

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗砷内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征

卢晓漩^{1,2}, 李强^{1,3*}, 靳振江⁴, 彭文杰^{1,4}, 房君佳^{1,2}, 黄炳惠^{1,4}, 宋昂¹

(1. 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; 2. 西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 桂林 541004; 4. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006)

摘要: 为更全面、准确把握岩溶碳循环特征, 本文在获取桂林五里峡水库丰水期水化学及溶解有机碳(DOC)分布特征的基础上, 还借助紫外吸收光谱技术对水体有机质分子量大小等进行分析。结果表明, 五里峡水库丰水期水化学类型仍为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型, 水体营养状态为中等营养型, 未达到富营养状态; 五里峡水库丰水期 DOC 质量浓度比枯水期低, DOC 为 TOC 的主要组成部分, DOC 质量浓度在垂直方向上呈表层至底层降低的趋势, 这是 Chl-a、DIC 等水环境因子综合影响的结果; $S_{275-295}$ 、 M 、 SUVA_{254} 、 E_{253}/E_{203} 吸收光谱特征参数表征下的库区水体有机质以小分子量物质为主, 富里酸所占比例高, 腐殖酸所占比例低, 芳香性较弱, 苯环上脂肪族等非极性官能团含量较多, 表明库区水体 DOC 内源特征较强, 有机质生物活性较好, 在水库碳循环中发挥了积极作用。

关键词: 岩溶区; 岩溶水化学; 溶解有机碳; DOM 吸收光谱; 五里峡水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2075-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708032

Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China

LU Xiao-xuan^{1,2}, LI Qiang^{1,3*}, JIN Zhen-jiang⁴, PENG Wen-jie^{1,4}, FANG Jun-jia^{1,2}, HUANG Bing-hui^{1,4}, SONG Ang¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: In recent years, scientists have focused on the karst carbon cycle. To better understand the hydrochemical characteristics and the physical-chemical properties of DOC in the wet season in karst areas, the water chemistry and DOC distribution characteristics in Wulixia reservoir were analyzed. The molecular weight of the water organic matter was analyzed based on the UV absorption spectrum. The results showed that the water chemistry of Wulixia reservoir was $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, the nutrient status of the water body was of the medium nutrient type, and the water maintained a good quality. The DOC mass concentration was lower in the wet season than in the dry season, and DOC was the main component of TOC. The DOC mass concentration tended to decrease from the surface to the bottom in a vertical direction. Chl-a and DIC were the main factors affecting the DOC vertical distribution. The organic matter in the reservoir area related to the absorption spectrum parameters of $S_{275-295}$, M , SUVA_{254} , and E_{253}/E_{203} showed that the water was dominated by constituents with small molecular weight, a high proportion of fulvic acid, low proportion of humic acid, and weak aroma. The results showed that the organic matter in the reservoir area was readily consumed by microbial bioactivity and that it played an active role in the carbon cycle of the reservoir. It also showed that the DOC endogenous characteristics of the reservoir were strong and provided a sufficient carbon source for heterotrophic microbes.

Key words: karst area; karst hydrochemistry characteristics; DOC; absorption spectrum; Wulixia reservoir

日趋严峻的气候变化问题一直是全球关注的焦点, 与温室气体 CO_2 密切相关的全球碳循环, 就成了科学家们研究的热点问题之一。在地球的各个圈层界面上, 以 CO_2 -水-碳酸盐岩耦合的岩溶作用作为全球碳循环的一部分, 在调节温室气体浓度方面发挥着重要的作用^[1,2]。但传统的碳循环模式把岩溶地质作用认定为一种纯无机的过程^[3], 以致于岩溶作用参与的碳循环被质疑^[4]。然而, 最新研究结

果表明, 岩溶作用并不是纯无机的地质过程, 而是无机、有机共同参与的过程, Liu 等^[5]研究珠江得出碳酸盐岩风化溶解产生溶解无机碳(dissolved

收稿日期: 2017-08-04; 修订日期: 2017-11-15

基金项目: 广西自然科学基金项目(2015GXNSFGA139010, 2014GXNSFCA118012); 中国地质科学院项目(YW201505); 中国地质调查局项目(DD20160305-05)

作者简介: 卢晓漩(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶学与环境变化, E-mail: 928369785@qq.com

* 通信作者, E-mail: glqiangli@163.com

inorganic carbon, DIC) 可被藻类等水体浮游植物通过产光合作用转化为溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)固定下来,从而达到增汇的作用; Li 等^[6]认为岩溶水体中的好氧不产氧光合异养细菌(AAPB)等微型生物对岩溶水体有机碳库有重要的贡献. 这些研究结果表明:岩溶地质作用是一种生物广泛参与的过程,并为岩溶有机碳研究及其与岩溶碳汇的关系提供了新的方向.

目前国内外学者对岩溶水体 DOC 的研究主要集中在大江和地下河,杨明星等^[7]运用生物标志物对有机碳进行了研究并对有机碳来源进行识别;梁作兵等^[8]通过对正构烷烃、脂肪酸等的研究来判读岩溶区青木关地下河的有机质来源,并得出细菌等微生物的相对贡献量较大的结论. 然而在岩溶区借助荧光、吸收系数等方法研究有机质的报道较少. 目前该技术的运用主要是在非岩溶区的一些湖泊,譬如:张运林等^[9]运用吸收光谱技术对太湖不同湖区的有色溶解性有机质(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)组成和来源进行了分析,并得出夏季浮游植物降解产物应当是水体 CDOM 的重要来源;陈晓玲等^[10]运用吸收光谱系数对长江中下游湖泊的 CDOM 吸收特性及来源进行了分析,发现梁子湖 CDOM 主要来源于浮游植物的降解. 我国西南岩溶区分布有众多的湖泊和筑坝水库,湖泊(水库)作为陆地淡水水体的关键部分,水库有机碳循环是区域碳循环的重要组成部分,是全球碳循环研究的基础^[11]. 湖泊(水库)中的有机碳(TOC)主要以 DOC 和颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)的形式存在,是湖泊(水库)碳的重要构成部分^[12]. 其中 DOC 是湖泊(水库)水体中最大的有机碳库,相当于大气中的碳储量,在陆地水体碳循环中起着至关重要的作用^[13]. 由于湖泊 DOC 的成分结构比较复杂,分析难度大,所以对湖泊 DOC 的研究远不及对无机碳的研究^[14]. 已有研究表明不同来源的碳源在物质化学结构组成和分子量级等方面具有显著差异,进而影响微型生物的可利用性和碳素在水体中的迁移转化效率^[15]. 那么岩溶区水库丰水期水体的水化学情况及 CDOM 吸收光谱表征下的 DOC 结构和来源特征如何呢?

为此,本文以桂林五里峡水库为研究对象,分析岩溶区水库丰水期水体水化学特征,并运用紫外光谱吸收这一技术对 DOC 物质化学结构组成和分子量进行了初步探讨,揭示岩溶区水库 DOC 的生物地球化学特征以及 DOC 来源,以期对岩溶

水库 DOC 研究以及寻找岩溶遗漏汇提供基础理论依据.

1 研究区概况

五里峡水库坐落在广西壮族自治区兴安县湘漓镇,有着 45 a 的库龄,是一座以灌溉功能为主的大型水库,水库补给源为上游的湘江支流漠川河,库区分布有大面积的碳酸盐岩,岩溶区面积大约占到库区面积的一半^[16]. 研究区年平均降水量为 1 697.2 mm,在 4~6 月是丰水期,丰水期月均降水量为 267.3 mm;11 月到次年 1 月是枯水期,枯水期月均降水量为 67.7 mm^[16].

2 材料与方法

2.1 野外样品的采集

作者于 2017 年 4 月在桂林五里峡水库按照库区来水河流、库中、库尾的顺序设置 12 个采样站点,进行分层采样,共采集样品 34 个(图 1). 五里峡水库是一座综合功能型水库,库区水位除了受大气降雨影响外,还受库区人为调控的影响,五里峡水库在此阶段达到 1 a 中的较高水位,可以对其进行分层采样. 水样采集使用德国 HYDRO-BIOS 公司生产的湖泊分层采样器进行,12 个采样站点中有 4 个站点受水深限制只采到表层水样,其它 8 个采样点进行了分层采样,共计采集水样 34 个. 其中每个样点采集水样 1 500 mL 用于测试阴阳离子及其它水化学因子;用棕色玻璃瓶采集水样 600 mL 用于 TOC、DOC 和 CDOM 吸光度的测定,其中 DOC 和 CDOM 吸光度测定所需水样是经 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤后的水样.

2.2 样品的测定

水体阴阳离子测定在国土资源部岩溶地质资源环境监督检查中心进行,阳离子和 TP 的测定采用美国生产的 IRIS Intrepid II XSP 全谱直读等离子体光谱仪,阴离子的测定采用瑞士生产的万通 883 离子色谱仪,阴阳离子分析误差 <5%. HCO_3^- 测定采用碱度试剂盒(德国 Merck 公司)现场滴定,测试精度为 0.1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 总有机碳(TOC)、溶解性有机碳(DOC)采用德国耶拿公司(Analytik Jena AG)生产的 MultiN/C3100 碳氮分析仪测定,精度为 0.001 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 透明度(SD)采用直径 30 cm 的黑白赛氏盘现场测定,水样的温度、pH、总溶解性固体(TDS)等基本水质指标(表 1)使用多参数水质检测仪 YSI EXO(美国 YSI 公司)现场测定.

表 1 五里峡水库表层水水化学特征

Table 1 Physico-chemical indicators in the karst water samples

样点名称	<i>T</i> /℃	pH	TDS /mg·L ⁻¹	Chl-a /μg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	TOC /mg·L ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹
WLX01	13.10	7.61	49.22	3.40	59.15	1.70	1.64
WLX02	13.15	7.43	49.21	3.10	59.15	1.45	1.40
WLX03	13.15	7.64	50.43	3.15	55.20	1.49	1.38
WLX04	13.11	7.71	48.49	3.21	55.20	1.79	1.74
WLX05	13.13	7.82	48.19	3.20	55.20	1.89	1.81
WLX06	12.77	7.94	46.15	3.20	51.26	1.72	1.48
WLX07	13.17	7.79	49.55	3.90	55.08	1.75	1.55
03	12.96	7.56	48.91	3.10	55.20	1.70	1.52
04	13.10	7.89	47.77	3.70	59.15	1.73	1.61
05	13.11	7.89	45.65	3.50	53.23	1.49	1.42
SD	13.80	8.04	45.63	4.60	57.18	1.86	1.75
08	13.53	7.84	50.72	1.47	61.12	1.90	1.78

TSIM 指数采用 0~100 的连续数值对湖泊营养状态分级,评价标准为:TSIM<37 为贫营养,38<TSIM<53 为中营养,TSIM>54 为富营养^[18].

$$\text{TSIM(Chl-a)} = 10 \times [2.46 + \ln(\text{Chl-a})/\ln 2.5]$$

$$\text{TSIM(SD)} = 10 \times [2.46 + (3.69 - 1.53 \ln \text{SD})/\ln 2.5]$$

$$\text{TSIM(TP)} = 10 \times [2.46 + (6.71 + 1.15 \ln \text{TP})/\ln 2.5]$$

$$\text{综合 TSIM} = [\text{TSIM(Chl-a)} + \text{TSIM(SD)} + \text{TSIM(TP)}]/3$$

式中,TSIM(Chl-a)、TSIM(SD)和 TSIM(TP)分别是以 Chl-a (μg·L⁻¹)、透明度 (m)、总磷 (mg·L⁻¹)为基准的营养状态指数.

DOM 光学性质的测定在岛津 UV-2550 紫外分光光度计上进行,测定 200~800 nm 波长的吸光度 *A*(λ),采用如下公式计算[式(1)]和校正[式(2)] DOM 的吸收系数^[19]:

$$a'(\lambda) = 2.303 \cdot A(\lambda)/r \tag{1}$$

$$a(\lambda) = a'(\lambda) - a'(700) \cdot \lambda/700 \tag{2}$$

式中,*a'*(λ)、*a*(λ)分别表示未经过散射校正的波长和经过散射校正的波长(m⁻¹);*A*(λ)表示吸光度;λ 为测定波长(nm);*r* 为光程路径(m).为了方便与同类研究进行对比,本研究采用 355 nm 处吸收系数 *a*(355)表示 CDOM 的相对浓度^[20].

S 值的确定:DOM 吸收光谱从紫外到可见光随波长的增加大致呈现指数衰减规律,一般用公式(3)来进行表征^[21]:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \tag{3}$$

式中,λ₀ 为参照波长(nm),本研究选取 440 nm 作

为参照波长;*S* 为指数函数曲线光谱斜率,单位为 μm⁻¹.

特征参数 SUVA₂₅₄ = *a*(254)/[DOC],为 254 nm 处吸光系数与 DOC 浓度比值^[22]; *E*₂₅₃/*E*₂₀₃ 是 DOM 在 253 nm 处的吸光度与 203 nm 处的吸光度的比值^[23];DOM 吸收光谱参数 *S*_{275~295} 为 275~295 nm 波段光谱斜率^[21]; *M* 值为 250 nm 和 365 nm 处吸光度比值^[22].

2.3 分析与统计

利用 Origin 9.0 及 CorelDRAWx7 软件进行样点图制作;运用 SPSS 20.0 软件和 Excel 进行数据计算及文中统计图的制作;在 Matlab 中进行 *S* 值计算;用 AqQA 软件绘制水化学三角图.

3 结果与讨论

3.1 基本水化学特征

通过计算阴阳离子数据发现,HCO₃⁻ 含量占到阴离子总量的约 87%,Ca²⁺ 占到阳离子总量的约 78%,Mg²⁺ 占到约 17%,K⁺、Na⁺ 分别占 3%、2%,SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻ 分别占 6%、5%、2%,图 2 是五里峡水库丰水期水样的水化学三角图:可以看出 HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 是整个库区水体的主要离子,由此可以知五里峡水库丰水期水化学类型为舒卡列夫分类法中 HCO₃-Ca·Mg 型,水体受碳酸盐岩风化作用控制,水岩作用显著.

为了解库区水体的营养状态本研究采用修正的卡尔森营养状态指数(TSIM)评价了五里峡水库丰水期的水体营养化类型,通过计算得出五里峡水库

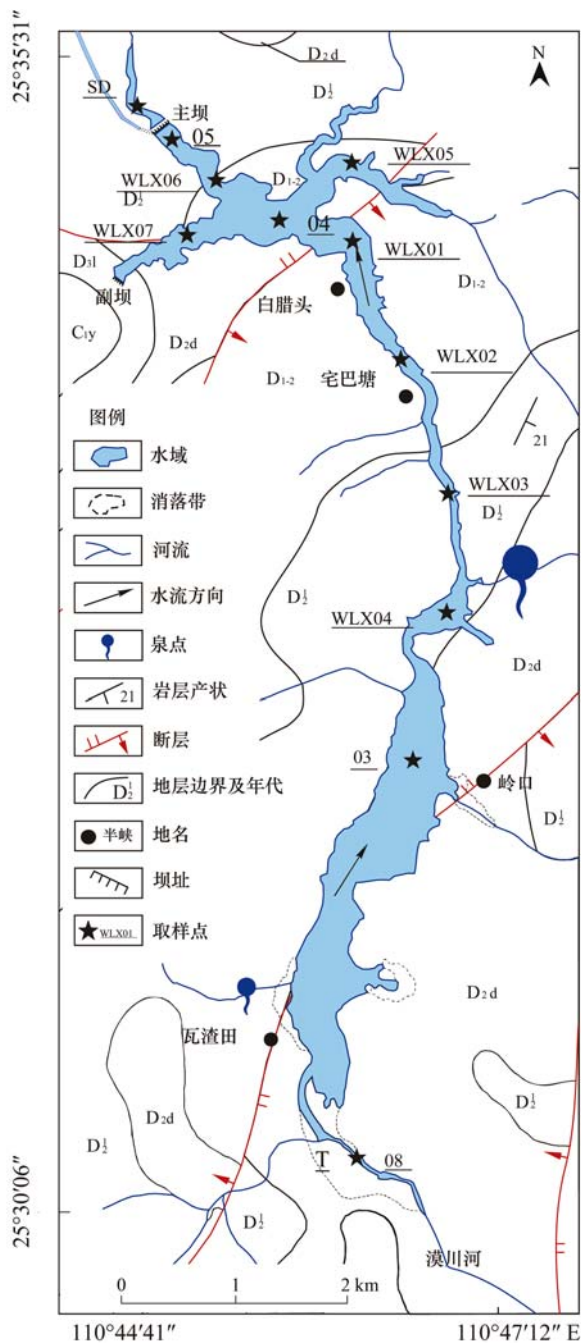


图1 五里峡水库库区示意^[17]

Fig. 1 Schematic map of hydrogeology in Wulixia reservoir

丰水期水体 TSIM (图 3) 值介于 41 ~ 48, 平均值约为 44, 结合修正的卡尔森营养状态指数 (TSIM) 评价标准可得: 五里峡水库丰水期水体营养状态为中等营养型, 该结果与宋昂等^[24] 在冬季五里峡坝前水体得出的结果相似, 但 TSIM 值略大, 出现这一现象的原因可能是由于随着水体温度升高, 水体中的微型浮游生物增多, 从而导致 Chl-a 浓度升高、水体能见度降低 (SD 值变小), 这样就使得 TSIM 值相对偏高。

3.2 DOC 分布特征分析

Wetzel^[25] 认为要想全面了解湖泊在全球碳循环中的重要角色, 就需要对 DOC 进行准确估算, 他发现湖泊水体有机碳中 90% ~ 95% 以 DOC 的形式存在, 五里峡水库丰水期样品中 TOC 质量浓度介于 1.2 ~ 1.98 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 1.58 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; DOC 值介于 1.1 ~ 1.81 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 1.46 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DOC 质量浓度占到 TOC 质量浓度的约 92% (图 4), 说明该研究区 TOC 中的主要物质为 DOC, 由此可知水体 DOC 的研究是湖泊水体有机碳研究的关键。此外五里峡水库丰水期 TOC 和 DOC 质量浓度比枯水期^[17] 要低 (图 5), 出现这种情况可能是因为水库丰水期水量多, 降水和流量的增加对水体 TOC 和 DOC 的稀释作用较强, 从而导致 TOC 和 DOC 质量浓度降低。该结果与叶琳琳等^[26] 太湖西北湖区得出的 DOC 分布规律非常相似。王巧莲等^[27] 在重庆雪玉洞地下河对 TOC 进行研究也发现稀释效应导致夏季地下水 TOC 的浓度降低。滕明德等^[28] 在红枫湖的研究也发现 TOC 在丰水期所占比例最小, 枯水期最高, 并认为有机质含量增加可能与枯水期流域内人为污水排放汇入支流的比例相对增加有关。由前文可知五里峡水库处于中等营养水平, 几乎没有人为污水的汇入, 因而五里峡水库 TOC、DOC 出现丰水期浓度低的情况应与水体的稀释效应有关。

图 6 是五里峡水库水体理化指标纵向分布。可以清楚地看到 TOC 和 DOC 值在垂直方向上显示出表层 (0 ~ -5 m)、中层 (-5 ~ -15 m) 浓度较高, 下层 (-15 ~ -20 m) 浓度较低, 整体呈表层至底层降低的特征, 这一分布规律与傅平青等^[29] 在百花湖、红枫湖 (岩溶高原湖泊) 的研究结果相似。前人研究认为湖泊 (水库) DOC 浓度呈现“上层高、下层低”的特征是上层水体具有较高的生产力, 浮游微型生物生长旺盛导致^[30]。Chl-a 是水体光合微型生物等现存量的重要指标^[31], 水体中 Chl-a 的浓度水平及变化特征可以反映水体中光合微型生物的丰度、生物量以及变化规律^[32]。五里峡水库 Chl-a 值介于 1.47 ~ 4 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 2.9 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 五里峡库区水体表层透光性好 ($\text{SD} < 3.2 \text{ m}$), 光照、溶解氧相对充足, 有利于水体光合浮游微型生物生长, 所以表层 Chl-a 浓度较高; 水库水体底层光照、溶解氧比较弱, 从而限制了水体光合浮游微型生物生长, 所以 Chl-a 浓度较低, 纵向分布上 Chl-a 呈现出表层向底层降低的趋势, 该趋势与罗宜富等^[33]

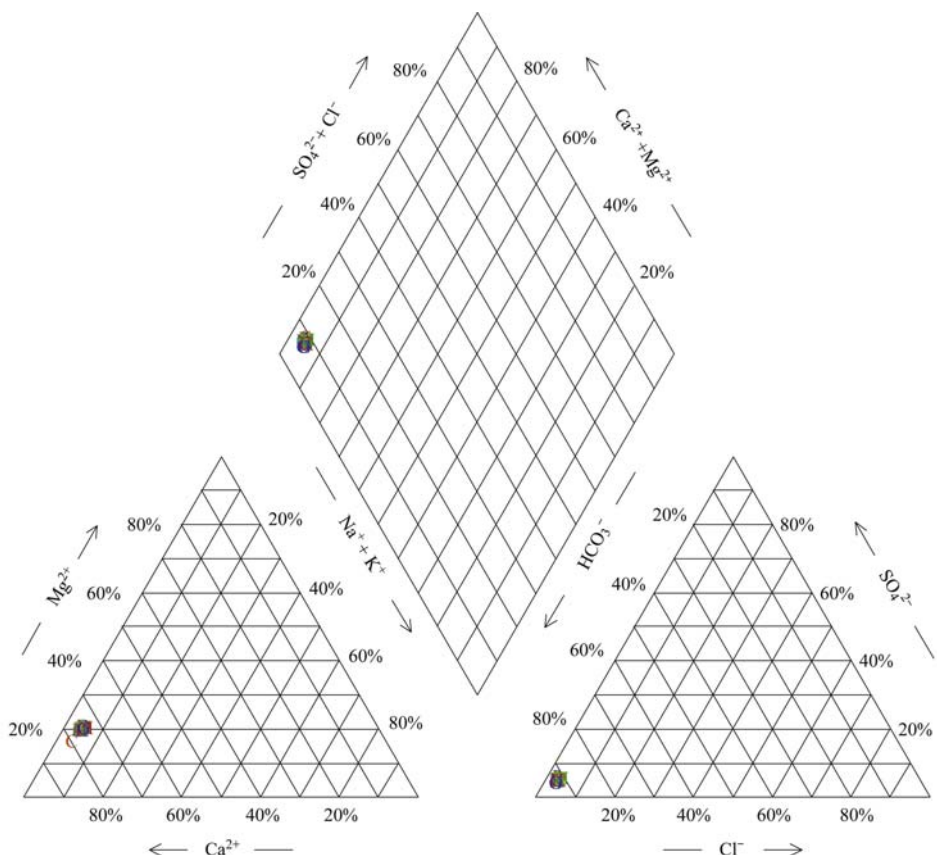


图2 五里峡水库丰水期水化学 Piper 图

Fig. 2 Ternary diagram for major ion composition in Wulixia reservoir

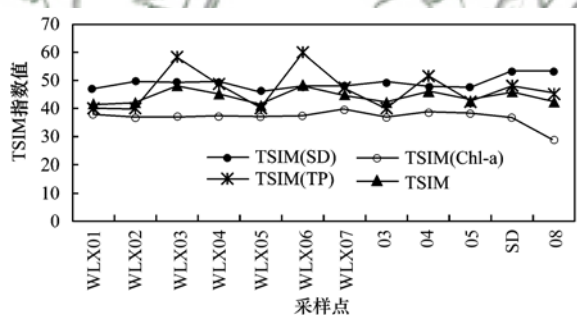


图3 五里峡水库卡尔森营养状态指数

Fig. 3 Carlson trophic status index in Wulixia reservoir

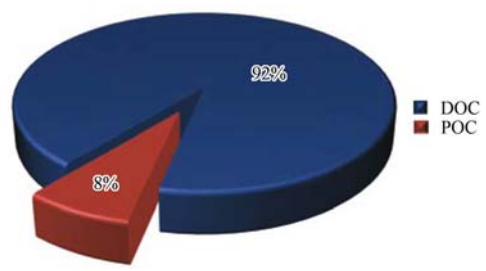
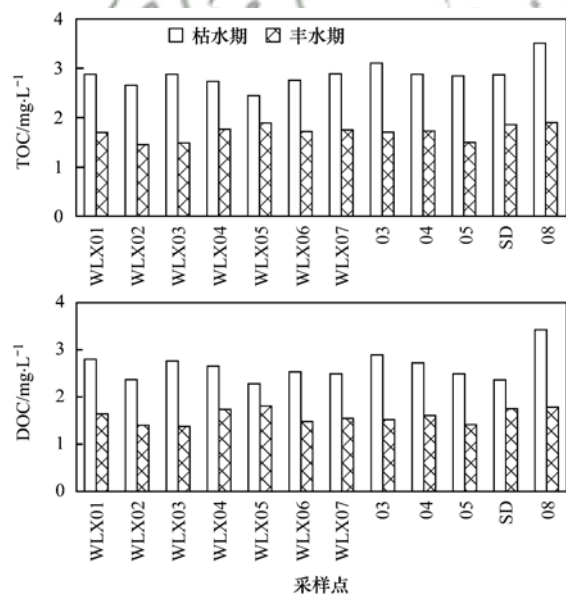


图4 五里峡水库丰水期 TOC 构成比例

Fig. 4 TOC structure in the wet season in Wulixia reservoir



TOC、DOC 枯水期数据来自文献[17]

图5 五里峡水库枯水期和丰水期 TOC、DOC 柱状图

Fig. 5 TOC and DOC bar charts in the wet and dry seasons in Wulixia reservoir

在贵阳市阿哈水库以及张竞予等^[34]在官厅水库的研究结果相似。由于水体光合浮游微生物生长会

释放 DOC^[5]，五里峡水库表层浮游生物会释放 DOC 到水体中，所以就导致表层水体 DOC 浓度相对较高，这应是影响 DOC 垂向分布特征的原因之

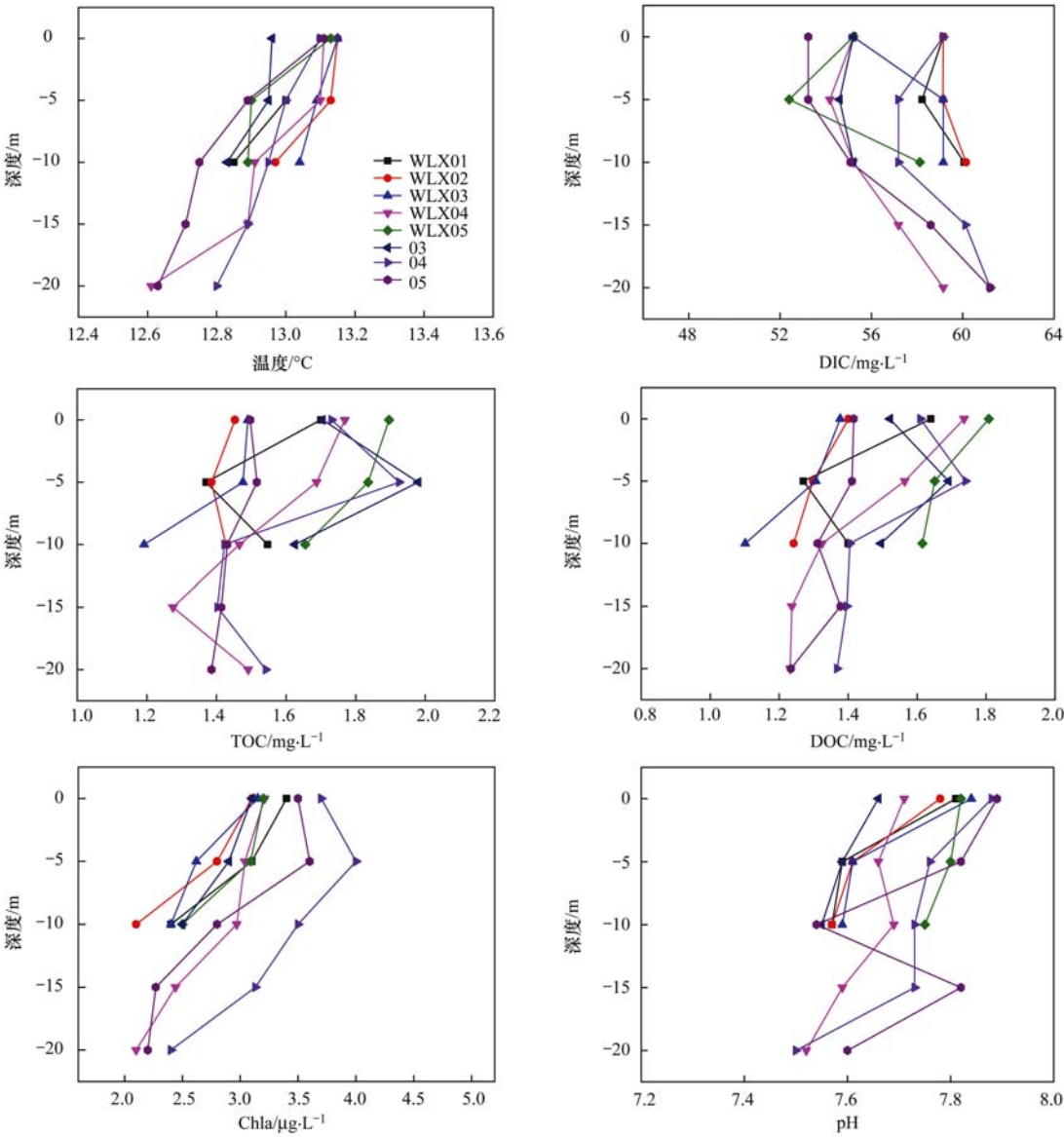


图 6 五里峡水库水体理化指标纵向分布

Fig. 6 Vertical distribution of the water physical-chemical properties in Wulixia reservoir

表 2 水体主要理化指标间的相关关系

Table 2 Correlation of main hydrochemical parameters in Wulixia reservoir

	<i>T</i>	pH	DIC	TOC	DOC
pH	-0.013	1			
DIC	-0.221	-0.152	1		
TOC	0.227	0.403 *	-0.433 *	1	
DOC	0.347	0.316	-0.437 *	0.936 **	1
Chl-a	0.573	0.096	-0.462 *	0.458 *	0.574 **

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

一, 并且从表 2 可以看出 DOC 与 Chl-a 在 0.01 水平上存在显著正相关关系. 另外, 五里峡水库丰期水温值介于 12.53 ~ 13.17℃, 平均值为 13.1℃, 温度处于较稳定水平, 从水体温度的分层数据来

看, 水体温度呈现出随深度的增加而递减的趋势, 表层温度比底层高, 表层适宜的温度条件有利于藻类和细菌的大量繁殖, 使得表层水体生物活动增强, 这些生物向水体中分泌的 DOC 也相应增多, 所

以就使得表层 DOC 含量比底层高. 水库 pH 值介于 7.43 ~ 8.04, 均值为 7.7, 水体处于偏碱性状态, 此环境也为光合微生物生长活动提供了良好的基础, 垂直方向上 pH 值同样呈现出表层较高的特征, 已有研究证明水体微生物光合作用的进行会大量吸收水中的 CO_2 , 释放出 O_2 , 导致水体 pH 值增加^[35], 五里峡水库表层水体微生物光合作用较强, 所以使得五里峡水库 pH 值呈现出表层较高的特征. 此外水库 DIC 值介于 51.26 ~ 61.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 57.11 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. DIC 值呈现出表层较低的特征, 已有研究表明岩石风化作用产生的 DIC 可以被水库、河流和海洋中的水生光合生物通过光合作用转化成有机碳^[5], 表层水体生物活动比较活跃, 表层水体中的 DIC 就会被微生物光合作用转化为 DOC, 从而使得表层水体中 DIC 浓度值变小, DOC 的浓度值变大, 所以 DIC 对 DOC 垂向分布特征也有一定得影响, DIC 与 DOC 在 $\alpha = 0.05$ 的水平上存在显著负相关关系(表 2)也是很好的印证. 通过以上分析可知 DOC 垂向分布特征是多种环境因子综合作用的结果.

3.3 有机质吸收光谱特征

由上文已知五里峡水库丰水期 DOC 质量浓度均值 1.46 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 五里峡水库库区蓄水量在丰水

期的均值为 $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ (数据来源: 五里峡水库监测站), 基于此估算了整个水库此时 DOC 的含量为 $1.168 \times 10^{11} \text{ mg}$, 该值占到了库区水体有机碳总量的 90% 以上, 对水体 DOC 研究有助于对岩溶水库碳循环全面了解. CDOM 是存在于各类水体中的一类含有腐殖酸、富里酸、氨基酸和芳烃聚合物等物质的溶解性有机物^[20], 是 DOC 的重要组成部分^[36]. 水体(如湖泊、水库以及河口等)中有机碳主要有 2 个来源, 一是由水体微生物经光合作用形成的内源有机碳; 二是陆生植被腐烂降解后由河流等携带进入水体的陆源物质以及人类生产活动产生的有机物^[37]. 而且不同来源碳源在物质化学结构组成和分子量级等方面存在显著差异, 进而影响细菌的可利用性和碳素在水体中的迁移转化^[15]. 为了深入了解有机质的构成特征及来源信息, 因此对五里峡水库 DOM 吸收光谱特征进行分析(图 7). 五里峡水库 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 的值(图 8)介于 0.23 ~ 1.38 m^{-1} , 均值为 0.41 m^{-1} , 相比于新安江水库 CDOM 浓度值 $(0.95 \pm 0.36) \text{ m}^{-1}$ ^[38]、石头门水库 CDOM 浓度值 $(3.99 \pm 1.58) \text{ m}^{-1}$ ^[39]、云贵高原湖泊 CDOM 浓度值 $(6.63 \pm 5.33) \text{ m}^{-1}$ ^[40], 五里峡水库丰水期 CDOM 浓度处于较低水平. 此外, $a(355)$ 和 DOC 表现出较好的正相关关系($R^2 = 0.49$).

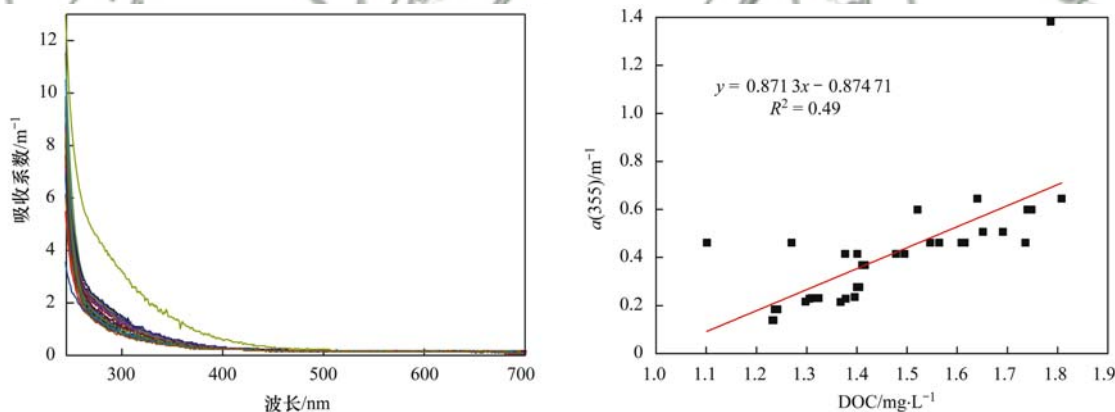


图 7 五里峡水库 CDOM 的光谱吸收曲线图及 DOC 与 $a(355)$ 相关关系

Fig. 7 Absorption coefficients of CDOM and linear regression between CDOM absorption coefficient and DOC concentration in Wulixia reservoir

吸收光谱在 254 nm 处的摩尔吸光度 (SUVA_{254}) 可用来示踪 DOM 芳香性^[22]. SUVA_{254} 是 DOM 在 254 nm 的平均摩尔吸收率, 为 254 nm 吸光系数与 DOC 浓度之比, SUVA_{254} 越大, 芳香化程度越高; SUVA_{254} 越低, 芳香化程度越低^[41]. 五里峡水库丰水期 SUVA_{254} 值除了采自漠川河的 08 号样点外, 其余采自库区样品的 SUVA_{254} 值范围为 1.52 ~ 2.5 $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$, 均值是 2.1 $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$. 对比国内

外文献发现(表 3), 该值明显低于有机质外源特征明显的森林湖泊(南哈巴雪山林线以下湖泊^[42]、加拿大魁北克 Rouyn-Noranda 湖^[43]), 与湖北荆门屈家岭表层地下水^[23]、云南哈巴雪山林线以上湖泊^[42]的值相近, 但是比我国青藏高原湖泊(纳木错)^[44]这类 DOM 内源特征占绝对优势的湖泊要高一些. 森林型湖泊日光辐射不足基本都是营养化程度很低的贫营养型湖泊, 水体中浮游生物对有机质

的作用微弱,内源有机质的补给非常少,有机质主要靠陆源补给(通过地表径流等方式把高芳香性组分比较高的腐殖质等带入水体).而五里峡水库库区日照充足,水体浮游微生物多,水体营养化程度属于中等营养型高于森林型湖泊,与森林型湖泊存在差异.所以五里峡水库库区 $SUVA_{254}$ 值区别于森林湖泊并处于较低水平,DOM 的芳香性较弱,内源物质对水体溶解有机质的贡献明显,表明在五里峡水库浮游微生物对水体 DOC 的贡献相对较多.采自漠川河的 08 号点 $SUVA_{254}$ 值为 $4.07 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$,与库区水体的 $SUVA_{254}$ 值相比要高,表明漠川河的 DOM 芳香性特征比库区强.

吸光度比值 E_{253}/E_{203} 可以用来表征有机物苯环结构上官能团的构成特征^[23], E_{253}/E_{203} 值越大,说明苯环结构取代基上羧基、羰基、氨基等极性官能团含量高,相反 E_{253}/E_{203} 值越小,说明苯环取代基上脂肪族和酯类等非极性官能团含量高^[45].由表 3 可知,五里峡水库 E_{253}/E_{203} 值的均值为 0.026.何小松等^[23]在对地下水有机质研究时得出表层水体的 E_{253}/E_{203} 值(0.02 ~ 0.27),并表明该值下 DOM 苯环上脂肪族结构等非极性官能团含量较高.五里峡水库 E_{253}/E_{203} 值比该结果低,表明五里峡水库库区水体 E_{253}/E_{203} 值指示下的 DOM 含有较多的苯环上脂肪族等非极性官能团,含的苯环上羧基、羰基等极性官能团较少,说明五里峡水库库区水体有机质疏水性强.

$S_{275-295}$ 是 DOM 吸收光谱模型中的重要参数,为 275 ~ 295 nm 波段光谱斜率,能提供 DOM 相对分子质量大小以及光化学反应活性等组成特征信息^[46],通常认为在 DOM 的物质构成中腐殖酸和富里酸的占比会影响 S 值的大小,腐殖酸比例越高 DOM 相对分子质量就越大, S 值也会相应变小^[47].如图 8 所示,五里峡水库 $S_{275-295}$ 值的范围为 0.015 ~ 0.023 nm^{-1} ,均值为 0.02 nm^{-1} ,其中采自漠川河的 08 号点 S 值最低为 0.015 nm^{-1} ,通过对不同水体的 S 值对比(表 3)发现,五里峡水库的 S 值明显高于有机质外源特征明显的湖泊(云南哈巴雪山林线以下湖泊^[42]、加拿大魁北克森林湖泊^[48])与水库型湖泊长寿湖^[49]和周村水库^[50]的 S 值相近.周村水库是山东省淮河流域的一座有 50 多年库龄的大型水源型水库,它位于西伽河上游,总库容 $8404 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[50],荧光参数指示下的周村水库 DOM 内源特征明显.五里峡水库也是一座有着 45

a 库龄的大型水源型水库,较高的 S 值表征下的五里峡水库 DOM 呈现出相对分子质量小,腐殖酸占的比例低的特征.水库上游的漠川河 S 值相比库区水体要低,表明漠川河 DOM 相对分子质量较大,腐殖酸占的比例较高.

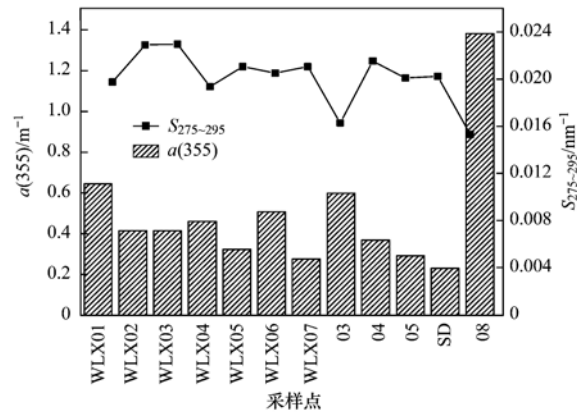


图 8 吸收系数 $a(355)$ 及 $S_{275-295}$ 值分布

Fig. 8 Distribution of CDOM absorption coefficient at 355 nm and the spectral slope $S_{275-295}$ value

DOM 的分子量特征参数值 $M[\text{CDOM}(250)/\text{CDOM}(365)]$ 为 250 nm 和 365 nm 波长处吸收系数的比值^[22],可以用来估算 DOM 分子量的大小, M 值越小对应的分子量就越大, M 值越大对应的分子量就越小,一般腐殖酸平均分子量较大,而富里酸平均分子量则较小,因而 CDOM 分子量越大,腐质酸的比例就越高,CDOM 分子量越小,富里酸的比例就越高^[51].五里峡水库的 M 均值为 11.41, M 值处于较高水平,说明库区水体 DOM 分子量较小,腐殖酸所占的比例低,富里酸占的比例较高.这与宋炎炎等^[51]认为二龙湖水库 10 月 DOM 组成更趋向于富里酸等小分子物质(M 值为 10.74)的结论相似.采自漠川河的 08 号点的 M 值为 7.95,该值明显低于库区样品的 M 值,说明漠川河 DOM 组成更趋向于腐殖酸等大分子物质.通常认为由外来水体携带的陆源 DOC 中 DOM 的类腐殖酸含量比较高;微生物等内源物质新陈代谢及降解产生的 DOC 中 DOM 则含的腐殖酸较少^[50].总体而言,五里峡库区水体 DOC 应主要来源于内源物质.而且陆源 DOC 含有更多的有色 DOC,CDOM 浓度较高,而微生物等自身降解产生的 DOC 中无色 DOC 占更大的比例,CDOM 浓度较低^[52].五里峡水库 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 值均值为 0.41 m^{-1} ,CDOM 浓度处于较低水平,说明 DOC 中无色 DOC 占比较多,同样说明 DOC 内源特征明显.该结果与冬季枯水期的结果相似^[17],DOC 都表现出较强的内源特征.

表3 不同水体紫外吸收光谱指标对比

Table 3 Comparisons of UV-Vis spectral parameters in different water samples

项目	DOC/(mg·L ⁻¹)	SUVA ₂₅₄ /L·(mg·m) ⁻¹	E ₂₅₃ /E ₂₀₃	S _{275~295}	文献
中国云南哈巴雪山林线以下湖泊	4.14~9.06	5.76~16.12	— ¹⁾	0.013~0.015	[42]
加拿大魁北克 Rouyn-Noranda 湖	0.8~13.4	13.82~27.40	—	—	[43]
加拿大魁北克森林湖泊	11.34~15.27	4.40~4.81	—	0.010~0.012	[48]
中国青藏高原纳木错湖	3.13	0.67	—	—	[44]
中国云南哈巴雪山林线以上湖泊	1.02~2.62	1.15~6.91	—	0.009~0.031	[42]
巴西 Barra Bonita Reservoir 湖	19.22	2.1	—	—	[53]
中国江西省西部湖泊	6.16~24.35	1.21~5.85	—	0.015~0.028	[54]
中国长寿湖(水库型湖泊)	3.76~27.73	1.00~6.91	—	0.015~0.025	[49]
湖北荆门屈家岭地下水(表层)	2.79~8.64	0.47~2.06	0.02~0.27	—	[23]
周村水库	2.52±0.14	—	—	0.018 27	[50]
桂林五里峡水库	1.1~1.81	1.52~2.5	0.026	0.015~0.023	本研究

1) “—”表示文章中没有相关数据

4 结论

(1)五里峡水库丰水期水体受碳酸盐岩风化作用控制,水化学类型仍为 HCO₃-Ca·Mg 型;此时库区水体未出现分层效应,水体混合较为均匀,修正的卡尔森营养状态指数(TSIM)表明五里峡水库水体营养状态为中等营养型,但未达到富营养状态,水质尚好。

(2)五里峡水库丰水期 DOC 质量浓度低于枯水期,DOC 质量浓度占到 TOC 质量浓度的约 92%;DOC 质量浓度在垂直方向上整体呈表层至底层降低的趋势,这一分布趋势是多种环境因子综合作用的结果。

(3)CDOM 特征参数 S_{275~295}、M 指示库区水体有机质以小分子量物质为主,富里酸占的比例高,腐殖酸占的比例低;CDOM(254)处的摩尔吸光度特征参数 SUVA₂₅₄ 指示五里峡库区水体有机质的芳香性较弱;吸光度比值 E₂₅₃/E₂₀₃ 指示下的库区水体有机质具有较多的苯环上脂肪族等非极性官能团;五里峡水库丰水期有机质较小的分子量、较弱的芳香性、较低的腐殖酸含量、较多的苯环上脂肪族等非极性官能团表明库区有机质生物活性好,在水库碳循环中发挥积极作用,同时也表明库区水体 DOC 内源特征较强。

(4)CDOM 特征参数指示下的库区上游漠川河有机质分子量大、芳香性强、腐殖酸含量高,呈现出较强的陆源特征。

(5)为进一步揭示库区水体 DOC 内源特征,在今后的工作中将增加库区水体无机碳与有机碳关系的研究,并对水样进行三维荧光扫描,结合平行因子分析法对五里峡水库有机质的空间分布特征作进一步分析。

参考文献:

[1] 袁道先,刘再华. 碳循环与岩溶地质环境[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[2] 刘再华, Dreybrodt W. 岩溶作用动力学与环境[M]. 北京: 地质出版社, 2007.

[3] Berner R A, Lasaga A C, Garrels R M. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years[J]. American Journal of Science, 1983, **283**(7): 641-683.

[4] Curl R L. Carbon Shifted but not sequestered[J]. Science, 2012, **335**(6069): 655.

[5] Liu Z H, Zhao M, Sun H L, et al. “Old” carbon entering the south China sea from the carbonate-rich Pearl river basin: coupled action of carbonate weathering and aquatic photosynthesis [J]. Applied Geochemistry, 2017, **78**: 96-104.

[6] Li Q, Song A, Peng W J, et al. Contribution of aerobic anoxygenic phototrophic bacteria to total organic carbon pool in aquatic system of subtropical Karst catchments, Southwest China: evidence from Hydrochemical and microbiological study [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2017, **93**(6), doi: 10.1093/femsec/fix065.

[7] 杨明星,刘再华,孙海龙,等. 基于生物标志物法的珠江流域有机碳溯源及 DIC 施肥效应研究[J]. 地球与环境, 2017, **45**(1): 46-56.

Yang M X, Liu Z H, Sun H L, et al. Organic carbon source tracing and DIC fertilization effect in the Pearl river: insights from lipid biomarker[J]. Earth and Environment, 2017, **45**(1): 46-56.

[8] 梁作兵,孙玉川,王尊波,等. 重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化[J]. 环境科学, 2016, **36**(9): 3212-3219.

Liang Z B, Sun Y C, Wang Z B, et al. Sources, migration and conversion of dissolved alkanes, dissolved fatty acids in a Karst underground river water, in Chongqing area[J]. Environmental Science, 2016, **36**(9): 3212-3219.

[9] 张运林,秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析[J]. 水科学进展, 2007, **18**(3): 415-423.

Zhang Y L, Qing B Q. Feature of CDOM and its possible source in Meiliang Bay and Da Taihu Lake in Taihu lake in summer and winter[J]. Advances in Water Science, 2007, **18**(3): 415-

- 423.
- [10] 陈晓玲, 陈莉琼, 于之峰, 等. 长江中游湖泊 CDOM 光学特性及其空间分布对比[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 248-254.
Chen X L, Chen L Q, Yu Z F, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter optical characteristics and spatial distribution in the lakes of the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(2): 248-254.
- [11] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. Limnology and Oceanography, 2009, **54**(6part2): 2298-2314.
- [12] 傅平青. 水环境中的溶解有机质及其与金属离子的相互作用——荧光光谱学研究[D]. 贵阳: 中国科学院研究所院(地球化学研究所), 2004.
- [13] Catalán N, Marcé R, Kothawala D N, *et al.* Organic carbon decomposition rates controlled by water retention time across inland waters[J]. Nature Geoscience, 2016, **9**(7): 501-504.
- [14] Urban N R, Auer M T, Green S A, *et al.* Carbon cycling in lake Superior[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2005, **110**(C6), doi: 10.1029/2003JC002230.
- [15] 叶琳琳, 孔繁翔, 史小丽, 等. 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展[J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 779-788.
Ye L L, Kong F X, Shi X L, *et al.* The bioavailability of dissolved organic carbon in the eutrophic lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(4): 779-788.
- [16] 刘文. 亚热带不同地质背景水库碳转移过程的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [17] 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 等. 岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源: 以桂林五里峡水库为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4120-4129.
Lu X X, Peng W J, Li Q, *et al.* Distinguishing the properties and sources of the dissolved organic matter in Karst reservoir water during winter under three dimensional fluorescence spectrum technology: a case study in Wulixia reservoir of Guangxi province[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4120-4129.
- [18] 王斌, 马健, 王银亚, 等. 天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2465-2471.
Wang B, Ma J, Wang Y Y, *et al.* Distribution of Chlorophyll-a and eutrophication state in Tianchi lake of Tianshan mountains in summer [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2465-2471.
- [19] Zhang Y L, Yin Y, Feng L Q, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. Water Research, 2011, **45**(16): 5110-5122.
- [20] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake bay [J]. Marine Chemistry, 2002, **77**(1): 23-41.
- [21] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. Limnology and Oceanography, 1981, **26**(1): 43-53.
- [22] Jaffrain J, Gérard F, Meyer M, *et al.* Assessing the quality of dissolved organic matter in forest soils using ultraviolet absorption spectrophotometry[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, **71**(6): 1851-1858.
- [23] 何小松, 张慧, 黄彩红, 等. 地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3813-3820.
He X X, Zhang H, Huang C H, *et al.* Vertical distribution characteristics of dissolved organic matter in groundwater and its cause[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3813-3820.
- [24] 宋昂, 彭文杰, 何若雪, 等. 好氧不产氧光合细菌反馈作用下的五里峡水库坝前水体化学特征研究[J]. 岩矿测试, 2017, **36**(2): 171-179.
Song A, Peng W J, He R X, *et al.* Hydrochemistry characteristics in front of the Wulixia Reservoir dam associated with feedback from aerobic anoxygenic phototrophic bacteria[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, **36**(2): 171-179.
- [25] Wetzel R G. Limnology: lake and river ecosystems (3rd ed.) [M]. London: Academic Press, 2001.
- [26] 叶琳琳, 吴晓东, 闫德智, 等. 太湖西北湖区表层水体颗粒态有机碳含量的季节变化及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(4): 1323-1329.
Ye L L, Wu X D, Yan D Z, *et al.* Seasonal dynamics of particulate organic carbon concentration in surface water and its source in the northwest of lake Taihu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(4): 1323-1329.
- [27] 王巧莲, 蒋勇军, 陈宇. 岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析: 以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1788-1797.
Wang Q L, Jiang Y J, Chen Y. Export of total organic carbon (TOC) from Karst watershed and its influencing factors: an example from Xueyudong underground river system, Chongqing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1788-1797.
- [28] 滕明德, 高庚申, 谢蔚嵩, 等. 红枫湖水体中碳的时空分布特征分析[J]. 环境监测管理与技术, 2017, **29**(1): 57-60.
Teng M D, Gao G S, Xie W S, *et al.* Analysis on the spatial and temporal characteristics of carbon in Hongfeng lake [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2017, **29**(1): 57-60.
- [29] 傅平青, 吴丰昌, 刘丛强, 等. 高原湖泊溶解有机质的三维荧光光谱特性初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(6): 512-520.
Fu P Q, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy of dissolved organic matter from Chinese highland lakes [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, **38**(6): 512-520.
- [30] Zigah P K, Minor E C, Werne J P. Radiocarbon and stable-isotope geochemistry of organic and inorganic carbon in lake Superior [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, **26**(1), doi: 10.1029/2011GB004132.
- [31] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. London: Cambridge University Press, 1984.
- [32] Kasprzak P, Padisák J, Koschel R, *et al.* Chlorophyll a concentration across a trophic gradient of lakes: an estimator of phytoplankton biomass? [J]. Limnologia, 2008, **38**(3-4): 327-338.
- [33] 罗宜富, 李磊, 李秋华, 等. 阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4151-4159.
Luo Y F, Li L, Li Q H, *et al.* Spatial and temporal distribution of chlorophyll a and its relationship to algae and environmental

- factors in Aha reservoir[J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (10): 4151-4159.
- [34] 张竞予, 鱼京善, 李占杰, 等. 官厅水库夏季叶绿素 a 浓度短时分布特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, **15**(2): 95-100, 115.
- Zhang J Y, Yu J S, Li Z J, *et al.* Short-term distribution of chlorophyll-a concentration in summer at Guanting reservoir[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, **15**(2): 95-100, 115.
- [35] Gallina N, Salmaso N, Morabito G, *et al.* Phytoplankton configuration in six deep lakes in the peri-Alpine region: are the key drivers related to eutrophication and climate? [J]. *Aquatic Ecology*, 2013, **47**(2): 177-193.
- [36] 姜广甲, 马荣华, 段洪涛, 等. 利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2235-2243.
- Jiang G J, Ma R H, Duan H T, *et al.* Estimation of DOC concentrations using CDOM absorption coefficients: a case study in Taihu lake[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2235-2243.
- [37] O'Reilly S S, Szpak M T, Flanagan P V, *et al.* Biomarkers reveal the effects of hydrography on the sources and fate of marine and terrestrial organic matter in the western Irish Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, **136**: 157-171.
- [38] 殷燕, 刘明亮, 王明珠, 等. 夏季新安江水库(千岛湖)颗粒物吸收光谱特征分析[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(5): 713-723.
- Yin Y, Liu M L, Wang M Z, *et al.* Coefficients of summer spectral absorption of particulate matter in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(5): 713-723.
- [39] Jiang G J, Liu D W, Song K S, *et al.* Spatial distribution and the possible source of CDOM for inland water in summer in the Northeast China [A]. In: *Proceedings of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [C]. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2010. 386-388.
- [40] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [41] Granskog M A, Macdonald R W, Mundy C J, *et al.* Distribution, characteristics and potential impacts of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Hudson Strait and Hudson bay, Canada [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, **27**(15): 2032-2050.
- [42] Su Y L, Chen F Z, Liu Z W. Comparison of optical properties of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in alpine lakes above or below the tree line: insights into sources of CDOM [J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2015, **14**(5): 1047-1062.
- [43] Muller K K, Fortin C, Campbell P G C. Spatial variation in the optical properties of dissolved organic matter (DOM) in lakes on the Canadian Precambrian shield and links to watershed characteristics[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2012, **18**(1): 21-44.
- [44] Spencer R G M, Guo W D, Raymond P A, *et al.* Source and biolability of ancient dissolved organic matter in glacier and lake ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, **142**: 64-74.
- [45] He X S, Xi B D, Wei Z M, *et al.* Spectroscopic characterization of water extractable organic matter during composting of municipal solid waste[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(4): 541-548.
- [46] Fichot C G, Benner R. The spectral slope coefficient of chromophoric dissolved organic matter ($S_{275-295}$) as a tracer of terrigenous dissolved organic carbon in river-influenced ocean margins [J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(5): 1453-1466.
- [47] Xiao Y H, Sara-Aho T, Hartikainen H, *et al.* Contribution of ferric iron to light absorption by chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(2): 653-662.
- [48] Glaz P, Gagné J P, Archambault P, *et al.* Impact of forest harvesting on water quality and fluorescence characteristics of dissolved organic matter in eastern Canadian boreal shield lakes in summer[J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(23): 6999-7011.
- [49] 江韬, 卢松, 王齐磊, 等. 三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2073-2081.
- Jiang T, Lu S, Wang Q L, *et al.* Absorption spectral characteristic dynamics of dissolved organic matter (DOM) from a typical reservoir lake in inland of three Gorges reservoir areas: implications for hg species in waters[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2073-2081.
- [50] 方开凯, 黄廷林, 张春华, 等. 淮河流域周村水库夏季 CDOM 吸收光谱特征、空间分布及其来源分析[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(1): 151-159.
- Fang K K, Huang T L, Zhang C H, *et al.* Summer absorption characteristics, spatial distribution and source analysis of CDOM in Zhoucun reservoir in Huaihe catchment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(1): 151-159.
- [51] 宋炎炎, 苏东辉, 邵田田. 东辽河流域河湖光学吸收特性的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(6): 2013-2023, doi: 10.13287/j.1001-9332.201706.022.
- Song Y Y, Su D H, Shao T T. Seasonal changes of optical absorption properties of river and lake in East Liaohe River Basin, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(6): 2013-2023, doi: 10.13287/j.1001-9332.201706.022.
- [52] Astoreca R, Rousseau V, Lancelot C. Coloured dissolved organic matter (CDOM) in Southern North Sea waters: optical characterization and possible origin[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **85**(4): 633-640.
- [53] Bittar T B, Stubbins A, Vieira A A H, *et al.* Characterization and photodegradation of dissolved organic matter (DOM) from a tropical lake and its dominant primary producer, the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* [J]. *Marine Chemistry*, 2015, **177**: 205-217.
- [54] 陈小锋, 揣小明, 刘涛, 等. 江苏省西部湖泊溶解性有机物光谱学特征和来源解析[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 259-266.
- Chen X F, Chuai X M, Liu T, *et al.* Characteristics and source identification of the dissolved organic matter in the lakes of west Jiangsu by spectroscopy[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(2): 259-266.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)