

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                  |                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 .....                                                    | 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)                    |
| 中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 .....                                                       | 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)                   |
| 基于长时间序列的北京 PM <sub>2.5</sub> 浓度日变化及气象条件影响分析 .....                                | 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)                      |
| 2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 .....                                                   |                                        |
| 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)                       |                                        |
| 抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 .....                                               |                                        |
| 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)                                               |                                        |
| 成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 .....                                                      | 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)         |
| 嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 .....                                               |                                        |
| 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)                                               |                                        |
| 泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 .....                                                      | 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)         |
| 城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 .....                                               | 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)                      |
| 桂林市酸雨变化特征及来源分析 .....                                                             | 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)              |
| 农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH <sub>3</sub> 和N <sub>2</sub> O)减排效果比较:以夏玉米季为例 .....          | 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)                   |
| 青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O通量的观测 ..... | 吴建国,周巧富 (2914)                         |
| 三峡库区香溪河秋末至中冬CO <sub>2</sub> 和CH <sub>4</sub> 分压特征分析 .....                        | 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)        |
| 气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 .....                                                     | 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)                  |
| 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 .....                                        |                                        |
| 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)                                                        |                                        |
| 入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 .....                                             | 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)            |
| 库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 .....                                                | 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)           |
| 农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 .....                                                       | 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)               |
| 农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 .....                                                    | 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)                  |
| 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 .....                                          |                                        |
| 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)                                                    |                                        |
| 重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 .....                                                     | 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)        |
| 深圳地区全氟辛烷磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 .....                                                  | 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)                   |
| 柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 .....                                                 | 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)              |
| 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 .....                                                  | 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)                 |
| 昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 .....                                                   | 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)           |
| 甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 .....                                                         | 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)              |
| 漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征 .....                                                   | 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)               |
| 雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 .....                                                     | 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)           |
| Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 .....                                                    | 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)          |
| Ce <sup>3+</sup> 与Cu <sup>2+</sup> 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 .....                    | 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)            |
| Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 .....                                                      | 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073) |
| 石墨烯-TiO <sub>2</sub> 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 .....                                  | 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)                      |
| 单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 .....                                                      | 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)     |
| 硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 .....                                                         | 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)          |
| 膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 .....                                                 | 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)            |
| ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 .....                                               | 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)           |
| 活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 .....                                                     | 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)                |
| 低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 .....                                                  | 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)        |
| 超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 .....                                                        | 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)        |
| 活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 .....                                                   | 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)       |
| 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 .....                                                 |                                        |
| 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)                                                |                                        |
| 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 .....                                                     | 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)                  |
| 我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 .....                                                | 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)               |
| 流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 .....                                                       | 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)    |
| 聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu <sup>2+</sup> 、Zn <sup>2+</sup> 的吸附特性 .....                | 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)                |
| 新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 .....                                                      | 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)                  |
| 纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 .....                                                      | 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)               |
| 鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 .....                                            |                                        |
| 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)                                                 |                                        |
| 不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 .....                                                  | 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)         |
| 中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 .....                                                        | 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)         |
| 贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 .....                                                  | 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)            |
| 不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 .....                                               | 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)                    |
| 《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)                           |                                        |

# 三峡库区香溪河秋末至中冬 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 分压特征分析

张军伟<sup>1</sup>, 雷丹<sup>1\*</sup>, 肖尚斌<sup>1</sup>, 张成<sup>2</sup>, 穆晓辉<sup>1</sup>, 刘佳<sup>1</sup>, 李迎晨<sup>1</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002)

**摘要:** 为揭示三峡库区支流库湾表层水体秋末至中冬  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的分压特征及其影响因素, 于 2014 年相应时间段在香溪河库湾每天定时采取表层水样, 利用顶空气相色谱技术测定水中溶解  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的浓度, 通过亨利定律计算  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的分压, 并同步监测相关环境因子. 结果表明, 表层水体  $\text{CH}_4$  分压变化范围 0.64 ~ 4.43 Pa, 平均值为  $(1.69 \pm 0.94)$  Pa,  $\text{CO}_2$  分压变化范围 49.90 ~ 868.91 Pa, 平均值为  $(328.48 \pm 251.63)$  Pa. 水体  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压的变化呈显著负相关 ( $r = -0.618, P < 0.01$ ),  $p\text{CH}_4$  和  $p\text{CO}_2$  与溶解氧、总磷、叶绿素 a、pH 水温和水位相关性明显, 其中  $p\text{CO}_2$  与各环境因子的相关性较  $p\text{CH}_4$  更为密切.

**关键词:** 溶解气体; 分压; 环境因子; 三峡水库; 香溪河库湾

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2924-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.013

## Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Jun-wei<sup>1</sup>, LEI Dan<sup>1\*</sup>, XIAO Shang-bin<sup>1</sup>, ZHANG Cheng<sup>2</sup>, MU Xiao-hui<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, LI Ying-chen<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The Concentrations of dissolved  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir from autumn to winter in 2014 were determined with headspace gas chromatography technology. Then their partial pressures of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  were calculated according to the Henry's law. Their temporal variation and the effects of environmental parameters were also discussed. The results indicated that the  $\text{CH}_4$  partial pressure in the surface water ranged 0.64-4.43Pa, with an average of  $(1.69 \pm 0.94)$  Pa. The  $\text{CO}_2$  partial pressure varied from 49.90 to 868.91Pa, with the average of  $(328.48 \pm 251.63)$  Pa. The  $p\text{CO}_2$  and  $p\text{CH}_4$  had a strong negative correlation ( $r = -0.618, P < 0.01$ ). During the period of monitoring, the  $p\text{CO}_2$  and  $p\text{CH}_4$  in surface water were significantly correlated with pH, DO, chlorophyll a, TP, surface water temperature and water level. Compared with  $p\text{CH}_4$ ,  $p\text{CO}_2$  was more closely correlated with various environmental factors.

**Key words:** dissolved gas; partial pressure; environmental factors; the Three Gorges Reservoir; Xiangxi River Bay

水库作为人类活动对大气温室气体浓度影响的一个重要方面, 越来越受到关注. 对于水库温室气体的研究始于 1993 年<sup>[1]</sup>, Duchemin 等<sup>[2]</sup>首次对水库水-气界面温室气体通量进行观测和计算. 水库淹没陆地生态系统中的碳并释放进入水体, 淹没土壤的化学性质被改变, 导致不稳定碳和营养物质释放到水中, 并在一定时间内改变水体里的生物化学参数, 进而影响新环境中温室气体的动力学过程, 主要体现在加强水体里细菌、浮游生物和鱼类群落的活动性, 从而刺激水库生态系统的全面生产, 这在热带地区尤为明显<sup>[3]</sup>. 通过各种途径进入到水库中的有机物, 在厌氧、好氧的条件下腐烂分解, 生成大量的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ , 成为温室气体重要的排放源<sup>[4]</sup>. 水体二氧化碳分压 ( $p\text{CO}_2$ ) 和甲烷分压 ( $p\text{CH}_4$ ) 是影响水-气界面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  交换的重要因素, 不仅受流域地表的生物、物理、化学和人类活动的影响, 而且也受生物地球化学过程的影响. 冉景

江等<sup>[5]</sup>通过对小江回水区  $p\text{CO}_2$  的时空变化监测与分析, 指出了水体  $p\text{CO}_2$  与水体碳循环的关系; 袁希功等<sup>[6]</sup>、姚臣湛等<sup>[7]</sup>对三峡库区支流香溪河库湾  $p\text{CO}_2$  进行监测以及影响因素的分析, 分析发现水-气界面  $p\text{CO}_2$  与温度、pH、叶绿素 a、溶解氧 (DO) 的相关性明显. 温志丹等<sup>[8]</sup>对长春 7 个城市湖泊  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压研究发现, 秋季  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压都高于大气中  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压, 秋季这些城市水体是大气  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的“源”. 在三峡水库蓄水期间, 水库内的水文情势发生了显著的变化, 水深加大、水面增宽、水流变缓、水质发生明显的变化, 同时季节交替伴随的水温降低, 共同导致生物地球化学过程的改变或自适应. 本研究基于 2014 年秋末至中冬以天

收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41273110); 湖北省自然科学基金项目 (2014CFB672, 2015CFC834)

作者简介: 张军伟 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水工学, E-mail: 1657729290@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: leidan@ctgu.edu.cn

为频率、对三峡库区支流香溪河表层水体 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 分压进行持续性的原位观测数据,通过分析香溪河库湾溶解温室气体分压的变化特征,探讨二者的影响因素,以期全面而系统地认识三峡水库蓄水之后的温室气体通量特征提供客观依据。

## 1 研究区概况

香溪河位于鄂西,距离三峡大坝约 20 km,是三峡水库湖北库区最大支流,也是三峡坝首的第一大支流,流域面积为 3 099 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>,拥有南阳河、古夫河、高岚河 3 条主要支流。香溪河流域地处亚热带大陆性季风气候区,降水量较多,多年降雨量平均在 900 ~ 1 200 mm 之间,年平均气温为 17.24℃<sup>[10]</sup>。香溪河流域内山地众多,地势高差大,沿河两岸多为陡坡峡谷。香溪河库湾属深水型回水库湾,由于干支流的水温差异及颗粒物浓度含量不同导致分层异重流现象长期存在,同时库湾存在显著的水温分层现象<sup>[11]</sup>。考虑到香溪河流域的自然地理特征及水环境特征,本研究中观测点选择在兴山县峡口镇,即图 1 中 XX06 的位置,其处于香溪河中游,距离香溪河口约 18 km。

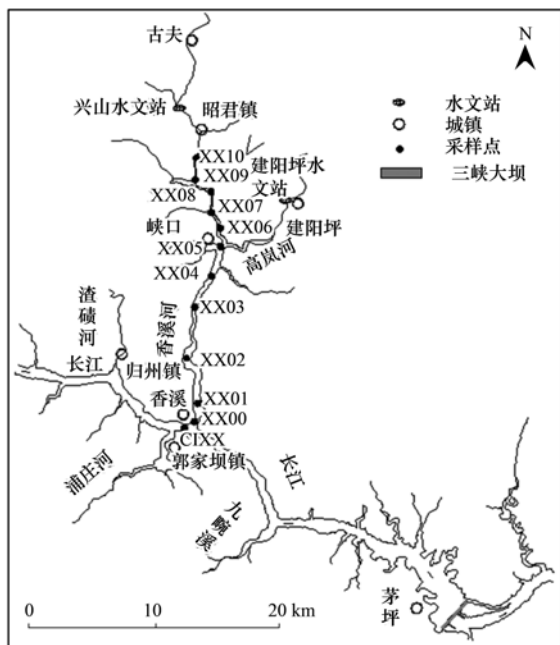


图 1 监测点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

## 2 材料与方法

### 2.1 样品的采集与分析方法

采样时段为 2014 年 11 月至 2015 年 1 月,每日上午 09:00 定点采集表层水(水深 0.5 m),已有的

研究表明<sup>[12]</sup>,上午 09:00 水体溶解 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度可反映 24 h 内的变化情况。使用注射器取 100 mL 水样,注入预先清洗干净的真空镀铝内膜采样袋内(水样取两袋做平行样,结果取其平均值),并注入 3 mL 饱和 HgCl<sub>2</sub> 溶液抑制微生物的活动,用于短时间保存<sup>[13]</sup>。另外取 350 mL 水样于采样瓶内,用于叶绿素 a、TN、TP 的测定。样品采集同时,利用水质多参数仪(HYDROAB DS5,美国)测定水体理化因子。采样袋中的水样带回实验室后先用注射器注入 200 mL 高纯氮(99.99%),然后用 40 W 功率超声波处理 20 min 使水中 CH<sub>4</sub> 与 CO<sub>2</sub> 充分释放,静置 24 h 使待测气体两相平衡<sup>[14]</sup>,抽取顶空气体,用 FLGC9790II 型气相色谱仪(福立公司,中国)测定,CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的检测器为离子化火焰检测器(FID)<sup>[15]</sup>。根据文献<sup>[16]</sup>,水体中 TN 以及 TP 的含量分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法和过硫酸钾消解法,通过紫外分光光度计(TU-1810,北京普析)测定,采用丙酮提取法<sup>[17]</sup>测定叶绿素 a 的浓度,水样通过 0.45 μm 乙酸纤维滤膜在真空泵下抽滤得到滤膜,将滤膜放入离心管中,加入 90% 的丙酮溶液 10 mL,放在阴暗处 24 h 之后摇匀,用离心机离心 15 min,取其上清液测定水体中叶绿素 a 的含量。

### 2.2 溶解气体浓度计算

水体中溶解气体浓度的计算采用 Johnson 等<sup>[18]</sup>提出的方法:

$$c_w = c_{\text{gas}} \times \left( \beta \times \frac{RT}{22.356} + \frac{V_{\text{gas}}}{V_{\text{liq}}} \right) \quad (1)$$

式中, $c_w$  为表层水中溶解气体的浓度( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $c_{\text{gas}}$  为顶空平衡后的气体浓度( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $\beta$  为 Bunsen 系数 [ $\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ]; $R$  为通用气体常数  $0.082 \text{ L} \cdot \text{Pa} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $V_{\text{gas}}$  和  $V_{\text{liq}}$  分别是气体体积(mL)和水样体积(mL); $T$  为热力学温度(K);22.356 为气体摩尔体积( $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。

### 2.3 溶解气体分压计算

水体中溶解气体的分压采用公式(2)计算<sup>[19]</sup>:

$$p = \frac{c_w}{k_H} \quad (2)$$

式中, $k_H$  为亨利定律常数 [ $\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ]; $c_w$  为表层水中溶解气体的浓度( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $p$  为待测气体分压(Pa)。

## 3 结果与分析

### 3.1 水体 $p\text{CO}_2$ 和 $p\text{CH}_4$

观测点 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 分压有明显的月变化特征

(图 2), 监测期间水体  $p\text{CH}_4$  平均为  $(1.69 \pm 0.94)$  Pa, 其分压变化范围  $0.64 \sim 4.43$  Pa; 水体  $p\text{CO}_2$  平均为  $(328.48 \pm 251.63)$  Pa, 分压变化范围  $49.90 \sim 868.91$  Pa. 11 月  $p\text{CO}_2$  相对比较稳定, 12 月和 1 月变化幅度比较明显, 而对于  $p\text{CH}_4$ , 11 月变化比较明显, 12 月和 1 月相对比较稳定. 已有研究表明, 长江上游的龙川江水体  $p\text{CO}_2$  在  $23 \sim 841$  Pa 之间<sup>[20]</sup>; 夏季梅溪河表层  $p\text{CO}_2$  为  $6.8 \sim 7.5$  Pa, 三峡库区库中长江干流表层  $p\text{CO}_2$  为  $201.4 \sim 210.2$  Pa<sup>[21]</sup>; 秋季黄河水体  $p\text{CO}_2$  介于  $80 \sim 166$  Pa<sup>[22]</sup>; 小浪底站表层水体  $p\text{CO}_2$  在  $82 \sim 195$  Pa 之间, 花园口站表层水体  $p\text{CO}_2$  在  $99 \sim 228$  Pa

之间, 且花园口站表层水体  $p\text{CO}_2$  均高于同期的小浪底站<sup>[23]</sup>. 由于受河流内、外部的物理、化学和生物过程的影响, 香溪河水体  $p\text{CO}_2$  与其他河流相比有显著差别.

$\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压呈显著负相关, 相关系数为  $-0.618$ . 11 月  $p\text{CH}_4$  比较高, 平均为  $2.39$  Pa, 且出现  $p\text{CH}_4$  最大值  $4.43$  Pa, 12 月和 1 月相对较低, 平均分压分别为  $1.12$  Pa、 $1.25$  Pa, 12 月分压达到最小值  $0.64$  Pa; 而  $p\text{CO}_2$  最大值和最小值分别在 12 月和 11 月, 最大值  $868.91$  Pa, 最小值  $49.90$  Pa, 11 月、12 月和 1 月  $p\text{CO}_2$  平均值分别为  $78.60$ 、 $578.93$  和  $433.10$  Pa.

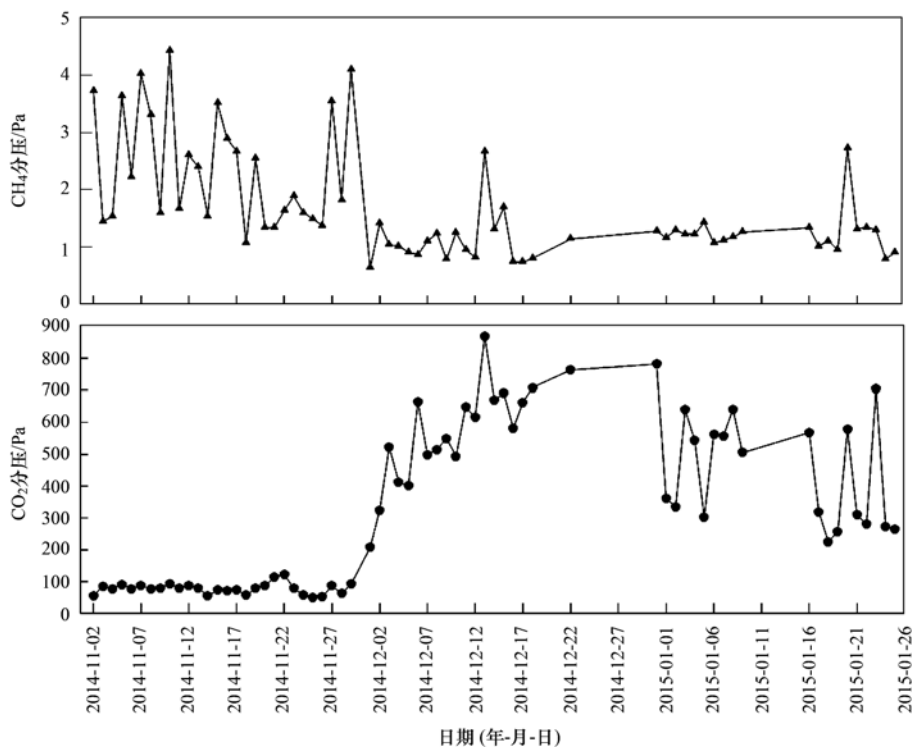


图 2  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压日变化

Fig. 2 Daily variation of the partial pressure of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$

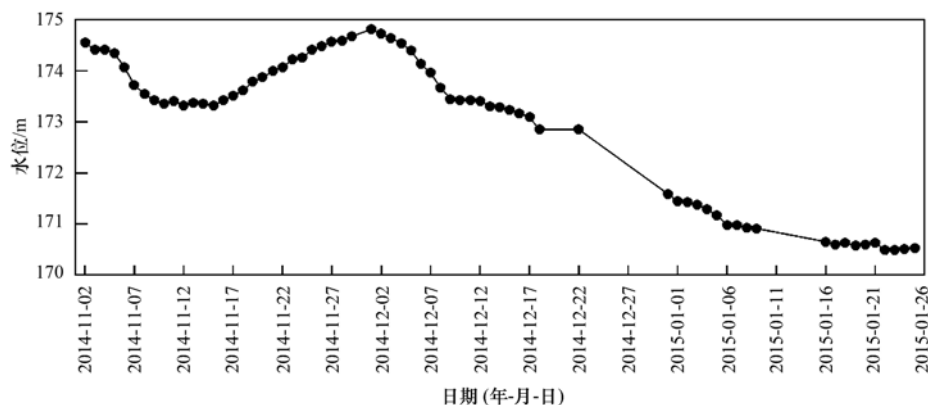
### 3.2 主要环境因子

图 3 为 2014 年 11 月至 2015 年 1 月香溪河支流水位变化情况. 三峡水库蓄水之后, 11 月水位整体小幅度的抬升, 平均水位  $174$  m, 水位日变幅比较小, 11 月上旬水位处于缓慢下降的趋势, 下旬水位从  $173.32$  m 慢慢抬升到  $174.81$  m; 12 月和 1 月水位持续下降, 从 11 月最高水位  $174.81$  m 下降到 1 月最低水位  $170.50$  m 左右, 平均日下降  $0.09$  m.

从图 4 可以看出, 入冬后随着气温降低, 香溪河支流表层水温呈现降低的趋势, 水温从 11 月最高  $21.29^\circ\text{C}$  降到 1 月最低  $13.37^\circ\text{C}$ , 日均降低  $0.10^\circ\text{C}$ .

叶绿素 a 的含量介于  $0.13 \sim 3.88 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 其中 11 月叶绿素 a 的含量相对较低, 在  $0.50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  左右, 12 月和 1 月叶绿素 a 含量较 11 月高, 其平均浓度分别为  $1.42 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $2.09 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 整体来看叶绿素 a 处于上升的趋势. 11 月表层水体溶解氧在  $8.2 \sim 10.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 12 月表层水体溶解氧 (DO) 呈现逐渐上升的趋势, DO 浓度从  $9.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  上升到  $12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 1 月 DO 介于  $8.0 \sim 12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间.

监测期间水体 pH 平均为  $8.6$ , 呈碱性, 11 月和 12 月 pH 比较稳定, 1 月 pH 波动比较大. TN、TP 浓



数据来源: 中国长江三峡集团公司

图3 2014年11月~2015年1月香溪河支流水位变化情况

Fig. 3 Variation of water level of Xiangxi River from Nov. 2014 to Jan. 2015

度分别在  $0.2 \sim 1.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.03 \sim 0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间波动,其中 TN、TP 在 12 月和 1 月比较高,11 月相对较低。

#### 4 讨论

水库温室气体的排放是由气体产生和传输过程共同决定的,直接影响碳通量的是水体和大气之间的二氧化碳分压差<sup>[24]</sup>,但是在大部分时间多数河段水体中的二氧化碳处于过饱和状态,不断向大气排放二氧化碳<sup>[25~29]</sup>。对于  $\text{CH}_4$  气体来说,氧化过程也是一个决定因素<sup>[30]</sup>,有研究表明淡水环境中碳的厌氧矿化占碳总矿化的 20% ~ 60%,其中厌氧矿化的 30% ~ 80% 都是通过水体和沉积物中甲烷的生成来实现<sup>[31]</sup>。而这些过程受诸多因素的影响,比如水库的库龄、气候、下垫面条件、水位变化、水位日变幅、pH、浮游生物等。

##### 4.1 $p\text{CO}_2$ 与环境因子之间的关系

水体  $p\text{CO}_2$  受多种因素的影响,其中水温 and 叶绿素的作用尤为重要<sup>[32]</sup>。支流由于受到干流与地形等影响,流速变缓,有利于浮游植物生长<sup>[33]</sup>,浮游植物的光合作用吸收二氧化碳,在已有的河流水体  $\text{CO}_2$  影响因素的研究中,呼吸作用是维持亚马逊河与珠江口  $p\text{CO}_2$  的主要机制<sup>[26, 34]</sup>,光合作用和呼吸作用同时影响着泰晤士河的  $p\text{CO}_2$ <sup>[35]</sup>。

叶绿素 a 含量是浮游植物数量的重要指标,它直接反映水库的初级生产力<sup>[36]</sup>。在自养状态下,水体中植物的光合作用大于呼吸作用,碳被固定,导致水体中  $\text{CO}_2$  分压降低;而在异养状态下,呼吸作用较强, $\text{CO}_2$  分压会相应增加<sup>[37]</sup>。11 月后三峡水库基本维持在 170 m 左右高水位运行,香溪河支流水体

受干流水体顶托作用影响,水体交换作用减小,水体处于准静止状态水力学条件以及水中营养条件 (TP) 均适合浮游植物的生长,水体中叶绿素 a 的含量随着浮游植物的增加逐渐上升,而浮游植物代谢作用的增强也导致水中 DO 增加。 $p\text{CO}_2$  与水体中叶绿素 a 含量呈显著正相关,相关系数为 0.435 (表 1),这与文献[38~40]研究结果相反,分析其原因是由于冬季光照强度较弱,水生生物呼吸作用释放的  $\text{CO}_2$  高于浮游植物光合作用消耗的  $\text{CO}_2$ ,导致  $p\text{CO}_2$  上升。Morotta 等<sup>[41]</sup>也观测到强降雨后湖泊中有水生植物覆盖的水体  $p\text{CO}_2$  的上升幅度要大于开阔水体,原因可能在于低光照下浮游植物的低光合作用吸收的  $\text{CO}_2$  无法抵消水生生物呼吸作用释放的  $\text{CO}_2$ ,从而导致水体  $p\text{CO}_2$  上升。

pH 影响水体中  $\text{CO}_2$  浓度,当 pH 较高时,水体中游离的  $\text{CO}_2$  就会转变为碳酸盐,水体中  $\text{CO}_2$  分压降低,导致水中溶解的  $\text{CO}_2$  处于不饱和状态,促使大气中  $\text{CO}_2$  进入水体中<sup>[19]</sup>。 $p\text{CO}_2$  与 DO、pH 呈显著正相关(表 1),这与文献[42~44]的研究结果相反,分析其原因是由于监测期间 pH 的变化范围比较小,且绝大部分时间处于稳定状态,在弱碱状态下,水中游离的  $\text{CO}_2$  易于形成碳酸,浮游植物光合作用释放  $\text{O}_2$ ,使水体中溶解氧含量增加,pH 上升,光合作用消耗的  $\text{CO}_2$  低于浮游植物呼吸作用产生的  $\text{CO}_2$  量,因此  $p\text{CO}_2$  与 DO、pH 呈显著正相关。

水温不仅可以影响气体分子的扩散速度及其在水体中的溶解度来影响气体的交换通量<sup>[43]</sup>,还可以通过影响微生物的活性来间接影响温室气体产生的地球化学过程<sup>[44]</sup>,另外水温通过影响水生植物的光合作用和呼吸作用进而影响  $\text{CO}_2$  在水-气界面的扩

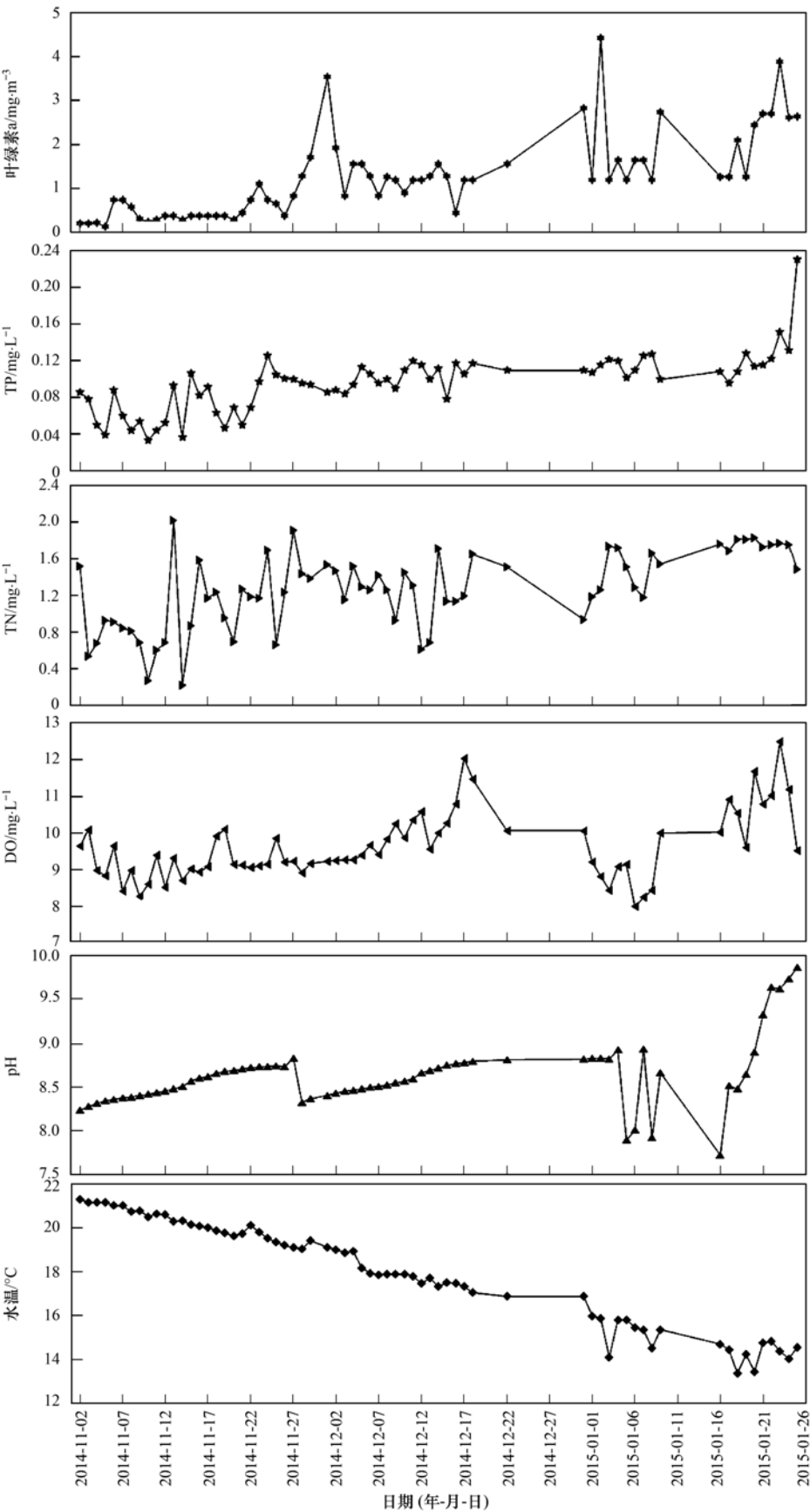


图 4 各环境因子日变化  
Fig. 4 Daily variation of environmental factors

散<sup>[45]</sup>. 水温与  $p\text{CO}_2$  呈明显的负相关, 相关系数达到  $-0.618$  (表 1), 这与许多学者的研究结果是一致的. 水温升高,  $\text{CO}_2$  在水体中的溶解度降低, 另外水温升高是光照强度增强的结果, 最终导致  $p\text{CO}_2$  降低.

4.2  $p\text{CH}_4$  与环境因子的关系

表层水体  $\text{CH}_4$  与水位变化和沉积物有机质含量有一定关系.  $\text{CH}_4$  主要产生于有机质在水下厌氧环境下的分解, 而水位的变化直接反映了沿岸消落区的淹没时长. 由于植物在水中的厌氧分解速率服从指数变化规律<sup>[46]</sup>, 在水库高水位运行时, 植物分解速率加快,  $\text{CH}_4$  生成量增加.  $p\text{CH}_4$  与水位呈现正相关, 相关系数为  $0.305$  (表 1), 11 月水位较高,  $p\text{CH}_4$  比较高, 随着水位的逐渐下降,  $p\text{CH}_4$  有下降的趋势.

温度对  $\text{CH}_4$  的浓度有重要影响<sup>[46]</sup>, 而水体中的  $\text{CH}_4$  主要来源于沉积物中有机物厌氧产甲烷过程<sup>[47]</sup>, 该代谢产生  $\text{CH}_4$  的过程与水温关系密切, 温暖的水体有利于有机物的矿化, 增强产甲烷速率<sup>[48]</sup>. Louis 等<sup>[49]</sup>认为, 水温较高的沉积物中积累的甲烷量大于扩散到水中的量, 导致甲烷过饱和而形成气泡. Friedl 等<sup>[50]</sup>研究结果显示温和的水体会更进一步促进温室气体的产生, 增加排放到大气中的量. 水温与  $p\text{CH}_4$  显著正相关, 相关系数  $0.509$  (表 1), 水温升高使得微生物活性增强, 增加  $\text{CH}_4$  产生量, 同时随着温度升高  $\text{O}_2$  和  $\text{CH}_4$  在水中的溶解度减小<sup>[43]</sup>, 降低  $\text{CH}_4$  在水柱中被氧化的量, 进而导致  $\text{CH}_4$  气体的释放增加<sup>[51]</sup>,  $p\text{CH}_4$  比较高. 其中

11 月水温相对比较高, 有利于  $\text{CH}_4$  的产生, 因此  $p\text{CH}_4$  与水温呈显著正相关 ( $r = 0.509, P < 0.01$ ).

由表 1 可知,  $p\text{CH}_4$  与叶绿素 a、DO、TP 呈负相关. Huttunen 等<sup>[52]</sup>研究表明沉积物中  $\text{CH}_4$  浓度以及  $\text{CH}_4$  扩散浓度与水体含氧量密切相关,  $\text{CH}_4$  只有在严格厌氧还原条件下才能产生, 主要通过沉积物-水界面以气泡或溶解的形式交换至上覆水<sup>[53, 54]</sup>, 在扩散经过有氧的沉积物层时, 厌氧层产生的  $\text{CH}_4$  会被氧化消耗<sup>[55]</sup>.  $p\text{CH}_4$  与水体中叶绿素 a 和 DO 呈负相关, 叶绿素 a 的含量是浮游植物数量的重要指标, 秋、冬季节浮游植物等生物死亡后堆积在库底形成了产生  $\text{CH}_4$  的“源”, 另外浮游植物光合作用释放  $\text{O}_2$ , 使水体中溶解氧增加, 产生的大部分甲烷被生活在有氧-缺氧临界面的甲烷氧化菌消耗掉<sup>[56]</sup>. 水体中的 TP 为浮游植物的生长提供了有利条件, 加大了光合作用强度, 使水中溶解氧增加, 加剧了  $\text{CH}_4$  氧化.

pH 与水体有机质的分解、微生物的活动和水生生物的代谢等密切相关<sup>[57, 58]</sup>, 在  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  产生及排放过程中有重要的影响<sup>[53]</sup>.  $\text{CH}_4$  是在严格厌氧条件下产甲烷菌产生的, 其中产甲烷菌对 pH 较为敏感, 有研究表明在厌氧培养产甲烷菌的过程中, 当 pH 小于 5.5 和大于 9.0 时, 产甲烷菌几乎不生长<sup>[58]</sup>, 产甲烷菌最适生长环境是中性环境, 有利于  $\text{CH}_4$  的产生<sup>[59]</sup>. 监测期间水体均呈现碱性, pH 在 7.25 ~ 9.70 之间波动, 产甲烷菌的活性可能随着 pH 的升高而受到了抑制, 所以  $p\text{CH}_4$  与水体 pH 呈负相关 ( $r = -0.218, P < 0.01$ ).

表 1 香溪河库湾表层水  $p\text{CO}_2$  和  $p\text{CH}_4$  与环境因子间的相关系数<sup>1)</sup>

Table 1 Correlation coefficient of influencing factors with the partial pressure of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  across the surface water of the Xiangxi River Bay

| 项目             | 水温            | 水位            | pH            | DO            | TN     | TP            | 叶绿素 a         |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|---------------|---------------|
| $p\text{CO}_2$ | $-0.618^{**}$ | $-0.394^{**}$ | $0.546^{**}$  | $0.411^{**}$  | 0.262  | $0.476^{**}$  | $0.435^{**}$  |
| $p\text{CH}_4$ | $0.509^{**}$  | $0.305^{**}$  | $-0.218^{**}$ | $-0.323^{**}$ | -0.240 | $-0.446^{**}$ | $-0.363^{**}$ |

1) \*\* 表示 0.01 置信水平显著相关;  $N = 67$

5 结论

(1) 监测期间表层水体  $p\text{CH}_4$  介于  $0.64 \sim 4.43$  Pa 之间, 平均为  $(1.69 \pm 0.94)$  Pa;  $p\text{CO}_2$  分压变化范围  $49.90 \sim 868.91$  Pa, 平均为  $(328.48 \pm 251.63)$  Pa.

(2) 通过对三峡库区支流香溪河库湾表层水体  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压持续性的原位观测, 结果表明  $p\text{CO}_2$

和  $p\text{CH}_4$  呈现明显的负相关性.  $p\text{CH}_4$  和  $p\text{CO}_2$  与水温、水位、pH、DO、叶绿素 a 等相关性明显, 其中各环境因子与  $p\text{CO}_2$  的相关性较  $p\text{CH}_4$  更为密切, 但是由于  $p\text{CH}_4$  和  $p\text{CO}_2$  的变化受到诸多因素共同的影响, 目前还难以确定是哪个因素占主要地位, 需要进一步开展三峡水库温室气体的研究.

致谢: 感谢中国长江三峡集团公司对本研究的支持.



## 参考文献:

- [1] Rudd J W M, Harris R, Kelly C A, *et al.* Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? [J]. *Ambio*, 1993, **22**(4): 246-248.
- [2] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R, *et al.* Production of the greenhouse gases CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> by hydroelectric reservoirs of the boreal region[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(4): 529-540.
- [3] Delmas R, Galy-Lacaux C, Richard S. Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 993-1003.
- [4] Mäkinen K, Khan S. Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs [J]. *Water Alternatives*, 2010, **3**(2): 91-105.
- [5] 冉景江, 林初学, 郭劲松, 等. 三峡库区小江回水区二氧化碳分压的时空变化特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(8): 976-982.
- [6] 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 等. 香溪河库湾春季 pCO<sub>2</sub> 与浮游植物生物量的关系[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1754-1760.
- [7] 姚臣谔, 张靖, 吴以赢, 等. 三峡坝区干流及香溪河库湾水体秋季二氧化碳分压[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(1): 152-157.
- [8] 温志丹, 宋开山, 赵莹, 等. 长春城市水体夏秋季温室气体排放特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 102-111.
- [9] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 141-144.
- [10] 付娟, 李晓玲, 戴泽龙, 等. 三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2015, **61**(3): 285-290.
- [11] 易仲强, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响[J]. *水生态学杂志*, 2009, **2**(5): 6-11.
- [12] Xiao S B, Wang Y C, Liu D F, *et al.* Diel and seasonal variation of methane and carbon dioxide fluxes at Site Guojiaba, the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(10): 2065-2071.
- [13] Butler J H, Elkins J W. An automated technique for the measurement of dissolved N<sub>2</sub>O in natural waters [J]. *Marine Chemistry*, 1991, **34**(1-2): 47-61.
- [14] 柴欣生, 付时雨, 莫淑欢, 等. 静态顶空气相色谱技术[J]. *化学进展*, 2008, **20**(5): 762-766.
- [15] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 240-260.
- [17] Song K S, Zang S Y, Zhao Y, *et al.* Spatiotemporal characterization of dissolved carbon for inland waters in semi-humid/semi-arid region, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(10): 4269-4281.
- [18] Johnson K M, Hughes J E, Donaghay P L, *et al.* Bottle-calibration static head space method for the determination of methane dissolved in seawater[J]. *Analytical Chemistry*, 1990, **62**(21): 2408-2412.
- [19] Sander R. Compilation of Henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry (Version 3) [EB/OL]. <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html>, 1999-04-08.
- [20] Li S Y, Lu X X, He M, *et al.* Daily CO<sub>2</sub> partial pressure and CO<sub>2</sub> outgassing in the upper Yangtze River basin: a case study of the Longchuan River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **466-467**: 141-150.
- [21] 李双, 王雨春, 操满, 等. 三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 885-891.
- [22] 张龙军, 徐雪梅, 温志超. 秋季黄河 pCO<sub>2</sub> 控制因素及水-气界面通量[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(2): 227-235.
- [23] 张永领, 杨小林, 张东. 小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站 pCO<sub>2</sub> 特征及扩散通量[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 40-48.
- [24] 李宁, 李学刚, 宋金明. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程[J]. *海洋环境科学*, 2005, **24**(2): 75-80.
- [25] Jones J B, Mulholland P J. Influence of drainage basin topography and elevation on carbon dioxide and methane supersaturation of stream water[J]. *Biogeochemistry*, 1998, **40**(1): 57-72.
- [26] Richey J E, Melack J M, Aufdenkampe A K, *et al.* Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Nature*, 2002, **416**(6881): 617-620.
- [27] Worrall F, Swank W T, Burt T. Fluxes of inorganic carbon from two forested catchments in the Appalachian Mountains [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(15): 3021-3035.
- [28] 苏征, 张龙军, 王晓亮. 黄河河流水体二氧化碳分压及其影响因素分析[J]. *海洋科学*, 2005, **29**(4): 41-44.
- [29] Raymond P A, Caraco N F, Cole J J. Carbon dioxide concentration and atmospheric flux in the Hudson River [J]. *Estuaries*, 1997, **20**(2): 381-390.
- [30] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2377-2384.
- [31] Bastviken D, Cole J J, Pace M L, *et al.* Fates of methane from different lake habitats: connecting whole-lake budgets and CH<sub>4</sub> emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, **113**(G2): G02024.
- [32] 朱钰, 商少凌, 翟惟东, 等. 南海北部夏季海表二氧化碳分压及其海气通量的遥感算法初探[J]. *自然科学进展*, 2008, **18**(8): 951-955.
- [33] 吴学谦, 操满, 傅家楠, 等. 三峡水库夏季干流、支流(草堂河)水体的二氧化碳分压及扩散通量[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2015, **21**(3): 311-318.
- [34] Zhai W D, Dai M H, Cai W J, *et al.* High partial pressure of CO<sub>2</sub> and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the

- Pearl River estuary, China [J]. *Marine Chemistry*, 2005, **93** (1): 21-32.
- [35] Neal C, Harrow M, Williams R J. Dissolved carbon dioxide and oxygen in the River Thames: spring-summer 1997 [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **210-211**: 205-217.
- [36] Paasche E. On the relationship between primary production and standing stock of phytoplankton [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1960, **26**(1): 33-48.
- [37] 刘昕, 江明喜, 邓红兵. 三峡地区香溪河流域叶片凋落物分解过程中 N、P 含量动态研究 [J]. *武汉植物学研究*, 2008, **26**(6): 613-619.
- [38] Fan C X, Ford P W, Hu W P, *et al.* Divergence of carbon dioxide fluxes in different trophic areas of Taihu Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, **15**(4): 433-442.
- [39] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(30): 5532-5540.
- [40] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖 p(CO<sub>2</sub>) 季节变化研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2674-2681.
- [41] Marotta H, Duarte C M, Pinho L, *et al.* Rainfall leads to increased pCO<sub>2</sub> in Brazilian coastal lakes [J]. *Biogeosciences*, 2011, **7**(5): 1607-1614.
- [42] 梅航远, 汪福顺, 姚臣湛, 等. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 58-63.
- [43] 丁建平, 程静, 杨建明. 溶解性气体对开式循环凝汽器运行特性的影响 [J]. *热力透平*, 2004, **33**(1): 41-45.
- [44] Singh S N, Kulshreshtha K, Agnihotri S. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands [J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(1): 39-46.
- [45] Patra P K, Lal S, Venkataramani S, *et al.* Seasonal and spatial variability in N<sub>2</sub>O distribution in the Arabian Sea [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1999, **46**(3): 529-543.
- [46] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. *Ecological Engineering*, 2005, **25**(5): 542-551.
- [47] Duc N T, Crill P, Bastviken D. Implications of temperature and sediment characteristics on methane formation and oxidation in lake sediments [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **100**(1-3): 185-196.
- [48] Gudas C, Bastviken D, Steger K, *et al.* Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments [J]. *Nature*, 2010, **466**(7305): 478-481.
- [49] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin É, *et al.* Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: a global estimate reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases [J]. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766-775.
- [50] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles- Consequences of damming [J]. *Aquatic Sciences*, 2002, **64**(1): 55-65.
- [51] 杨妍, 刘丛强, 吴攀, 等. 猫跳河流域梯级开发水库夏季甲烷排放研究 [J]. *贵州水力发电*, 2009, **23**(3): 12-16.
- [52] Huttunen J T, Väisänen T S, Hellsten S K, *et al.* Methane fluxes at the sediment-water interface in some boreal lakes and reservoirs [J]. *Boreal Environment Research*, 2006, **11**(1): 27-34.
- [53] Ivanov M V, Pimenov N V, Rusanov I I, *et al.* Microbial processes of the methane cycle at the north-western shelf of the Black Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **54**(3): 589-599.
- [54] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(4): 384-396.
- [55] Huttunen J T, Väisänen T S, Hellsten S K, *et al.* Fluxes of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(1): 3-13-17.
- [56] Rosa L P, Dos Santos M A, Matvienko B, *et al.* Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(7): 1443-1450.
- [57] Dumestre J F, Vaquer A, Gosse P, *et al.* Bacterial ecology of a young equatorial hydroelectric reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **400**: 75-83.
- [58] 刘亭亭, 曹靖瑜. 产甲烷菌的分离及其生长条件研究 [J]. *黑龙江水专学报*, 2007, **34**(4): 120-122.
- [59] Wang Z P, DeLaune R D, Patrick W H, *et al.* Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(2): 382-385.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China .....                                                                                                              | CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)                |
| Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China .....                                                                             | LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)           |
| Diurnal Variation of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date .....                                            | MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)                       |
| Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 .....                                                                                                  | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)     |
| Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang .....                                                                   | ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)                 |
| Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain .....                                                                    | JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)                |
| Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City .....                        | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)              |
| Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City .....                                                                                             | ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)        |
| Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case .....                                                                    | LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)                         |
| Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin .....                                                                                                             | GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)                 |
| Assessment of Gaseous Nitrogen (NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation .....       | FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)              |
| Soil CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons ..... | WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)                                      |
| Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....                                                               | ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)          |
| Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir .....                                                                                                    | ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)            |
| Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed .....                    | WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)             |
| Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai .....                                                                                        | XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)            |
| Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River .....                                              | WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)           |
| Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream .....                                                                   | LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)          |
| Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch .....                                                                                | LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)          |
| Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....                                            | CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)      |
| Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area .....                                                                       | LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)            |
| Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region .....                                                                               | CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)                 |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China .....                        | WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)         |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River .....                                                                            | CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)     |
| Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland .....                                                                    | WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)        |
| Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers .....                                                                                       | LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)              |
| Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan .....                                                             | CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)              |
| Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season .....                                                                               | ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)          |
| Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands .....                                     | ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)        |
| Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce <sup>3+</sup> and Cu <sup>2+</sup> Ions .....                                                         | ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)       |
| Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor .....                                                                                                             | DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073) |
| Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol .....                                                | XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)                               |
| Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO <sub>2</sub> in Aqueous Solution .....                                                      | YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)              |
| Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....                                                                     | MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)                   |
| Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater .....                                                                           | LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)               |
| Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor .....                                                                 | WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)          |
| Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment .....                                                                     | LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)              |
| Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia .....                                               | GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)                   |
| Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition .....                                                                                        | MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)                   |
| Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid .....                                                                            | HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)         |
| Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province .....                                                                 | WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)             |
| Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics .....                                                                    | ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)           |
| Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties .....                                                                            | FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)                |
| Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method .....                                                                                                      | LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)                       |
| Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions .....                | ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)              |
| Preparation and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges .....                                                               | WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)          |
| Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions .....                                                                                                    | ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)            |
| Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid .....                                                     | ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)     |
| Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization .....                                                        | JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)        |
| Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA .....                                                                                              | WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)      |
| Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance .....                                                              | LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)               |
| Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils .....                                                | LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)              |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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     | 赵进才                                                                                                                                                                 | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                            |
| 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   | 中国国际图书贸易集团有限公司<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