

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

**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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 ..... 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 ( 1 )

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 ..... 林海涛,李琦路,张干,李军 ( 10 )

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 ..... 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 ( 16 )

南京地区大气PM<sub>2.5</sub>潜在污染源硫碳同位素组成特征 ..... 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 ( 22 )

青奥会前后南京PM<sub>2.5</sub>重金属污染水平与健康风险评估 ..... 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 ( 28 )

南昌市秋季大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素富集特征及来源分析 ..... 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 ( 35 )

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 ..... 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 ( 41 )

边界层低空急流导致北京PM<sub>2.5</sub>迅速下降及其形成机制的个例分析 ..... 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 ( 51 )

电厂燃煤烟尘PM<sub>2.5</sub>中化学组分特征 ..... 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 ( 60 )

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 ( 66 )

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 ( 74 )

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 ..... 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 ( 82 )

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 ..... 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 ( 88 )

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 ..... 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 ( 94 )

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 ..... 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 ( 102 )

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 ..... 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 ( 112 )

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 ..... 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 ( 123 )

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 ..... 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 ( 132 )

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 ..... 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝菱,陈琳 ( 141 )

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 ..... 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 ( 148 )

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 ..... 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 ( 156 )

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 ..... 黄廷林,刘飞,史建超 ( 166 )

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 ..... 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 ( 173 )

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 ..... 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 ( 180 )

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 ..... 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 ( 187 )

二氧化钛光催化氧化阿散酸 ..... 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 ( 193 )

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 ..... 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 ( 198 )

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 ..... 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 ( 208 )

纳米TiO<sub>2</sub>吸附HgCl<sub>2</sub>水溶液中Hg(II) ..... 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 ( 220 )

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 ..... 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 ( 228 )

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 ..... 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 ( 240 )

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 ..... 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 ( 247 )

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 ..... 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 ( 253 )

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 ..... 徐特,曾辉,倪宏刚 ( 262 )

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 ..... 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 ( 270 )

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 ..... 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 ( 280 )

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 ..... 周益奇,刘云霞,傅慧敏 ( 288 )

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 ..... 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 ( 293 )

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 ..... 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 ( 301 )

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 ..... 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 ( 309 )

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 ..... 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 ( 317 )

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 ..... 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 ( 325 )

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 ..... 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 ( 335 )

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 ( 342 )

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 ..... 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 ( 350 )

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 ..... 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 ( 359 )

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 ..... 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 ( 366 )

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 ..... 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 ( 377 )

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 ..... 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 ( 384 )

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 ..... 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 ( 391 )

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 ..... 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 ( 397 )

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

# 长春城市水体夏秋季温室气体排放特征

温志丹<sup>1</sup>, 宋开山<sup>1\*</sup>, 赵莹<sup>1</sup>, 邵田田<sup>1,2</sup>, 李思佳<sup>3</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 吉林师范大学生态环境研究所, 四平 136000)

**摘要:** 为掌握我国东北地区城市湖泊水体温室气体的释放/吸收特征, 本研究分别于夏季和秋季, 对位于吉林省长春市的 7 个城市湖泊(南湖、北湖、雁鸣湖、胜利公园、地理所内湖、天嘉公园和长春公园)表层水中的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 分压 [ $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$ ] 进行了监测, 并对影响  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  季节变化的相关环境和水质参数进行了分析. 研究结果表明在夏季和秋季, 这 7 个城市湖泊表层水体中 CH<sub>4</sub> 都处于过饱和状态; 除夏季的南湖和胜利公园内湖, 其它湖泊 CO<sub>2</sub> 也都处于过饱和状态, 且不同湖泊间的温室气体分压具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 通量也同样具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ). 除了南湖和胜利公园内湖外, 其它各湖泊在夏秋季节都是大气 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的“源”, 且对大气中温室气体的贡献都以 CO<sub>2</sub> 为主. 环境参数与  $p(\text{CO}_2)$  或  $p(\text{CH}_4)$  之间的相关性分析表明, 在夏季, 城市湖泊表层水体中  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  都与日照时数呈显著负相关 ( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.48$ ,  $P < 0.05$ ;  $r_{p(\text{CH}_4)} = -0.63$ ,  $P < 0.01$ ), 日照时数通过影响水生植物的光合作用进而影响水体中 CO<sub>2</sub> 和溶解氧浓度,  $p(\text{CH}_4)$  还与降水量呈显著正相关 ( $r_{p(\text{CH}_4)} = 0.44$ ,  $P < 0.05$ ); 在秋季,  $p(\text{CO}_2)$  与气温呈显著负相关 ( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.39$ ,  $P < 0.05$ ). 另外, 水质参数与  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  的相关性分析表明, 这些城市湖泊表层水体的  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  都与水体 pH 显著负相关 ( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.51$ ,  $r_{p(\text{CH}_4)} = -0.82$ ,  $P < 0.01$ ), 与盐度显著正相关 ( $r_{p(\text{CO}_2)} = 0.38$ ,  $P < 0.05$ ;  $r_{p(\text{CH}_4)} = 0.75$ ,  $P < 0.01$ ),  $p(\text{CH}_4)$  还与水体 DOC、TN 和 TP 均具有显著相关性 ( $P < 0.01$ ). 从研究结果可以推测在这 7 个富营养城市湖泊中, 水体的营养物水平及其所决定的浮游植物生物量并不是影响表层水体  $p(\text{CO}_2)$  的最主要因素, 而日照时数、水体 pH 和盐度与夏秋季表层水体中的  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  有较大关联.

**关键词:** 城市湖泊; CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; 季节变化; 温室气体

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0102-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.015

## Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China

WEN Zhi-dan<sup>1</sup>, SONG Kai-shan<sup>1\*</sup>, ZHAO Ying<sup>1</sup>, SHAO Tian-tian<sup>1,2</sup>, LI Si-jia<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Ecological Environment, Jilin Normal University, Siping 136000, China)

**Abstract:** The partial pressures of carbon dioxide  $p(\text{CO}_2)$  and methane  $p(\text{CH}_4)$  in the surface water of seven urban lakes in Changchun city, China (Nan Lake, Bei Lake, Yanming Lake, Shengli, Dilisuo, Changchun, Tianjia), have been studied in both summer and autumn related to the environment and water quality parameters. The results indicated that both in summer and autumn, CH<sub>4</sub> of seven lakes was all supersaturated, and CO<sub>2</sub> was all supersaturated except in Nan lake and Shengli lake. For either  $p(\text{CO}_2)$  or  $p(\text{CH}_4)$ , there was a significant difference among different urban lakes ( $P < 0.05$ ), and there was almost no obvious difference in the same lake between summer and autumn. The gas flux also had a significant difference among different urban lakes ( $P < 0.05$ ). Except for Nan Lake and Shengli, all other lakes were the sources of atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> both in summer and fall, and the discharge of CO<sub>2</sub> to atmosphere by lakes was more than that of CH<sub>4</sub>. According to the correlation analysis, there was a significant negative relationship between  $p(\text{CO}_2, \text{CH}_4)$  and sunshine duration in summer ( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.48$ ,  $P < 0.05$ ;  $r_{p(\text{CH}_4)} = -0.63$ ,  $P < 0.01$ ). The sunshine duration could affect the concentrations of CO<sub>2</sub> and dissolved oxygen in the water by influencing the photosynthesis of aquatic plants. There was also a significant negative relationship between  $p(\text{CH}_4)$  and precipitation in summer ( $r_{p(\text{CH}_4)} = 0.44$ ,  $P < 0.05$ ), and between  $p(\text{CO}_2)$  and air temperature in autumn ( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.39$ ,  $P < 0.05$ ). The correlation analysis between water quality parameters and  $p(\text{CO}_2, \text{CH}_4)$  showed that both  $p(\text{CO}_2)$  and  $p(\text{CH}_4)$  were negatively correlated with pH ( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.51$ ,  $r_{p(\text{CH}_4)} = -0.82$ ,  $P < 0.01$ ), while they were positively correlated with salinity ( $r_{p(\text{CO}_2)} = 0.38$ ,  $P < 0.05$ ;  $r_{p(\text{CH}_4)} = 0.75$ ,  $P < 0.01$ ). The results suggested that the levels of nutrients in these urban lakes, which were related to the phytoplankton biomass, were not the main influencing factors for  $p(\text{CO}_2)$  in surface water, and sunshine duration, pH, and salinity all had a greater impact on  $p(\text{CO}_2)$  and

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171293); 中国科学院百人计划项目(Y3H1061001)

作者简介: 温志丹(1986~), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: wenzhidan@iga.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: songks@neigae.ac.cn

$p(\text{CH}_4)$  in summer and autumn.

**Key words:** urban lakes;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{CH}_4$ ; seasonal variability; greenhouse gas

自 19 世纪 90 年代以来,地球表面温度上升了  $0.65 \sim 1.06^\circ\text{C}$ ,由人类活动引起的温室气体排放是导致全球气候变暖的主要原因<sup>[1]</sup>. 大气中  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  是最重要的温室气体,对增强温室效应的贡献率分别达到 60% 和 15%<sup>[2]</sup>. 近年来,内陆水体在全球碳排放中的作用越来越受到重视<sup>[3~6]</sup>,大量研究表明湖泊作为陆地生态系统的重要组成部分,是温室气体的重要排放源<sup>[7~9]</sup>. 据估计,全球湖泊对大气  $\text{CO}_2$  的总汇(以 C 计)达  $5.32 \times 10^7 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[10]</sup>,释放的  $\text{CH}_4$  量约占非人为排放的 6% ~ 16%<sup>[11]</sup>. 因此,湖泊水-气界面温室气体通量的研究对进一步理解内陆水体对大气温室气体的源汇格局的影响具有重要意义.

目前,国内外对内陆水体中温室气体的研究多集中于湖泊、河流、湿地和水库<sup>[12~16]</sup>,而针对受人类活动影响较大的城市湖泊的相关研究极少. 在现代城市中,城市内湖在景观娱乐、调蓄洪涝、调节气候和改善城市生态环境等方面发挥了重要的作用. 城市湖泊基本上属于静止或缓流水体,由于地理位置的特殊性,相对封闭,交换能力差,底泥较厚且有机质、N、P 等营养物质丰富,常处于富营养状态<sup>[17]</sup>. 岸边有机物的大量输入及其在底泥中的储存会刺激水生生物和微生物的新陈代谢,可能会导致  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  等温室气体的大量排放. 另外,大量研究表明土地类型、温度、风速、水中溶解性有机碳(DOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、pH、电导率(EC)和叶绿素浓度(Chla)等环境因素都对水体温室气体的通量具有较大的影响<sup>[14, 18~21]</sup>,因城市湖泊具有独特的地理与水质条件,因此有必要对其温室气体的产生和排放进行深入研究.

由于城市湖泊面积较小,其温室气体的排放通量通常为人们所忽略. 但是在生态系统中,城市碳的收支也是全球碳循环的非常重要的一个环节. 根据北京市五环内城市湖泊  $\text{CH}_4$  排放通量的研究结果,估算出北京市城市湖泊  $\text{CH}_4$  年排放量约为  $0.26 \sim 0.38 \text{ Gg}$ ,约占整个北京地区  $\text{CH}_4$  年排放量的 0.10%<sup>[22]</sup>. 武汉东湖水-气界面的  $\text{CO}_2$  年平均通量值表明,东湖为大气  $\text{CO}_2$  的“源”, $\text{CO}_2$  释放速率随着水体营养水平的降低而显著升高<sup>[23]</sup>. 曾有研究指出,从时空格局来看,历史久且面积小的城市湖泊  $\text{CH}_4$  排放通量较高,水质较好且面积大的城市湖泊

$\text{CH}_4$  排放通量较低,而经人为改建的较大城市湖泊  $\text{CH}_4$  排放通量也较高<sup>[22]</sup>. 另外,城市湖泊多为浅水湖,浅水湖泊中温室气体的昼夜通量大小差异明显,温度、含氧量、营养物水平等因素都对温室气体通量有重要影响<sup>[24, 25]</sup>. 目前温室气体通量的观测技术主要有静态浮箱法、边界层法和微气象法,有研究指出在同一环境气候条件下,不同的测定方法得到的结果可能会存在 2 ~ 18 倍数的差异<sup>[26, 27]</sup>. 近年来,基于水体中溶存的温室气体浓度来估算气体分压及通量的方法被研究者们广泛应用,并取得较好的结果<sup>[8, 18, 28]</sup>.

城市湖泊近水面上空的温室气体浓度是城市湖泊作为温室气体源汇变化的间接反映,为了进一步掌握我国东北地区城市湖泊水体温室气体的释放/吸收特征,本研究选择位于吉林省长春市不同地点的 7 个城市水体(南湖、北湖、雁鸣湖、胜利公园、地理所内湖、天嘉公园和长春公园),分别于夏秋两季对湖泊水-气界面的  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  浓度进行了分析监测,并对相关影响因素进行了分析. 本研究为深入理解城市湖泊温室气体的时空变化特征及其与环境因素之间的相互关系,准确估算城市湖泊对大气中温室气体的影响提供了科学数据支撑和理论参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 湖泊概况及采样点布设

7 个湖泊主要位于吉林省长春市区内,其形态学及水质参数特征见表 1. 这些湖泊均属于城市内的景观湖,湖泊岸边均为人筑石堤(地理所内湖除外),并建有绿化带、环湖路(环湖栈桥)和供居民休息的长椅. 按湖泊的地理位置看,北湖和地理所内湖在城边,其它 5 个湖泊在城中;根据经济合作与发展组织(OECD)的富营养化单因子(叶绿素 a)评价标准,这些湖泊都属于富营养化湖泊,其中雁鸣湖、胜利公园和长春公园甚至出现过富营养化状态.

各湖泊地理位置见图 1:南湖( $43.852\ 253^\circ\text{E}$ ,  $125.310\ 301^\circ\text{N}$ )、北湖( $43.983\ 802^\circ\text{E}$ ,  $125.358\ 091^\circ\text{N}$ )、雁鸣湖( $43.944\ 05^\circ\text{E}$ ,  $125.270\ 448^\circ\text{N}$ )、胜利公园( $43.945\ 072^\circ\text{E}$ ,  $125.324\ 397^\circ\text{N}$ )、地理所内湖( $43.998\ 252^\circ\text{E}$ ,  $125.344\ 899^\circ\text{N}$ )、天嘉公园( $43.903\ 943^\circ\text{E}$ ,

125.276 881°N) 和 长 春 公 园 (43.894 823°E, 125.270 479°N). 采 样 时 间 为 2013 年 6 月 3 日 ~ 2013 年 11 月 8 日 和 2014 年 7 月 2 日 ~ 2014 年 11 月 3 日. 采 样 点 设 置 见 图 1, 距 离 岸 边 5 m 以 上, 采 集 表 层 0.5 ~ 1 m 深 度 的 湖 水. 其 中: 南 湖 4 个 点,

重 复 采 样 5 次; 北 湖 5 个 点, 重 复 采 样 4 次; 雁 鸣 湖、胜 利 公 园、地 理 所 内 湖、天 嘉 公 园 和 长 春 公 园 都 只 有 一 个 采 样 点, 分 别 采 样 6 次、4 次、23 次、6 次 和 6 次, 共 采 集 样 品 85 个. 采 样 的 时 间 主 要 都 集 中 在 下 午 13:00 ~ 16:00.

表 1 7 个 城 市 湖 泊 形 态 学 及 水 质 参 数

Table 1 Morphological properties and water quality parameters of the seven urban lakes in China

名称	面积 $\times 10^4/\text{m}^2$	水深/m	pH	浊度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	盐度 $/\text{PSU}$	DOC $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	叶绿素 $/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TN $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
南湖(NH)	88.63	2.60 ~ 6.50	8.36 ~ 8.96	17.42 ~ 32.26	0.18 ~ 0.24	8.61 ~ 16.23	36.17 ~ 55.36	0.79 ~ 1.16	0.08 ~ 0.15
北湖(BH)	119.79	0.50 ~ 3.10	8.17 ~ 9.17	21.67 ~ 22.66	0.22 ~ 0.50	12.54 ~ 13.76	11.66 ~ 24.39	0.31 ~ 0.62	0.04 ~ 0.13
雁鸣湖(YMH)	1.49	0.40 ~ 3.50	7.71 ~ 9.05	25.13 ~ 45.13	0.42 ~ 0.53	18.73 ~ 30.12	44.07 ~ 133.07	1.81 ~ 3.76	0.30 ~ 0.82
胜利公园(SL)	1.62	0.50 ~ 3.00	8.49 ~ 9.04	11.22 ~ 40.34	0.28 ~ 0.48	9.20 ~ 15.98	61.28 ~ 133.07	2.34 ~ 2.64	0.11 ~ 0.12
地理所湖(DL)	0.92	0.50 ~ 3.20	8.10 ~ 9.30	12.89 ~ 21.06	0.18 ~ 0.25	8.14 ~ 13.25	11.32 ~ 52.85	0.45 ~ 1.13	0.01 ~ 0.09
天嘉公园(TJ)	2.68	0.50 ~ 2.50	7.41 ~ 8.13	7.32 ~ 22.17	0.55 ~ 0.60	19.99 ~ 28.49	32.29 ~ 48.97	17.25 ~ 25.34	0.90 ~ 0.97
长春公园(CC)	2.54	0.60 ~ 3.00	7.41 ~ 8.01	5.21 ~ 46.76	0.38 ~ 0.53	13.70 ~ 33.64	22.27 ~ 93.54	8.94 ~ 12.28	0.63 ~ 1.31

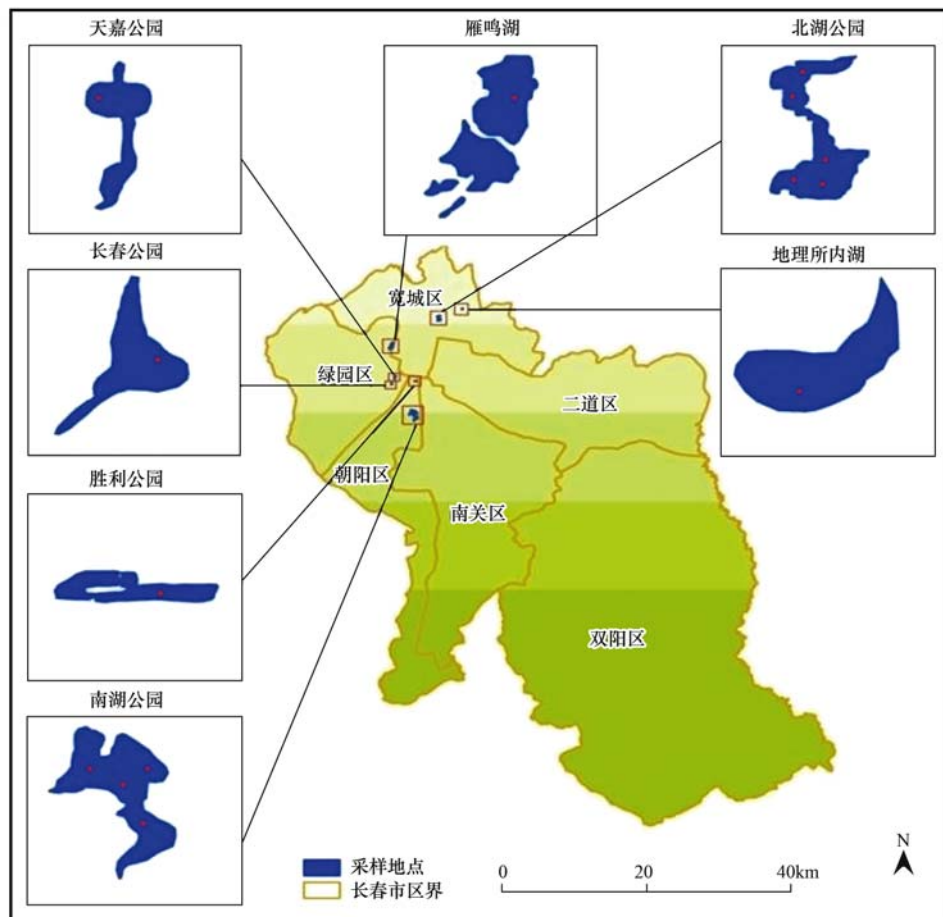


图 1 采 样 湖 泊 示 意

Fig. 1 Locations of the sampling lakes

## 1.2 样品采集

在 每 个 采 样 点 用 采 水 器 采 集 表 层 0.5 ~ 1 m 深 度 的 湖 水 4 L, 装 入 白 色 聚 乙 烯 样 品 瓶 中, 样 品 采 集 后 于 24 h 内 运 回 实 验 室 进 行 水 质 分 析 测 试.

采 用 顶 空 平 衡 法 测 定 溶 存 于 水 体 中 的  $\text{CO}_2$  和

$\text{CH}_4$  浓 度<sup>[8]</sup>. 具 体 操 作 如 下: 采 样 前 将 600 mL 的 细 口 玻 璃 瓶 的 瓶 口 朝 上, 以 便 瓶 内 充 满 空 气, 采 样 时 将 整 个 瓶 置 于 水 面 下, 瓶 口 处 于 水 面 下 50 ~ 100 cm 处, 收 集 350 mL 水 体 后 取 出, 并 用 硅 胶 塞 密 封 瓶 口, 剧 烈 摇 晃 采 样 瓶 1 ~ 2 min, 静 置 10 ~ 20 min 使 气 体

在水相和气相中达到平衡. 水样在采集后立即运回实验室,并向每个瓶内注入 0.2 mL 饱和 HgCl<sub>2</sub> 溶液以抑制微生物活性. 样品于 4℃ 保存待分析.

### 1.3 分析方法

水体 pH、浊度和电导率( EC )于采样现场使用便携式水质分析仪( YSI6600, 美国)测定; 盐度根据测定的 EC 计算得出<sup>[7]</sup>; 水样经过预先烘烤过的 WhatmanGF/F(0.7 μm) 过滤后,使用总有机碳分析仪( TOC-5000, 日本岛津)进行溶解性有机物( DOC )分析; 总氮( TN )和总磷( TP )根据水质监测的标准方法使用紫外-可见光分光光度计( UV-2600, 日本岛津)进行测定<sup>[29]</sup>; 叶绿素 a( Chla )浓度的测定采用丙酮提取法<sup>[30]</sup>. 环境气候参数来源于中国气象科学数据共享服务网.

CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度测定:使用医用注射器抽取玻璃瓶上层气体 130 mL,采用温室气体分析仪( DLT-100, 美国 LGR )来分析气样中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度.

### 1.4 数据分析

根据温室气体分析仪的测定结果(气体的体积浓度值),结合亨利定律( Henry's law )<sup>[3]</sup>,分别计算湖泊表层水体中 CO<sub>2</sub> 分压  $p(\text{CO}_2)$  和 CH<sub>4</sub> 分压  $p(\text{CH}_4)$ :

$$p = k_c \times c_B$$

式中,  $p$  为湖泊表层水体中气体分压( atm ),  $c_B$  为气体的物质的量浓度( mol·m<sup>-3</sup> ),  $k_c$  为亨利常数[ atm·( mol·m<sup>-3</sup> )<sup>-1</sup> ].

根据气体浓度值和双层模型公式计算湖泊水-气界面的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量<sup>[3, 8]</sup>:

$$F = (D/z) \times (c_{aq} - c_{air})$$

式中,  $F$  为湖泊水-气界面气体通量[ mmol·( m<sup>2</sup>·d )<sup>-1</sup> ],  $D$  为气体分子扩散系数( cm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> ),  $z$  为表面边界层厚度( μm ),根据文献<sup>[8]</sup>,  $D/z$  值取 0.5 m·d<sup>-1</sup>;  $c_{aq}$  为气体在边界层底部的量浓度( mol·m<sup>-3</sup> );  $c_{air}$  为气体在边界层上表面的量浓度( mol·m<sup>-3</sup> ),该浓度为实测的大气中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的浓度.

应用 SPSS 软件进行单因素方差分析,并对环境参数和温室气体分压之间的关系进行数据统计分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子及城市内湖水水质参数分析

7 个城市湖泊的水质参数列于表 1 中,从表层湖水 pH 可知,这 7 个城市内湖湖水均呈碱性,湖水盐度在 0.18 ~ 0.60 范围内. DOC 浓度在 8.10 ~ 33.64 mg·L<sup>-1</sup> 范围内,其中雁鸣湖、长春公园和天嘉公园内湖的 DOC 浓度相对较高. 长春公园和天嘉公园内湖的 TN 和 TP 浓度高于其它几个湖泊. 参照 OECD 湖泊富营养化的单因子评价标准( Chla ),南湖、北湖、地理所和天嘉公园内湖为富营养型,雁鸣湖、长春公园和胜利公园内湖为严重富营养型.

从长春市 2013 和 2014 年夏季和秋季的部分气候参数(表 2)可以看出,长春市秋季风速大于夏季,有利于气体扩散. 秋季的气温明显低于夏季(均值 8.57℃ < 22.67℃),且日照时数和降水量都明显下降.

表 2 长春市 2013 和 2014 年夏秋季的部分环境参数

Table 2 Environment parameters in summer and autumn of Changchun, China

季节	时间(年-月)	平均风速/m·s <sup>-1</sup>	平均气压/μatm	平均气温/℃	日照时数/h	降水量/mm
夏季	2013-06	2.80	966	21.30	234.50	191
	2013-07	2.40	961	23.70	227	153.10
	2013-08	2.50	964	22.60	207.80	121.70
	2014-06	2.00	965	22.40	236.70	78.60
	2014-07	2.40	964	23.50	260.60	116.70
	2014-08	2.00	969	22.50	270.20	49.50
秋季	2013-09	2.40	975	16.40	235.30	32.70
	2013-10	2.30	979	8.30	176.80	51.50
	2013-11	3.20	976	-0.80	164.10	30.90
	2014-09	2.10	974	15.90	263.90	62.10
	2014-10	2.90	978	8.60	179.70	5.70
	2014-11	2.80	992	3.00	187.80	6.70

### 2.2 不同城市湖泊中 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 季节变化特征

从本研究的分析结果可以看出,不论是在夏

季还是秋季,7 个城市内湖表层水体中  $p(\text{CO}_2)$  的差异都很明显[图 2(a)],南湖中  $p(\text{CO}_2)$  最小,位于长春公园内的湖泊  $p(\text{CO}_2)$  值最高,在夏秋两季

分别高达  $(10\ 551.40 \pm 0.46) \mu\text{atm}$  和  $(10\ 083.42 \pm 0.42) \mu\text{atm}$ , 是南湖  $p(\text{CO}_2)$  的 149.42 倍(夏)和 21.10 倍(秋). 与  $p(\text{CO}_2)$  的情况相同, 7 个城市内湖表层水体中  $p(\text{CH}_4)$  值差别较大[图 2(b)], 夏季  $p(\text{CH}_4)$  值在  $(121.11 \pm 0.02) \sim (13\ 913.56 \pm 2.79) \mu\text{atm}$  之间, 秋季  $p(\text{CH}_4)$  值在  $(95.49 \pm 0.02) \sim (10\ 313.32 \pm 0.87) \mu\text{atm}$  之间, 夏秋两季的  $p(\text{CH}_4)$  最小值均出现在南湖, 而最大值为长春公园内湖.

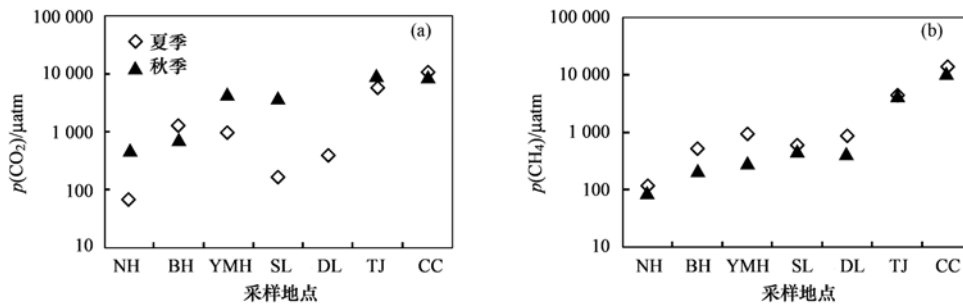


图 2 7 个城市湖泊表层水体  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  的季节变化特征

Fig. 2 Seasonal variability of  $p(\text{CO}_2)$  and  $p(\text{CH}_4)$  in the surface water of urban lakes in Changchun, China

### 2.3 气体排放通量估算

大气和水表  $\text{CO}_2$  分压差决定了水-气界面  $\text{CO}_2$  的通量大小及方向<sup>[31]</sup>. 本研究对 7 个城市湖泊夏、秋季水-气界面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量进行了估算, 各湖泊  $\text{CO}_2$  及  $\text{CH}_4$  的通量大小差异明显(图 3). 除了南湖和胜利公园内湖水夏季  $\text{CO}_2$  通量为负值  $[-5.09 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $-3.47 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$  外, 湖泊  $\text{CO}_2$  通量均为正值, 其值范围为  $1.82 \sim$

在本研究所涉及到的 7 个湖泊范围内, 夏季到秋季的季节更替对城市内湖表层水体中  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  的影响较大(图 2). 除了北湖和长春公园内湖的夏季  $p(\text{CO}_2)$  值高于秋季, 其他湖泊均在秋季展现了更高的  $p(\text{CO}_2)$  值[图 2(a)]. 这 7 个城市内湖夏季的  $p(\text{CH}_4)$  均高于秋季[图 2(b)], 尤其体现在雁鸣湖中, 夏季  $p(\text{CH}_4)$  值是秋季的 3.20 倍; 而天嘉公园内湖中夏秋两季的  $p(\text{CH}_4)$  值差别最小, 夏季  $p(\text{CH}_4)$  值仅为秋季的 1.02 倍.

$172.96 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ . 无论夏季还是秋季, 这 7 个城市内湖的  $\text{CH}_4$  通量均为正值  $0.07 \sim 10.93 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ . 对夏、秋两个季节的气体通量进行整体分析, 发现除了南湖和胜利公园内湖外, 其它各湖泊对大气中温室气体的贡献都以  $\text{CO}_2$  为主, 在雁鸣湖、北湖、天嘉公园、长春公园和地理所内湖, 其  $\text{CO}_2$  通量分别为  $\text{CH}_4$  通量的 80.81、35.40、34.92、17.84 和 5.91 倍.

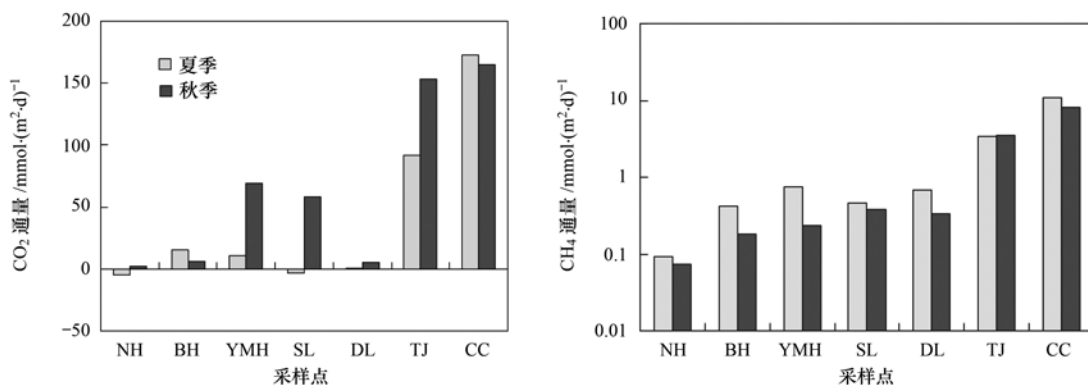


图 3 7 个城市湖泊夏秋季水-气界面碳通量估算

Fig. 3 Change of the  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  flux at the water-air interface in seven urban lakes in summer and autumn

## 3 讨论

### 3.1 不同城市湖泊中 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 的对比分析

这 7 个城市湖泊在秋季的  $p(\text{CO}_2)$  值都高于大气  $\text{CO}_2$  分压, 这说明在秋季, 这些城市水体是大气

$\text{CO}_2$  的“源”. 夏季这些湖泊大多也都为大气  $\text{CO}_2$  的“源”, 但南湖和胜利公园内湖除外, 其  $p(\text{CO}_2)$  值低于大气  $\text{CO}_2$  分压, 它们有可能吸收大气中的  $\text{CO}_2$ , 是大气  $\text{CO}_2$  的“汇”; 这可能因为南湖和胜利公园内湖生长较多荷花, 藻类以及一些浮游植物生长也较

多,夏季为其主要生长季节,光合作用较强,会大量吸收并利用  $\text{CO}_2$ 。同时,不论是在夏季还是秋季,所有湖泊中的  $p(\text{CH}_4)$  值均高于大气  $\text{CH}_4$  分压,说明这些城市内湖在夏秋两季均为大气  $\text{CH}_4$  的“源”,夏季较秋季的“源”贡献更为明显。对 7 个城市湖泊夏、秋季水-气界面  $\text{CH}_4$  通量估算的结果也表明,无论夏季还是秋季,这些城市内湖均为大气  $\text{CH}_4$  的“源”。

对 7 个具有不同水质的城市内湖在夏、秋两季水面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分压进行比较。单因素方差分析表明,无论在夏季还是秋季,这 7 个城市内湖间的  $p(\text{CH}_4)$  和  $p(\text{CO}_2)$  都具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。这些湖泊都处于长春市区内,所处环境的温度、风速、气压等都大致相同,水质之间的巨大差异可能是造成  $p(\text{CH}_4)$  和  $p(\text{CO}_2)$  具有显著性差异的最主要原因。南湖、雁鸣湖和胜利公园内湖的夏季  $p(\text{CO}_2)$  显著低于秋季外 ( $P < 0.05$ ),其它湖泊夏、秋两季的  $p(\text{CO}_2)$  均无明显差异。贵州红枫湖和百花湖的  $p(\text{CO}_2)$  季节变化也表明夏季的  $p(\text{CO}_2)$  低于其它季节<sup>[30]</sup>,这可能因为夏季为浮游植物的主要生长季节,较强的光合作用会大量吸收并利用  $\text{CO}_2$ ,有研究者曾指出浮游植物光合作用是影响河流表层水体  $p\text{CO}_2$  的主要因子<sup>[32]</sup>。地理所内湖、雁鸣湖和北湖的  $p(\text{CH}_4)$  在夏、秋两季差异显著 ( $P < 0.05$ ),其它湖泊无明显差异。

对这些城市内湖夏季和秋季的水面  $\text{CO}_2$  分压进行统计分析,结果表明  $p(\text{CO}_2)$  值分布在  $70.61 \sim 10\,551.40 \mu\text{atm}$  之间。很多研究者对不同类型的湖泊水面  $p(\text{CO}_2)$  进行过研究,美国中西部 131 个农业富营养湖的  $p(\text{CO}_2)$  值在  $0.1 \sim 20\,392 \mu\text{atm}$  之间<sup>[14]</sup>,分布在世界范围内的 196 个咸水湖的  $p(\text{CO}_2)$  值在  $0.1 \sim 100\,000 \mu\text{atm}$  之间波动<sup>[7]</sup>,位于北美大平原的 6 个硬水湖中  $p(\text{CO}_2)$  值为  $2.96 \sim 54\,280.78 \mu\text{atm}$ <sup>[33]</sup>,美国佛罗里达州的 948 个淡水湖的  $p(\text{CO}_2)$  值分布在  $0 \sim 81\,000 \mu\text{atm}$  之间<sup>[9]</sup>。本研究为完善不同类型湖泊  $p(\text{CO}_2)$  的数据库提供了有关城市湖泊的数据参考。另外,很多研究已经表明世界范围内,湖泊水中  $\text{CO}_2$  在无冰期内大多数处于过饱和状态<sup>[8, 11]</sup>,本研究的结果也与该结论相符合,除夏季的南湖和胜利公园内湖,其它城市湖水体中  $\text{CO}_2$  均处于过饱和状态。对所有采样点水体中的  $\text{CO}_2$  饱和度进行统计分析[图 4(a)],结果表明所采集的水样品中 64.71% 的水体都处于  $\text{CO}_2$  过饱和状态。

对这些具有不同水质的城市内湖的水面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量进行统计分析,结果表明无论在夏季还是秋季,这 7 个城市内湖间的  $\text{CH}_4$  通量以及  $\text{CO}_2$  通量都具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。本研究中除了夏季的南湖和胜利公园内湖水体  $\text{CO}_2$  通量为负值 [ $-5.09 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $-3.47 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ] 外,其余湖泊  $\text{CO}_2$  通量均为正值,其值范围为  $1.82 \sim 172.96 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。研究已经表明水生系统中  $\text{CO}_2$  产生主要依赖于水体及沉积物中有机质的微生物降解过程,涉及微生物的好氧及厌氧呼吸、细菌的发酵及产甲烷过程和水生植物及藻类的生长代谢,这些过程对  $\text{CO}_2$  通量的相对贡献在不同的水生生态环境中有所差异<sup>[20]</sup>。但南湖和胜利公园内湖生长较多荷花,夏季生长较为旺盛。曾有研究指出,在以挺水植物为主的水体中,有机质的生物降解并不是  $\text{CO}_2$  的产生的主要途径,其生成及排放主要依赖于植物的呼吸代谢,同时光合作用又会吸收大量  $\text{CO}_2$ <sup>[34]</sup>,这个“汇”作用可能是造成最终南湖和胜利公园内湖  $\text{CO}_2$  通量为负值的主要原因。

本研究中大部分湖泊对大气中温室气体的贡献都是以  $\text{CO}_2$  为主。全球增温潜势 (GWP) 被用于定量评价不同温室气体对气候变化影响的相对能力。根据 2007 年联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 公布的温室气体 GWP 值,脉冲排放的 1 kg  $\text{CH}_4$  在未来 100 年产生的增温效应是等量  $\text{CO}_2$  所能产生效应的 25 倍<sup>[34]</sup>。尽管在本研究中,雁鸣湖、北湖、天嘉公园、长春公园和地理所内湖的  $\text{CH}_4$  通量远远低于  $\text{CO}_2$  通量,但其对温室效应的贡献也不容忽视。目前对湖泊气-水界面  $\text{CH}_4$  分压和通量已受到研究者的广泛关注,研究表明淡水环境中碳的厌氧矿化占碳总矿化量的 20% ~ 60%,其中厌氧矿化的 30% ~ 80% 都是通过水体和沉积物中的甲烷生成来实现<sup>[35]</sup>。本研究所涉及的 7 个城市湖中  $p(\text{CH}_4)$  值分布在  $95.49 \sim 13\,913.56 \mu\text{atm}$  之间,  $\text{CH}_4$  通量为  $0.07 \sim 10.93 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ,这 7 个城市内湖均处于  $\text{CH}_4$  过饱和状态。Kling 等<sup>[3]</sup> 对阿拉斯加的 25 个湖泊和 4 个河流水-气界面的  $\text{CH}_4$  通量进行研究,结果表明这些水体中  $\text{CH}_4$  基本都处于过饱和状态,通量为  $0.08 \sim 1.02 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ,美国 3 个湖泊夏季的  $\text{CH}_4$  通量为  $0.49 \sim 1.60 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ <sup>[35]</sup>,南京丁解水库春季的  $\text{CH}_4$  通量为  $(2.55 \pm 0.21) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ <sup>[12]</sup>。与这些湖泊和水库的  $\text{CH}_4$  通量相比,本研究中天嘉公园和长春



公园内湖的  $\text{CH}_4$  通量明显偏高(图 3),可能与这两个湖泊营养化程度较高有关,富营养化导致水体深层和底泥中堆积的有机物质在厌氧条件下分解产生  $\text{CH}_4$ ,进而被释放进入水体和大气<sup>[2]</sup>. 对所有采样点水体中的  $\text{CH}_4$  饱和度进行统计分析[图 4(b)],结果表明所采集的水样都处于  $\text{CH}_4$  过饱和状态. 另

外,水体中甲烷主要来源于沉积物中有机物厌氧产甲烷过程<sup>[36]</sup>,而研究发现湖泊沉积物中有机碳的矿化与水温具有较强的相关性,温暖的水体有利于有机物的矿化,增强产甲烷速率<sup>[37]</sup>. 本研究中 7 个城市湖泊在夏季的  $\text{CH}_4$  通量都高于秋季,可能与夏季水体温度较高有关.

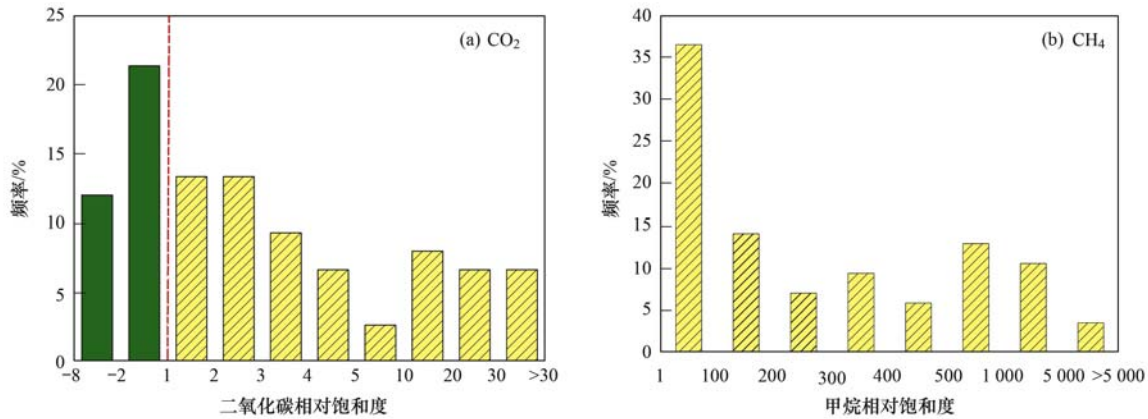


图 4 7 个城市湖泊夏秋季水-气界面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  相对饱和度估算

Fig. 4 Estimated frequency of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  saturation at the water-air interface in seven urban lakes in summer and autumn

### 3.2 环境因子对 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 的影响

水表  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  会受风速、气温、降水量等环境气候因子的影响. 本研究分别于夏季和秋季,以南湖、北湖、雁鸣湖、胜利公园、地理所、天嘉公园和长春公园内湖这 7 个湖泊为代表,综合分析长春城市内湖表层水体中  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  与环境因子(风速、气压、气温、日照时数和降水量)的相关性(表 3). 分析结果表明夏季长春城市内湖  $p(\text{CO}_2)$  与日照时数呈显著负相关( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.48$ ,  $P < 0.05$ ),在秋季,与气温呈显著负相关( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.39$ ,  $P < 0.05$ ). 日照时数是影响水生植物的光合作用的重要因素,较长的日照时数会增强水生植物的光合作用,有利于水体吸收大气中的  $\text{CO}_2$ . 紫外线辐射也是影响水体中水生生物分布格局和生产力的重要因素,进而影响水体对大气中  $\text{CO}_2$  的源汇作用<sup>[31]</sup>. 另外,气体在水中的溶解度与温度呈反比,东北地区秋季的气温变化较为明显(表 2),它们

会直接导致秋季水温下降,不利于  $\text{CO}_2$  从水体进入大气.

夏季长春城市内湖中  $p(\text{CH}_4)$  除了与日照时数呈显著负相关外( $r_{p(\text{CH}_4)} = -0.63$ ,  $P < 0.01$ ),与降水量还呈显著正相关( $r_{p(\text{CH}_4)} = 0.44$ ,  $P < 0.05$ );而在秋季,监测的环境因子与  $p(\text{CH}_4)$  基本无关联性. 在夏季,较长的日照时数增强了水生生物的光合作用,导致水体中溶解氧浓度上升,而甲烷的产生则需要厌氧或缺氧环境下,因能促进  $\text{CH}_4$  的氧化,导致  $p(\text{CH}_4)$  不断降低<sup>[36]</sup>. 有研究曾指出湖泊及河流中的  $\text{CH}_4$  主要包括以下几种状态:沉积物释放、水体中运输和氧化、水体中贮存和释放进入大气<sup>[35, 38]</sup>. 降雨会影响水体中  $\text{CH}_4$  的运输速率,从而使更多贮存在水体中的  $\text{CH}_4$  释放进入大气. 另外,降雨也会增加陆地生态系统中有机物向湖水系统的输送,从而导致能够矿化生成  $\text{CH}_4$  的有机底物增多,  $\text{CH}_4$  的生成量增大. 曾有研究曾指出,风速是影

表 3 夏秋季城市湖泊表层水体中  $p(\text{CO}_2)$  和  $p(\text{CH}_4)$  与环境因素的 Pearson 相关性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation between  $p(\text{CO}_2, \text{CH}_4)$  and the environmental factors for the surface water of urban lakes in summer and autumn

季节	气体分压 / $\mu\text{atm}$	平均风速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	平均气压 / $\text{atm}$	平均气温 / $^{\circ}\text{C}$	日照时数 / $\text{h}$	降水量 / $\text{mm}$
夏季	$p(\text{CO}_2)$	0.09	-0.25	-0.10	-0.48 *	0.27
	$p(\text{CH}_4)$	-0.21	-0.02	-0.37	-0.63 **	0.44 *
秋季	$p(\text{CO}_2)$	0.18	-0.17	-0.39 *	-0.26	-0.11
	$p(\text{CH}_4)$	-0.09	-0.13	-0.04	0.07	-0.08

1) \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,下同

响湖泊和海洋水-气界面温室气体通量的一个主要因素<sup>[19, 39]</sup>,但在本研究中,无论在夏季还是秋季,都并未发现城市内湖水表的 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 与风速存在相关性,这可能是由城市内湖的特殊地理位置所导致的,它们大多位于城市中,楼房建筑物等遮挡相对较多,而且有些湖泊作为景观水体,周围人群密度较大,这些都会影响到湖面的实际风速和气流。

### 3.3 水质参数对 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 的影响

为了更好地阐明夏秋季节这 7 个城市湖泊中 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 产生的机制,本研究进一步分析了城市湖泊中 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 与湖泊水质参数之间的关系(表 4)。从分析的结果可以看出,城市湖泊中 $p(\text{CO}_2)$ 与水体 pH 显著负相关( $r_{p(\text{CO}_2)} = -0.51, P < 0.01$ ),这与很多研究者获得的结论相一致,水体 pH 决定了水体的酸碱性,游离的二氧化碳易溶于碱性水体,导致 $p(\text{CO}_2)$ 降低<sup>[11, 31, 40]</sup>;这些城市湖泊中 $p(\text{CO}_2)$ 与盐度显著正相关( $r_{p(\text{CO}_2)} = 0.38, P < 0.05$ ),研究表明盐湖会向大气释放大

的 $\text{CO}_2$ ,盐湖中的碳酸盐沉淀是 $\text{CO}_2$ 的一个主要来源<sup>[7]</sup>。国内外大量的研究表明,湖泊表层水体中过饱和的 $\text{CO}_2$ 与陆源 DOC 有良好的相关性,推测湖泊 $\text{CO}_2$ 主要来源于湖泊中 DOC 的生物降解利用过程<sup>[18, 41]</sup>。但本研究中并未发现中 $p(\text{CO}_2)$ 与 DOC 之间存在相关性,可能是因为这些湖泊中有 $\text{CO}_2$ 欠饱和的湖泊,如南湖和胜利公园内湖,也有富营养的自养型湖泊,如长春公园和天嘉公园内湖,浮游植物光合作用大量利用了水体中的 $\text{CO}_2$ ,这些因素的存在都影响了 $p(\text{CO}_2)$ 与 DOC 的相关性构建<sup>[41]</sup>。另外,本研究中 $p(\text{CO}_2)$ 与营养盐(TN 和 TP)和叶绿素浓度(Chla)不存在相关性。Finlay 等<sup>[33]</sup>在对加拿大的 6 个硬质水湖泊的 $p(\text{CO}_2)$ 研究中,也发现 $p(\text{CO}_2)$ 与藻类生物量、生产力均没有相关性。从本研究结果可以推测在这 7 个城市湖泊中,水体的营养水平及其所决定的浮游植物生物量及生产力并不是影响表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 的最主要因素。

表 4 夏秋季城市湖泊表层水体中 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 与水质参数的 Pearson 相关性分析

Table 4 Correlation between  $p(\text{CO}_2, \text{CH}_4)$  and water quality parameters for the surface water of urban lakes in summer and autumn

类型	pH	浊度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	盐度/PSU	DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Chla/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
$p(\text{CO}_2)$	-0.51**	0.10	0.38**	0.11	-0.13	0.36	0.30
$p(\text{CH}_4)$	-0.82**	0.03	0.75**	0.52**	0.01	0.82**	0.77**

分析城市湖泊中 $p(\text{CH}_4)$ 与湖泊水质参数之间的关系(表 4),结果表明城市内湖表层水体的 $p(\text{CH}_4)$ 与水体 pH、盐度、DOC、TN 和 TP 均具有显著相关性( $P < 0.01$ ),相关系数见表 4。水体中 $\text{CH}_4$ 的产生主要依靠产甲烷菌群,发生在湖泊的变温层沉积物中的产甲烷反应是湖泊释放 $\text{CH}_4$ 的主要驱动力<sup>[11, 35]</sup>。本研究的 7 个城市湖泊均为浅水湖泊,具有较低的液体静压力,有利于湖底水体及沉积物中产生的 $\text{CH}_4$ 以气泡的方式释放进大气中<sup>[11]</sup>。产甲烷菌是一种对 pH 极度敏感的细菌,有研究表明在厌氧培养产甲烷菌的过程中,pH 小于 5.5 以及大于 9.0 时,几乎没有产甲烷菌的生长<sup>[42]</sup>,而中性环境最适合期生长及 $\text{CH}_4$ 的产生<sup>[43]</sup>。本研究中的城市湖泊水体均为碱性,pH 在 7.41 ~ 9.30 之间波动,产甲烷菌的活性可能随 pH 升高而受到了抑制,所以湖泊中 $p(\text{CH}_4)$ 与水体 pH 呈显著负相关( $r_{p(\text{CH}_4)} = -0.82, P < 0.01$ )。水体沉积物等高度厌氧环境是大气中 $\text{CH}_4$ 最重要的自然排放源,而水体中有机物的大量输入也是影响水体 $\text{CH}_4$ 通量的重要因素之一<sup>[35, 44]</sup>。中国东北的一处碱蓬湿地中的

$\text{CH}_4$ 排放与有机质的含量密切相关<sup>[45]</sup>,本研究中得到了 $p(\text{CH}_4)$ 与湖水中 DOC 浓度呈显著正相关的结论( $r_{p(\text{CH}_4)} = 0.52, P < 0.01$ )。虽然 $\text{CH}_4$ 在大气中的浓度远低于 $\text{CO}_2$ ,本研究中大部分城市湖泊水-气界面 $\text{CH}_4$ 的通量也远低于 $\text{CO}_2$ (图 3),但目前 $\text{CH}_4$ 的大气浓度在所有温室气体中增幅最大<sup>[25]</sup>,因此研究湖泊中 $\text{CH}_4$ 的通量对分析大气温室气体的源汇格局也具有十分重要的意义。

## 4 结论

(1)无论在夏季还是秋季,这 7 个城市湖泊间的 $p(\text{CH}_4)$ 和 $p(\text{CO}_2)$ 都具有显著性差异( $P < 0.05$ ),且水体中 $\text{CH}_4$ 都处于过饱和状态,除夏季的南湖和胜利公园内湖,其它城市湖泊水体中 $\text{CO}_2$ 也都处于过饱和状态。

(2)南湖、雁鸣湖和胜利公园内湖夏季 $p(\text{CO}_2)$ 显著低于秋季外( $P < 0.05$ ),其它湖泊夏、秋两季的 $p(\text{CO}_2)$ 均无明显差异;地理所内湖、雁鸣湖和北湖的 $p(\text{CH}_4)$ 在夏、秋两季差异显著( $P < 0.05$ ),其它湖泊无明显差异。

(3)夏季长春城市湖泊 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 都与日照时数呈显著负相关,在秋季, $p(\text{CO}_2)$ 与气温呈显著负相关;结合 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 与水质参数的相关性分析结果,推测在这7个富营养城市湖泊中,水体的营养物水平及其所决定的浮游植物生物量并不是影响表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 的最主要因素,而日照时数、水体pH和盐度与夏秋季表层水体中的 $p(\text{CO}_2)$ 和 $p(\text{CH}_4)$ 有较大关联。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. 1-151.
- [2] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(4): 966-975.
- [3] Kling G W, Kipphut G W, Miller M C. The flux of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  from lakes and rivers in arctic Alaska [J]. *Hydrobiologia*, 1992, **240**(1-3): 23-36.
- [4] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. *Nature*, 2013, **503**(7476): 355-359.
- [5] 王仕禄, 万国江, 刘丛强, 等. 云贵高原湖泊 $\text{CO}_2$ 的地球化学变化及其大气 $\text{CO}_2$ 源汇效应[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(5): 581.
- [6] Salomao M S M B, Cole J J, Clemente C A, *et al.*  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  dynamics in human-impacted watersheds in the state of São Paulo, Brazil [J]. *Biogeochemistry*, 2008, **88**(3): 271-283.
- [7] Duarte C M, Prairie Y T, Montes C, *et al.*  $\text{CO}_2$  emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2008, **113**(G4): G04041.
- [8] Cole J J, Caraco N F, Kling G W, *et al.* Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes [J]. *Science*, 1994, **265**(5178): 1568-1570.
- [9] Lazzarino J K, Bachmann R W, Hoyer M V, *et al.* Carbon dioxide supersaturation in Florida lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1): 169-180.
- [10] Downing J P, Meybeck M, Orr J C, *et al.* Land and water interface zones [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70**(1): 123-137.
- [11] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6): 2298-2314.
- [12] 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 等. 南京典型水体春季温室气体排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(8): 1360-1371.
- [13] 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.
- [14] Balmer M B, Downing J A. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: undersaturation implies atmospheric uptake [J]. *Inland Waters*, 2011, **1**(2): 125-132.
- [15] 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.
- [16] 梅航远, 汪福顺, 姚臣谔, 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.
- [17] 杨文静. 武汉市内湖富营养化周年变化规律的监测及初步讨论[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. 1-3.
- [18] Lapierre J F, Giorgio P A. Geographical and environmental drivers of regional differences in the lake  $p\text{CO}_2$  versus DOC relationship across northern landscapes [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2012, **117**(G3): G03015.
- [19] 陈永根, 李香华, 胡志新, 等. 中国八大湖泊冬季水-气界面 $\text{CO}_2$ 通量[J]. 生态环境, 2006, **15**(4): 665-669.
- [20] 谭永浩. 上海市河流沉积物温室气体的排放与产生机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. 3-22.
- [21] 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 $p\text{CO}_2$ 特征及扩散通量[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 40-48.
- [22] 艾永平. 城市湖泊的甲烷排放时空变化及其与水文水质关系——以北京市为例[D]. 南昌: 南昌大学, 2009. 4-43.
- [23] 邢阳平. 浅水湖泊水-气界面碳循环的研究[D]. 儋州: 华南热带农业大学, 2004. 7-48.
- [24] Nimick D A, Gammons C H, Parker S R. Diel biogeochemical processes and their effect on the aqueous chemistry of streams: A review [J]. *Chemical Geology*, 2011, **283**(1-2): 3-17.
- [25] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Diel variation of methane fluxes in summer in a eutrophic subtropical lake in China [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, **19**(4): 639-644.
- [26] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R. Comparison of static chamber and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(2): 350-357.
- [27] Matthews C J D, St Louis V L, Hesslein R H. Comparison of three techniques used to measure diffusive gas exchange from sheltered aquatic surfaces [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(4): 772-780.
- [28] Roland F, Vidal L O, Pacheco F S, *et al.* Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs [J]. *Aquatic Sciences*, 2010, **72**(3): 283-293.
- [29] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [R]. Washington, DC: American Public Health Association, 1998.
- [30] 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.
- [31] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 $\text{CO}_2$ 的汇[J]. 生态学报, 2001, **21**(5): 827-833.
- [32] 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 等. 香溪河库湾春季 $p\text{CO}_2$ 与浮游植物生物量的关系[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1754-1760.

- [33] Finlay K, Leavitt P R, Wissel B, *et al.* Regulation of spatial and temporal variability of carbon flux in six hard-water lakes of the northern Great Plains[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6): 2553-2564.
- [34] Hamilton S K, Sippel S J, Melack J M. Oxygen depletion and carbon dioxide and methane production in waters of the Pantanal wetland of Brazil [J]. *Biogeochemistry*, 1995, **30**(2): 115-141.
- [35] Bastviken D T, Cole 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.
- [36] 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.
- [37] Gudasz C, Bastviken D, Steger K, *et al.* Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments [J]. *Nature*, 2010, **466**(7305): 478-481.
- [38] 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 等. 九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 558-564.
- [39] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [40] 宋金明, 徐永福, 胡维平, 等. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 3-79
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Wang Z P, Delaune R D, Patrick W H Jr, *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.
- [44] de Angelis M A, Scranton M I. Fate of methane in the Hudson river and estuary[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(3): 509-523.
- [45] 王慧, 赵化德, 张世宇, 等. 碱蓬湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量及影响因素研究[J]. *海洋环境科学*, 2012, **31**(2): 173-175.

## CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe .....	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> ( 1 )
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure .....	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> ( 10 )
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou .....	..... HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> ( 16 )
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Region .....	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 22 )
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games .....	..... ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> ( 28 )
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Autumn in Nanchang City .....	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 35 )
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring .....	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> ( 41 )
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism .....	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> ( 51 )
Characteristics of Chemical Components in PM <sub>2.5</sub> from the Coal Dust of Power Plants .....	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> ( 60 )
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 66 )
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> ( 74 )
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng .....	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> ( 82 )
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> ( 88 )
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> ( 94 )
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China .....	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 102 )
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn .....	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 112 )
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China .....	..... SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> ( 123 )
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River .....	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> ( 132 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff .....	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> ( 141 )
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban .....	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> ( 148 )
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River .....	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> ( 156 )
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir .....	..... HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao ( 166 )
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	..... YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 173 )
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing .....	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 180 )
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism .....	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> ( 187 )
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO <sub>2</sub> .....	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> ( 193 )
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV .....	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> ( 198 )
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution .....	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 208 )
Experimental Research of Hg( II ) Removal from Aqueous Solutions of HgCl <sub>2</sub> with Nano-TiO <sub>2</sub> .....	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 220 )
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters .....	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> ( 228 )
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System .....	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> ( 240 )
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate .....	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> ( 247 )
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta .....	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> ( 253 )
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization .....	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang ( 262 )
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City .....	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> ( 270 )
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration .....	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 280 )
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min ( 288 )
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil .....	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings .....	..... PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> ( 301 )
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils .....	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> ( 309 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China .....	..... LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> ( 317 )
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors .....	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> ( 325 )
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland .....	..... JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> ( 335 )
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 342 )
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction .....	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> ( 350 )
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy .....	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> ( 359 )
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying .....	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 366 )
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> ( 377 )
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens .....	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 384 )
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants .....	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> ( 391 )
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact .....	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> ( 397 )

# 《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行