

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物质碳及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响

吴飞红^{1,2}, 蒲俊兵^{2*}, 李建鸿², 张陶^{1,2}, 李丽^{1,2}, 黄思宇²

(1. 重庆市岩溶环境学重点实验室, 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: 热分层导致水库内部水化学、水生生物分布等出现显著的分层特征, 并影响了水库内部的生物地球化学循环过程。为掌握夏季热分层期岩溶水库水体理化性质和溶解无机碳变化过程及其影响因素, 以岩溶地下水补给型水库广西上林县大龙洞水库为研究对象, 于 2015 年 6 月沿水库流程方向在 8 个点位开展分层采样及监测。结果发现: ① 水库夏季存在明显的热分层现象, 水体 pH、电导率 (Spc) 等理化性质出现分层结构; ② 水体溶解氧 (DO) 与叶绿素 a (Chl-a) 浓度从表层至底层并没有呈现单一的递减趋势, 而是在水面以下 2.5 m 或者 5 m 处达到最大值; ③ 由表层至底层水体溶解无机碳 (DIC) 浓度整体上呈增加趋势, 表层水体 DIC 平均浓度为 $2.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 底层平均浓度为 $4.18 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 其同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) 在表水层偏正, 在温跃层随水深增加逐渐偏负。分析认为: ① 由于夏季热分层效应, 水库水体温度、水生生物的分布及新陈代谢的强度和方向在不同水层存在显著差异, 致使水库水体理化性质、DIC 均呈现垂向分层性特征; ② DIC 浓度变化在表水层主要受碳酸盐岩沉淀过程及浮游植物光合作用影响, 进而影响水中 DIC 稳定同位素的分馏; 在温跃层则主要由生物呼吸作用及有机质分解过程控制。

关键词: 岩溶水库; 热分层; DIC; $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; 新陈代谢

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3209-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703138

Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer

WU Fei-hong^{1,2}, PU Jun-bing^{2*}, LI Jian-hong², ZHANG Tao^{1,2}, LI Li^{1,2}, HUANG Si-yu²

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, 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: Thermal stratification leads to significant stratification characteristics of hydrochemistry and aquatic organisms in reservoirs, and thus affects the biogeochemical cycle in the reservoir. This study aims to understand physico-chemical properties and dissolved inorganic carbon change processes and its factors in a karst groundwater-fed reservoir, Dalongdong Reservoir, located in Shanglin County, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China. The eight sampling points were placed along the direction of the water flow on June 19-21, 2015. The results show that: ① The reservoir exhibited obvious thermal stratification in the summer. There were significant differences in physical and chemical parameters, such as pH and conductivity (Spc) between the epilimnion and thermocline; ② The dissolved oxygen (DO) and chlorophyll a (Chl-a) content from the surface to the bottom did not show a single decreasing trend, but the maximum value occurred 2.5 m or 5 m below the surface; ③ From the surface to the bottom, dissolved inorganic carbon (DIC) concentrations showed an increasing trend with the average DIC concentration of $2.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ in the epilimnion and the average DIC concentration of $4.18 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ at the bottom of the thermocline. The value of stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) was more positive in the epilimnion than in the thermocline, where $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ gradually became partially negative with water depth. Possible reasons of these results include: ① The significant differences in temperature, distribution of aquatic organisms, and strength and direction of metabolisms in different water layers due to thermal stratification; ② The DIC variations in the epilimnion were mainly affected by the carbonate precipitation process and phytoplankton photosynthesis, thereby affecting the DIC stable isotope fractionation. DIC was mainly controlled by biological respiration and the organic matter decomposition process in the thermocline.

Key words: karst reservoir; thermal stratification; DIC; $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; metabolism

在河流上建设大坝形成水库, 其水动力条件、水循环模式等发生显著变化^[1]。近年来水库建设改变

收稿日期: 2017-03-16; 修订日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41572234, 41202185); 中国地质科学院基本科研业务费项目 (YYWF201636); 广西自然科学基金项目 (2016GXNSFCA380002); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502501); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160305-03); 国土资源部公益性科研行业专项 (201311148)

作者简介: 吴飞红 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶环境学与碳循环, E-mail: 875812898@qq.com

* 通信作者, E-mail: junbingpu@karst.ac.cn

水环境现状,并衍生出水质变化^[2~4]、温室气体排放^[5~7]、生物群落结构改变^[8,9]等环境问题已引起全球科学家们的广泛关注.热分层是静水水体(如湖泊、水库)不同于流动水体(如河流、溪流)的一个重要特征.在热带亚热带地区的研究发现,湖泊、水库的热分层现象一般发生在夏季,表层水温升高形成垂向的密度分层,使上下水体交换不畅,不同层位水质差异大.韩志伟等^[10]发现乌江渡水库夏季水体受温度分层和生物活动影响,出现水化学分层, HCO_3^- 含量在30 m以上随水深增加递增,30 m以下呈相反趋势;文献[4]研究表明土耳其 Tahtali 水库分层期间温跃层溶解氧浓度低于临界值,导致水体缺氧.文新宇等^[11]通过季节监测发现抚仙湖分层期由春季持续至秋季,温跃层深度发生改变,夏季溶解氧和 pH 均在温跃层出现峰值.百花湖水库分层期总氮、总磷等营养盐浓度表层较底层低^[12];新安江水库湖泊区在分层期浮游植物高密度区域垂向分布在5~10 m,其实际光合效率最大值出现在10 m区域^[13].总之,多数湖泊、水库由于夏季热分层导致内部水化学、水生生物作用等出现显著的分层特征,并控制了其内部的生物地球化学循环过程^[14].

碳作为水体内部元素循环、能量流动等活动的核心元素,对它的研究对认识水生态过程、元素循环以及它们的相互作用具有重要的指示意义^[15].水体中溶解无机碳(DIC)含量及其同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)的变化反映了碳地球化学行为和生物地球化学循环特征^[16,17].一般认为,表层水体光合作用将一定程度降低水体 DIC 浓度,导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正;底层主要受有机质分解影响使水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏负.在水体垂直剖面上的分层结构限制下上述现象维持在整个热分层期. Myrbo 等^[18]通过对6个温带硬水湖泊的研究发现分层期湖上层及底层 DIC 浓度变化梯度大,但 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 并不是单调偏负, Jones 湖 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在底温层呈现偏正趋势,最大值出现在临近沉积物-水界面处.国内乌江、猫跳河流域梯级水库研究表明^[19~21],水体垂直方向上, DIC 浓度增加且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 逐渐偏负,但夏季分层期上下层水体差异最大,分层影响显著.广西五里峡水库 DIC 浓度及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 也具有此季节性特征^[22].上述研究多集中在地表水补给型水库,针对地下水补给型水库是否存在类似现象或其它时空变化特征,特别是热分层效应对水体碳的生物地球化学循环的影响则是需要进一步研究的科学问题.本文以我国西南地区典型岩溶地下水补

给型水库——大龙洞水库为研究对象,在李建鸿等^[23]对大龙洞表层水体 DIC 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 时空分布和影响机制进行初步研究的基础上,探讨水库热分层期间水体物理化学参数、DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 时空变化特征,以及 DIC 在库区不同深度水体中的转化过程,有助于深刻认识水库内部碳的生物地球化学特征,以期为更好地阐明水库在全球碳循环中的地位和作用,评价其碳汇效应以及水库的保护和开发提供科学依据.

1 材料与方法

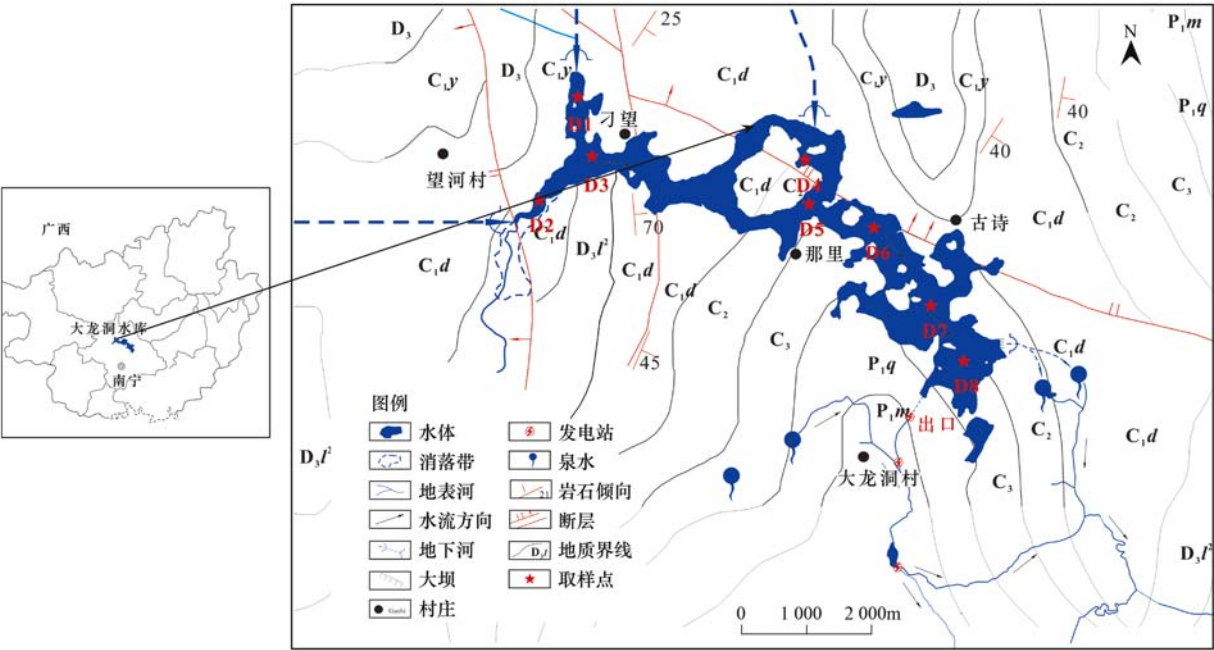
1.1 研究区概况

大龙洞水库位于广西上林县红水河支流清水江上游,库区位于 $23^{\circ}30'01''\sim 23^{\circ}40'08''\text{N}$, $108^{\circ}30'02''\sim 108^{\circ}36'04''\text{E}$ 之间.水库始建于1958年,是利用天然岩溶谷地并堵塞洞穴、落水洞和裂隙形成的峡谷型水库(图1).水库呈近似西北-东南方向展布,主要接受上游遇龙和大龙洞两条地下河补给,库区出露地层主要为石炭系碳酸盐岩^[24],是典型的岩溶地下水补给型岩溶水库.水库中、下游库岸较陡峭,消落带主要分布在上游区域.上游部分区域也偶尔成为东敢水库丰水期泄洪区.水库总库容1.5亿 m^3 ,总集雨面积310 km^2 ,主要功能为灌溉和发电.水库位于亚热带湿润性季风气候区,多年平均气温 21°C ,平均降雨1837.3 mm,且降雨集中在4~9月.水库流域内植被以C3植物为主,人类活动较为强烈.

1.2 取样及实验方法

2015年6月中旬对广西上林县大龙洞水库上、中、下游共8个采样点不同深度(间隔2.5 m,根据各点实际深度确定采样点个数)利用定深采样器进行现场采样,采样点分布见图1.

用德国 WTW 公司 Multi3430 多参数水质测定仪现场测定水温(T)、DO、pH 值、Spc,各指标测试精度分别为 0.1°C , $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.004 pH 单位, 0.5% .用 YSI6600 多参数水质测定仪测定 Chl-a,精度为 $0.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. HCO_3^- 浓度用德国 Merck 公司碱度计现场滴定,精度为 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.用萨氏透明盘测定水体透明度.用高密度聚乙烯瓶取样,所有水样均经直径50 mm, $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤.取15 mL 过滤水样并加入2滴1:1 HNO_3 ,使其 pH 值 <2 并采用美国 Perkin Elmer Optima 2100 ICP-OES 光谱仪测定阳离子.取100 mL 水样并利用美国戴安公司 ICS-900 离子色谱分析仪测定阴离子,阴阳离子分析误差 $<5\%$.取30 mL 过滤水样并



修改自文献[23]
图1 研究区水文地质简图及采样点示意
Fig. 1 Schematic diagram of the hydrogeology of the study area and sampling points

加入3~5滴饱和 HgCl_2 溶液,用于测定水体溶解无机碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$). 利用连有 Gas Bench II 装置的 MAT253 质谱仪测定水样 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$,结果以 V-PDB 标准给出,分析误差 $<0.15\text{‰}$. 取100 mL未过滤水样同样加入3~5滴饱和 HgCl_2 溶液,采用德国耶拿 Multi N/C 3100 碳氮分析仪测定总氮(TN). 所有实验均在中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成.

根据现场监测和分析测试得出的参数,利用 WATSPEC 软件^[25]计算出二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)和方解石饱和指数(SIc).

2 结果与讨论

2.1 水库热分层现象

从图2可以看出,表层至水下2.5 m间能接受较多太阳辐射能且水团混合较为均匀,平均水温 30.7°C ,温差仅 0.8°C ,水温较高但温差较小,为表水层. 水下2.5 m至水库底部12.5 m,水温 $27.8\sim 20.8^\circ\text{C}$,因接受到的光照逐渐减少,水温随水深增加近似线性下降,最大温度梯度 $1.32^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 出现在水下2.5~5 m,为温跃层. 因此,大龙洞水库在6月出现温度分层现象. 夏季分层有效限制了上下水体的交换,在水库中形成上层水体好氧环境和下层水体的厌氧环境,并影响 CO_2 的溶解度、水生生物的分布及新陈代谢的强度和方向和有机质的分解等在下

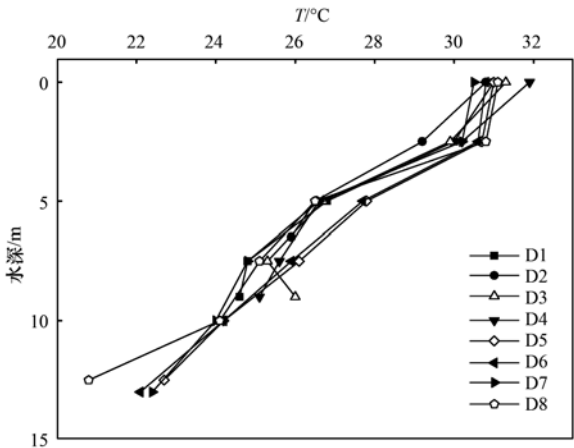


图2 大龙洞水库水温垂向分布
Fig. 2 Vertical distribution of water temperature in Dalongdong Reservoir

文将详细分析.

2.2 热分层效应影响水库水化学垂向分布

水化学数据表明,大龙洞水库主要离子为 Ca^{2+} 和 HCO_3^- . Ca^{2+} 在所有样品中占阳离子总质量的 $77.56\%\sim 95.42\%$, Mg^{2+} 占 $3.52\%\sim 16.62\%$, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 共占 $0.85\%\sim 5.32\%$. HCO_3^- 占阴离子总质量的 $91.74\%\sim 98.46\%$, SO_4^{2-} 占 $0.73\%\sim 4.68\%$, $\text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$ 共占 $0.76\%\sim 5.03\%$ (图3). 根据舒卡列夫分类法判断水库水化学类型为 HCO_3-Ca 型,说明岩溶地质背景控制了水库水化学组成. 水库各采样水层详细水化学参数见表1.

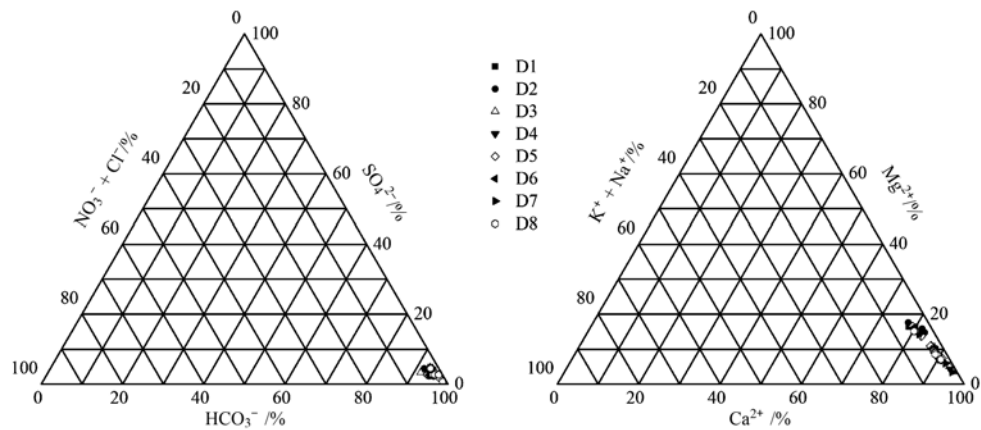


图 3 大龙洞水库水化学三角

Fig. 3 Hydrochemistry triangle in Dalongdong Reservoir

表 1 大龙洞水库各采样水层水化学参数¹⁾

Table 1 Hydrochemistry parameters of each sampling water layer in Dalongdong Reservoir

项目	水深/m					
	0	2.5	5	7.5	10	12.5
<i>T</i> /℃	31.1	30.2	26.9	25.4	24.6	22.0
pH	8.71	8.62	7.56	7.45	7.38	7.33
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.27	13.51	8.89	6.60	6.10	1.14
Chl- <i>a</i> / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	6.81	15.12	10.13	3.02	1.94	0.17
Ca^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	31.75	36.00	69.50	77.00	88.57	77.50
HCO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	118.95	128.10	215.79	237.90	264.04	254.68
Spc/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	183.4	182.8	336.8	372.6	401.7	363.8
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.86	1.22	2.29	2.44	2.91	1.27
SI _c	0.90	0.87	0.31	0.27	0.28	0.12
$p\text{CO}_2/\times 10^{-6}$	245.49	368.50	6 009.32	8 196.00	10 473.78	11 112.23
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}/\text{‰}$	-3.45	-3.92	-9.39	-10.10	-11.53	-9.85

1) 表中每个值为同一水层采样点样品测试平均值

DO 作为水生生物新陈代谢作用、水气交换的产物,可表征水体水生生物新陈代谢作用的强度和方向. 表水层 DO 随水深增加而增加,最大值出现在水下 2.5 m 处为 $13.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,温跃层则呈减小趋势,底层 DO 仅为 $1.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 1). Rice 等^[26]关于饱和 DO 浓度公式如下:

$$\ln(\text{DO}) = -139.3441 + [1.575701 \times 10^5 / (T + 273.15)] - [6.642308 \times 10^7 / (T + 273.15)^2] + [1.243800 \times 10^{10} / (T + 273.15)^3] - [8.621949 \times 10^{11} / (T + 273.15)^4]$$

式中, *T* 为水温 (℃). 依据该公式可以根据水温得到各水层的 DO 饱和趋势线. 从图 4(a) 可以看出表水层水体均处于 DO 饱和状态. 表水层内浮游植物以光合作用为主,释放 O_2 ,使得水体 DO 浓度较高,然而由于夏季表水层接受较高太阳辐射,水温较高, O_2 在水中的溶解度降低,且浮游植物可发生光抑制作用使得实际光合效率最大值出现在水下 2.5 m 水层而非浅表水层,这与泸沽湖、新安江水库的研究结

果类似^[11,13]. 温跃层随水深增加,DO 浓度并未由于水温降低而增加,而是出现下降趋势,但在水下 5 m 水层 DO 仍处于饱和状态,说明水体的真光层可能达到 5 m 甚至更深水层. 随着水深增加光合作用减弱,新形成的有机质在沉降过程中可不断被分解,靠近底层沉积物的分解加重水体耗氧并释放 CO_2 及还原物质,分层结构阻挡上下水体的物质能量交换,表水层产生的 O_2 未能向下传输,引起下层水体耗氧速率远远大于复氧速率,温跃层水体垂直方向下逐渐由缺氧发展为厌氧环境.

Chl-*a* 浓度对浮游植物的生物量具有很好的指示作用,营养盐、水温、降水和水动力影响浮游植物分布^[27,28]. Chl-*a* 在上游水体最大浓度与 DO 出现的最大浓度水层一致,但下游均在水下 5 m 处 Chl-*a* 达到最大值[图 4(b)],其原因可能是水库从上游至下游平均深度由 8.4 m 增至 12.7 m,水深与 Chl-*a* 出现最大值的深度呈显著相关 ($r = 0.88$, $P < 0.01$). 此外,从表 1 可以看出,TN 在表水层消耗较

大,温跃层则逐渐累积而浓度增加. 由于水深差异,水动力过程向水下 5 m 水层补充营养盐,且该水层可能仍为真光层,因此浮游植物生物量大. 而浮游植物的垂向分布同时也影响了水库的透明度,使其最大透明度小于 2.3 m.

如图 4(c)所示,表水层 $p\text{CO}_2$ 基本与当地大气 $p\text{CO}_2$ 持平甚至更低,大气 CO_2 可能向水中扩散未发生脱气. 水体 $p\text{CO}_2$ 整体上表现出随水深增加迅速增加的趋势,对 $p\text{CO}_2$ 与水深(H)进行线性回归分析得到: $p\text{CO}_2 = 992.4H - 135.0$ ($R^2 = 0.93$), $p\text{CO}_2$ 随水深的变化率近似为 $992.4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$,变幅较大. 变化趋势与水温、DO 相反, $p\text{CO}_2$ 与两者均呈负

相关关系($r = -0.94$ 和 $r = -0.60$; $P < 0.01$),表明在热分层影响下,水温、浮游植物新陈代谢强度及方向和有机质的分解使 CO_2 浓度在不同层位差异较大.

表水层 pH 值较高,平均值达 8.66,但有增高的趋势,温跃层 pH 值变化范围为 7.28 ~ 7.73,并随水深增加逐渐降低[图 4(d)]. pH 值与水温、DO 显著正相关($r = 0.90$ 和 $r = 0.80$; $P < 0.01$),与 $p\text{CO}_2$ 显著负相关($r = -0.94$, $P < 0.01$). 表水层 CO_2 浓度较低, pH 值的增加趋势与 DO 的变化趋势一致,浮游植物光合作用强,消耗水体中适量的 CO_2 ,打破了 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{CO}_3\text{-HCO}_3^- \text{-CO}_3^{2-}$ 的平衡过程,引起 pH 值升

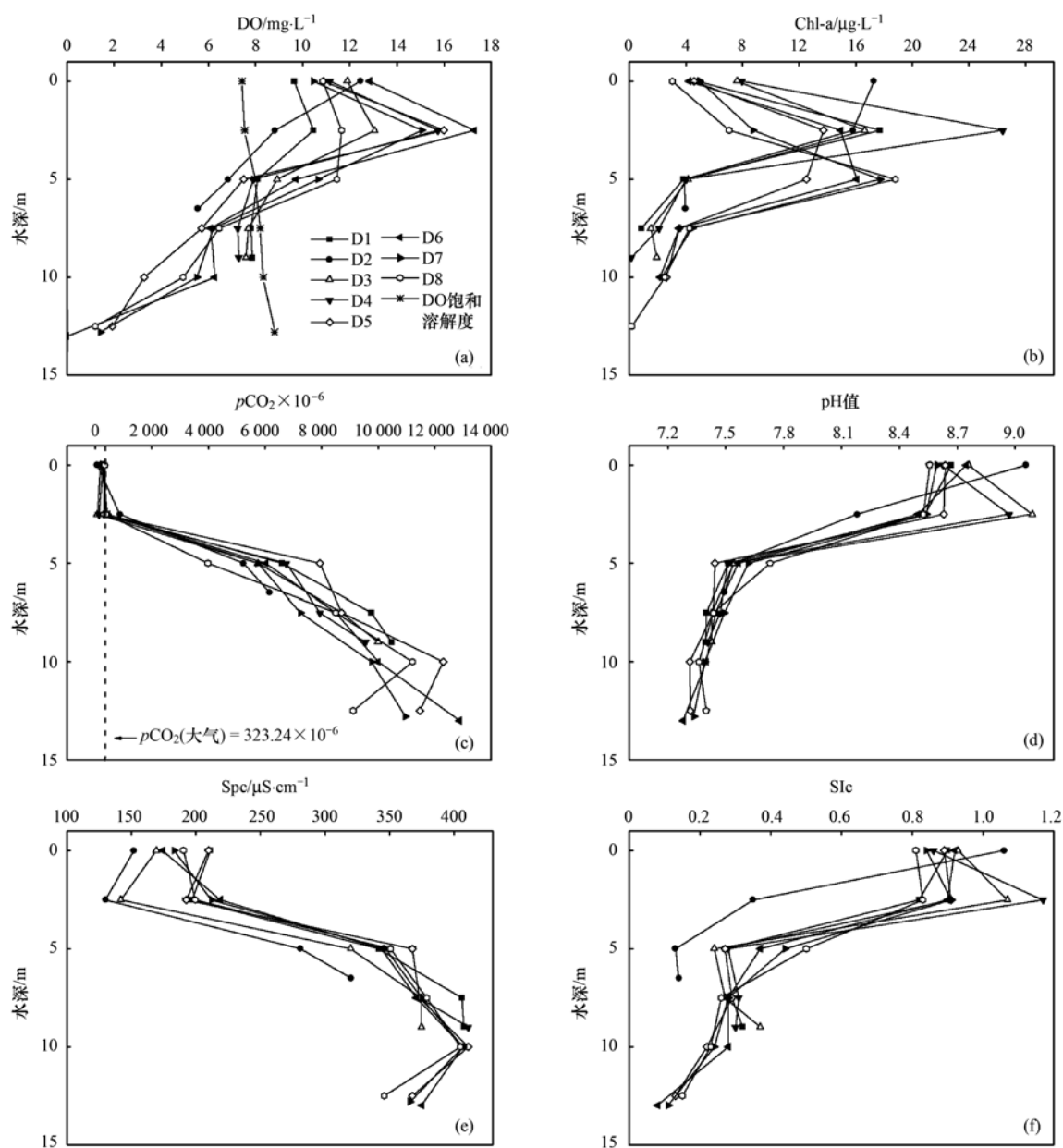


图 4 大龙洞水库水体理化性质垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of physical and chemical properties of water in Dalongdong Reservoir

高,并释放 O_2 . 温跃层内 CO_2 溶解度增加,水体 pCO_2 增加,导致 pH 值降低. S_{pc} 由主要离子强度决定,水库各采样层水体离子主要以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主,S_{pc} 与离子变化趋势一致. 表水层水体 S_{pc} 相对稳定,温跃层随水深增加明显增加[图 4(e)]. 本研究水体为岩溶地下水补给型岩溶水库,由于其特殊的地质环境具有“富钙偏碱高碳酸氢根”的特点,水中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度受碳酸盐平衡体系和生物作用等影响,分层期 S_{pc} 与 pH、水温均呈明显负相关关系($r = -0.95$ 和 $r = -0.88$; $P < 0.01$),这与非岩溶区湖泊分层期温度与电导率呈极显著正相关的研究结果相反^[11].

SI_c 整体上随水深增加呈减小的趋势,表水层变化范围为 0.81 ~ 1.17,平均值为 0.89,随水深增加而增加;温跃层变化范围为 0.08 ~ 0.50,平均值为 0.24,随水深增加而减小. 水库水体在 6 月热分层期处于方解石饱和状态[图 4(f)]. 垂直方向上 SI_c 也与水温变化趋势一致,两者显著相关($r = 0.89$, $P < 0.01$),说明热分层影响各层位水体碳酸盐岩的溶解和沉淀.

2.3 热分层效应影响水库 DIC 垂向分布特征

研究区水体 pH 值介于 7.28 ~ 9.09 之间,此碳酸盐平衡体系控制下, HCO_3^- 占 DIC 的 90% 以上,一般以 HCO_3^- 浓度表征水体溶解无机碳浓度^[17]. 如图 5 所示,DIC 整体上表现出随水深增加逐渐增加

的变化趋势,表水层 DIC 平均浓度为 $2.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,底层平均浓度为 $4.18 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. $\delta^{13}C_{DIC}$ 总体上则呈现偏负的相反趋势, $\delta^{13}C_{DIC(\text{平均})}$ 由表水层的 -3.69‰ 至水下 10 m 处为 -11.53‰ . 表水层 DIC 和 $\delta^{13}C_{DIC}$ 与水深的变化速率分别仅 $0.06 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{m})^{-1}$ 和 $-0.19\text{‰} \cdot \text{m}^{-1}$. 但表水层至温跃层发生较大变化,特别是表水层 2.5 m 至温跃层 5 m 间 DIC 和 $\delta^{13}C_{DIC}$ 变化速率分别达 $0.60 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{m})^{-1}$ 和 $-2.28\text{‰} \cdot \text{m}^{-1}$. 这表明大龙洞水库在热分层影响下不同层位 DIC 和 $\delta^{13}C_{DIC}$ 差异显著.

由于研究区以 C3 植被为主,理论上碳酸参与碳酸盐岩溶蚀形成的地下水中 $\delta^{13}C_{DIC}$ 值约为 -14‰ ~ -11.5‰ ^[29],水库接受地下水补给其水体 DIC 和 $\delta^{13}C_{DIC}$ 值依赖于地下水的 DIC 和其同位素组成. 表水层 $\delta^{13}C_{DIC}$ 值变化范围为 -6.16‰ ~ -2.33‰ ,温跃层 $\delta^{13}C_{DIC}$ 值主要介于 -13.05‰ ~ -9.30‰ 之间,表水层较温跃层 $\delta^{13}C_{DIC}$ 值与理论值存在更大偏差,这表明 $\delta^{13}C_{DIC}$ 在表水层分馏过程较复杂. 对水体 DIC 与 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的相互关系分析得到(图 6),表水层两者无显著相关性($r = -0.02$, $P > 0.05$),温跃层则存在负相关关系($r = -0.55$, $P < 0.01$). 表明表水层除 DIC 外,其他环境因素控制着 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的变化,而温跃层影响 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的环境因素相对单一. 因此受热分层效应影响,各层位 DIC 变化及其分馏过程不同.

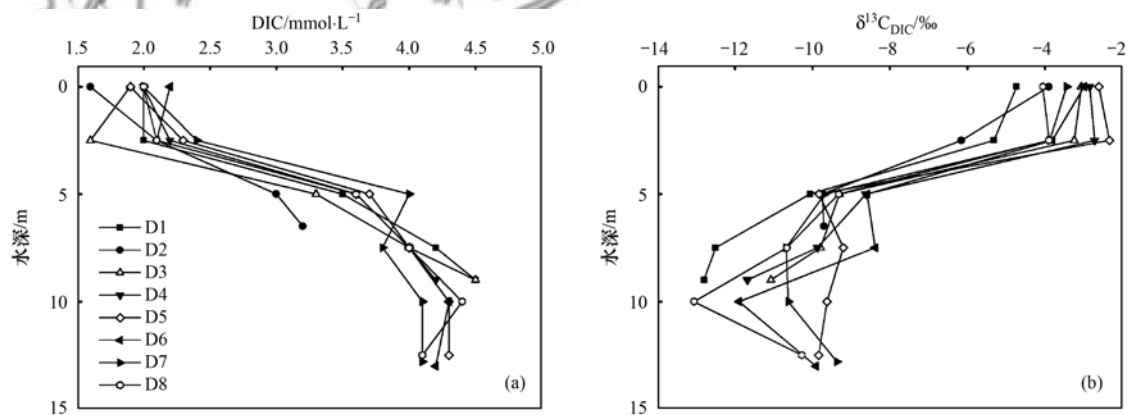
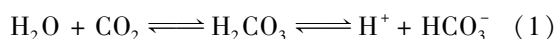


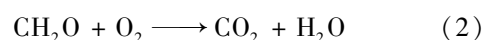
图 5 大龙洞水库 DIC 及 $\delta^{13}C_{DIC}$ 分布

Fig. 5 Distribution of DIC and $\delta^{13}C_{DIC}$ in Dalongdong Reservoir

结合研究区的水文地质背景,其无机碳来源通过 3 个过程. ① CO_2 的溶解:



包括大气 CO_2 、水生生物呼吸作用产生的 CO_2 溶解;②有机质的分解:

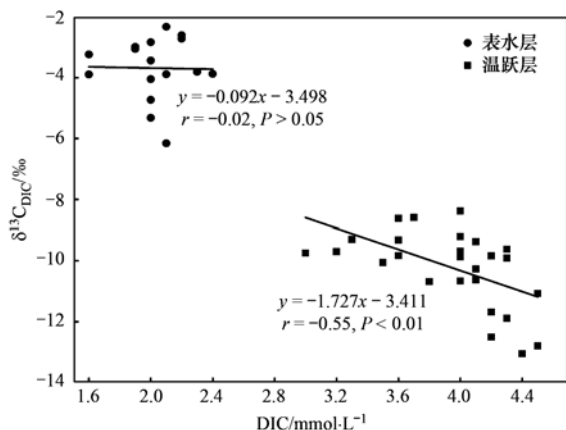


入库河流携带有机质以及库底沉积物的分解;

③碳酸盐岩的溶解与沉淀^[30]:



DIC 的变化过程会使其稳定同位素发生明显

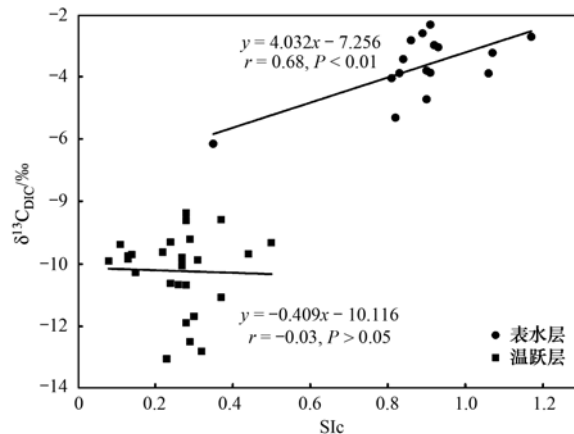
图 6 DIC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相关性Fig. 6 Correlation of DIC with $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in Dalongdong Reservoir

分馏。

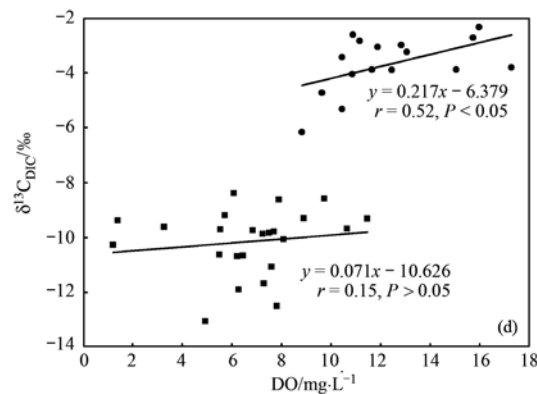
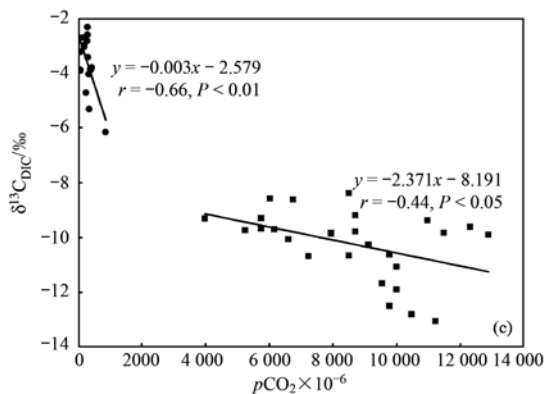
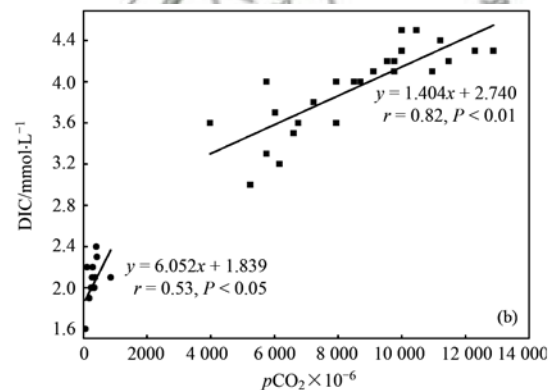
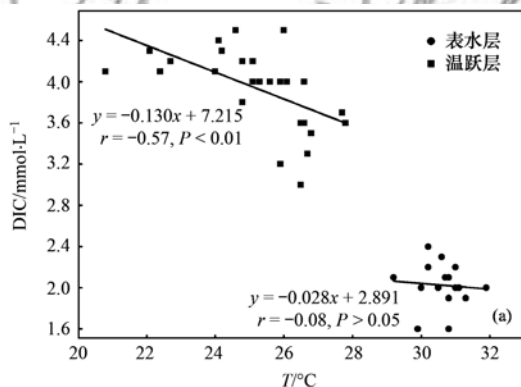
针对表水层而言, 大气 CO_2 溶于水形成的 HCO_3^- , 其 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 $0 \sim 2.5\text{‰}$ ^[31], 可使水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变重。从图 4(c) 看出, 表水层 $p\text{CO}_2$ 低于大气 $p\text{CO}_2$, 导致大气 CO_2 能够进入水体, 同时由于水体本身 DIC 的存在, 使得表水层 DIC 的变化受到多种因素的影响, 因此使得表层水体 DIC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 无显著相关关系。

表层水所有点 $\text{SIc} > 0$ 且 $\text{SIc} > 0.8$, 水体处于方解石过饱和状态, 碳酸钙开始沉积, 反应式 (3) 向左进行, DIC 减少, 此过程中 ^{13}C 趋向富集在碳的高价化

合物中, ^{13}C 偏重的 DIC 从水中移除, 使水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变轻^[32]。但图 5 所示, 表水层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正, 表水层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 SIc 为正相关关系 ($r = 0.68, P < 0.01$) (图 7), 温跃层所有采样点 $\text{SIc} > 0$, SIc 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 无相关性 ($r = -0.03, P > 0.05$), 水体仍处于方解石饱和状态, 未发生沉淀, DIC 浓度的增加与碳酸盐溶解无关。热分层效应下, 碳酸盐岩的沉淀过程对水体碳酸盐平衡体系和无机碳分馏过程影响较小。

图 7 SIc 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相关性Fig. 7 Correlation of SIc and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

表水层 DIC 与温度却无显著相关 ($r = -0.08, P > 0.05$), 反而在温跃层两者存在负相关关系 ($r =$

图 8 DIC 与水温、 $p\text{CO}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $p\text{CO}_2$ 、DO 的相关关系Fig. 8 Correlations of DIC and temperature, $p\text{CO}_2$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ with $p\text{CO}_2$, DO

$-0.57, P < 0.01$) [图 8(a)], 说明分层期间, 温度会影响水中 DIC 浓度, 但在表水层水温不是唯一的影响因素. 水库表水层、温跃层 DIC 与 $p\text{CO}_2$ 均呈正相关关系 ($r = 0.53, P < 0.05; r = 0.82, P < 0.01$), $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $p\text{CO}_2$ 也均为负相关关系 ($r = -0.66, P < 0.01; r = -0.44, P < 0.05$) [图 8(b)、8(c)]. 而 CO_2 在水中的溶解度受到水温、浮游植物新陈代谢及有机质分解影响. 热分层期间上下水体混合受限, 夏季光照充足, 表水层浮游植物光合作用强度大, 并优先利用溶解 CO_2 合成有机碳, 存在约为 20‰~23‰ 的同位素分馏^[18,31]. 在 CO_2 不足的情况下, HCO_3^- 被利用, 这使得 CO_2 和 DIC 减少, $p\text{CO}_2$ 较低. 同时由于藻类在这过程中优先利用 ^{12}C , 使剩余水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正.

图 8(d) 可以看出, 表水层 DO 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 存在相关性 ($r = 0.52, P < 0.05$), 但温跃层两者无相关关系 ($r = 0.15, P > 0.05$). 温跃层光合作用减弱, DO 随着水深增加处于非饱和状态, 水体环境由缺氧至厌氧状态. 呼吸作用大于光合作用, 生物利用 DIC 减少, 同时呼吸作用增强使有机质分解, 由此产生的 DIC 也称呼吸作用 DIC^[33], 该过程不存在较大的同位素分馏, 但释放出富集轻同位素的 DIC. 此外, 有机质颗粒在沉降过程以及在沉积物表层中发生降解, 反应式(2)向正方向进行, 并释放大量 ^{12}C , 使得具偏负 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的 DIC 在温跃层聚集. 因此随着深度增加, 库底 DIC 浓度增加, $p\text{CO}_2$ 较高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值更偏负.

3 结论

(1) 水库水体在研究时段内出现热分层, 水温形成的密度分层限制上下水体交换, 各层水体 DO、pH、SpC 和 DIC 等物理化学性质差异较大.

(2) Chl-a 和 DO 浓度沿垂向的分布并不是在水体表面达到最大值, 而是在水面以下 2.5 m 或者 5 m 处达到最大值, 这可能与水库深度及光抑制作用有关, 浮游植物的垂向分布同时也影响水库水体的透明度.

(3) DIC 浓度随水深增加而增加, 而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 则随水深增加呈变轻趋势. 分层导致表水层和温跃层无机碳变化过程及影响机制不同. 碳酸盐岩的沉淀过程对水体碳酸盐平衡体系和无机碳分馏过程影响有限. 表水层水温较高, DIC 浓度低, 并主要受生物作用影响, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏正. 温跃层 $p\text{CO}_2$ 较高, 受呼吸作

用和有机质分解影响, DIC 浓度增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏负.

(4) 本文仅局限于讨论夏季水库水体垂直方向上生物地球化学特征, 缺乏时空尺度上的分析对比, 在后续研究中需要进一步探讨.

参考文献:

- [1] 毛战坡, 王雨春, 彭文启, 等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 134-140.
Mao Z P, Wang Y C, Peng Y Q, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 134-140.
- [2] 王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 54-60.
Wang Y C, Zhu J, Ma M, et al. Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon-reservoir, southwestern China[J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(1): 54-60.
- [3] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 310-315.
Cao C J, Qin Y W, Zheng B H, et al. Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 310-315.
- [4] Elçi Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. Limnology, 2008, 9(2): 135-142.
- [5] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin é, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate[J]. BioScience, 2000, 50(9): 766-775.
- [6] Fearnside P M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: controversies provide a springboard for rethinking a supposedly 'clean' energy source. An editorial comment[J]. Climatic Change, 2004, 66(1-2): 1-8.
- [7] Deshmukh C. Greenhouse gas emissions (CH_4 , CO_2 and N_2O) from a newly flooded hydroelectric reservoir in subtropical South Asia: the case of Nam Theun 2 reservoir, Lao PDR [D]. Toulouse: Université Paul Sabatier, 2013.
- [8] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1101-1108.
Lin Q Q, Hu R, Duan S S, et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [9] Branco C W C, Rocha M I A, Pinto G F S, et al. Limnological features of Funil Reservoir (R. J., Brazil) and indicator properties of rotifers and cladocerans of the zooplankton community[J]. Lakes & Reservoirs Research and Management, 2002, 7(2): 87-92.
- [10] 韩志伟, 刘丛强, 吴攀, 等. 大坝拦截对河流溶解组分化学组成的影响分析——以夏季乌江渡水库为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 361-367.
Han Z W, Liu C Q, Wu P, et al. Damming effect on water dissolved chemistry components—a case study of Wujiangdu reservoir water in summer, southwest China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(4): 361-367.
- [11] 文新宇, 张虎才, 常凤琴, 等. 泸沽湖水体垂直断面季节性

- 分层[J]. 地球科学进展, 2016, **31**(8): 858-869.
- Wen X Y, Zhang H C, Chang F Q, *et al.* Seasonal stratification characteristics of vertical profiles of water body in Lake Lugu[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, **31**(8): 858-869.
- [12] 夏品华, 李秋华, 林陶, 等. 贵州高原百花湖水库湖沼学变量特征及环境效应[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1660-1669.
- Xia P H, Li Q H, Lin T, *et al.* Limnological characteristics and environmental effects of the Baihua reservoir in Guizhou plateau, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1660-1669.
- [13] 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.
- Wu Z X, Liu M L, Lan J, *et al.* Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(3): 460-465.
- [14] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach[J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [15] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 李思亮, 刘丛强, 陶发祥, 等. 碳同位素和水化学在示踪贵阳地下水碳的生物地球化学循环及污染中的应用[J]. 地球化学, 2004, **33**(2): 165-170.
- Li S L, Liu C Q, Tao F X, *et al.* Chemical and stable carbon isotopic compositions of the ground waters of Guiyang city, China: implications for biogeochemical cycle of carbon and contamination[J]. *Geochimica*, 2004, **33**(2): 165-170.
- [17] 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.
- [18] Myrbo A, Shapley M D. Seasonal water-column dynamics of dissolved inorganic carbon stable isotopic compositions ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) in small hardwater lakes in Minnesota and Montana[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(11): 2699-2714.
- [19] 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.
- Yu Y X, Liu C Q, Wang F S, *et al.* Dissolved inorganic carbon and its isotopic differentiation in cascade reservoirs in the Wujiang drainage basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(21): 3371-3378.
- [20] 李干蓉, 刘丛强, 陈椽, 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.
- Li G R, Liu C Q, Chen C, *et al.* Dissolve inorganic carbon and its carbon isotope composition in cascade reservoir of the Maotiao River during summer and autumn[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 2891-2897.
- [21] 喻元秀, 汪福顺, 王宝利, 等. 溶解无机碳及其同位素组成特征对初期水库过程的响应——以新建水库(洪家渡)为例[J]. 矿物学报, 2009, **29**(2): 268-274.
- Yu Y X, Wang F S, Wang B L, *et al.* Response of dissolved inorganic carbon and its isotopic spatial and temporal characteristics to the earlier reservoir process: a case study on a new reservoir (Hongjiadu)[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, **29**(2): 268-274.
- [22] 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.
- Liu W, Pu J B, Yu S, *et al.* Preliminary research on the feature of dissolved inorganic carbon in Wulixia Reservoir in summer, Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2959-2966.
- [23] 李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2833-2842.
- Li J H, Pu J B, Yuan D X, *et al.* Variations of inorganic carbon and its impact factors in surface-layer waters in a groundwater-fed reservoir in karst area, SW China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2833-2842.
- [24] 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.
- [25] Wigley T M L. WATSPEC: a computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions[M]. Norwich, England: Geo Abstracts for the British Geomorphological Research Group, 1977.
- [26] Rice E W, Baird R B, Eaton A D, *et al.* Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. Washington, DC: American Public Health Association, the American Water Works Association and the Water Environment Federation, 2012.
- [27] Schindler D W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(1, part 2): 356-363.
- [28] Reynolds C S, Irish A E, Elliott J A. The ecological basis for simulating phytoplankton responses to environmental change (PROTECH)[J]. *Ecological Modelling*, 2001, **140**(3): 271-291.
- [29] Li X D, Liu C Q, Harue M, *et al.* The use of environmental isotopic (C, Sr, S) and hydrochemical tracers to characterize anthropogenic effects on karst groundwater quality: a case study of the Shuicheng Basin, SW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(12): 1924-1936.
- [30] Li S L, Liu C Q, Li J, *et al.* Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of Southwest China: isotopic and chemical constraints[J]. *Chemical Geology*, 2010, **277**(3-4): 301-309.
- [31] Hélie J F, Hillaire-Marcel C, Rondeau B. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River—isotopic and chemical constraint[J]. *Chemical Geology*, 2002, **186**(1-2): 117-138.
- [32] Dreybrodt W. Processes in karst systems[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1988.
- [33] van Breugel Y, Schouten S, Paetzel M, *et al.* The impact of recycling of organic carbon on the stable carbon isotopic composition of dissolved inorganic carbon in a stratified marine system (Kyllaren fjord, Norway)[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, **36**(8): 1163-1173.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)