养失衡以及盐胁迫的次级反应等途径影响土壤甲烷产生菌所需的底物供应及其活性<sup>[18,19]</sup>; ③较高的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度通过其还原作用降解有机碳产生的能量<sup>[31]</sup>,与产甲烷菌竞争醋酸、氢等底物以及产生毒害和改变环境因子等方式对甲烷代谢过程产生抑制作用<sup>[8,32]</sup>. 此外,强烈的水动力作用对河口沼泽湿地土壤间隙水  $\text{CH}_4$  浓度空间分布特征亦有重要影响. 周期性涨潮使得河口区土壤盐度增加,硫酸盐类、氯离子等物质含量也随之增加<sup>[33]</sup>,进而对土壤甲烷代谢过程产生一定抑制作用. 因此可以推测,鳊鱼滩和蝙蝠洲湿地土壤间隙水  $\text{CH}_4$  浓度显著低于下洋洲,与 2 个沼泽湿地位于出海口海滨段,受潮汐作用影响显著密切相关.



图(a)~(c)数据为0~50 cm深度,10 cm间隔的全部观测值,图(d)数据为0~10 cm和40~50 cm这2个深度的平均值

图4 沼泽湿地土壤间隙水溶解性  $\text{CH}_4$  与土温、pH、盐度和  $\text{SO}_4^{2-}$  的相关关系

Fig. 4 Relationship between dissolved methane and soil temperature, pH, salinity,  $\text{SO}_4^{2-}$  in the porewater in three marshes

表 4 沼泽湿地间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 与 DOC、Cl<sup>-</sup> 离子的相关关系<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation between dissolved methane concentrations and ions concentrations of the porewater in three marshes

| 观测时间 | DOC<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | SOC<br>/g·kg <sup>-1</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>/mmol·L <sup>-1</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>/mmol·L <sup>-1</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>/mmol·L <sup>-1</sup> | Cl <sup>-</sup><br>/mmol·L <sup>-1</sup> |
|------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 夏季   | 0.049                       | -0.162                     | 0.359                                                 | 0.623                                                 | -0.729 *                                               | -0.558                                   |
| 冬季   | -0.603                      | 0.486                      | 0.101                                                 | 0.403                                                 | -0.923 **                                              | -0.984 **                                |
| 总计   | 0.516 *                     | 0.392                      | -0.326                                                | 0.011                                                 | -0.431 *                                               | -0.558 *                                 |

1) 因缺失冬季 10~40 cm 深土壤间隙水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等指标的测定数据,故表中相关分析数据为 0~10 cm 和 40~50 cm 的平均值, n=9; \* 表示显著性水平 P<0.05; \*\* 表示显著性水平 P<0.01

为了探析所测定的环境因子对河口区沼泽湿地土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度时空特征的贡献的大小,利用多元回归分析中的逐步回归法建立了间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 与各环境因子之间的最优回归方程(表 5)。结果表明,在测定的环境因子中,土壤温度和间隙水 Cl<sup>-</sup> 浓度分别可解释夏季和冬季沼泽湿地

间隙水溶解性浓度变化的 88.6% 和 91.4%,它们之间的复相关系数均达到 0.001 的极显著性水平(表 5)。对冬夏季进行综合分析可知,土壤温度和盐度对沼泽湿地间隙水溶解性浓度的贡献较大,两者可解释其浓度变化的 81.5%,它们之间的复相关系数亦达到 0.001 的极显著性水平(表 5)。

表 5 间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度与环境因子间的多元回归方程

Table 5 Multiple regression equations between dissolved methane and environmental factors in three marshes

| 观测时间 | 回归方程                                                   | F 值   | R <sup>2</sup> | P      |
|------|--------------------------------------------------------|-------|----------------|--------|
| 夏季   | $Y = -2142.60 + 93.10X_{\text{土温}}$                    | 54.66 | 0.886          | <0.001 |
| 冬季   | $Y = 389.97 - 6.80X_{\text{Cl}^-}$                     | 74.28 | 0.914          | <0.001 |
| 总计   | $Y = 173.70 - 82.31X_{\text{盐度}} + 14.27X_{\text{土温}}$ | 33.01 | 0.815          | <0.001 |

4 结论

(1)河口短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 存在显著的时空特征,沿半咸水至淡水的盐度梯度,间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度呈现逐步增加的水平空间分布趋势和夏季显著高于冬季的时间动态特征。

(2)土壤 pH、盐分和间隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup> 浓度差异性是影响上述空间分布特征的重要因素,而间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度时间动态特征与土温、DOC 浓度密切相关。此外,河口区周期性涨落潮等水动力条件亦是引起其时空特征的重要因素之一。

(3)多元逐步回归分析表明,土壤温度和盐度及间隙水中 Cl<sup>-</sup> 浓度对沼泽湿地间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度时空变化特征的贡献最大,是引起其变化的主要环境因子。

(4)与国内外其它沼泽湿地相比,闽江河口短叶茳苳沼泽湿地间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 浓度低于纬度偏北的内陆和河口淡水沼泽湿地,与三江平原毛茆草泥炭湿地间隙水 CH<sub>4</sub> 浓度相当,但高于同一研究区域的芦苇沼泽湿地。

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Working group I Contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge,

United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

[2] Allen D E, Dalal R C, Rennenberg H, *et al.* Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(2): 622-631.

[3] Kao-Kniffin J, Freyre D S, Balser T C. Methane dynamics across wetland plant species [J]. Aquatic Botany, 2010, **93**(2): 107-113.

[4] Tong C, Huang J F, Hu Z Q, *et al.* Diurnal variations of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide vertical fluxes in a subtropical estuarine marsh on neap and spring tide days [J]. Estuaries and Coasts, 2013, **36**(3): 633-642.

[5] 曾志华, 杨民和, 余晨兴, 等. 闽江河口区淡水 and 半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性 [J]. 生态学报, 2014, **34**(10): 2674-2681.

[6] DeLaune R D, Smith C J, Patrick W H. Methane release from Gulf coast wetlands [J]. Tellus B, 1983, **35B**(1): 8-15.

[7] Bartlett K B, Bartlett D S, Harriss R C, *et al.* Methane emissions along a salt marsh salinity gradient [J]. Biogeochemistry, 1987, **4**(3): 183-202.

[8] Poffenbarger H J, Needelman B A, Megonigal J P. Salinity influence on methane emissions from tidal marshes [J]. Wetlands, 2011, **31**(5): 831-842.

[9] 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 闽江河口湿地研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[10] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量特征初步研究 [J]. 草业学报, 2011, **20**

- (3): 51-61.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [12] Minamikawa K, Nishimura S, Sawamoto T, *et al.* Annual emissions of dissolved CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in the subsurface drainage from three cropping systems [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(2): 796-809.
- [13] Kelley C A, Martens C S, Ussler III W. Methane dynamics across a tidally flooded riverbank margin [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(6): 1112-1129.
- [14] 杨文燕, 宋长春, 张金波. 沼泽湿地孔隙水中溶解有机碳、氮浓度季节动态及与甲烷排放的关系 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(10): 1745-1750.
- [15] Bange H W, Dahlke S, Ramesh R, *et al.* Seasonal study of methane and nitrous oxide in the coastal waters of the southern Baltic Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **47**(6): 807-817.
- [16] Ferrón S, Ortega T, Gomez-Parra A, *et al.* Seasonal study of dissolved CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in a shallow tidal system of the bay of Cádiz (SW Spain) [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, **66**(1-4): 244-257.
- [17] 刘德燕, 丁维新. 天然湿地土壤产甲烷菌及其影响因素研究进展 [J]. *地理科学*, 2011, **31**(2): 136-142.
- [18] Frankenberger W T, Bingham F T. Influence of salinity on soil enzyme activities [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **46**(6): 1173-1177.
- [19] Baldwin D S, Rees G N, Mitchell A M, *et al.* The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a freshwater wetland [J]. *Wetlands*, 2006, **26**(2): 455-464.
- [20] Van der Nat F J, Middelburg J J. Methane emission from tidal fresh water marshes [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **49**(2): 103-121.
- [21] Wilson J O, Crill P M, Bartlett K B, *et al.* Seasonal variation of methane emissions from a temperate swamp [J]. *Biogeochemistry*, 1989, **8**(1): 55-71.
- [22] Weston N B, Porubsky W P, Samarkin V A, *et al.* Porewater stoichiometry of terminal metabolic products, sulfate, and dissolved organic carbon and nitrogen in estuarine intertidal creek-bank sediments [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **77**(3): 375-408.
- [23] Lee R Y, Porubsky W P, Feller I C, *et al.* Porewater biogeochemistry and soil metabolism in dwarf red mangrove habitats (Twin Cays, Belize) [J]. *Biogeochemistry*, 2008, **87**(2): 181-198.
- [24] 全川, 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子 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(1): 207-216.
- [25] Bridgham S D, Richardson C J. Mechanisms controlling soil respiration (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) in southern peatlands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, **24**(11): 1089-1099.
- [26] Sawyer T E, King G M. Glucose uptake and end product formation in an intertidal marine sediment [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(1): 120-128.
- [27] Bergman I, Svensson B H, Nilsson M. Regulation of methane production in a Swedish acid mire by pH, temperature and substrate [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(6): 729-741.
- [28] Nilsson M, Bohlin E. Methane and carbon dioxide concentrations in bogs and fens-with special reference to the effects of the botanical composition of the peat [J]. *Journal of Ecology*, 1993, **81**(4): 615-625.
- [29] Tong C, She C X, Yang P, *et al.* Weak correlation between methane production and abundance of methanogens across three brackish marsh zones in the Min River Estuary, China [J]. *Estuaries and Coasts*, 2015, doi: 10.1007/s12237-014-9930-2.
- [30] Kotsyurbenko O R, Friedrich M W, Simankova M V, *et al.* Shift from acetoclastic to H<sub>2</sub>-dependent methanogenesis in a west siberian peat bog at low pH values and isolation of an acidophilic *Methanobacterium* strain [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(7): 2344-2348.
- [31] Marton J M, Herbert E R, Craft C B. Effects of salinity on denitrification and greenhouse gas production from laboratory-incubated tidal forest soils [J]. *Wetlands*, 2012, **32**(2): 347-357.
- [32] Neubauer S C. Ecosystem responses of a tidal freshwater marsh experiencing saltwater intrusion and altered hydrology [J]. *Estuaries and Coasts*, 2013, **36**(3): 491-507.
- [33] Hartzell J L, Jordan T E, Cornwell J C. Phosphorus burial in sediments along the salinity gradient of the Patuxent River, a subestuary of the Chesapeake Bay (USA) [J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, **33**(1): 92-106.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                    |                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology ..... | LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)                             |
| Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM <sub>2.5</sub> at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer .....               | CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)     |
| Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM <sub>2.5</sub> in Chengdu City .....                                                                       | YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)   |
| Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning .....                                                                 | HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)    |
| Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing .....                                                                                       | CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)           |
| Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction .....                                                                                                     | ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)     |
| Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors .....                                                                                                             | YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)     |
| Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China .....                                                                                | ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)    |
| Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors .....                                                                                     | CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)             |
| Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images .....                                                                           | WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)      |
| Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary .....                                                      | YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)     |
| Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City .....                                                                                                       | CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)           |
| Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir .....                                                                     | BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)    |
| Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR .....                                                       | WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)  |
| Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes .....                            | WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)      |
| Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance .....                                                                                                            | LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)                                 |
| Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater .....                                                                                                               | WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)     |
| Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou .....                                                                   | DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)     |
| Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination .....                           | YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)             |
| Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....                                                     | FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)           |
| Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers .....                                 | WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)      |
| Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network .....                                                                                                        | JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)                      |
| Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater .....                                                                        | ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)       |
| Efficacy of A <sup>2</sup> /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling .....                                                       | WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)          |
| Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System .....                                                                   | LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)          |
| Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures .....                                                                                        | LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)     |
| 2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway .....                | SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)       |
| Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....                                                                                      | YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)       |
| Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage .....                                                           | LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)                   |
| Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge .....                                                          | MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)                |
| Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes .....                                                                            | LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)            |
| Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Alkaline Process .....                          | JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)     |
| Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain .....                                                                              | DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809) |
| Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain .....                                                                       | QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)     |
| Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area .....                                                                        | WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)        |
| Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China .....                                                | FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)       |
| Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils .....                                                                | SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839) |
| Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment .....                                                             | JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)          |
| Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants .....                              | CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)    |
| Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i> .....              | SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)    |
| Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence .....                                        | LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)      |
| Application of Whole-cell Biosensor ADPI <sub>p</sub> WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment .....                                                                | TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)            |
| Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring .....                                                                  | GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)             |
| Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish .....                                                                                                                               | LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)        |
| Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i> .....                                                                                        | CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)                                    |
| Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions .....                                                                                     | XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)       |
| Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater .....                                         | GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)         |
| Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components .....                                                                                                | LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)            |
| Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment .....                              | DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)            |
| Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications .....                                                         | DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)    |

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                               |                 |    |                                                                                                                                                                                                                   |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                         | Co-Sponsored    | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn | Edited          | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                       | Published       | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@mail.sciencep.com                                                                                             | Distributed     | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行