

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

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

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任巍, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 吴伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161)	《环境科学》征订启事 (4365)
信息 (4123, 4132, 4409)	

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析

张成^{1,3}, 吕新彪¹, 龙丽², 张军伟², 穆晓辉², 李迎晨², 王圣瑞⁴, 张文丽⁵, 肖尚斌²

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 2. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 3. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002; 4. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 5. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002)

摘要: 薄边界层理论被广为用来计算水-气界面气体通量, 而气体传输速率(k_{600})则是其中的关键性环境因子. 为了研究极低风速下小型浅水湿地水-气界面甲烷气体传输速率, 以宜昌饮用水水库梅子垭水库和周邻 5 个富营养化池塘为研究对象, 采用静态通量箱进行了为期一年的水-气界面甲烷气体通量观测, 同步监测了水环境因子和气象因子. 野外监测时的风速(U_{10})范围为 $0 \sim 0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均值约为 $0.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 水温(T_w)变化范围为 $6.3 \sim 30.9^\circ\text{C}$, 平均值约为 19.3°C . 结果表明, 梅子垭水库和周边 5 个池塘水-气界面甲烷气体传输速率较小, 在 $0.20 \sim 1.99 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间变化, 平均值约为 $0.50 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$. 本研究利用表层水温和风速指标两个参数的双二次项模型和二次项加幂函数模型, 回归得到了气体传输速率的数学公式, 回归结果与原始数据和对 k_{600} 进行深度平均(bin-averaged)后的数据均存在极显著性关系.

关键词: 气体传送速率; 甲烷; 风速; 表层水温; 水-气界面

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4162-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201603102

Gas Transfer Velocity of CH_4 at Extremely Low Wind Speeds

ZHANG Cheng^{1,3}, LÜ Xin-biao¹, LONG Li², ZHANG Jun-wei², MU Xiao-hui², LI Ying-chen², WANG Sheng-rui⁴, ZHANG Wen-li⁵, XIAO Shang-bin²

(1. College of Earth Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 5. College of Biotechnology & Pharmaceutical Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Thin boundary theory equation (TBL) is widely used to determine gas fluxes across water-air interfaces, and the gas transfer velocity (k_{600}) is the key environmental factor in the equation. A monthly field campaign was carried out during one year to measure CH_4 flux and to probe its exchange rate across the air-water interface in a drinking reservoir and 5 adjacent ponds. The ranges of wind speed and surface water temperature were $0 \sim 0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $6.3 \sim 30.9^\circ\text{C}$ respectively, and their average values were $0.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and 19.3°C respectively. The gas transfer velocity of CH_4 varied from 0.20 to $1.99 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ with an average of $0.50 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$. Correlation functions between the gas transfer velocity and the wind speed at 10 m height (U_{10}) and surface water temperature (T_w) were given here to quantify k_{600} . There were significant correlations between the fitted values and actual values both for original and bin-averaged data.

Key words: gas transfer velocity; methane; wind speed; surface water temperature; the water-air interface

淡水生态系统释放大量的 CO_2 和 CH_4 , 是重要的碳源^[1~3]. 近年来, 湖泊和水库等的温室气体释放问题受到了普遍关注^[4~7]. 然而, 极少有研究关注面积小、水深浅且自然地理特征差异显著的池塘(相当大部分处于富营养化状态)^[8~12]. 小型湖泊和池塘通常因有机碳富集而表现为高强度的 CO_2 和 CH_4 释放^[13,14], 它们的数量/面积和在全球碳循环中的作用或地位被严重低估^[3,15,16]. 因此, 通过不同气候条件下对大量浅水池塘的碳通量观测, 对于阐明上述问题十分必要.

当前对小水域水-气界面扩散通量的监测, 通常采用间接的薄边界层公式^[17,18] (thin boundary layer equation, TBLE) 和直接的静态通量箱技术^[19,20]

(static floating chambers, SFC) 两种方法. 两种方法各有优缺点, 静态通量箱技术使用方便、成本较低且是直接的通量观测, 因而其适用于过程研究, 特别是可揭示小尺度范围内气体通量的空间差异性^[21,22]; 但是若观测点较多, 该方法存在耗时久的问题. TBLE 方法野外省时且操作简单, 但是该方法通常低估水-气界面的释放通量^[23]. 但 TBLE 方法计算水-气界面气体通量所得结果的不确定性主要

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-06-04

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); 湖北省教育厅科研计划项目(Q20151209); 湖北省自然基金指导性计划项目(2015CFC834)

作者简介: 张成(1974~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境科学, E-mail: zhangch116@163.com

来自于气体交换传输速率 k ^[24].

通常认为 k 主要受水-气界面靠水一侧的扰动混合状况和强度所控制^[25]; 风是湖泊、水库和海洋环境中的主导因子^[26,27]. 但是水生态系统间存在巨大的差异性, 如风在海洋和小型湖泊中的作用不可能完全一样, 因而用单一的风速模型来预测所有水生系统的 k 值可能并不合适^[28]. 特别是对于那些在全球各地普遍存在的、风不同程度地被遮蔽的小型水环境, 这种情况尤为突出^[15,19,29]. 虽然已有研究者涉及低风速气象条件下的气体传输速率^[30,31], 但是对于极低风速或基本无风气象条件下的研究, 尚未见有报道. 本研究通过对处于亚热带地区宜昌郊区一个饮用水水库和 5 个池塘近一年的气体通量及环境因子观测, 通过揭示极低风速 (小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 或基本无风条件下小型浅水湿地气体传输速率的年内变异特征及其环境影响因子, 并尝试给出定量的拟合公式, 以期为类似条件下水-气界面气

体通量研究提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

湖北省宜昌市为亚热带季风性湿润气候, 四季分明, 水热同季, 寒旱同季. 宜昌年平均降雨量为 $1\,100\sim1\,300\text{ mm}$, 年平均日照时数为 $1\,538\sim1\,883\text{ h}$, 年平均气温为 $16.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. 梅子垭水库 ($30^{\circ}44'59''\text{N}$, $111^{\circ}20'49''\text{E}$) 及其周围的 5 个池塘位于宜昌市西陵区, 海拔 $70\sim200\text{ m}$ ^[32]. 水体总氮、硝态氮、铵态氮、总磷以及正磷酸盐的浓度变化范围分别为 $1.16\sim18.79$ 、 $0.20\sim2.64$ 、 $0.17\sim9.94$ 、 $0.02\sim3.49$ 、 $0.01\sim2.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 研究对象所处的研究区地貌为典型的低山丘陵, 属于鄂西山地向江汉平原的过渡地带. 研究对象周围是居民区, 以果园种植为主, 几乎没有农田, 它们的自然地理特征见表 1.

表 1 梅子垭水库及所观测池塘的基本自然地理属性

Table 1 Features of physical geography of Meiziya reservoir and five ponds

池塘编号	平均水深/m	面积/m ²	地理坐标	景观特征
1 号	0.6	450	30°45'43"N, 111°20'06"E	家用鱼塘, 水面有生活垃圾, 一年换一次水
2 号	1.0	200	30°45'25"N, 111°20'56"E	家用鱼塘, 水体呈绿色, 长年不换水
3 号	1.1	800	30°45'23"N, 111°20'57"E	家用鱼塘, 一年换一次水
4 号	1.6	300	30°45'06"N, 111°21'01"E	商业性鱼塘, 不换水, 偶尔进水确保水量
5 号	1.2	375	30°44'54"N, 111°20'49"E	家用鱼塘, 长年不换水, 水面有生活垃圾
梅子垭水库	2.5	300 000	30°44'59"N, 111°20'49"E	水面有生活垃圾

1.2 现场监测

分别于 2014 年 11 月至 2015 年 10 月对梅子垭水库及周边 5 个池塘进行了 CH_4 通量原位观测, 每月一次, 每月中下旬进行实验采样, 每次采样上午 09:00 左右开始, 按照 1 号池塘、2 号池塘、3 号池塘、4 号池塘、梅子垭水库、5 号池塘依次进行. 监测了相应的气象因子和水环境因子, 其中采用哈希多参数水质检测仪 (DataSonde5, 美国) 现场测定水温、溶解氧等水质指标, 用便携式气象站 (YGY-QXY, 中国) 现场测定风速、气温和气压. 风速每 2 s 测量一次, 计算时取观测时段的平均值. 每个观测点采取表层水样 100 mL 注入预先清洗干净并抽真空的集气袋 (中国上海钰彦商贸有限公司生产) 内, 立即加入约 4 mL 饱和 HgCl_2 溶液以杀死微生物, 样品用于水体溶解气体浓度分析. 用于分析水体溶解气体浓度的水样均取两份, 室内分析后取平均值. 另外采取两瓶水样, 用做叶绿素 a 和营养盐测定. 所有待测水样均尽快带回实验室进行测定.

采用密闭式静态通量箱-温室气体分析仪 (DLT-

100, 美国) 系统测量水-气界面 CH_4 通量. 该通量箱底部中通、不透明, 表层为隔热材料, 来减少光线和热量对 CH_4 的影响, 体积 43.30 L , 底面积 0.096 m^2 (直径为 0.35 m , 高度为 0.45 m). 通量箱内顶部装有 2 个小风扇, 以使箱体内的气体混合均匀. DLT-100 具有高分辨率、高精度的特点, 能以 1 Hz 的频率连续、实时地监测待测气体中 CH_4 浓度^[33~35]. 本研究每个观测点的通量观测持续 15 min 左右, 每个池塘有两个观测点.

1.3 实验室分析

水质指标分析参考文献^[36], 采用纳氏试剂光度法测量氨氮, 紫外分光光度法测硝酸盐氮, 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测总氮, 钼锑抗分光光度法测正磷酸盐, 过硫酸钾法测总磷, 丙酮提取法测叶绿素 a ^[36].

采用顶空平衡技术分析水体溶解气体浓度. 实验室内将 200 mL 高纯氮 (99.99%) 注入用以分析水体溶解气体浓度的气袋, 然后放置超声波清洗仪中超声 10 min 左右, 静置 24 h 使得待测气体两相平

衡^[37],随后抽取气袋内的气体,用装配离子化火焰检测器(FID)的 FL GC9790II型气相色谱仪(福立,中国)测定 CH₄ 的浓度 c_{gas} , N₂ 做载气,流速 20 mL·min⁻¹, TDX-O₂ 柱分离,柱温 90℃,检测器温度 250℃. 表层水体溶解气体浓度 c_w 采用下式计算^[38]:

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

式中, c_{gas} (mol·L⁻¹) 为气相色谱仪监测得到的结果,即平衡后气袋内气相部分中的气体浓度, β 为 Bunsen 系数 (L·L⁻¹·atm⁻¹), R 为普适气体常数 [8.31 J·(mol·K)⁻¹], T 为室温 (K), 22.356 为气体的摩尔体积 (L·mol⁻¹), V_{gas} 和 V_{liq} 分别为气袋内水样体积和注入氮气的体积 (L).

1.4 水-气界面通量与气体传运输速率计算

由于所观测的池塘水深很浅,冒泡释放十分普遍并存在季节差异性. 当通量箱内没有气泡或者只有很少的气泡时,箱体里 CH₄ 的浓度就会随着时间的变化逐渐上升或者下降,使时间-气体浓度曲线呈现直线趋势. 在这种情况下,本研究直接用 Lambert 等^[39]给出的简单线性回归方法计算 CH₄ 释放量,即公式(2)计算:

$$F = k \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot V \cdot A^{-1} \cdot F_3^{-1} \quad (2)$$

式中, F 为水-气界面 CH₄ 通量 [mg·(m²·h)⁻¹], k 为在观测时间内通量箱内 CH₄ 浓度随时间的变化率 (10⁻⁶·min⁻¹), F_1 为 ppm 到 μg·m⁻³ 的转换系数 (CH₄ 为 655.47), F_2 为 min 与 h 的转换系数 (60), V 为通量箱在水面时箱体内部的气体体积 (m³), A 为水上部分通量箱的面积 (m²), F_3 为 μg 到 mg 的转化系数 (1000).

当有较多气泡进入箱体时,箱体内气体(主要是 CH₄)浓度就会急剧上升,利用 DLT-100 高频采样的优势,可以通过差值法计算出冒泡浓度^[35].

TBLE 方法计算某气体水-气界面通量 (F) 的公式为:

$$F = k \times (c_w - c_{\text{sat}}) \quad (3)$$

式中, k 为气体交换输运速率 (gas transfer velocity) (cm·h⁻¹), c_w 为该气体在表层水体中的浓度 (mol·L⁻¹), c_{sat} 为该气体相对于上方空气而言平衡时表层水体中的浓度 (mol·L⁻¹). c_w 和 c_{sat} 均可直接或间接测定.

水面 10 m 高处的风速由下式计算 (U_{10})^[40]:

$$U_z = U_{10}([1 - C_{10}^{1/2} \times k_c^{-1} \times \ln(10/z)]) \quad (4)$$

式中, U_z 是水面 z (m) 处的风速,即实测风速, C_{10} 为风在 10 m 高处的表面拖曳系数 (1.3×10^{-3}), k_c 为

von Karman 常数 (0.41), z 为便携式气象站距离水面的高度 (m).

公式(3)中的 c_{sat} 根据亨利定律^[41]计算:

$$c_{\text{sat}}/c_g = k_H \times RT = k_H^0 \times \exp[-\Delta_{\text{soln}}H/R(1/T - 1/T^0)] \times RT \quad (5)$$

式中, c_g 为上覆大气中的气体浓度 (mol·L⁻¹), R 为普适气体常数 [8.31 J·(mol·K)⁻¹], T 为温度 (K), k_H 为亨利常数, k_H^0 为 298.15 K 时的亨利常数, $\Delta_{\text{soln}}H/R = -d(\ln k_H)/d(1/T)$ 和 $T^0 = 298.15$ K.

在利用公式(3)计算 k 值时,仅考虑扩散通量(冒泡通量不计入). 为了便于不同气体间和不同水温条件下的对比,采用下式按 Schmidt 数为 600 对气体传运输速率进行标准化 ($Sc = 600$, 温度为 20℃ 是对 CO₂ 而言)^[42]:

$$k_{600} = k_{g,T}(600/Sc_{g,T})^{-n} \quad (6)$$

式中, $k_{g,T}$ 和 $Sc_{g,T}$ 分别为给定气体在相应温度下的气体输运速率和 Schmidt 数,本研究利用 Wanninkhof^[43]提出的方法计算 Sc ,由于所有风速均小于 $<3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,本文中 $n = 2/3$ ^[44].

2 结果与讨论

某些观测点在观测时段内频繁冒泡使得甲烷扩散难以识别和计算,本文剔除了此部分数据及其他实验误差等引起的明显不符合实际的数据,下文的分析中共使用数据 58 组 (1 号池塘 10 组, 2 号池塘 12 组, 3 号池塘 8 组, 4 号池塘 9 组, 5 号池塘 10 组, 梅子垭水库 9 组).

2.1 气象因子

表 2 列出了观测期间的主要气象因子. 从中可以看出,风速总体很小(实际上大多数时候风速低于笔者所用仪器的检测限或基本无风),平均风速约为 $0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速仅 $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 相对气温和风速而言,变异系数 (CV) 指示出年内气压变化较小,最小为 986.4 hPa,最大为 1024.2 hPa,且呈现为明显的季节性变化特征.

2.2 水环境因子

一年的观测期内水温和溶解氧的情况见表 3. 变异系数值表明,年内各观测点间的溶解氧差异不大,而水温的差异则相对较大. 梅子垭水库的溶解氧高于 1 号池塘和 2 号池塘,低于 3 号池塘、4 号池塘和 5 号池塘,但其标准差和变异系数均小于这 5 个池塘,说明梅子垭水库的溶解氧相对于这 5 个池塘而言比较稳定.

表 2 观测期间主要气象因子¹⁾

Table 2 Main meteorological factors during the observation period															
池塘编号	风速 $U_{10}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$					气压/hPa					气温/ $^{\circ}\text{C}$				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1 号	0.00	0.62	0.09	0.19	2.18	988.0	1 023.7	1 005.7	12.9	0.01	6.0	30.1	17.5	10.0	0.57
2 号	0.00	0.22	0.02	0.06	3.46	988.1	1 024.2	1 005.4	11.8	0.01	6.3	29.2	19.9	8.7	0.44
3 号	0.00	0.30	0.09	0.13	1.43	987.8	1 023.3	1 005.3	12.4	0.01	7.6	30.8	23.3	8.0	0.34
4 号	0.00	0.75	0.26	0.32	1.27	987.2	1 020.0	1 005.2	12.0	0.01	9.0	33.2	23.9	8.3	0.35
5 号	0.00	0.61	0.14	0.24	1.74	986.9	1 019.1	1 002.2	11.5	0.01	12.5	41.7	27.1	10.0	0.37
梅子垭水库	0.00	0.70	0.19	0.24	1.29	986.4	1 022.0	1 002.4	13.2	0.01	11.6	36.6	26.1	8.5	0.32

1) min 为最小值,max 为最大值,ave 为平均值,std 为标准偏差,CV 为变异系数,下同

表 3 观测期间水温和溶解氧情况

Table 3 Water temperature and DO during the observation period										
池塘编号	水温/ $^{\circ}\text{C}$					溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1 号	6.3	30.6	18.1	9.7	0.54	1.7	12.3	6.0	2.8	0.47
2 号	6.5	30.3	19.0	8.8	0.46	1.8	11.6	7.1	3.5	0.49
3 号	8.6	30.7	19.4	8.7	0.45	7.1	21.6	13.0	4.5	0.35
4 号	7.9	30.9	18.3	9.2	0.50	8.7	18.4	12.9	3.3	0.26
5 号	8.3	30.0	21.1	8.7	0.41	7.5	16.4	11.0	2.6	0.23
梅子垭水库	8.2	28.3	19.7	7.9	0.40	9.1	13.7	10.4	1.3	0.13

2.3 水-气界面通量

图 1 是一年中水-气界面 CH_4 的平均通量. 从中可知,5 个池塘水-气界面 CH_4 通量均大于梅子垭水库水-气界面 CH_4 通量. 其中,5 号池塘最大,为 $0.007\text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 大约是梅子垭水库的 2.3 倍. 所有观测点的水-气界面扩散通量值均不高,其原因在于绝大部分 CH_4 是以冒泡方式释放的. 野外观测过程中,肉眼的观察和 DLT-100 温室气体分析仪实时监测的通量箱内气体浓度变化均发现频繁的冒泡发生. 同一气候条件下的野猪林池塘,在夏季超过 90% 的 CH_4 是以冒泡方式释放^[35].

2.4 气体传输速率 k_{600}

表 4 为一年观测期内气体传输速率 k_{600} 的统计. 可知,观测年内气体传输速率在 $0.20\sim1.99\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$, 平均值约为 $0.50\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$, 这与笔者先前在同一气候带观测的结果类似^[35], 但是低于 Crusius 等^[30]对于低风速条件下的湖泊观测结果. 需要指出的是,Crusius 等^[30]报道的观测时间段内,风速仍

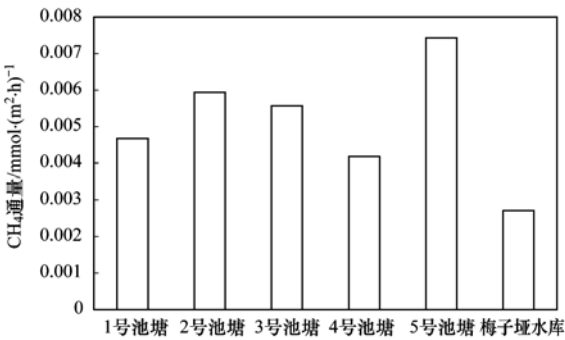


图 1 水-气界面 CH_4 平均通量

Fig. 1 Mean CH_4 flux across the water-air interface

然远大于本研究观测时的情形. 迄今为止,尚未有与本文报道的气象条件类似、极低风速下气体传输速率的研究报道.

众所周知,通常表层水温与气温间存在显著的相关性,而气温高低同样影响气压条件,因此本文仅用表层水体温度和风速 U_{10} 来建立 k_{600} 的回归方程(表 5). 本研究的监测数据覆盖一年,

表 4 气体传输速率 k_{600}

Table 4 Gas transfer velocity k_{600}					
池塘编号	$k_{600}/\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$				
	min	max	ave	std	CV
1 号	0.21	1.16	0.46	0.30	0.67
2 号	0.24	1.99	0.67	0.55	0.81
3 号	0.21	1.17	0.47	0.33	0.69
4 号	0.20	1.66	0.49	0.47	0.94
5 号	0.26	1.07	0.51	0.32	0.62
梅子垭水库	0.26	0.59	0.37	0.10	0.27

即经历了 12 个月不同季节的变化;每次野外采样从早至晚,即各点的采样时间也不固定.为了降低不确定性,本研究采用 Guérin 等^[26]的方法,

按照数值间距为 0.1 将 k_{600} 进行深度平均(bin-averaged),对深度平均后 k_{600} 的回归精度明显提高(表 5).

表 5 k_{600} 与风速 (U_{10}) 和水温 (T_w) 间的关系函数¹⁾

Table 5 Relationship between k_{600} and weed speed (U_{10}), water temperature

项目	函数类型	公式	r^2	P	n
原始数据	二次项	$k_{600} = -0.003 T_w^2 - 0.108 T_w + 0.223 U_{10}^2 - 0.362 U_{10} - 0.284$	0.121	0.007	58
	二次项 + 幂函数	$k_{600} = -0.003 T_w^2 + 0.110 T_w - 0.149 U_{10}^{0.281} - 0.294$	0.123	0.007	58
深度平均后	二次项	$k_{600} = -0.024 T_w^2 + 0.998 T_w + 80.371 U_{10}^2 - 24.908 U_{10} - 8.033$	0.936	<0.000 1	11
	二次项 + 幂函数	$k_{600} = 0.009 T_w^2 - 0.315 T_w - 1.860 U_{10}^{0.299} + 4.244$	0.854	<0.000 1	11

1) 关系函数基于全部采样点的全部数据(异常数据除外)模拟得到

表 5 的结果表明,在极低风速或基本无风的条件下,用表层水体温度 and 风速可以很好地表达甲烷气体在水-气界面的传输速率. 低风速条件的对流冷却对于湖面的气体交换有极大的贡献^[30,45];笔者先前基于池塘水-气界面通量昼夜性变化的观察也表明,夜

晚降温导致水体垂向上湍流混合增大了气体的传输速率^[35]. 此外,由于一年监测期间水温 and 气温变幅分别达 24.6℃ and 35.7℃,大的温度差异同时导致气体在水体中溶解度的显著变化,而气温及与其密切相关的气压(表 6)则影响气体分子的扩散速率.

表 6 深度平均后的 k_{600} 及各个环境因子间的相关系数¹⁾

Table 6 Correlation coefficients among bin-averaged k_{600} and main environmental factors

	k_{600}	叶绿素	水温	气温	气压	U_{10}
k_{600}	1	0.383	0.355	0.439	-0.142	-0.486
叶绿素		1	0.385	0.422	-0.287	-0.481
水温			1	0.977 **	-0.907 **	-0.194
气温				1	-0.820 **	-0.323
气压					1	-0.159
U_{10}						1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; $n = 11$

3 结论

气体传输速率是利用薄边界层理论计算水-气界面气体通量的关键环境因子. 本文以宜昌饮用水水库梅子垭水库和周邻 5 个富营养化池塘为对象的研究表明,通常受屏蔽的小型水体,或基本无风或风速极低条件下的水体,气体传输速率可由表层水温和风速来表达. 利用表层水温和风速指标两个参数的双二次项模型和二次项加幂函数模型,回归结果与原始数据和对 k_{600} 进行深度平均(bin-averaged)后的数据均存在极显著性关系.

参考文献:

[1] Battin T J, Luyssaert S, Kaplan L A, *et al.* The boundless carbon cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 598-600.

[2] Barros N, Cole J J, Tranvik L J, *et al.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude[J]. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(9): 593-596.

[3] Bastviken D, Cole J J, Pace M L, *et al.* Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113** (G2): G02024.

[4] Yang L, Lu F, Wang X K, *et al.* Spatial and seasonal variability of diffusive methane emissions from the Three Gorges Reservoir

[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(2): 471-481.

[5] 侯翠翠, 张芳, 李英臣, 等. 卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征[J]. *环境科学*, 2016, **37** (5): 1891-1899.

[6] 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.

[7] Xiao S B, Liu D F, Wang Y C, *et al.* Temporal variation of methane flux from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 2500.

[8] Jacinthe P A, Filippelli G M, Tedesco L P, *et al.* Carbon storage and greenhouse gases emission from a fluvial reservoir in an agricultural landscape[J]. *CATENA*, 2012, **94**: 53-63.

[9] Whitfield C J, Aherne J, Baulch H M. Controls on greenhouse gas concentrations in polymictic headwater lakes in Ireland[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **410-411**: 217-225.

[10] Grossart H P, Frindte K, Dziallas C, *et al.* Microbial methane production in oxygenated water column of an oligotrophic lake [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(49): 19657-19661.

[11] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(2): 1219-1230.

[12] Wang F S, Wang B L, Liu C Q, *et al.* Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs-river system on the

- Maotiao River, southwest of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(23): 3827-3834.
- [13] Repo M E, Huttunen J T, Naumov A V, *et al.* Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western Siberia[J]. *Tellus B*, 2007, **59**(5): 788-796.
- [14] Riera J L, Schindler J E, Kratz T K. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clear-water lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, U. S. A. [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, **56**(2): 265-274.
- [15] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, *et al.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(5): 2388-2397.
- [16] Kortelainen P, Rantakari M, Huttunen J T, *et al.* Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(8): 1554-1567.
- [17] Liss P S, Slater P G. Flux of gases across the air-sea interface [J]. *Nature*, 1974, **247**(5438): 181-184.
- [18] 姚晓, 李哲, 郭劲松, 等. 水-气界面 CO₂ 通量监测的静态箱法与薄边界层模型估算法比较[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(2): 289-296.
- [19] Cole J J, Bade D L, Bastviken D, *et al.* Multiple approaches to estimating air-water gas exchange in small lakes[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2010, **8**(6): 285-293.
- [20] Frankignoulle M. Field measurements of air-sea CO₂ exchange [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(3): 313-322.
- [21] Denmead O T. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere[J]. *Plant and Soil*, 2008, **309**(1-2): 5-24.
- [22] Hendriks D M D, van Huissteden J, Dolman A J. Multi-technique assessment of spatial and temporal variability of methane fluxes in a peat meadow [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(6): 757-774.
- [23] 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.
- [24] Raymond P A, Cole J J. Gas exchange in rivers and estuaries: choosing a gas transfer velocity [J]. *Estuaries*, 2001, **24**(2): 312-317.
- [25] Wanninkhof R, Asher W E, Ho D T, *et al.* Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, **1**(1): 213-244.
- [26] Guérin F, Abril G, Serça D, *et al.* Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, **66**(1-4): 161-172.
- [27] Upstill-Goddard R C, Watson A J, Liss P S, *et al.* Gas transfer velocities in lakes measured with SF₆ [J]. *Tellus B*, 1990, **42**(4): 364-377.
- [28] Vachon D, Prairie Y T. The ecosystem size and shape dependence of gas transfer velocity versus wind speed relationships in lakes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, **70**(12): 1757-1764.
- [29] Vachon D, Prairie Y T, Cole J J. The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(4): 1723-1732.
- [30] Crusius J, Wanninkhof R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(3): 1010-1017.
- [31] Clark J F, Schlosser P, Wanninkhof R, *et al.* Gas transfer velocities for SF₆ and 3He in a small pond at low wind speeds [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(2): 93-96.
- [32] 王庆礼, 邓红兵, 郝占庆, 等. 梅子垭旅游资源评价及开发、保护规划研究[J]. *长江流域资源与环境*, 1998, **7**(4): 347-352.
- [33] Herbst M, Friborg T, Ringgaard R, *et al.* Interpreting the variations in atmospheric methane fluxes observed above a restored wetland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(7): 841-853.
- [34] Schroth M H, Eugster W, Gómez K E, *et al.* Above-and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(5): 879-889.
- [35] Xiao S B, Yang H, Liu D F, *et al.* Gas transfer velocities of methane and carbon dioxide in a subtropical shallow pond [J]. *Tellus B*, 2014, **66**: 23795.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Lambert M, Fréchette J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al* (Eds.). *Greenhouse Gas Emissions — Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. 37-60.
- [40] Amorcho J, DeVries J J. A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1980, **85**(C1): 433-442.
- [41] Sander R. Compilation of Henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry [EB/OL]. 1999. <http://satellite.mpic.de/henry/henry/henry-3.0.pdf>.
- [42] Jähne B, Münnich K O, Börsinger R, *et al.* On the parameters influencing air-water gas exchange [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, **92**(C2): 1937-1949.
- [43] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [44] Liss P S, Merlivat L. Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis [A]. In: Buat-Ménard P (Ed.). *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling* [M]. Netherlands: Springer, 1986, **185**: 113-127.
- [45] Crill P M, Bartlett K B, Wilson J O, *et al.* Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1988, **93**(D2): 1564-1570.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《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11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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