

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素

李建鸿^{1,2}, 蒲俊兵^{2*}, 袁道先^{1,2}, 刘文^{1,2}, 肖琼², 于爽², 张陶^{1,2}, 莫雪^{1,2}, 孙平安², 潘谋成²

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为更深入地认识岩溶区地下水补给型水库表层无机碳的循环过程, 于2014-07-12~2014-07-20期间, 以广西上林县大龙洞岩溶水库表层水体为研究体系, 对无机碳循环研究的重要指标进行定点观测和高密度的昼夜监测。结果发现: ① 从上游到下游 DIC 含量和水体 $p\text{CO}_2$ 值逐渐增加 [$\text{DIC}_{(\text{平均})}$: 122.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 172.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $p\text{CO}_{2(\text{平均})}$: 637.91×10^{-6} 增至 1399.97×10^{-6}], $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值逐渐偏负 [$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}(\text{平均})}$: -4.34‰ 降至 -6.97‰]。② 库区均为大气 CO_2 的源, CO_2 交换通量在 $7.11 \sim 335.54 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 之间, 平均 $125.03 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 上游和下游地区 CO_2 交换通量较大 [平均 $131.73 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、 $170.25 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], 中游狭窄地区 CO_2 交换通量较小 [平均 $116.05 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]。③ 表层水体 $p\text{CO}_2$ 值和水-气界面 CO_2 交换通量存在晚上升高, 白天降低的昼夜变化规律, 且与叶绿素 a (Chla) 呈负相关关系。分析认为: ① 大龙洞水库表层水体 DIC 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值和水体 $p\text{CO}_2$ 的空间分布主要受浮游植物浓度、浊度、电导率、水深、透明度等的影响, 而水-气界面 CO_2 交换通量除了受浮游植物浓度空间变化的影响外还受风速的影响。② 浮游植物昼夜垂向运动及光合作用和呼吸作用昼夜变化控制着水库表层水体溶解性无机碳的昼夜循环过程。

关键词: 溶解无机碳; CO_2 交换通量; 稳定碳同位素; 空间分布; 岩溶水库

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2833-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.08.014

Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China

LI Jian-hong^{1,2}, PU Jun-bing^{2*}, YUAN Dao-xian^{1,2}, LIU Wen^{1,2}, XIAO Qiong², YU Shi², ZHANG Tao^{1,2}, MO Xue^{1,2}, SUN Ping-an², PAN Mou-cheng²

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to understand the inorganic carbon cycle of the groundwater-fed reservoir in karst area, Dalongdong Reservoir, which is located at Shanglin County, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China, was investigated from 12th to 20th July, 2014. Concentration of dissolved inorganic carbon (DIC), $\delta^{13}\text{C}$ of DIC ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$), partial CO_2 pressure ($p\text{CO}_2$) and CO_2 flux across water-air interface were studied by observation *in situ* and high-resolution diel monitoring. Results show that: ① DIC concentration and water $p\text{CO}_2$ increased from upstream area to downstream area [$\text{DIC}_{(\text{average})}$: from 122.88 to 172.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $p\text{CO}_{2(\text{average})}$: from 637.91×10^{-6} to 1399.97×10^{-6}], while $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ decreased from upstream area to downstream area [$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}(\text{average})}$: from -4.34‰ to -6.97‰] in the reservoir. ② CO_2 efflux across water-air interface varied from 7.11 to 335.54 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ with mean of 125.03 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ in Dalongdong reservoir surface-layer waters, which was the source of atmospheric CO_2 . CO_2 effluxes across water-air interface in upstream area [mean 131.73 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$] and downstream area [mean 170.25 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$] were higher than that in middle area [mean 116.05 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$] in the reservoir. ③ Water $p\text{CO}_2$ and CO_2 efflux across water-air interface showed similar characteristics of diel variations, which decreased in daylight and increased in night and showed a negative correlation with chlorophyll a (Chla). Possible reasons of research results are found as follows: ① DIC concentration, water $p\text{CO}_2$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ are influenced by biomass of phytoplankton, turbidity, conductivity, the depth of water and transparency, while CO_2 efflux across water-air interface is controlled by both of biomass of phytoplankton and wind speed. ② Photosynthesis, respiration and vertical motion of phytoplankton possibly affect diel variations of DIC cycle in the groundwater-fed reservoir in karst area.

Key words: dissolved inorganic carbon; CO_2 efflux across water-air interface; stable carbon isotope; spatial distribution; groundwater-fed karst reservoir

收稿日期: 2014-12-04; 修订日期: 2015-03-21

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201311148); 国家自然科学基金项目(41202185); 地质调查工作项目(12120113006700, 12120113005300); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2014D002); 岩溶动力学重点实验室开放基金项目(14-B-03)

作者简介: 李建鸿(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶环境与全球气候变化, E-mail: jianhongli1988@163.com

* 通讯联系人, E-mail: junbingpu@karst.ac.cn

筑坝拦截改变了天然河流的自然属性和作用过程,其导致的“水库效应”普遍出现在世界不同地区、不同规模的河流上^[1-7],而最早引起人们关注的是由大坝拦截引起的水文情势改变、泥沙淤积、鱼类回游、对生源要素的拦截、水库内生物地球化学循环以及水库温室气体变化等方面^[8]. 碳作为生命的核心元素,其它重要元素的生物循环过程都与碳紧密相关^[9]. 目前,水库水-气界面 CO_2 等温室气体的源汇问题、DIC 含量及其同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) 的时空分布特征等方面是国内外研究者的研究重点. DIC 含量会影响水体 $p\text{CO}_2$, 从而影响水-气界面 CO_2 交换^[10,11]. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 可以揭示水-气界面 CO_2 交换过程中碳的来源及计算 CO_2 交换通量^[14], 而水-气界面 CO_2 交换则会导致碳同位素发生分馏^[12,13], 将水化学数据和同位素数据结合起来研究是揭示水库 DIC 循环过程的重要手段. 有关水库 DIC 循环的研究一直存在争论,多数水库、湖泊^[15-20] 研究表明热分层期间 DIC 含量表现为表层比底层较低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值则表层偏正,底层偏负; DIC 含量夏、秋季较低,冬、春季较高; $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值夏、秋季偏正,冬、春季相对偏负. 但吴起鑫等^[21] 对三峡水库的研究表明坝前水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值夏季比冬季偏负,在垂向上变化不明显. 李干蓉等^[16] 对猫跳河梯级水库的研究表明 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值从上游至下游逐渐偏负,而刘文等^[17] 对五里峡水库的研究则得出相反的结论,沿流程方向从库尾到坝前同一深度不同取样点 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值逐渐偏正. 水库水-气界面 CO_2 交换过程同样也受到了高度关注. Barros 等^[22] 根据全球 85 个水电站水库的研究表明,其释放 CO_2 的量为 $0.048 \text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$. 在巴西亚马逊地区的 Tucuruí 水库,由于有机质的强烈分解,其年释放的 CO_2 达 $7 \sim 10.1 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$, 相当于圣保罗市的化石燃料释放的 CO_2 量; 水库蓄水后,其 CO_2 的排放量会随着库龄的增加而下降,几年后排放量趋于稳定^[23]. 我国目前有关水库水-气界面 CO_2 交换通量的研究主要集中在乌江流域和三峡水库. 喻元秀等^[15] 的研究指出洪家渡水库总体上是大气 CO_2 的源,天然河流水体经水库作用后 CO_2 释放强度增加,库区表层水体 CO_2 释放量达 $4.87 \sim 7.79 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 特别值得关注的是水库泄水后 CO_2 释放量可达 $64.29 \sim 102.86 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 李双等^[11] 的研究发现三峡库区干、支流表层水体的 CO_2 交换通量差异显著,支流梅溪河和库区干流分别为 $-7.48 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

和 $39.58 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 但水库作为“碳源”的结论也受到质疑,Trnavik 等^[24] 认为它主要发生在淹没区为泥炭地或浅水库区的区域,其它地区并不明显. 梅航远等^[25] 对万安水库的研究表明入库水体、库区水体、出库水体都表现为大气 CO_2 的源,但是水库对河流温室气体释放的减缓作用明显. Knoll 等^[26] 和 Mendonça 等^[27] 研究表明水库建设非但不会使大气 CO_2 增加,反而会固碳成为碳汇.

以上差异性结论甚至相反结论的出现,一方面表明水库碳循环过程的复杂性,另一方面反映人们对水库碳循环过程的了解还不够深入. 以上研究的对象主要以地表河补给型水库为主,到目前并没有数据揭示岩溶区地下水补给型水库水-气界面 CO_2 交换特征和 DIC 含量及其同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) 的时空分布特征,一定程度上影响了水库碳源、碳汇的准确评价. 本研究于 2014 年 7 月在主要接受岩溶地下水补给的广西上林县大龙洞水库上、中、下游进行各断面空间高密度监测和在下游开阔水域进行了连续 48 h 的昼夜监测,这样在取样密度足够大的前提下,对水库水-气界面 CO_2 交换通量及表层水体 DIC 含量、 $p\text{CO}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 时空分布特征进行了较为准确的刻画,以期为更好地揭示水库水-气界面碳的生物地球化学循环过程提供科学依据,也有助于水库环境保护与开发.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大龙洞水库位于广西上林县西燕乡,红水河支流清水江上游,库区位于 $23^\circ30'01'' \sim 23^\circ40'08''\text{N}$, $108^\circ30'02'' \sim 108^\circ36'04''\text{E}$, 是一座利用天然岩溶谷地并堵塞洞穴、落水洞和一些裂隙而形成的以灌溉为主结合发电的大型水库,库区长十余里,宽 $500 \sim 600 \text{ m}$,最宽处达 1 km 以上. 水库始建于 1958 年,总库容 1.51 亿 m^3 , 坝后电站装机 $4 \times 500 \text{ kW}$, 年发电量 $694 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}$ ^[28].

研究区位于南北向及北西向两组断裂的交汇地带,地层变动强烈,水库水源主要由 30 号大龙洞地下河及 29 号遐龙地下河供给,地下水补给区主要出露的地层为下石灰统 (C_1) 和中泥盆统东岗岭组 (D_2d^3) 碳酸盐岩^[29], 集雨面积 310 km^2 (上游有 91 km^2 集雨面积的东敢水库丰水期泄洪时注入,如图 1). 受亚热带季风气候影响,库区多年平均气温 21°C , 多年平均降雨量 1837.3 mm , 雨季为 4~9 月.

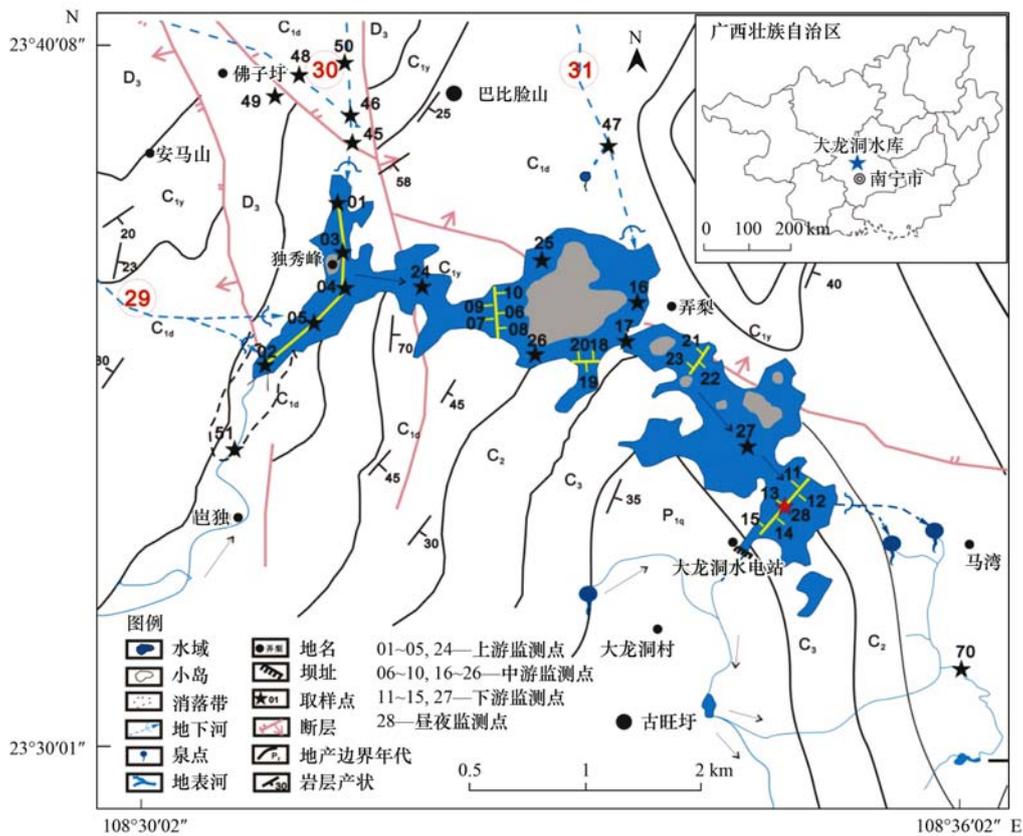


图 1 大龙洞水库水文地质及采样点示意

Fig. 1 Schematic map of hydrogeology and the sampling sites in Dalongdong Reservoir

1.2 监测、取样及实验方法

2014-07-12 ~ 2014-07-20 在广西上林县大龙洞水库区上、中、下游进行各断面空间高密度监测, 库区内共设置 27 个监测点, 入库河流共设置 5 个监测点, 在下游开阔水域和出库水体设置昼夜监测点展开了为期 48 h 的昼夜监测. 每个监测点取水面下 0.5 m 的水样, 并用浮游静态箱进行水-气界面 CO₂ 交换通量观测; 昼夜监测每 3 h 间距进行人工采样. 采样期间均为晴天, 平均气温 33.8℃. 采样点见图 1.

现场用 WTW3430 多参数水质测定仪 (德国 WTW 公司) 测定水温 (T)、溶解氧 (DO)、pH 值、电导率 (Spc), 精度分别为 0.1℃、0.01 mg·L⁻¹、0.001 个 pH 单位、1 μS·cm⁻¹; 用 YSI6600 多参数水质测定仪测定浊度 (Tb), 叶绿素 a (Chla), 精度分别为 0.1 FTU、0.1 μg·L⁻¹; 用 KANOMAX6036 手持式风速仪 (日本 KANOMAX 公司) 测定风速, 精度为 0.01 m·s⁻¹; 用萨氏透明盘测定水体透明度; 用碱度试剂盒 (德国 Merck 公司) 滴定 HCO₃⁻, 滴定精度为 0.01 mg·L⁻¹. 取 30 mL 水样储存于高密度聚

乙烯瓶中并加入 4 ~ 5 滴饱和 HgCl₂, 用来测定 δ¹³C_{DIC}. δ¹³C_{DIC} 及阴阳离子的测定参照文献 [11] 进行.

采用自主设计制作的浮游静态箱^[30]进行水-气界面 CO₂ 交换通量观测. 气体采样箱为直径 30 cm, 高 40 cm 的不锈钢圆筒, 箱体内部放置有隔热材料, 防止因阳光直射导致箱内温度升高; 采样箱内部装有小型风扇, 用以充分混合箱内气体. 箱体下水之前, 接通风扇电源并将箱体倒置 5 min, 使箱内气体混合均匀, 静态箱下水后, 利用 100 mL 针筒采集采样箱内气体作为背景浓度, 然后分别隔 5、5、10、15 min 采集一次气样, 共采集 5 次, 此外研究期间每天取一个大气样品, 气体样本保存于 1 L 气样袋中, 密封避光保存. 气样袋取回实验室后 48 h 内用 Agilent 7890B 气相色谱仪进行 CO₂ 浓度分析. 采用六通阀进样 (100℃), 用纯度为 99.999% 的氮气为载体 (21 mL·min⁻¹), 先经 g3591-81121 色谱柱 (60℃) 分离, 再通过镍转化炉 (375℃) 将 CO₂ 转化成 CH₄, 最后用 FID (250℃) 检验. 用 200 × 10⁻⁶、500 × 10⁻⁶、1 000 × 10⁻⁶、2 006 × 10⁻⁶ 的 CO₂ 标气 (由广西国信

气体研究有限公司提供)对 Agilent 7890B 气相色谱仪进行校正,校正曲线相关系数大于 0.999。每个气体检测两次,标准偏差控制在 1% 以内,气体浓度变化的线性要求相关系数 R 大于 0.9,否则剔除该点气体数据。所有气体测试工作均在国土资源部岩溶动力学重点实验室完成。

通过测定气样浓度变化率计算水-气界面的 CO_2 交换通量,计算公式为^[31]:

$$\text{通量}(V) = \frac{\text{斜率} \times \text{压力} \times F_1 \times F_2 \times \text{体积}}{\text{SP} \times R \times (273.15 + T) \times \text{表面积}} \quad (1)$$

式中,斜率为时间-浓度关系图中的斜率($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$);压力为环境压力(Pa); F_1 为分子摩尔质量(CO_2 , $44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$); F_2 为分钟和小时的转换系数(60);体积为浮游箱内套入的空气体积(m^3);SP为标准气压(101 325 Pa); R 为常量0.082 07; T 为箱内温度($^{\circ}\text{C}$);表面积为水上浮游箱的表面积(m^2);通量单位 $[\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ 。

利用 WATSPEC^[32] 软件计算出水体二氧化碳分压($p\text{CO}_2$),方解石饱和指数(saturation index of calcite, SIc)。见公式(2)和(3):

$$p\text{CO}_2 = (\text{HCO}_3^-)(\text{H}^+)/K_h K_1 \quad (2)$$

$$\text{SIc} = \lg(\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})/K_s \quad (3)$$

式中, K_h 和 K_1 分别为 H_2CO_3 和 CO_2 的平衡常数^[32], K_s 为方解石平衡常数^[32]。

水温日变化对岩溶水水化学日变化的影响,可以通过计算温度对亨利常数的影响来评估^[33]。

$$C = \frac{(K_{h1} - K_{h2})/K_{h1}}{(p\text{CO}_{2\text{max}} - p\text{CO}_{2\text{min}})/p\text{CO}_{2\text{max}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, C 为水温日变化对岩溶水化学日变化的影响, $p\text{CO}_{2\text{max}}$ 为当日最大二氧化碳分压, $p\text{CO}_{2\text{min}}$ 为当日最

小二氧化碳分压, K_{h1} 为当日二氧化碳分压最大时所计算的亨利常数, K_{h2} 为当日二氧化碳分压最小时所计算的亨利常数。

2 结果与分析

2.1 研究区水体物理化学总体特征

由表 1 可以看出,大龙洞水库流域水体中的阳离子均以 Ca^{2+} 为主,阴离子均以 HCO_3^- 为主,库区表层水体、出库水体和入库河流 Ca^{2+} 平均含量分别 32.36、42.40、35.42 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 HCO_3^- 平均含量分别为 152.5、215.94、178.73 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。除 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 外,研究区内水体阳离子由多到少排序为 $\text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$,阴离子由多到少排序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 。根据以上数据判断研究区水体水化学类型为舒卡列夫分类法中的 HCO_3-Ca 型,反映了其水化学特征主要受碳酸盐岩溶解影响,这与该水库集雨区地层主要为下石灰统(C_1)和中泥盆统东岗岭组(D_2d^3)碳酸岩吻合。

按 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度排序均为出库水体 > 入库河流 > 库区表层水体。出库水体 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度较高是因为大龙洞水库是底层泄水,而入库水体 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度较高则是因为水库主要接受 3 条岩溶地下河的补给。入库河流的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 分别比库区表层均值高出 2.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、25.23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。库区表层 SIc 值范围在 0.20 ~ 0.64 之间,平均 0.53,可见库区表层水均处于方解石过饱和状态。

2.2 DIC 含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的空间变化特征

大龙洞库区表层水体 pH 值范围在 7.89 ~ 8.38 之间,水体中溶解无机碳以 HCO_3^- 为主,占总溶解无机碳的 90% 以上,一般以 HCO_3^- 浓度表征水中溶解无机碳浓度(DIC)^[34]。

表 1 大龙洞水库表层水体水化学特征

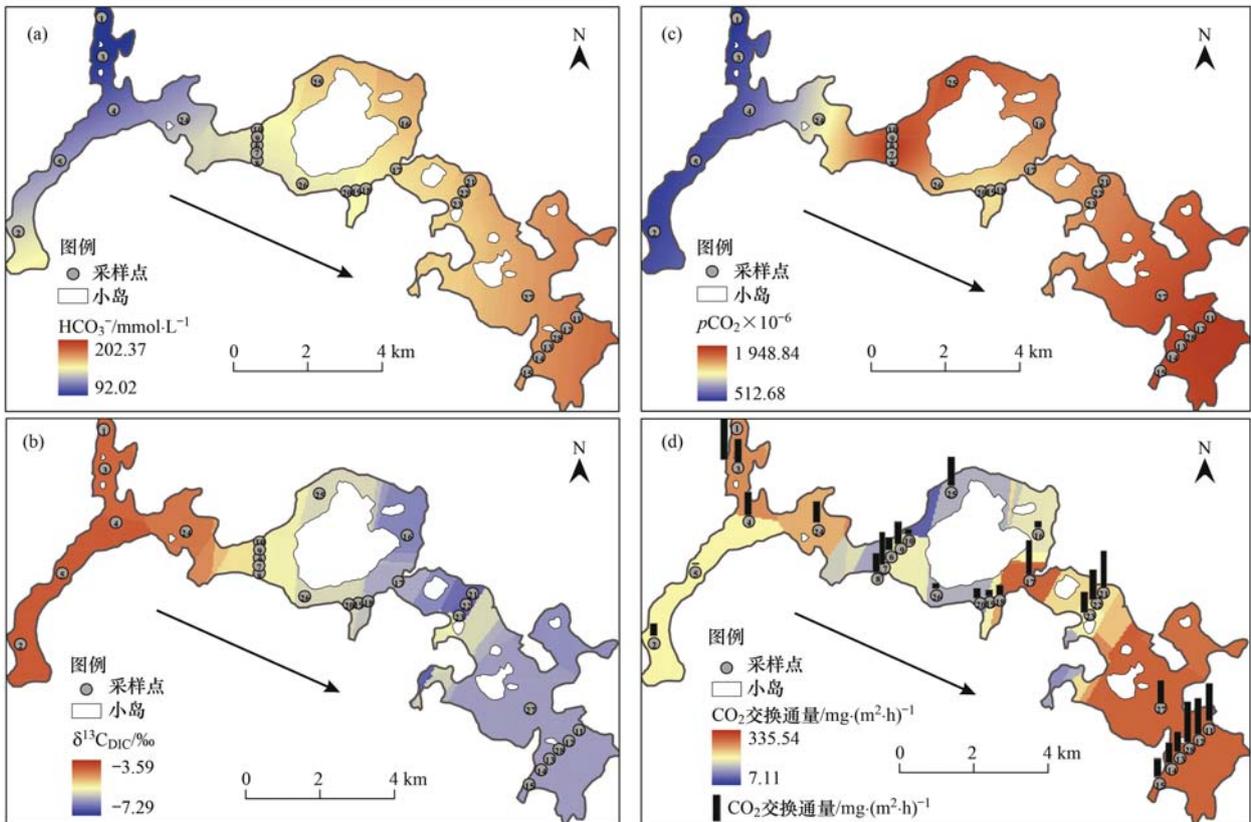
Table 1 Hydrochemical characteristics of surface-layer water in Dalongdong Reservoir

项目	库区表层水体范围(平均值)	出库水体范围(平均值)	入库河流范围(平均值)
$\text{Ca}^{2+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	25.56 ~ 37.14(32.36)	39.62 ~ 44.93(42.40)	17.93 ~ 57.78(35.42)
$\text{Mg}^{2+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	4.50 ~ 5.31(4.86)	4.31 ~ 5.07(4.76)	0.47 ~ 8.23(4.46)
$\text{Na}^{+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.70 ~ 0.92(0.81)	0.80 ~ 0.96(0.86)	0.40 ~ 1.94(0.99)
$\text{K}^{+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.45 ~ 0.63(0.53)	0.52 ~ 0.61(0.57)	0.27 ~ 1.45(0.95)
$\text{HCO}_3^-/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	85.4 ~ 176.9(152.5)	207.4 ~ 237.9(215.94)	109.8 ~ 231.8(178.73)
$\text{Cl}^-/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.94 ~ 2.96(2.20)	2.29 ~ 2.89(2.61)	1.26 ~ 4.78(3.04)
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6.82 ~ 11.38(8.14)	8.94 ~ 11.18(9.69)	3.38 ~ 9.86(6.53)
$\text{NO}_3^-/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.59 ~ 3.75(2.94)	3.02 ~ 6.41(4.91)	1.4 ~ 12.66(5.70)
SIc	0.20 ~ 0.64(0.53)	-0.11 ~ 0.04(0.03)	-0.34 ~ 0.87(0.22)
$p\text{CO}_2/\times 10^{-6}$	512.68 ~ 1 948.84(1 153.80)	7 585.78 ~ 10 964.78(8 897.82)	316.23 ~ 1 1481.54(4 313.30)
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}/\text{‰}$	-7.92 ~ -3.59(-5.85)	-10.98 ~ -7.41(-9.54)	-10.08 ~ -1.87(-6.87)

用 Arcgis 9.3 中的 Spatial Analysis 模块对大龙洞水库表层水体 DIC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值进行 Kriging 插值,结果如图 2(a)、2(b)所示,两者均存在较大的空间差异. 通过相关分析可以看出 DIC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值呈显著的负相关关系 ($R = -0.77, P < 0.01$). DIC 含量的高值区和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的低值区均位于下游开阔水域,而 DIC 含量的低值区和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的高值区位于上游地表河与地下河入库附近,但不同库区变化幅度不同. 从上游到中游 DIC 含量大幅增加 [$\text{DIC}_{(\text{平均})}$: $122.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $154.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$],增幅达 22.0%; 而从中游到下游增幅较小 [$\text{DIC}_{(\text{平均})}$: $154.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $172.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$],增幅为 11.0%. 从上游到中游 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值大幅变负 [$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}(\text{平均})}$: -4.34‰ 降至 -6.01‰],降幅达 38.41%; 从中游到下游降幅较小 [$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}(\text{平均})}$: -6.01‰ 降至 -6.97‰],降幅为 16.07%. 水体 DIC 含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值是各种生物和非生物成因的无机碳相互混合和各种因素彼此均衡的结果^[13],局部地区的差异现象可能是由于其主要控制因素的差异造成的.

2.3 水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换量空间变化特征

大龙洞水库表层水体 $p\text{CO}_2$ 与水-气界面 CO_2 交换量空间变化如图 2(c)和 2(d)所示. 表层水体 $p\text{CO}_2$ 值范围在 $512.68 \times 10^{-6} \sim 1948.84 \times 10^{-6}$ 之间,平均 1153.80×10^{-6} ,而监测期间大气 $p\text{CO}_2$ 范围在 $415.47 \times 10^{-6} \sim 453.87 \times 10^{-6}$ 之间,平均 433.91×10^{-6} . 所有监测点表层 $p\text{CO}_2$ 值均高于大气的 $p\text{CO}_2$ 值,形成向大气的正向 CO_2 浓度梯度,库区表层水体成为大气 CO_2 的源. 而通过用密闭式静态箱-气相色谱法对库区进行水-气界面 CO_2 交换量监测,结果同样表明大龙洞整个库区均为大气 CO_2 的源, CO_2 交换量范围在 $7.11 \sim 335.54 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 之间,平均 $125.03 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 就空间变化而言,总体上表层 $p\text{CO}_2$ 值从上游逐渐向下游坝前增大,且变化相对均匀,上游,中游,下游水体 $p\text{CO}_2$ 平均值分别为 637.91×10^{-6} 、 1208.83×10^{-6} 和 1399.97×10^{-6} . 而上游地区和下游坝前地区 CO_2 交换量较大 [平均 $131.73 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、 $170.25 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$],中游狭窄地区 CO_2 交换通



(a) DIC 含量、(b) $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、(c) 水体 $p\text{CO}_2$ 和 (d) 水-气界面 CO_2 交换量

图 2 大龙洞水库 DIC 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of DIC content, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $p\text{CO}_2$ and CO_2 efflux in Dalongdong Reservoir

量较少[平均 $116.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],且呈斑块状分布. 与国内主要水库、河流水-气界面 CO_2 交换通量相比,大龙洞水库夏季7月水-气界面 CO_2 脱气量[平均 $125.03 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]要远远高于香溪河库湾^[35][夏季 $0.336 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]、红枫湖^[12][夏季 $38.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]和三峡库区主干流^[11][夏季 $72.57 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]的 CO_2 交换通量,可见大龙洞水库夏季水-气界面 CO_2 交换通量相当可观.

2.4 水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量昼夜变化特征

通过对大龙洞水库下游开阔水域进行昼夜监测,发现水库表层水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量存在明显的昼夜变化过程(图3,监测点如图1中的28号点). 表层水体 $p\text{CO}_2$ 值晚上升高,白天降低,变化范围在 $1348.96 \times 10^{-6} \sim 1737.80 \times 10^{-6}$ 之间,平均 1470.88×10^{-6} . 采样自14日09:00开始,表层水体 $p\text{CO}_2$ 值开始逐渐下降. 观测期间,低峰均出现在15:00左右,最小值在14日15:00 (1348.96×10^{-6}),此时水-气界面 $p\text{CO}_2$ 差为 915.05×10^{-6} ,水体 $p\text{CO}_2$ 是大气的3.1倍,而最大值出现在16日06:00 (1737.80×10^{-6}),此时水体 $p\text{CO}_2$ 是大气的4倍.

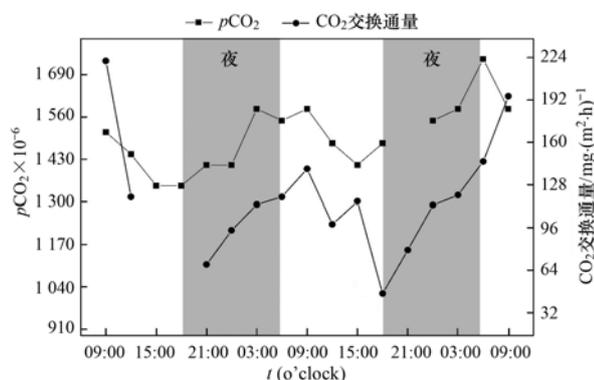


图3 大龙洞水库表层水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量昼夜变化

Fig. 3 Diel variation of $p\text{CO}_2$ and CO_2 efflux of surface-layer water in Dalongdong Reservoir

CO_2 交换通量白天下降,晚上上升,呈单峰型日变化. 但总体来看,由于白天水温比夜间高,水库内生物呼吸作用白天大于夜间,所以 CO_2 交换通量白天高于夜间,白天平均 $122.83 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,晚上平均 $101.72 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 白天 CO_2 交换通量波动较大,但夜间从18:00至次日06:00 CO_2 上升趋势显著,15日18:00出现本次昼夜监测最小值 [$46.38 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],在16日09:00达到排放高

峰 [$194.72 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$].

3 讨论

3.1 大龙洞水库表层水体 DIC 空间变化控制因素分析

Chla 是水生生物新陈代谢过程方向和强度的重要性指标,与水体藻类生物量呈显著相关^[36,37],主要反映水生生物光合作用的强度. 相关分析结果如表2所示: Chla 与 DIC 含量、水体 $p\text{CO}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值、水-气界面 CO_2 交换通量在空间分布上均呈显著的相关关系. 其中 Chla 与 DIC 含量、水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量呈负相关,与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值呈正相关. 图4(a)显示,大龙洞水库表层水体从上游到下游,Chla 逐渐减少,表明从上游到下游浮游植物总量减少,光合作用减弱, DIC 吸收利用减少,从而导致 DIC 含量和水体 $p\text{CO}_2$ 从上游到下游逐渐增加[图2(a)和2(c)],由于大气 $p\text{CO}_2$ 相对稳定,水体 $p\text{CO}_2$ 增加将加大水-大气 $p\text{CO}_2$ 分压梯度差,因此导致下游水-气界面 CO_2 交换通量高于上游和中游[图2(d)]. 另一方面由于藻类在光合作用形成有机质过程中优先利用 ^{12}C ^[12],使剩余水体 DIC 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正,当光合作用减弱时其对水体无机碳同

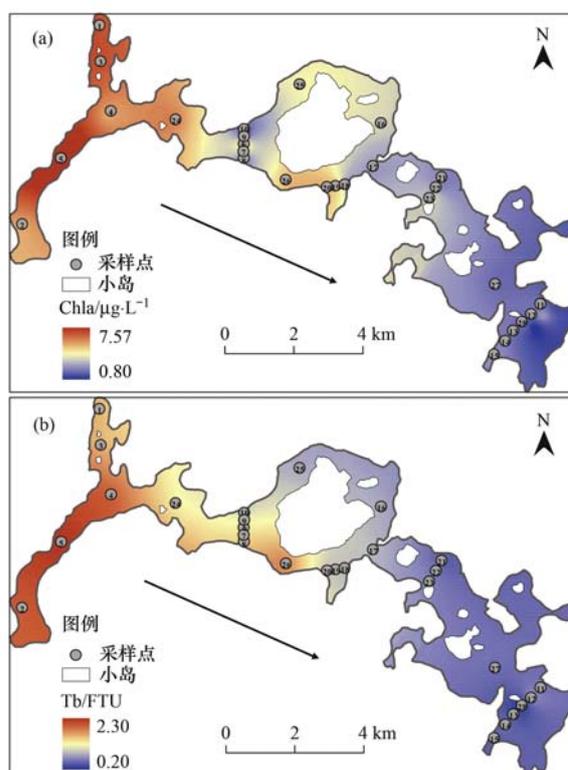


图4 大龙洞水库表层水体 Chla 和 Tb 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of Chla and Tb of surface-layer water in Dalongdong Reservoir

位素分馏作用减弱,因此大龙洞水库从上游到下游表层水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏负[图2(b)]. 这表明 Chla 是影响大龙洞表层水体无机碳空间变化重要因素之一,这与吕迎春等^[38]的研究结果相似.

浊度(Tb)和透明度主要通过影响水生生物的分布及其新陈代谢的强度和方向进而影响无机碳的行为. 自然状态下光饱和点(I_k)位置一般在 $0.14 \sim 0.72 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ^[39],而光抑制现象通常在3倍 I_k 处开始^[40]. 相关研究表明夏季光照强度大,水体表层光照强度一般在3倍 I_k 以上,容易出现光抑制现象,初级生产力或者浮游植物总量最大值出现在次表层,如新安江水库夏季浮游植物总量最大值出现在10 m处^[41],红枫湖夏季表层水中2 m处浮游植物的Chla浓度最大^[38]. 大龙洞水库浮游植物总量最大值出现在5 m左右(数据未发表),且如表2所示,Tb与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值呈显著正相关($R = 0.89, P < 0.01$),与DIC含量和 $p\text{CO}_2$ 呈显著负相关(R 为 -0.66 和 $-0.61, P < 0.01$),透明度与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值呈显著负相关($R = -0.84, P < 0.01$),与DIC含量和 $p\text{CO}_2$ 呈显著正相关(R 为 0.73 和 $0.58, P < 0.01$),这表明夏季大龙洞水库可能出现了光抑制现象. 如图4(b),从上游到下游,表层水体浊度(Tb)明显下降,增加了水体的透明度和透光性,从而导致下游表层水体光抑制作用强于上游和中游,

下游表层水体 Chla 较低,光合作用减弱,因此从上游到坝前 DIC 含量和 $p\text{CO}_2$ 增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏负.

表2显示,风速与DIC含量、 $p\text{CO}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的相关关系并不明显,但风速是影响水-气界面 CO_2 交换通量的重要因素之一^[42]. 风速主要通过改变气体交换系数来改变水-气界面 CO_2 交换速率,风速增大时,风对水面有剪切作用,使水面产生波浪^[43],从而增大水气交换速率. 大龙洞库区水-气界面 CO_2 交换通量与山谷的形状和小岛的空间格局有着密切联系,与风速呈显著正相关($R = 0.78, P < 0.01$). 如图2(d),2号和5号观测点位于库位的地表河入库处,河谷开阔,风速较小,且由于观测期间东敢水库处于蓄水阶段,地表河流量不大,水深较浅,水体DIC含量相对较低,加之长距离运输后,水体 $p\text{CO}_2$ 降低,从而导致水-气界面 CO_2 交换速率降低,因此其水-气界面 CO_2 交换通量要小于地下河入库附近的1号和3号观测点. 位于小岛背后的16号监测点和位于库湾的18~20号,13~15号监测点,由于受山体阻挡风力较小,水-气界面 CO_2 交换通量较小,而位于小岛前的6~10号和位于下游开阔水域的11、12、28号监测点,由于山体的阻挡,水体回水效应明显,扰动较强,导致这些区域水-气界面 CO_2 交换通量较大.

表2 DIC含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $p\text{CO}_2$ 和 CO_2 交换通量空间变化控制因素相关性系数¹⁾($n = 27$)

Table 2 Correlation coefficient of influencing factors with the distribution of DIC content, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $p\text{CO}_2$ and CO_2 efflux ($n = 27$)

项目	T	pH	DO	Spc	Tb	Chla	Slc	水深	透明度	风速
HCO_3^-	-0.08	-0.38	-0.01	0.76**	-0.66**	-0.72**	0.50**	0.55**	0.73**	0.21
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	0.18	0.46*	-0.06	-0.82**	0.89**	0.86**	-0.27	-0.64**	-0.84**	-0.37
$p\text{CO}_2$	-0.30	-0.95**	-0.06	0.82**	-0.61**	-0.65**	-0.35	0.53**	0.58**	0.42
CO_2 通量	-0.16	-0.29	0.02	0.04	-0.59*	-0.50*	-0.51**	0.14	0.01	0.78**

1) **表示在0.01置信水平上显著相关; *表示0.05置信水平上显著相关

表2显示,水深与DIC含量、 $p\text{CO}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的相关关系显著,但与水-气界面 CO_2 交换通量相关关系不显著,这是由于在水库较深区域, CO_2 气泡在向水体表层迁移过程中由于静水压力作用的变化会溶解到水体中^[44],使表层DIC含量增加, $p\text{CO}_2$ 增大,由于水库较深区域DO较低,有机质分解释放大量的 ^{12}C ,因此水深与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 呈显著反相关.

Spc与 $p\text{CO}_2$ 、DIC含量之间呈显著正相关(R 为 0.76 和 $0.82, P < 0.01$),与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 呈显著负相关($R = -0.82, P < 0.01$),原因在于水体中Spc主要由离子强度决定,而大龙洞表层水体的离子主要以 HCO_3^- 为主,所以Spc主要受 HCO_3^- 浓度的影

响,而本研究中 $p\text{CO}_2$ 是以 HCO_3^- [式(2)]计算得到. 另一方面pH与 $p\text{CO}_2$ 呈显著正相关也是由于本研究中 $p\text{CO}_2$ 以pH计算得到.

与其他研究相似^[42,45],在水温变化不大情况下,水温与 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量空间分布相关关系不显著. 大龙洞水库表层水体在监测期间水温在 $30.5 \sim 32.8^\circ\text{C}$ 之间,平均 31.67°C ,空间变化很小,因此大龙洞水库表层水体水温与DIC含量、 $p\text{CO}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值、水-气界面 CO_2 交换通量在空间分布上相关关系均不显著($P > 0.05$).

3.2 大龙洞水库表层水体 DIC 昼夜变化控制因素

图5显示,昼夜监测期间水温度(T)存在白天

升高晚上降低的昼夜变化规律,相关分析结果显示水温与 $p\text{CO}_2$ 呈显著负相关 ($R = -0.87, P < 0.01$), 水温度与 DIC 含量呈显著负相关 ($R = -0.77, P < 0.01$). 通过亨利常数计算 [式(4)] 表明昼夜温度变化对监测期间大龙洞水库 $p\text{CO}_2$ 值昼夜变化的影响只有 4.80% ~ 6.58%, 而其它因素(非物理因素及生物因素)的影响占 93.42% ~ 95.20%. 这是由于水体比热容较大, 监测期间水温变化范围在 30.3 ~ 31.1°C 之间, 变化系数为 0.86, 昼夜变化幅度不大(表 3).

如图 5 所示, pH 存在白天升高, 晚上降低的昼夜变化, 这是由于白天藻类的光合作用将水中溶解的无机碳转化为有机碳, 使水中 $p\text{CO}_2$ 降低, 而且还从水体中吸收溶解的营养盐, 如硝酸盐和磷酸盐, 使得表层水的碱度和 pH 升高.

许多研究表明浮游植物具有明显垂向昼夜运动规律, 且有些藻类垂向运动的速率很快, 如微囊藻群体垂向运动的速率超过每小时 10 cm, 大部分蓝藻上午下沉, 晚上重新上浮^[45]. 本研究同样发现大龙洞水库表层水体 Chla 白天较低, 晚上较高, 存在明显的昼夜变化(图 5), 且与 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量呈显著负相关 (R 为 -0.54 和 $-0.57, P < 0.05$). 水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量出现了相似的昼夜变化(图 3). 水体 $p\text{CO}_2$ 在 09:00 达到最大值, 主要由于晚上大部分藻类上浮到表层, 经过一昼夜的以水生浮游植物呼吸作用为主的生理作用, 造成 CO_2 在表层水体富集. 白天随着水生浮游植物光合作用效率的增强, 水体 CO_2 利用效率增加, 加之表层水体水温上升和空气之间的热对流程度降低, 水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量逐渐降低(图 3). 夜间从 18:00 至次日 06:00, 由于水体

水生浮游植物开始转向以呼吸作用为主, 水体富集 CO_2 , 加之表层水体和大气的比热值差异, 大气降温高于水体, 形成显著热对流, 水-气界面 CO_2 交换通量增加(图 3). 浮游植物密度是影响水库浊度的主要因素^[41], 表层水体浮游植物增多时, 浊度增大. 大龙洞表层水体 Tb 与 Chla 昼夜变化趋势一致(图 6), Tb 与水体 $p\text{CO}_2$ 和水-气界面 CO_2 交换通量呈负相关 (R 为 -0.52 和 $-0.56, P < 0.05$), 这一点同样佐证了大龙洞水库浮游植物发生了垂向昼夜运动. 综上所述: 浮游植物的垂向昼夜运动、光合作用和呼吸作用共同影响水库表层水体无机碳昼夜变化.

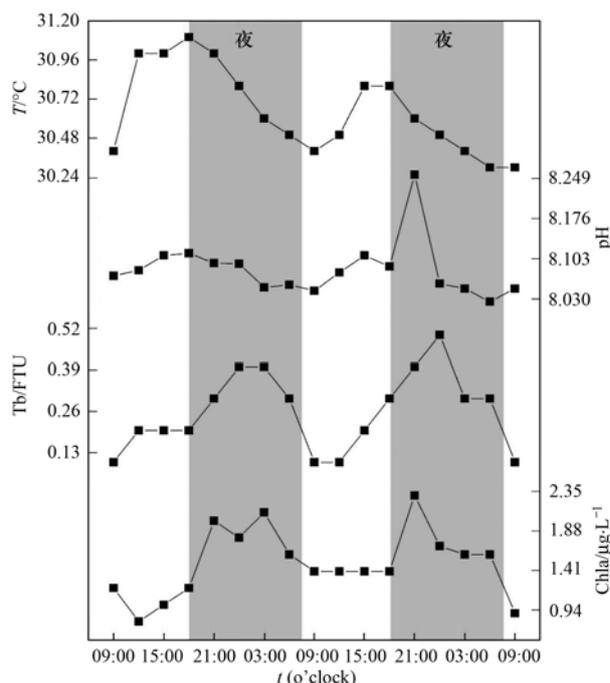


图 5 大龙洞水库表层水体 T 、pH、Tb 和 Chla 昼夜变化
Fig. 5 Diel variation of T , pH, Tb and Chla of surface-layer water in Dalongdong Reservoir

表 3 DIC 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、水体 $p\text{CO}_2$ 和 CO_2 交换通量昼夜变化控制因素相关性系数¹⁾ ($n = 17$)

Table 3 Correlation coefficient of influencing factor with diel variation of DIC content, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $p\text{CO}_2$ and CO_2 efflux ($n = 17$)

项目	T	pH	DO	Spc	Tb	Chla	风速
HCO_3^-	-0.77**	-0.26	0.33	0.74**	0.03	0.28	0.32
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	-0.21	-0.18	-0.06	0.21	0.10	-0.21	0.21
$p\text{CO}_2$	-0.87**	-0.97**	0.47	0.83**	-0.52*	-0.54*	0.43
CO_2 通量	-0.29	-0.31	0.26	0.23	-0.56*	-0.57*	0.52*

1) ** 表示在 0.01 置信水平上显著相关; * 表示 0.05 置信水平上显著相关

4 结论

(1) 从上游到下游 DIC 含量和 $p\text{CO}_2$ 值逐渐增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值逐渐偏负, 而上游和下游坝前地区 CO_2 交换通量较大, 中游狭窄地区 CO_2 交换通量较

少. 分析认为: 大龙洞水库表层水体 DIC 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值和 $p\text{CO}_2$ 的空间分布主要受浮游植物浓度、浊度、电导率、水深、透明度等的影响, 而水-气界面 CO_2 交换通量除了受浮游植物浓度空间变化的影响外还受风速的影响.

(2) 由于大龙洞水库水体为岩溶地下水补给, 其具有较高的 DIC 含量, 从而导致表层水体 $p\text{CO}_2$ 值均高于大气的 $p\text{CO}_2$ 值, 而通过用密闭式静态箱-气相色谱法对库区进行水-气界面 CO_2 交换通量监测, 结果表明整个库区均为 CO_2 的源, CO_2 释放通量在 $7.11 \sim 335.54 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 平均 $125.03 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

(3) 表层水体 $p\text{CO}_2$ 值和水-气界面 CO_2 交换通量存在晚上升高, 白天降低的昼夜变化规律, 且与叶绿素 a (Chla) 呈负相关 (R 为 -0.54 和 -0.57 , $P < 0.05$). 这表明浮游植物昼夜垂向运动及光合作用和呼吸作用昼夜变化控制着水库表层水体溶解性无机碳的循环过程.

致谢: 本研究取样、分析过程中得到中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶动力学重点实验室的李瑞、原雅琼同学和吴夏老师的帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Naiman R J, Melillo J M, Lock M A, *et al.* Longitudinal patterns of ecosystem processes and community structure in a subarctic river continuum [J]. *Ecology*, 1987, **68**(5): 1139-1156.
- [2] Balistrieri L S, Murray J W, Paul B. The cycling of iron and manganese in the water column of Lake Sammamish, Washington [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(3): 510-528.
- [3] Dynesius M, Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world [J]. *Science*, 1994, **266**(5186): 753-762.
- [4] 汪秀丽. 埃及水电与阿斯旺高坝环境影响评价[J]. *水利电力科技*, 2006, **31**(3): 20-33.
- [5] 沈志良. 长江干流营养盐通量的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1997, **28**(5): 522-528.
- [6] Zhang J, Zhang Z F, Liu S M, *et al.* Human impacts on the large world rivers: Would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**(4): 1099-1105.
- [7] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [8] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 乌江流域梯级水库中溶解无机碳及其同位素分异特征[J]. *科学通报*, 2008, **53**(16): 1935-1941.
- [9] Krumbein W E. *Microbial geochemistry* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983. 5-62.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 487-511.
- [13] 王将克, 常弘, 廖金凤, 等. 生物地球化学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1999. 294-350.
- [14] Hélie J F, Hillaire-Marcel C. Diffusive CO_2 Flux at the air-water interface of the Robert-Bourassa hydroelectric reservoir in Northern Quebec: Isotopic approach (^{13}C) [A]. In: *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 339-354.
- [15] 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.
- [16] 李干蓉, 刘丛强, 陈稼, 等. 猫跳河流域梯级水库夏-秋季溶解无机碳(DIC)含量及其同位素组成的分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2891-2897.
- [17] 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 等. 广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2959-2966.
- [18] Wang X F, Veizer J. Respiration-photosynthesis balance of terrestrial aquatic ecosystems, Ottawa area, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(22): 3775-3786.
- [19] Miyajima T, Yamada Y, Wada E, *et al.* Distribution of greenhouse gases, nitrite, and $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in Lake Biwa; Implications for hypolimnetic metabolism [J]. *Biogeochemistry*, 1997, **36**(2): 205-221.
- [20] Wachniew P, Rózański K. Carbon budget of a mid-latitude, groundwater-controlled lake; isotopic evidence for the importance of dissolved inorganic carbon recycling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(12): 2453-2465.
- [21] 吴起鑫, 韩贵琳, 唐杨. 三峡水库坝前水体水化学及溶解无机碳时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 654-661.
- [22] 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.
- [23] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin É, *et al.* Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate; Reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases [J]. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766-775.
- [24] 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, part 2): 2298-2314.
- [25] 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.
- [26] Knoll L B, Vanni M J, Renwick W H, *et al.* Temperate reservoirs are large carbon sinks and small CO_2 sources; Results from high-resolution carbon budgets [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, **27**(1): 52-64.
- [27] Mendonça R, Kosten S, Sobek S, *et al.* Carbon Sequestration in

- a Large Hydroelectric Reservoir: An Integrative Seismic Approach [J]. *Ecosystems*, 2014, **17**(3): 430-441.
- [28] 广西水利信息网, <http://www.gxwater.gov.cn>.
- [29] 雷恒新, 姚星辉. 区域地质水文普查报告[R]. 南宁: 广西壮族自治区地质局, 1979. 6-90.
- [30] 刘文, 蒲俊兵, 章程. 一种便携式水陆两用温室气体采集设备[P]. 中国专利: ZL 201420363633. 4, 2014-11-05.
- [31] Lambert M, Fréchet J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies [A]. In: *Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 37-60.
- [32] Wigley T M L. WATSPEC: a computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions [C]. *Geo Abstracts for the British Geomorphological Research Group*, 1977. 1-49.
- [33] 莫雪, 蒲俊兵, 袁道先, 等. 亚热带典型岩溶区地表溪流溶解无机碳昼夜变化特征及其影响因素[J]. *第四纪研究*, 2014, **34**(4): 873-880.
- [34] Das A, Krishnaswami S, Bhattacharya S K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **236**(1-2): 419-429.
- [35] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1471-1475.
- [36] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 6-90.
- [37] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库——福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(2): 244-250.
- [38] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 红枫湖夏季分层期间 pCO₂ 分布规律的研究[J]. *水科学进展*, 2008, **19**(1): 106-110.
- [39] Davison I R. Environmental effects on algal photosynthesis: temperature [J]. *Journal of Phycology*, 1991, **27**(1): 2-8.
- [40] Harris G P. Photosynthesis, productivity, and growth: the physiological ecology of phytoplankton [M]. New York: Lubrecht & Cramer Ltd, 1978. 1-171.
- [41] 吴志旭, 刘明亮, 兰佳, 等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(3): 460-465.
- [42] 赵玮. 三峡水库湖北段温室气体排放通量时空特征及其影响因素分析[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2012.
- [43] 李小平. 湖泊学[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 45-208.
- [44] Abril G, Guérin F, Richard S, Delmas R, *et al.* Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(4): 1-16.
- [45] 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 等. 香溪河库湾春季 pCO₂ 与浮游植物生物量的关系[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1754-1760.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 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