

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
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	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

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

李双¹, 王雨春², 操满¹, 钱慧君¹, 许涛², 周子然³, 邓兵³, 汪福顺^{1*}

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038; 3. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200633)

摘要: 以三峡库区库中干流以及主要支流——梅溪河为研究区, 于 2013 年 5 月对该区域水体中溶解二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 进行了走航观测. 结果表明, 夏季梅溪河表层 $p\text{CO}_2$ 为 6.8 ~ 7.5 Pa, 三峡库区库中长江干流表层 $p\text{CO}_2$ 为 201.4 ~ 210.2 Pa. 在库区干、支流交汇的过渡区水体剖面上, 表层水体 $p\text{CO}_2$ 最低为 53.5 Pa, 随着水深增加, $p\text{CO}_2$ 急剧增大, 在 3 m 处达到约 210 Pa 后基本保持不变. 通过计算, 库区支流梅溪河和库区干流表层水体的 CO_2 释放通量分别为 $-7.48 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $39.58 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 结果表明, 库区支流梅溪河表现为大气中 CO_2 的“汇”, 而库区干流表现为 CO_2 的“源”, 库区干、支流水体在 CO_2 的释放上有显著差异.

关键词: 温室气体; 二氧化碳分压; 二氧化碳通量; 三峡库区; 梅溪河

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0885-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.011

Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer

LI Shuang¹, WANG Yu-chun², CAO Man¹, QIAN Hui-jun¹, XU Tao², ZHOU Zi-ran³, DENG Bing³, WANG Fu-shun¹

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydroelectric Power Research, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200633, China)

Abstract: This study investigated the partial pressure of CO_2 ($p\text{CO}_2$) in the mainstream of the Three Gorges Reservoir and its tributary (Meixi River) in May 2013. Results showed that $p\text{CO}_2$ in the surface water of the Meixi River and mainstream of the Three Gorges Reservoir was 6.8-7.5 Pa and 201.4-210.2 Pa, respectively. At the mixing area between the Meixi River and the mainstream of Changjiang, the lowest value of $p\text{CO}_2$ in surface water was 53.5 Pa, and $p\text{CO}_2$ gradually increased downwardly. Below 3 m in depth, $p\text{CO}_2$ kept the stable value of around 210 Pa. Based on the calculation results, the emission flux of CO_2 in the Meixi River and the mainstream of the central Three Gorges Reservoir was about $-7.48 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $39.58 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. These results showed that the Meixi River is a sink for atmospheric CO_2 , and the mainstream of the Three Gorges Reservoir is a source for atmospheric CO_2 .

Key words: greenhouse gas; partial pressure of carbon dioxide; diffusion flux of carbon dioxide; the Three Gorges Reservoir; Meixi River

CO_2 是重要的温室气体, 据欧洲环境协会和美国环境协会统计, 大气中 CO_2 占温室气体总量的 80% ~ 85%^[1,2]. 人类活动使得大气中温室气体的浓度远远超过了工业革命前的水平, 大气中 CO_2 的含量已从 1750 年的 (28 ± 1) Pa 增加到 1999 年的 36.7 Pa, 至目前的 38 Pa^[3]. 近 50 年气候变暖主要是由人类活动引起的可能性, 从 2001 年 IPCC 第三次评估报告中的 66% 提高到了 90% 以上, 进一步从科学上确认了人类活动引起全球气候变化的事实^[4]. 化石燃料使用产生的 CO_2 一直是温室气体的

重要来源, 而水力发电长期以来被认为是清洁能源而得到大规模推广. 然而最近的一些研究表明, 水库也可能会释放大量的温室气体^[5,6]. 甚至, 某些水电站型水库生产单位电力所释放的温室气体甚至大于火电所产生的温室气体^[7]. 但这些研究大多是集

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-09-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07104-001); 国家自然科学基金项目 (42173128); 上海市教委基金项目 (12YZ017)

作者简介: 李双 (1986 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境科学, E-mail: Lishuang2011@shu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: fswang@shu.edu.cn

中在热带水库、温带泥炭地水库或浅水库区,对深水水库、峡谷型水库和河道型水库等研究相对较少.此外,我国水库众多,但相关数据严重缺乏,目前的研究多集中在巴西^[8]、加拿大^[9]、美国^[10]、芬兰^[11]、法属圭亚那^[12]等地.中国现有研究更偏重于对自然湖泊及富营养水库的研究,如太湖、东湖、红枫湖、百花湖、滇池和泸沽湖等^[13].人工水库的温室气体产生、释放及其通量关系研究数据较少且近年来逐渐引起学术界的重视^[2,14,15].此外,水库水-气界面 CO_2 的“源/汇”关系在时间和空间上可能是动态变化的^[16,17].因此,积极寻找并量化各种体系中温室气体的源/汇关系成为重要的科学任务.

2003 年开始蓄水的三峡水库是世界瞩目的水利工程,装机容量和发电量都位居世界第一.水库蓄水到 175 m 后,库区面积达到 1 084 km²,两岸原有的大量土地被淹没.蓄水后,三峡库区 CO_2 的排放受到各方关注.本研究从三峡库区中部库区干、支流水体溶解 CO_2 分压及其水气扩散通量入手,分析了夏季三峡水库干库区支流水体对大气 CO_2 的吸收与释放,并探讨研究区水域在对大气中 CO_2 “源”和“汇”关系中的作用.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

三峡库区较大的库区支流主要有嘉陵江、乌江、梅溪河、草堂河、鲢鱼溪、抱龙河、神龙溪、香溪河、青干河、神农溪和黄柏河等.梅溪河位于长江北岸三峡库区中部,发源于巫溪县境内,在奉节老城区东注入长江,是长江的一级库区支流.本研究在梅溪河设置 3 个断面采样点,在长江干流段设置表层采样点.采样地点见图 1.

1.2 样品的采集与分析

2013 年 5 月,对三峡库区中部的长江干流、库区支流(梅溪河)进行走航监测.首先从梅溪河上游(M03)走航至河口(M01);然后从长江干流(A)向三峡大坝方向航行 14.6 km(C).走航过程中利用自吸泵连续抽取水面下 0.5 m 水体进行 $p\text{CO}_2$ 及相关水质参数的分析.在梅溪河上游(点 M03)、中游(点 M02)、河口(点 M01)处分别进行了水体剖面 $p\text{CO}_2$ 的分析.利用自吸泵间隔抽取不同深度水体,水底至水面下 5 m,每间隔 5 m 取水样,水面下 5 m 至表层每间隔 1 m 取水样,用二氧化碳传感器 HydroC™/ CO_2 对水体进行 $p\text{CO}_2$ 分析;同时用 YSI

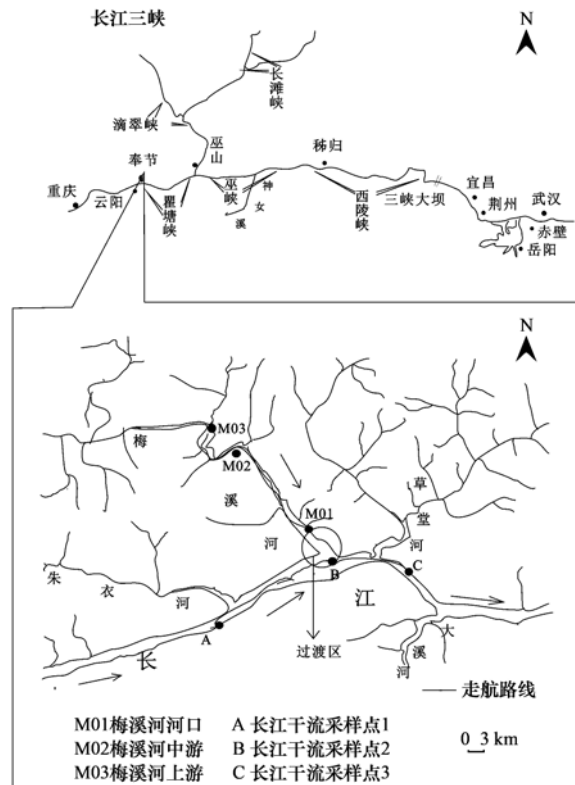


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Geographic location of study area and sampling sites

水质参数仪测定 pH、水温、DO、叶绿素 a (Chl-a), 浊度仪(OBS)测定水体浊度.

1.3 数据处理

水气界面 CO_2 交换通量主要受以下 2 个因素的影响:①水体 $p\text{CO}_2$ 与大气中 $p\text{CO}_2$ 的差;②气体交换系数,而气体交换系数又受流速、风速、温度等因素影响.

二氧化碳于水气界面中扩散的通量可以用以下公式(1)计算^[18-21]:

$$F = k [(p\text{CO}_{2\text{w}} - \text{gas}_{\text{sat}}) K_{\text{H}}] \quad (1)$$

式中, F 为水气界面扩散通量 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], $F > 0$ 表示水体向大气中释放 CO_2 , $F < 0$ 表示水体吸收 CO_2 ^[22]. $p\text{CO}_{2\text{w}}$ 为表层水体中 CO_2 分压; gas_{sat} 为水气平衡时 CO_2 浓度 (38 Pa); k 为气体交换系数,可以参照 Soumis 等^[21]的经验公式(2)计算:

$$k = 2.07 + 0.215 U^{1.7} \quad (2)$$

式中, U 为监测地区平均的风速.

K_{H} 为亨利系数,受到温度与盐度的影响,可以根据公式(3)计算^[23]:

$$\ln K_{\text{H}} = -60.2409 + 93.4517 / (100/T) + 23.3585 \times \ln(T/100) + S \times [0.023517 - 0.023656 \times (T \times 100) + 0.0047036 \times (T/100)^2] \quad (3)$$

式中, $T = t + 273.15$, t 为摄氏温度, S 为盐度.

2 结果与分析

2.1 研究区水体表层 $p\text{CO}_2$ 及各项水质参数的变化

库区干流表层水温为 $20.3 \sim 21.1^\circ\text{C}$, 支流梅溪河表层水温为 $24.1 \sim 26.2^\circ\text{C}$, 库区干流表层水温明显低于支流表层(图3). 从库区干流至梅溪河, 浊度明显下降; 相应地, 叶绿素 a 、 DO 则逐渐增加; 库区干流表层水体 $p\text{CO}_2$ 在干流河段总体相对稳定, 变化范围为 $201.4 \sim 210.2 \text{ Pa}$, 远高于大气 $p\text{CO}_2$ (38.0 Pa). 梅溪河表层水体的 $p\text{CO}_2$ 变化范围为 $6.8 \sim 7.5 \text{ Pa}$, 显著低于大气的 $p\text{CO}_2$.

从库区干流至梅溪河过渡区, 浊度明显下降

(图2). 浊度的降低, 增加了水体的透光度, 有利于藻类光合作用的增强. 由方程(4)和方程(5)可知, 水体中藻类光合作用的增强, 使水体中 CO_2 含量降低, 平衡向左移动, $[\text{H}^+]$ 降低, 水体的 pH 升高、 $p\text{CO}_2$ 降低. 在过渡区内水体表层的各项参数均发生大的变化. 从过渡区进入梅溪河, 水体中叶绿素 a 含量的逐渐增大, 大量的藻类颗粒进一步增加了水体浊度^[24], 从而影响水体中藻类的光合作用, 使支流梅溪河中上游水体的 $p\text{CO}_2$ 保持在一个相对稳定的水平.

光合反应、呼吸(有氧)作用总反应式:



CO_2 体系在水体中的溶解平衡过程为:

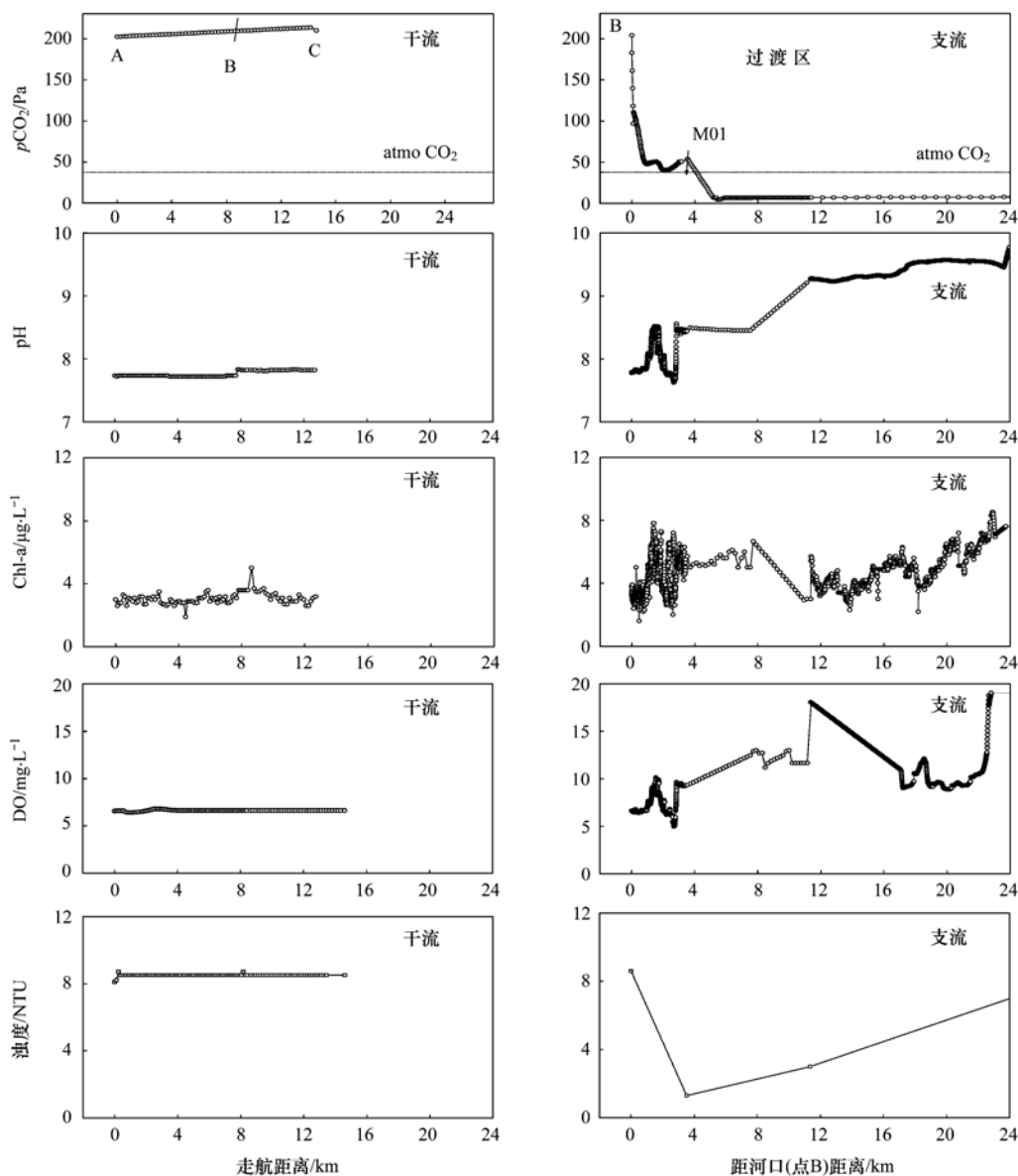
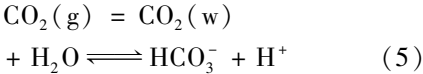


图2 库区干、支流表层水体走航监测结果

Fig. 2 Results of the cruise monitoring of the surface water in the mainstream and tributary of the central Three Gorges Reservoir



库区干、支流水体浊度、温度的明显差异使干、支流水体光合作用强度明显不同,导致干、流水体表层 $p\text{CO}_2$ 的显著差异.

2.2 库区支流水体 $p\text{CO}_2$ 及水体参数剖面变化

三峡水库蓄水后,水库水位变动以及干支流水体密度差的变化带来干流水体处于频繁的交换状态,这种变化又会反过来进一步改变库湾水体的物理、化学特性. 库区干流水体由于较大的流速、流量,具有显著的一维流动特征. 库湾支流水动力特性受上游来水及水库干流影响显著,在深度方向具有典型的分层特征,不能简单地根据其“河道型”形态特点概化为一维特性^[25].

库区支流由于受到干流水体回水顶托作用,流速减缓,透明度较高,有利于浮游植物等的生长,在水体剖面上会形成明显的分层现象^[26]. 以库区干支流的交汇点(B)为起点,绘制库区支流梅溪河3个断面水体参数的剖面变化(图3). $p\text{CO}_2$ 最小值均出现在监测断面表层,随着深度增大,迅速增加. 水面10 m以下水体, $p\text{CO}_2$ 变化平稳,范围为180.5~185 Pa,整个水体剖面呈现明显的垂向分层现象. 库区干、支流水体温度也有分层现象,库区干流量大流速快,透光性较差,水体表层与底部温差并不大;库区支流受到干流回水顶托影响,水流流速显著降低,有明显的水体热分层现象. 表、底水体温差较大. 由温度、浊度的剖面图可知,干流水体从底部汇入支流,对支流水体产生影响,离河口越远影

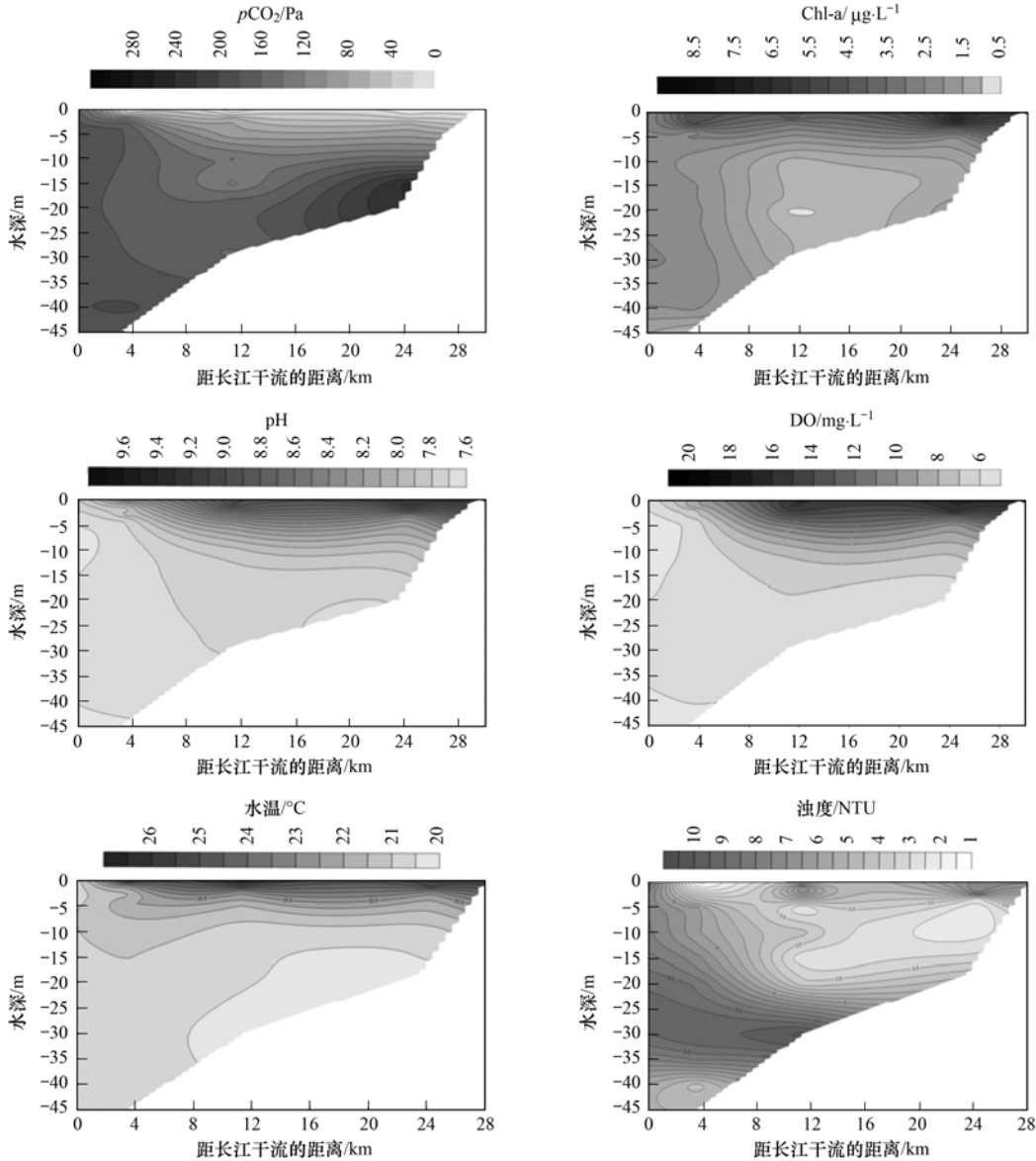


图3 梅溪河剖面监测结果

Fig. 3 Result of the vertical section monitoring in the Meixi River

响逐渐减弱.

与 $p\text{CO}_2$ 变化规律相反, 水温、pH、溶解氧 (DO) 和叶绿素 a (Chl-a) 均是在表层水体中最高, 然后随着深度增加而下降. 由图 4 可知在库区支流梅溪河的 3 个监测断面上, 水体 $p\text{CO}_2$ 与 pH、DO 均呈负相关关系. 光合作用在上层水体中占据主导作用, 水中初级生产力通过光合作用大量消耗水体中溶解 CO_2 , 并释放 O_2 , 导致 pH 值增加, $p\text{CO}_2$ 值降低. 随着水体深度的增加, 水体中无机碳平衡逐渐受呼吸作用控制, 由方程 (5) 可知, pH 值逐渐降低而 $p\text{CO}_2$ 值则逐渐增大.

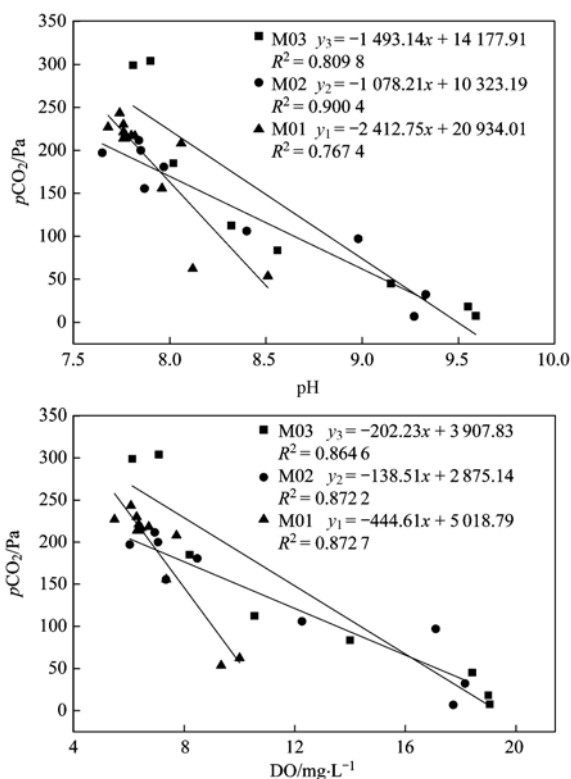


图 4 梅溪河水体剖面 $p\text{CO}_2$ 与 pH 及 DO 的关系

Fig. 4 Relationship between $p\text{CO}_2$ and pH or DO of the water column in the Meixi River

2.3 干、支流水体 $p\text{CO}_2$ 的水平及垂直差异

三峡水库蓄水后, 三峡库区江段从天然河道变成了河道型、季调型水库. 作为一个典型的河道型水库, 三峡水库水动力特性在空间上存在显著的差异, 库区干流一维流动特征显著, 流速基本不满足藻类水华形成的必要条件, 同时三峡水库的水动力特性在时间上呈现的显著变化可以较好地抑制库区藻类的累积, 使干流库区仍然保持着天然河流的特性. 而在支流库湾, 蓄水改变水文水动力条件及河道地形, 难以简单概化为一维特征, 而是在深度上长期具有复杂的分层异向流动特征, 从而不断影响着支流

库湾水华的发生^[27,28]. 从库区干流到库区支流梅溪河, 水体浊度降低, 水体透光性升高, 有利于浮游植物的生长繁殖及其光合作用, 使库区支流梅溪河水体时有水华现象发生.

干、支流水体物理化学性质的差异, 使干支流水体处于频繁的交换状态, 这种交换状态又会反过来影响干流水体的物理、化学特性, 从而不断影响着支流库湾水华现象的发生. 由于支流表层水体参数的变化, 可知从干流到支流水体中藻类的光合作用逐渐增强, 使 $p\text{CO}_2$ 有显著差异; 同时在库区支流水体剖面上, 随着深度的增加光合作用的减弱, 底部水体中有机质降解作用使 CO_2 分压增大, 使水体剖面上 $p\text{CO}_2$ 也有显著差异. 为了进一步了解受大坝作用影响的库区干、支流水体 CO_2 释放的差异性, 通过方程 (1) 计算库区干、支流表层水体 CO_2 的扩散通量^[29].

2.4 水体 CO_2 释放通量

库区受地形影响, 风力普遍偏小, 静风频率一般较大, 万州、涪陵站年静风频率占 60% 以上, 年平均风速一般在 $0.5 \sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 是全国的小风区之一^[30]. 取库区的年平均风速 $0.5 \sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 根据公式 (2) 计算得出 k 值为 $2.136 \sim 2.769 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ($0.513 \sim 0.664 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$). 计算监测区域的 CO_2 释放通量时取 k 的平均值 $2.452 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ($0.589 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$). 通过公式 (1) 计算, 梅溪河和三峡坝区干流河道的夏季 CO_2 平均释放通量分别为 $-7.487 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $39.585 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 计算结果显示, 夏季库区支流梅溪河 CO_2 释放通量 $F < 0$, 是大气中 CO_2 的“汇”, 而库区干流 CO_2 释放通量 $F > 0$, 则表现为大气中 CO_2 的源, 库区干、支流水体 CO_2 释放上有明显不同. 由图 5, 对比世界上主要河流、水库的水气界面 CO_2 交换通量^[8~13,31] 可以看出, 水库、河流总体均表现为 CO_2 的“源”, 向大气中释放 CO_2 . 虽然库区干流在夏季的 CO_2 交换通量明显高于库湾地区 (梅溪河), 但是作为河道干流相对于 Amazon 河要低很多, 比起加拿大的 St. Lawrence、Ottawa 河, 以及我国的西江 (Xijiang) 都要低, 也低于热带水库 (如 Petit Saut、Tucurui、Samuel).

河流作为陆地生源要素向海洋输送的通道, 携带大量的有机质, 在搬运过程中受呼吸作用降解有机质的影响, 会向大气释放大量的 CO_2 . 但三峡库区库中干、支流由于三峡大坝的拦截作用降低了水流速度, 使水生生态系统由“河流型”异养

体系向以浮游生物为主的“湖沼型”自养体系演化,减缓了河流温室气体的释放。因此相对热带地区的一些水库,三峡水库温室气体释放作用并不明显。

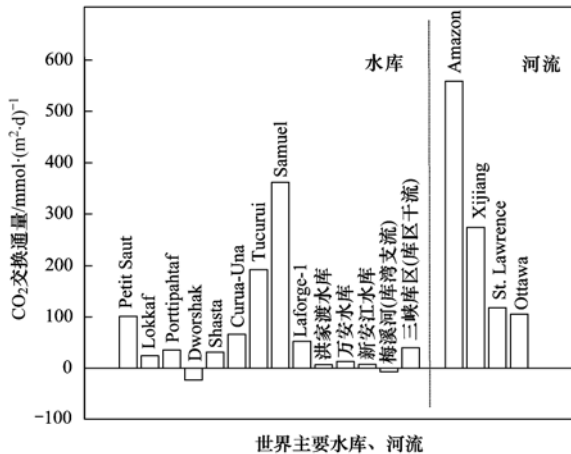


图5 世界上主要水库、河流水气界面 CO₂ 交换通量

Fig. 5 Exchange flux of CO₂ between water and air in main reservoirs and rivers of the world

3 结论

(1) 研究区干、支流水体表层 $p\text{CO}_2$ 、DO、Chl-a、pH 走航结果表明:干、支流水体 $p\text{CO}_2$ 的显著差异是由干、支流水体光合作用强度不同引起的。

(2) 库湾支流水动力特性受上游来水及水库干流影响显著,在深度方向具有典型的分层特征,不能简单的根据其“河道型”形态特点概化为一维特性。

(3) 库区干流作为陆地生源要素向外界输送的通道,携带大量的有机质,在搬运过程中受有机质降解作用的影响,向大气释放大量的 CO₂。同时由于干流水体往往有着很高流速与湍流度,加速了水体中 CO₂ 分压向大气的扩散速率,因此表现为明显的温室气体“源”。在库区支流地区受干流顶托及地形限制,水体流速、浊度等都显著下降,这为浮游植物的生长创造了条件,水体光和作用得到增强。这显著降低了水体中溶解 CO₂ 分压,甚至低于大气水平。库区支流因此表现出对大气 CO₂ 的吸收,并成为大气 CO₂ 的“汇”。通过对三峡水库库中干流及支流的调查,发现三峡坝区库中干流水域向大气中释放 CO₂,释放通量为 $39.58 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。库区支流梅溪河吸收空气中的 CO₂,释放通量为 $-7.48 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

致谢:感谢中国水利水电科学研究院水环境研

究所、华东师范大学河口海岸国家重点实验室对本研究的支持!

参考文献:

- [1] Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al.* Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [M]. New York: Springer, 2005.
- [2] 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.
- [3] Yao G, Gao Q, Wang Z, *et al.* Dynamics of CO₂ partial pressure and CO₂ outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China [J]. Science of the Total Environment, 2007, **376**(1-3): 255-266.
- [4] 何建坤,刘滨,王宇. 全球应对气候变化对我国的挑战与对策[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2013, **22**(5): 75-83.
- [5] Gunkel G. Hydropower-A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions [J]. Clean-Soil Air Water, 2009, **37**(9): 726-734.
- [6] Fearnside P M. Why hydropower is not clean energy. Scitizen, Paris, France (peerreviewed website) [EB-OL]. 2007. http://www.scitizen.com/screens-blogPage-viewBlog-sw_viewBlog.php?idTheme=14&idContribution=298.
- [7] Kelly C A, Rudd J W M, Bodaly R A. Increases in fluxes of greenhouse gases and methylmercury following flooding of an experimental reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(5): 1334-1344.
- [8] Dos Santos M A, Rosa L P, Sikar B, *et al.* Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants[J]. Energy Policy, 2006, **34**(4): 281-288.
- [9] Kelly C A, Rudd J W M, St. Louis V L, *et al.* Turning attention to reservoir surfaces, a neglected area in greenhouse studies[J]. Eos, Transactions, American Geophysical Union, 1994, **75**(29): 332-333.
- [10] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: A regional-scale approach [J]. Hydrological Processes, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [11] Huttunen J T, Aini J, Liikanen A, *et al.* Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. Chemosphere, 2003, **52**(3): 609-621.
- [12] Guerin F, Abril G, Sera 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.
- [13] 吕迎春,刘丛强,王仕禄,等. 贵州喀斯特地区水库红枫湖、百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2674-2681.
- [14] Billett M F, Moore T R. Supersaturation and evasion of CO₂ and CH₄ in surface waters at Mer Bleue peatland, Canada [J]. Hydrological Processes, 2008, **22**(12): 2044-2054.
- [15] Gupta V, Smemo K A, Yavitt J B, *et al.* Stable isotopes reveal widespread anaerobic methane oxidation across latitude and peatland type[J]. Environmental Science Technology, 2013, **47**

- (15): 8273-8279.
- [16] Fearnside P M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams in tropical forests [A]. In: The Encyclopedia of Energy [M]. New York: John Wiley & Sons Publishers, 2011.
- [17] Johanna S, Lars L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. *Ecological Engineering*, 2005, **25**(5): 542-551.
- [18] Jonsson A, Karlsson J, Jansson M. Sources of carbon dioxide supersaturation in clearwater and humic lakes in northern Sweden [J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(3): 224-235.
- [19] Wannikhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [20] Cole J J, Caraco N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(4): 647-656.
- [21] Soumis N, Canuel R, Lucotte M. Evaluation of two current approaches for the measurement of carbon dioxide diffusive fluxes from Lentic Ecosystems [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(8): 2964-2969.
- [22] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量 [J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(7): 1193-1199.
- [23] Weiss R F, Price B A. Nitrous oxide solubility in water and seawater [J]. *Marine Chemistry*, 1980, **8**(14): 347-359.
- [24] 胡圣, 邱光胜, 印士勇. 三峡水库香溪河库湾水体富营养化演化监测分析 [J]. *人民长江*, 2012, **43**(12): 10-13.
- [25] 纪道斌, 刘德富, 杨正建, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析 [J]. *中国科学 (G 辑): 物理学 力学 天文学*, 2010, **40**(1): 101-112.
- [26] Zhang G L, Zhang J, Ren J L, *et al.* Distributions and sea-to-air fluxes of methane and nitrous oxide in the North East China Sea in summer [J]. *Marine Chemistry*, 2008, **110**(35): 42-45.
- [27] 廖文根. 水动力调控: 抑制三峡库区支流水华的路径 [J]. *中国三峡建设*, 2008, **11**(5): 60-63.
- [28] 詹磊, 董耀华, 刘同宦, 等. 干支流直角交汇区水流泥沙运动特性初步研究 [J]. *长江科学院院报*, 2010, **27**(8): 6-11.
- [29] 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, **66**(3): 265-274.
- [30] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 三峡工程对区域气候影响有多大 [J]. *中国三峡*, 2009, (11): 30-35.
- [31] St Louis V, Kelly C A, Duchemin E. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate [J]. *Biological Sciences*, 2000, **50**(9): 766-775.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行