

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲霉和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析

王从锋^{1,2}, 胡子龙¹, 杨正健^{1*}, 丹勇¹, 赵萍¹, 郝文超¹, 聂小芬¹, 聂睿¹, 徐刘得¹, 刘德富^{1,3}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002; 3. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 水库建设所导致的生态问题正引发前所未有的深度思考, 梯级水库在时间和空间尺度上的影响效应更加值得探究. 为揭示新老水库有机碳分布特征及其沉积物 TOC 来源的差异, 于 2017 年 11 月采集了苗尾、功果桥和大朝山这 3 个不同时期建设的水库的水样和沉积物样柱. 测定了水体的温度(T)、溶解氧(DO)、总有机碳含量(TOC)、沉积物总有机碳(TOC)、氧化还原电位(ORP)、总氮(TN)和总磷(TP)等指标, 并利用¹⁵N和¹³C同位素, 结合 IsoSource 软件, 解析沉积物中 TOC 来源及其来源物质对相应水库沉积物中 TOC 的贡献量, 从而探究其内在的碳循环机制和梯级水库演进模式. 结果表明, 苗尾、功果桥和大朝山水库水体有机碳质量浓度平均值分别为 0.95、1.97 和 4.64 mg·L⁻¹. 对应水库沉积物中有机碳含量变化范围分别为 4.41~81.63、18.30~28.42 和 9.16~14.46 g·kg⁻¹. 水库的梯级建设, 使得新老水库的沉积物来源, 周围补给等出现差异, 使得新老水库 TOC 出现巨大差异. 对于水体 TOC, 水体热力学状态和溶解氧的差异从而间接影响了水体中 TOC 的分布趋势. 沉积物中主要考虑生源要素的影响, 即沉积环境对有机质的保存能力是造成 DCS、MV 和 GGQ 沉积物垂向分布有差异的主要原因. 而梯级水库的演进模式中, MV 时空尺度上处于第一级段, 是以累积上游来流 TOC 为主; GGQ 处于第二级段, 是以主要消耗分解上游来流 TOC; DCS 处于第三级段, 是以主要积累水库周边 TOC 来源.

关键词: 沉积物; 有机碳; 碳氮同位素; 差异分析; 新老水库

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3039-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811243

Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes

WANG Cong-feng^{1,2}, HU Zi-long¹, YANG Zheng-jian^{1*}, DAN Yong¹, ZHAO Ping¹, HAO Wen-chao¹, NIE Xiao-fen¹, NIE Rui¹, XU Liu-de¹, LIU De-fu^{1,3}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Area Region, Yichang 443002, China; 3. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, College of Civil Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The ecological problems due to reservoir construction are causing unprecedented concern. To reveal the differences in organic carbon distribution characteristics and sediment sources of total organic carbon (TOC) between the old and new reservoirs, water samples, and sediment samples from reservoirs constructed in the three different periods of Miaowei, Gongguoqiao, and Dachaoshan were collected in November 2017. The temperature (T), dissolved oxygen (DO), TOC, redox potential (ORP), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) of the water samples were measured. The isotopes ¹⁵N and ¹³C were used as indicators with IsoSource software to analyze the contributions of TOC sources and their source materials to the corresponding reservoir sediments, in order to explore the carbon cycle mechanism and evolution mode of reservoir. The results showed that the average concentrations of organic carbon in the waters of the Miaowei, Gongguoqiao, and Dachaoshan Reservoirs were 0.95 mg·L⁻¹, 1.97 mg·L⁻¹, and 4.64 mg·L⁻¹, respectively. The range of organic carbon content in the corresponding sediments was 4.41-81.63 g·kg⁻¹, 18.30-28.42 g·kg⁻¹, and 9.16-14.46 g·kg⁻¹, respectively. The cascade construction of the reservoirs resulted in a difference between the sediment sources of the new and old reservoirs and the surrounding recharge area, meaning that the TOC of the new and old reservoirs were significantly different. For the TOC of waterbodies, the difference between the thermodynamic state of water and dissolved oxygen indirectly affects the distribution trend of TOC. The sediments mainly reflect the influence of source elements, that is, the ability of the sedimentary environment to preserve organic matter was the main cause of the vertical distribution of DCS, MV, and GGQ sediments. In the evolution mode of cascade reservoir, the research shows that it can be preliminarily set as three stages. Firstly, due to the short age of MV, it is in the first stage and mainly accumulates the TOC from the upstream. GGQ is longer than the age of MV, and it is mainly used to decompose the upstream TOC, so it is defined as in the second stage. Finally, as an old reservoir, DCS mainly accumulates TOC sources around the reservoir, which can be regarded as the third stage.

Key words: sediment; organic carbon; carbon and nitrogen isotopes; difference analysis; new and old reservoir

收稿日期: 2018-11-29; 修订日期: 2019-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204); 国家自然科学基金项目(51879099, 91647207, 51709096)

作者简介: 王从锋(1974~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为生态水利, E-mail: wangcf@ctgu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

河流具备的陆-海二元纽带属性, 决定其本身也是陆地系统重要组成部分. 传统的河流连续体^[1]、洪水脉动^[2]和河流生态系统四维结构^[3]等生态理念, 如何与时俱进, 去解决社会、经济、人文和环境等多元矛盾的冲突. 人类不得不面临这一选择困境. 迫于对绿色能源的需求, 世界各国仍在大量修建大坝等水工建筑物^[4]. 而水库“源-汇”效应在时-空尺度上都广泛影响世界河流的自然过程^[5-8]. 目前“河流水库化”成为陆地水文系统的重要特点^[9]. 碳在河流元素属性中不容忽视, 是底泥和水体重要组成部分. 水库内部几乎所有生物、物理和化学变化都与其息息相关^[10, 11]. 反映河流碳的生源要素指标中, 总有机碳 (TOC) 极其重要, 它能够反映水体中有机物污染程度^[12]. 并且水体中有机碳是生物圈最大的活性有机碳库, 在生物、地质和化学过程发挥着主要作用^[13]. 并且, 在检测方面, TOC 测定方法比 COD 和 BOD 的测定更方便快捷和准确, 能全面反映水体含碳有机物污染状况, 因此对 TOC 的研究也越来越引起人们的重视^[14, 15].

国内外对于水体中 TOC 的研究主要集中在海、河与浅水湖泊, 对于人造水库则鲜有报道^[16]. 但人类活动修筑的大型水库或拦河坝, 已经影响到河流碳的生物地球化学过程^[13, 17]. 其对生态环境的胁迫, 使得科研人员对于水库的 TOC 相关研究迫在眉睫. 而目前针对与河流 TOC 相关研究表明其来源主要包括外源和内源^[18]. 水库的建设, 使得河流这种自然模式受到影响. 水库在时间层次上的更替需要很长的区间, 一般大型水库都是百年工程, 从而使得这种影响在时间尺度上极其深远^[19]. 通过文献^[20-26], 本文定义新水库库龄 < 10 a, 老水库库龄 > 10 a. 正因为新老水库在时-空尺度的差异, 再加上水库本身不同的属性, 这些都使得梯级水库对河流的碳循环的影响程度和相关机制研究明显不足^[20].

而本研究基于此出发点, 探究新老水库内在的相关碳循环机制. 而在目前可利用的研究工具中, $\delta^{13}\text{C}$ 被广泛用作河流有机物质来源的示踪工具^[21, 22], 并且常用 C 同位素的比值与标准同位素比值的千分偏差 ($\delta^{13}\text{C}$) 来表示稳定同位素 ^{13}C , 如对密西西比河河口有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 研究表明, 滨海沼泽和 C_3 维管束植物是下游河水有机碳的主要来源^[23]. 然而, 由于微生物降解对 ^{13}C 产生分馏作用, 影响有机质来源的指示作用^[24]. 基于 ^{13}C 会产生分馏作用的不利影响, 因此本文综合运用 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 TOC 等, 去探究水库碳的相关机制. 考虑到西南地

区修建有大量的水库大坝. 这些水库大部分属于特殊、狭长型河道梯级深水水库. 水库的沉积物中碳滞留状况和来源属性, 以及对区域乃至全球碳循环的意义有多大等问题目前尚不清楚. 由于有机碳与水体富营养化密切相关, 到目前为止, 苗尾 (MV)、功果桥 (GGQ) 和大朝山 (DCS) 水库极少有这方面的报道, 且很少有学者和研究人员将梯级水库下的新老水库做综合研究, 因此本文综合前人的研究方法和理论^[25, 26], 利用同位素技术及常规环境因子指标, 结合 IsoSource 软件, 分析其新老水库 TOC 的来源及分布, 以及相应的机制, 这不仅有助于研究澜沧江流域碳循环和有机质的贮藏量, 而且还有助于分析流域环境变化趋势, 以期改善该流域生态环境提供参考依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区域与样点设置

澜沧江是湄公河上游在中国境内河段的名称, 是中国西南地区的大河之一. 图 1 所示, MV、GGQ 和 DCS 水库均是澜沧江上的梯级水电站, MV 水电站位于云南省大理白族自治州云龙县, 坝址距昆明 544 km. 地处横断山脉澜沧江纵谷地区, 是澜沧江干流水电基地中下游河段 (古水至苗尾河段) 一库七级开发方案中的最下游一个梯级电站, 该水电站于 2016 年左右蓄水, 并与该年建成投产, 距今只有短短 2 a. GGQ 位于云南省云龙县境内, 是澜沧江干流中下游“两库八级”梯级水电开发的最上游一级水电站, 该电站位于横断山纵谷区, 河谷深切, 于 2011 年左右蓄水, 距今 7 a. DCS 位于中国云南省云县与景东县交界的澜沧江中游, 那果河支流入口下游 1.5 km 处. 在 2001 年左右蓄水, 于 2003 年建成投产, 距今 17 a. 通过本文定义, 可以初步认为 DCS 为老库, MV 和 GGQ 为新库, 且 MV 库龄最小.

本研究于 2017 年 11 月, 分别对 MV、GGQ 和 DCS 进行采样.

1.2 样品采集与测试

1.2.1 样品采集与处理

本研究采用重力式柱状采泥器在样点中采集沉积物样品以及上覆水, 采泥器原理为依靠自身重力垂直采集沉积物样品, MV、GGQ 与 DCS 沉积物按照 2 cm 一分层进行现场分样, 其他上游点位, 因沉积较少, 因此将所取沉积物混合后, 取表层, 并将沉积物用干净聚乙烯自封袋密封保存, 排尽袋中的空气, 上覆水立即装入 300 mL 聚乙烯采样瓶, 4 密封保存后带回实验室^[25].

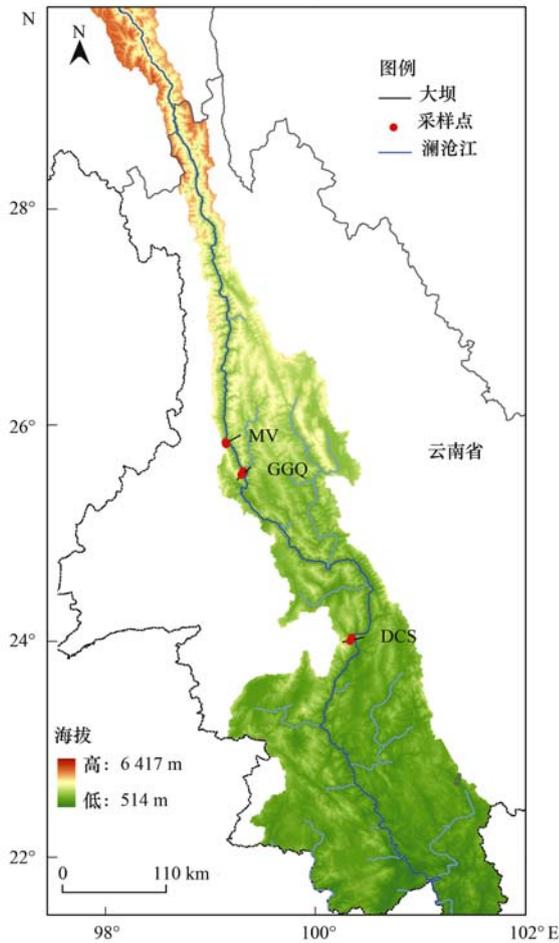


图 1 澜沧江采样点
Fig. 1 Sampling layout of the Lancang River

根据澜沧江水文地质状况和流域分布情况, 选取了具有代表性的表层水采样地点, 使样品尽可能地覆盖整个流域。

1.2.2 同位素数据处理

使用预先处理过的 WhatmanGF/FGF-F 玻璃纤维滤膜(0.47 μm , 预先在马弗炉 500 $^{\circ}\text{C}$ 下燃烧 4 h 以除去无机物, 直至滤膜恒质量)收集水体表层悬浮颗粒物, 具体参考相关人员方法^[26]。

沉积物则将已经分层的样品, 首先称取土样 0.5 ~ 1.5 g 装入离心管中, 用 0.1 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ 稀 HCl 反复洗涤去掉土样中的无机碳, 再用去离子水反复洗涤, 直到离心管中的溶液呈中性, 置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干的土样放入玛瑙研钵碾磨, 过筛 200 目, 利用精度为百万分之一电子天平称取少量碾磨过的土样, 连滤膜一起用锡箔纸包好并放入冰箱于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 下冷冻避光保存。包于锡杯中, 最后将包好的样品逐个放入仪器里进行测试。

1.2.3 环境因子数据处理

水温 (T) 和溶解氧 (DO) 这两个指标均用 HydrolabDS5 多参仪(美国)现场测定, 沉积物氧化还原电位 (ORP) 由中国科学院南京土壤研究所研

发 QX-6530 便捷式氧化还原电位仪测定。TP 用钼锑抗比色法, TN 用凯氏定氮法测定。

1.2.4 沉积物与水体 TOC 分析

水体中 TOC 采用型号为德国耶拿 MutiN/C3100 的 TOC 分析仪, 实验时取 10 mL 样品, 加入 0.5 mL 2 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸后上机检测, 主要测定原理是非分散性红外线技术 (NDIR)。底泥中的 TOC 采用型号为意大利 EA300 元素分析仪, 其利用的专利为 flash 燃烧技术, 实验时取 10 g 经真空冷冻干燥过的底泥样品上机检测。

1.3 数据分析

基于 IsoSource 软件的物源解析方法, 其基本原理是根据稳定同位素质量守恒, 以质量守恒混合模型为基础, 开发用于计算源头值 $> (n+1)$ (n 为多种同位素值) 潜在贡献比例。该模型在一定增量范围内, 通过测试的同位素值信息, 使用标准线性混合模型来模拟每一种可能污染比例, 其总值为 100%, 从而确定混合物各部分的比例^[26]。

用该软件依据同位素各端元值, 算出贡献率结果与沉积物含量依次乘后, 即得沉积物中 TOC 的具体含量值。

$$Q = P \times F \quad (1)$$

式中, Q 为该层次的 TOC 含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), P 为来源百分比 (%), F 为该层 TOC 含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 澜沧江新老水库水体-沉积物 TOC 分布规律

为证明新老水库 TOC 存在差异性, 阐明其具体表征。通过研究发现, 图 2 可看出新老水库水体 TOC 质量浓度在垂向上呈现出先减小后增大的趋势 (DCS 除外); DCS 和 MV 水体中 TOC 质量浓度最大值均出现在表层水体中, 而 GGQ 水体中 TOC 质量浓度最大值出现在上覆水体中。相对于 MV 和 GGQ 水库, DCS 水体表层 TOC 质量浓度最大, 其值为 4.94 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。上覆水中, MV 水库 TOC 含量最小, 其值为 1.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总体上, 各层水体 TOC 质量浓度表现为: DCS 水库水体 TOC 质量浓度 > GGQ 水库水体 TOC 质量浓度 > MV 水库水体 TOC 质量浓度。从箱线图可以看出, MV 与 DCS 的 TOC 无明显摆动幅度, 而 GGQ 变化明显, 分布区间广。沉积物中 TOC 变化趋势如图 2 所示, 在 0 ~ 4 cm 处 MV 水库 TOC 含量 \gg GGQ 水库 TOC 含量 > DCS 水库 TOC 含量, 其最大值 81.63 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在 4 ~ 6 cm 处, MV 水库沉积物 TOC 含量急剧递减, 而 GGQ 和 DCS 沉积物 TOC 含量增加, 在 6 ~ 10 cm 处, GGQ 水库沉积物 TOC 含量 > DCS 水库 TOC 含量 > MV

水库 TOC 含量,且三水库 TOC 含量均呈现递减的趋势. 在 0~6 cm 处, MV 和 DCS 水库 TOC 含量呈现出先减后增,而 GGQ 水库 TOC 含量呈现递增趋势;在 6~16 cm 处, MV 和 GGQ 水库 TOC 含量变化趋势相同,变化趋势为先减后增,而 DCS 在 6~8 cm 处 TOC 含量表现为递增,8~12 cm 处含量表现

为递减. 其中 MV 和 GGQ 水库沉积物 TOC 含量在 4~6 cm 处均达到最大值,其含量分别为 $16.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $28.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 整体上, GGQ 水库沉积物 TOC 含量较 MV 和 DCS 都大. 且从箱线图可看出, MV 沉积物变化剧烈,而 DCS, GGQ 相对无明显变化.

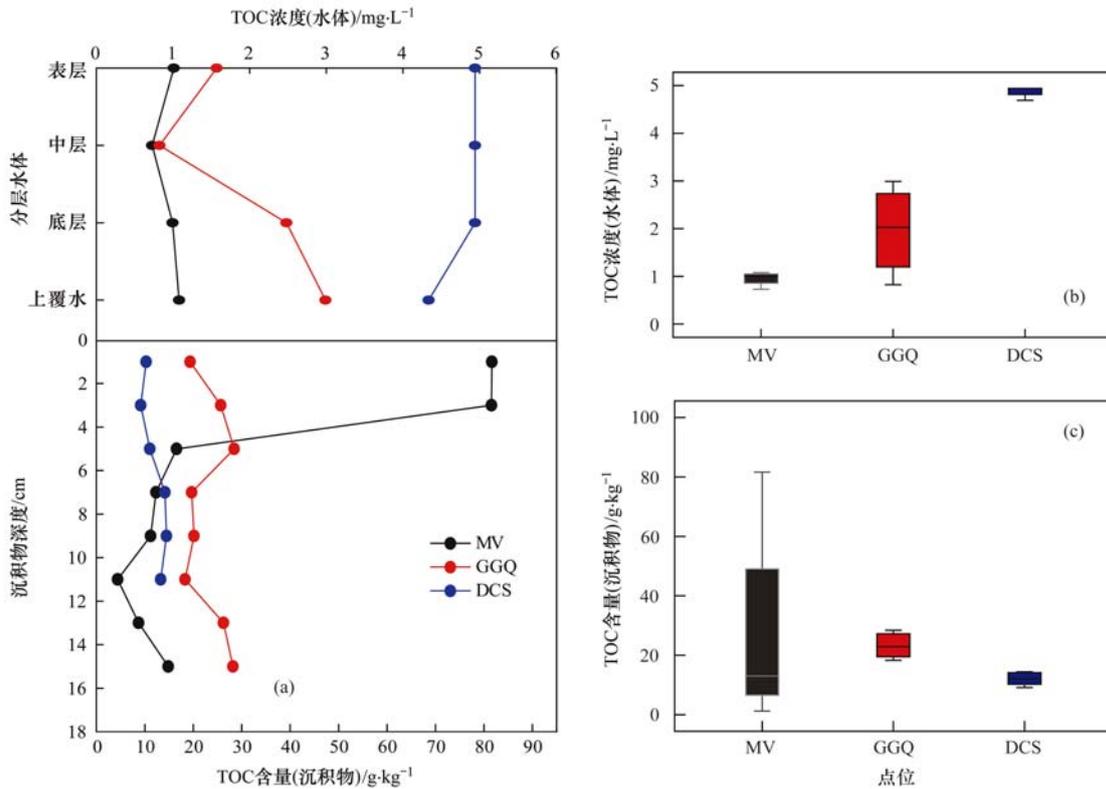


图 2 TOC 分布及其箱线图

Fig. 2 Total organic carbon distribution and the associated box plot

2.2 澜沧江流域有机质同位素溯源特性

为说明澜沧江新老水库 TOC 量的属性与其来源有关,本研究试图通过溯源分析去解决这个问题. 因此通过表 1 分析,可看出 MV、GGQ 和 DCS 沉积物同位素的分布趋势, MV、GGQ 和 DCS 的 N

同位素分别处于 $5.28\text{‰} \sim 6.24\text{‰}$ 、 $4.61\text{‰} \sim 7.60\text{‰}$ 和 $2.70\text{‰} \sim 4.52\text{‰}$. 而其 C 同位素 MV 处于 $-16.34\text{‰} \sim -24.60\text{‰}$ 区间; GGQ 处于 $-16.96\text{‰} \sim -26.48\text{‰}$ 区间; DCS 处于 $-23.65\text{‰} \sim -27.94\text{‰}$ 区间.

表 1 沉积物同位素值¹⁾

Table 1 Isotopic values of sediments

深度/cm	样点同位素值/‰					
	MV		GGQ		DCS	
	N	C	N	C	N	C
0~2	5.75	-18.03	—	—	2.7	-25.67
2~4	5.82	-21.61	6.26	-24.75	4.28	-25.44
4~6	6.05	-24.17	5.72	-25.60	3.95	-24.03
6~8	6.24	-24.60	4.96	-26.48	4.42	-23.65
8~10	6.04	-16.34	5.33	-18.65	4.52	-26.05
10~12	5.48	-20.62	4.61	-16.96	4.4	-25.96
12~14	5.41	-16.35	7.6	-19.26	4.33	-27.94
14~16	5.28	-19.80	7.57	-18.83	—	—

1) “—”表示无数据

如图 3 为澜沧江流域 C 和 N 同位素分布值,其端元简化后,将其划分为这 5 个端元,可知周边土

壤 C 的同位素区间在 $-21\text{‰} \sim -27\text{‰}$, N 的同位素在 $0\text{‰} \sim 8\text{‰}$; 污水 C 的同位素区间在 $-21\text{‰} \sim$

-52‰, N 的同位素在 1‰ ~ 5‰; 悬浮有机质 C 的同位素区间在 -21‰ ~ -32‰, N 的同位素在 3‰ ~ 19‰; 枯枝落叶 C 的同位素区间在 -19‰ ~ -37‰, N 的同位素在 0‰ ~ 7‰; 上游来流 C 的同位素区间在 -3‰ ~ -27‰, N 的同位素在 2‰ ~ 9‰. 表 1 可知 MV 沉积物 C 和 N 同位素范围分别在 -16.35‰ ~ -24.60‰ 和 5.28‰ ~ 6.24‰; GGQ 沉积物 C, N 同位素范围分别在 -16.96‰ ~ -26.48‰ 和 4.61‰ ~ 7.60‰; DCS 沉积物 C 和 N 同位素范围分别在 -23.65‰ ~ -27.94‰ 和 2.70‰ ~ 4.52‰. GGQ、DCS 和 MV 的沉积物都落在多端元交汇处, 且 DCS 的悬浮有机质也落入多端元交汇处, MV 和 GGQ 的悬浮有机质只落入其本体区间内.

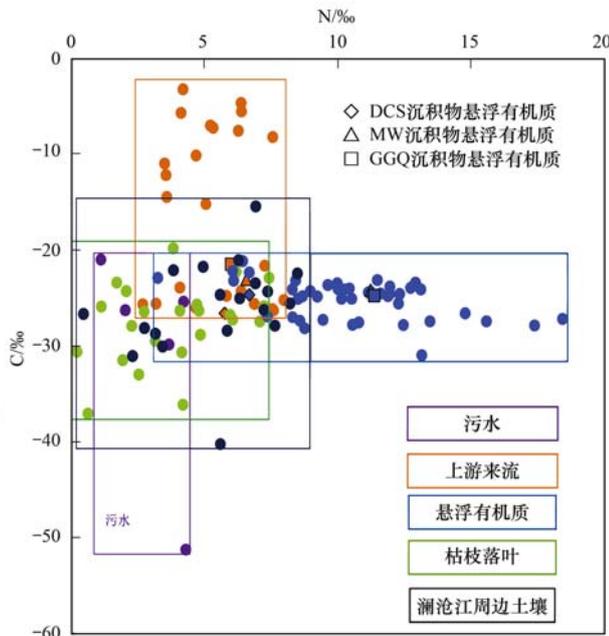


图 3 同位素端元

Fig. 3 Isotope end element diagram

如图 4 为各来源对新老水库相应 TOC 贡献量, MV 水库各层沉积物 TOC 的相关贡献量, 数据证明在各有机质来源中, 沉积物受上游来流的影响较大, 特别是 0 ~ 2 cm 和 2 ~ 4 cm 处沉积物 TOC 含量分别达 $39.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $26.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 岸边泥土、耕地有机质和悬浮有机质对沉积物 TOC 贡献量占总体的 50%; 排污水对 TOC 贡献量较少, 各层均小于 8% 的贡献量. 不考虑小范围波动, 总体垂向上各来源随沉积物深度的加深, 上游来流对 TOC 的贡献量逐渐减小. 对 GGQ 水库各层沉积物 TOC 的贡献量, 从表层至沉积物 16 cm 处, 上游来流对 TOC 的贡献量随沉积物深度的增加, 从 $4.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $11.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且均为总体所占 TOC 的 20%. 从表层至沉积物 12 cm 处, 上游来流和排

污污水对 DCS 沉积物各层 TOC 的贡献量总体上要小于其上游的 MV 和 GGQ 水库, 但上游来流对 TOC 的贡献量随沉积物深度的增加而增加, 而排污水对 TOC 的贡献量随深度增加呈现出先减小后增加的趋势.

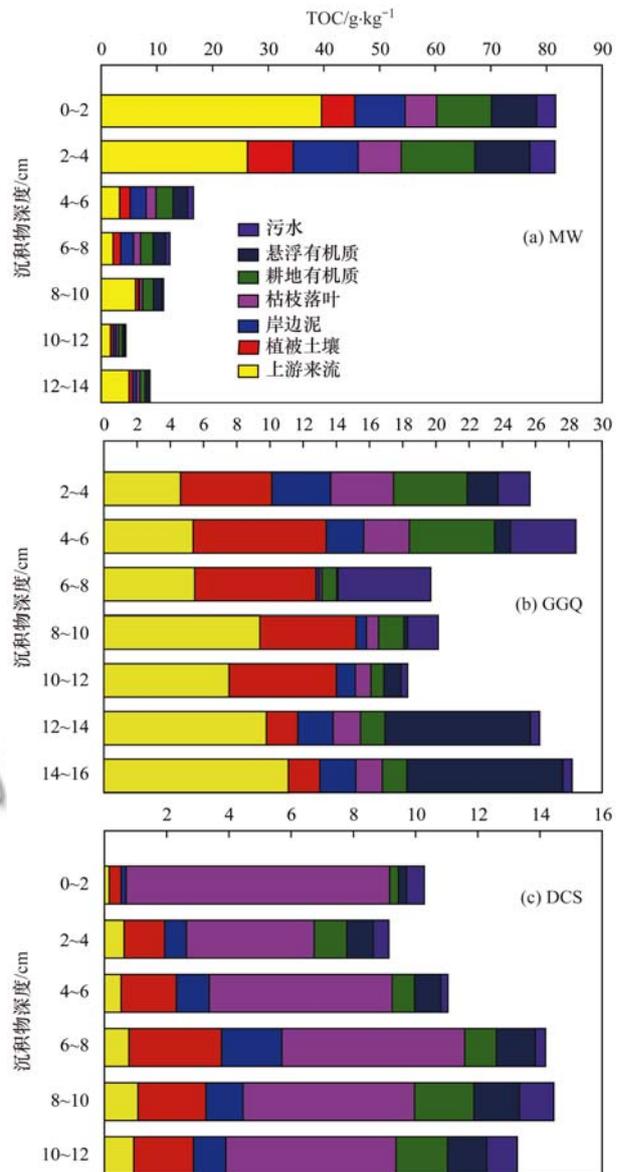
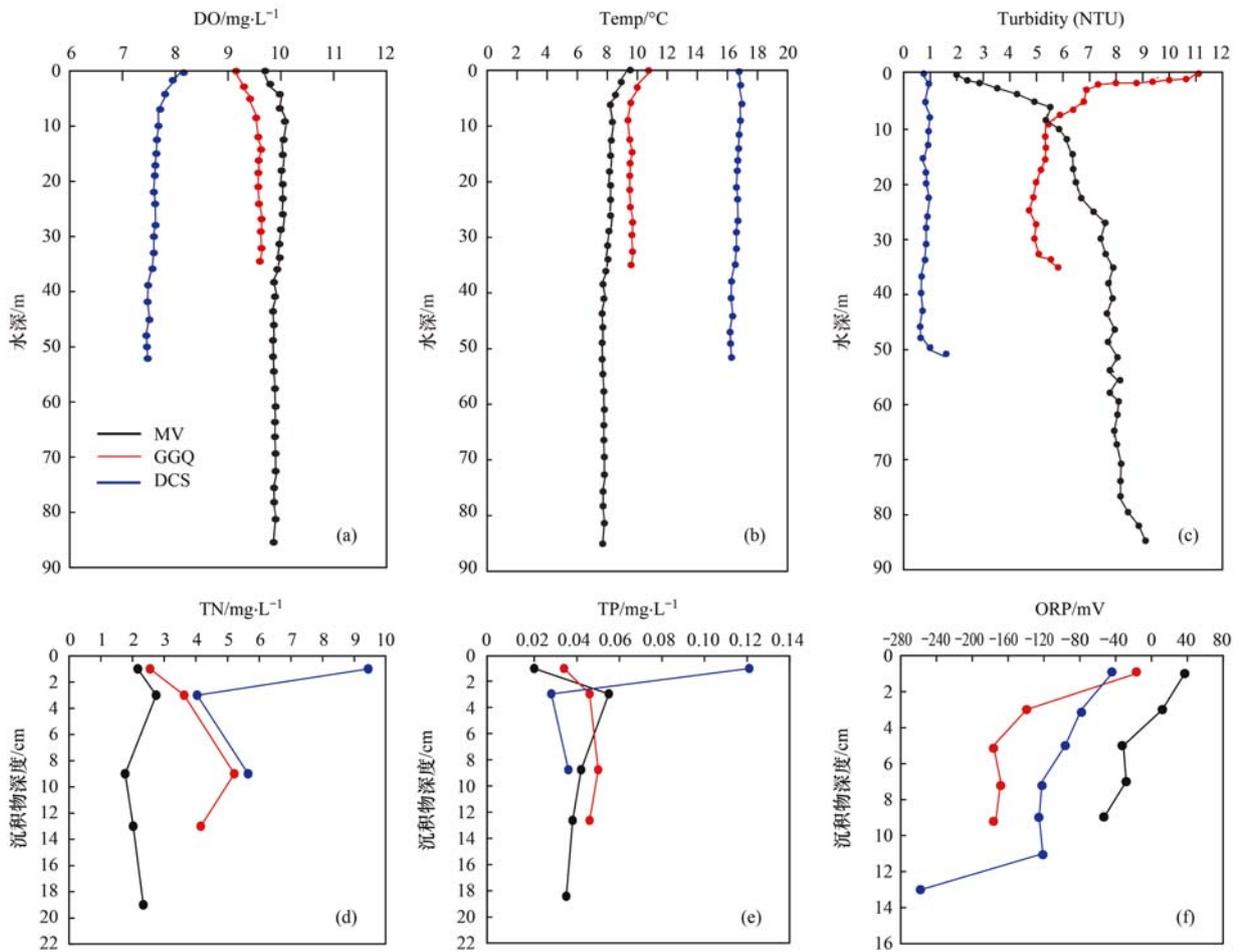


图 4 TOC 来源示意

Fig. 4 Schematic diagram of total organic carbon sources

2.3 澜沧江新老库水体-沉积物环境因子特征

环境因子是水库内在属性的外在表现, 通过环境因子分析, 可以找出新老水库的同-异性. 因此, 通过图 5 可知, 水体温度, $MV < GGQ < DCS$, 在该时段内所测水体温度, DCS 无水温分层, 而 GGQ 和 MV 存在弱水温分层, GGQ 水体温度在 $9.42 \sim 10.61^\circ\text{C}$ 区间上变化, MV 水体温度在 $8.39 \sim 9.80^\circ\text{C}$ 区间上变化, DCS 稳定在 16.74°C . 其水体溶解氧含量可知 $MV > GGQ > DCS$, 其刚好和水体温度相反. 且 MV 是先增加后降低, 其在 $9.70 \sim$



(a)溶解氧、(b)温度、(c)浊度, (a)~(c)水体环境因子; (d)总氮、(e)总磷、(f)氧化还原电位, (d)~(f)沉积物环境因子

图5 环境因子指标

Fig. 5 Environmental factor indicators

10.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的区间上变化,而 GGQ 于 0~15 m 处逐渐增加到 9.63 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,后在 15~35 m 处于稳定,且基本保持在 9.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DCS 只逐渐从 8.09 减小至 7.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 关于 ORP: MV 在 37~ -53 mV 的范围内变化,GGQ 在 -17~-176 mV 的范围内变化,且在 5 cm 处有小范围波动 DCS 在 -44.3~-257.3 mV 的范围内变化,其变化速率 MV > GGQ > DCS. 沉积物间隙水中 TN,DCS 较 MV 与 GGQ 波动幅度明显,DCS 区间在 4.04~ 9.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 MV 和 DCS 区间分别在 1.77~ 2.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.55~5.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 沉积物间隙水中 TP 也与 TN 属性同步,DCS 也较 MV 与 GGQ 波动幅度明显,DCS 区间在 0.03~0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 对于浊度来说, MV 的浊度随着深度的增加,不断增加,从 2.09 NTU 到 8.8 NTU; GGQ 的浊度随着深度的增加,不断减少,然后在 35 m 出现增大趋势,其变化区间在 11~5.91 NTU; DCS 的浊度无明显变化,在 54 m 左右有小范围波动,其在 1~2 NTU 内变化.

3 讨论

关于水库碳循环如图 6 所示,受上游来流输入、大气碳库以及水库周围碳源影响. 而水库内部有机碳和无机碳系统的相互作用,在不同生物作用、化学作用与物理作用下,使得梯级水库 TOC 来源在时空尺度出现巨大差异性. 碳来源的多途径性包括:①在水库蓄水后淹没的原区域的碳^[27~30];②从上游输入到水库中的有机物^[31];③水库系统中生长和死亡各种生物;④消落带的植被^[32];⑤流域内受侵蚀土壤所带来的碳^[33].

3.1 水库建设对水体-沉积物 TOC 垂向分布的影响机制

以往研究发现,水体中 TOC 在藻类水华暴发期以及水华过后容易积累,浮游植物是产生 TOC 的主要来源^[32]. 浮游植物在生长期会排泄出有机物质,据研究,这部分可占到光合作用产物的 30%~40%,而且光合作用产物中的很大一部分转化为 TOC 释放到水体中的过程是非常快的,几乎

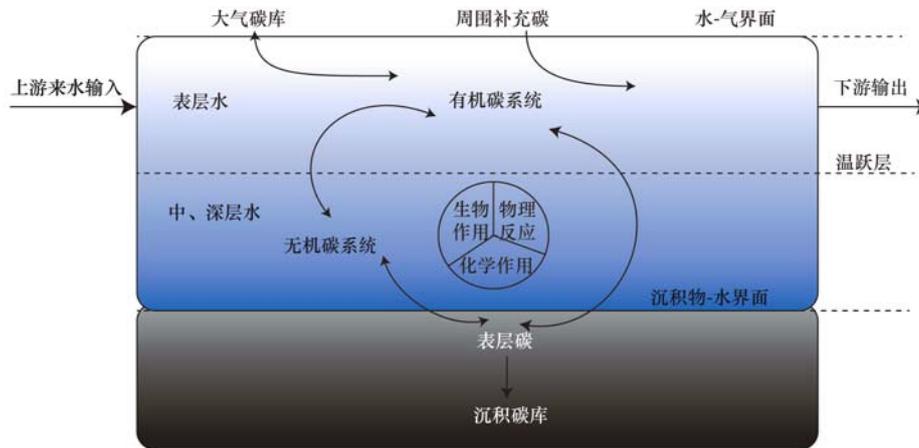


图 6 水库碳循环示意

Fig. 6 Schematic of the reservoir carbon cycle

与光合作用同时进行^[34, 35]。这意味着浮游植物初级生产力高,产生的 TOC 也高。TOC 含量在 GGQ、MV 和 DCS 表、中和底层水体差异明显,其可能原因很多。DCS 与其他 2 座水库的主要差异与浮游植物有关。而不同的水体温度和溶解氧等,将影响水库浮游植物的垂直分布^[36, 37]。适当的水体温度能促进浮游植物的新陈代谢和生长,温度对水体的影响,表现在间接地影响表层水体浮游植物的悬浮,以及浮游植物垂直分布和演替^[38]。水体温度, MV < GGQ < DCS; 而水体溶解氧 MV > GGQ > DCS, 水体热力学状态的差异和溶解氧的差异从而间接影响了水体中 TOC 的分布趋势。相对于 MV 和 GGQ, 不考虑沉积物的影响,影响 DCS 水体 TOC 可能还是主要由于周围枯枝落叶等有机质来源丰富,随雨水或者地表径流流入河中。被水中浮游植物和微生物利用分解,从而影响了水体中的 TOC 分布。MV 的水体理化因子与功果桥的无明显差异,其主要影响因素可能是沉积物的保存状态差异,和外部环境的影响。沉积物经过分解矿化等过程后,GGQ 和 MV 底部都呈现出增大的趋势,而外部环境有机质输入影响使得其在表层和中层,有着截然不同的浊度分布。MV 底层浊度较高,说明沉积物再悬浮或矿化等分解作用的趋势强,而受周围环境的影响小,但受上游来流影响大,水体的 TOC 来源基本是分解水库内部 TOC 和水库截留的上游来流有机质。而 GGQ 的浊度表层高,说明水库周围的有机质输入,其逐渐沉降,从而使得水体 TOC 呈现逐渐减少的趋势,最终使得水体中 GGQ 的 TOC 大于 MV,变化趋势也有所差别。水体浊度是一种光学效应,它反映了光线在透过水层时受到的阻碍。从浊度的分布来看,DCS 的浊度偏小,且无明显变化,说明在水体中悬浮有机质较少的条件下,光照充足,进而水体中的悬浮有机质大多被分解成可溶态的碳,所以

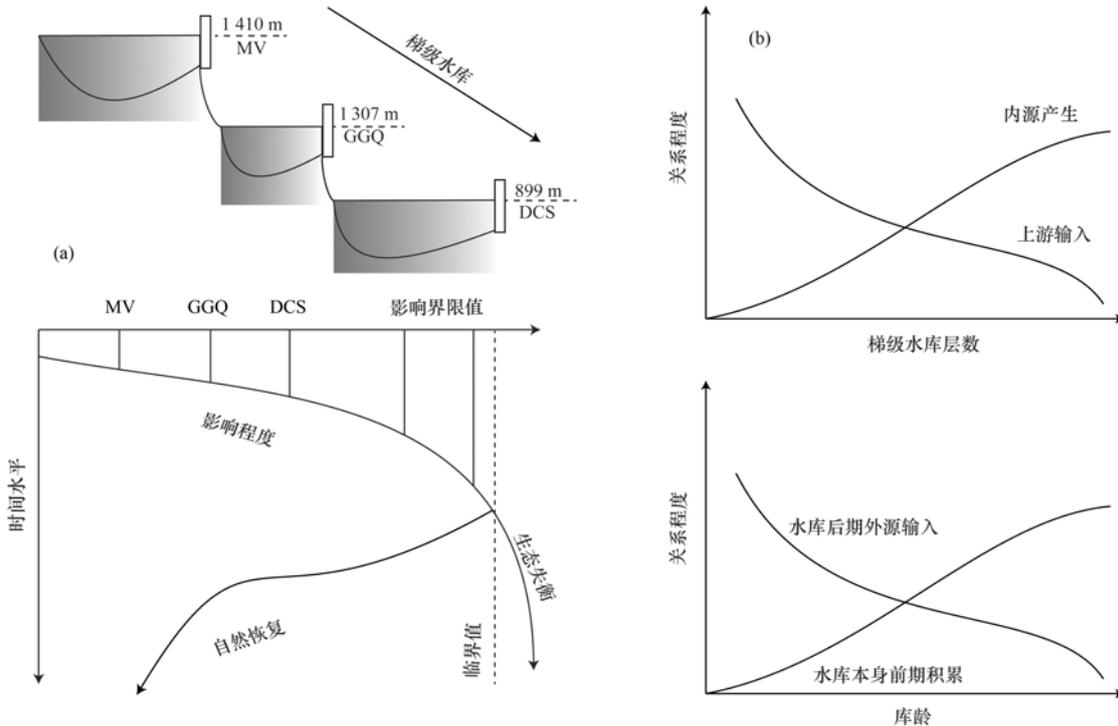
尽管水体的浊度低,但是 TOC 仍然很高。这些都说明 MV、GGQ 和 DCS 在水体 TOC 分布上存在本质区别。

沉积物中 TOC 含量取决于沉积物中有机质的输入量和沉积环境对有机质的保存能力^[39],从 TOC 等指标的相关性分析中,看出 GGQ、DCS 和 MV 有着明显的区别。有机质的输入量来源与水生植物、流域侵蚀带来的陆源植物碎屑和人类污染排放物^[40],而 MV 相对于 DCS、GGQ 其表层有很高的 TOC,是由于水库蓄水后淹没大量储存在植被和土壤中的碳及外源泥沙有机质尚未矿化造成的。而造成 GGQ、DCS 和 MV 在沉积物 TOC 存在明显差异与其两者不同的理化环境和成库状态有关,致使其沉积物处于不同的有机物赋存状态,水库淹没陆地生态系统后,改变被淹没土壤的化学性质,导致其与之前形成截然不同的 TOC 分布和来源,即沉积环境对有机质的保存能力不同。一方面,可能是在不同层次的氧化还原环境氛围中,使得 TOC 出现差异;另一方面,也可能是生源要素的含量差异,使得 TOC 的来源与分布有着显著差异。在不同层次的氧化还原环境氛围中,其 TOC 的来源与分布应该都有显著差异。从 Eh 中可以看出 MV 表层处于弱还原,其余处于还原状态环境,而 GGQ 和 DCS 整体处于还原环境。可以发现三者基本都处于还原环境,因此主要考虑生源要素的影响。而 TN 和 TP 变化剧烈,且含量上的差异,整体上 TN 趋势上是 MV < GGQ < DCS, 而 TP 是 GGQ < MV < DCS。这种差异影响了相关底栖动物和微生物等的生物活性,导致不同程度的有机质滞留与分解,从而使这些物质沉积在沉积物中量的差异性。沉积环境对有机质的保存能力,即生源要素量的差异,造成 GGQ、DCS 和 MV 沉积物垂向分布有如此差异的主要原因。

3.2 澜沧江不同水库沉积物来源差异分析

如图 7 所示, 水库的梯级建设, 使得新老水库存在一定的拦截模式. DCS、GGQ 和 MV 分别距今 17、7 和 2 a. MV 建库时间短, 但由于梯级水库拦截作用, 使得 GGQ 和 DCS 上游来流补充的 TOC 减少. MV 库龄短, 因此只有表层 0~4 cm TOC 沉积的含量高, 在此区段内 MV 水库 TOC 含量 \gg GGQ 水库 TOC 含量 $>$ DCS 水库 TOC 含量, 其最大值为 $81.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 底部在 7 cm 之后沉积的 TOC 含量就相对于 GGQ 和 DCS 来说较小, 且各种来源都很小. 这符合相关人员研究的成果^[20], 其研究表明水库存在拦截效应. 而 GGQ 上游来流在总量上占比小, 且随深度增加逐渐升高. 可以推测 MV 建成后, 其拦截作用, 使得表层补给速率小于分解速率, 从

而表层 TOC 通过矿化等作用被分解, 释放到水体当中, 而中下层滞留于水库底部. GGQ 建库时间相对比 DCS 短, 在上游来流的 TOC 分解还不完全的前提下, 周围植被土壤, 岸边泥, 枯枝落叶等物质的综合影响, 使得 GGQ 的 TOC 来源不同于 MV. 结合水库对河流碳循环的有机碳输入过程影响的相关研究, 对 Verde 的河流-水库系统研究表明, 水库拦截了 72% 的颗粒有机碳, 水库出口处 TOC 含量明显高于入口处, 而水库输出的 TOC 中, 约 1/3 来自于水库^[41]. 并且在中国西洪家渡水库以及猫跳河流域水库研究也表明, 河流经水库作用后水体无机碳体系也发生了显著变化^[42]. 这些学者和研究人员的均表明了水库通过影响河流的物理因子、化学反应、生物过程、从而造成了河流碳循环的异常.



(a) 澜沧江新老水库影响现状及其基本情况, (b) 水库物质属性在时间与空间尺度上的变化趋势

图 7 梯级水库拦截模式

Fig. 7 Cascade reservoir interception mode

本研究表明, 不同库龄水库 TOC 来源差异化现象明显. 建库时间最长的 DCS, 一方面上游来流对其有机碳的补充量不到 10%, 占总量少. 另一方面周边补充量大于 80%, 说明 DCS 已经使上游来流 TOC 基本分解, 而其累积 TOC 是后期补充的周围碳. DCS 的 TOC 含量很高的现象, 可以证明老水库在上游来流很小的前提下, 除水库初期沉积的 TOC 和浮游生物产生的有机物外, 这些周边补充的有机质分解(比如污水, 植被腐蚀质以及冲蚀岸边的土壤等)也会成为 TOC 含量升高的来源. 研究表明, 在库龄 60 a 的水库中仍然可以找到完好无损的

树枝、树干、树根和下层土壤中的腐殖质^[43]. 同样, Lokka 水库蓄水 30 a 后, 库底仍然进行着强烈的厌氧分解, 而浅水区对土壤的侵蚀也会为水库提供有机碳^[44-46]. 这也就解释了为何 DCS 比 GGQ 和 MV 建库时间都长, 而沉积物中仍然有如此高含量的 TOC^[47]. 一方面, 空间尺度上, 随着梯级水库的不断建设, 使得上游来流的碳逐渐被拦截; 另一方面, 时间尺度上, 随着时间的推移, 其水库早期蓄积的有机质被分解消耗, 而后期补充的是周围的碳源, 且梯级水库建设对于 DCS、GGQ 和 MV 的影响程度上 $\text{DCS} > \text{GGQ} > \text{MV}$. 因此如何定义临界值, 在

发挥河流的自然调节能力的同时, 又使其避免生态失衡, 这有待进一步研究。

4 结论

(1) 影响澜沧江梯级水库新老水库水体 TOC 的主要原因是由于水体热力学状态和溶解氧的差异。

(2) 沉积物中主要考虑生源要素的影响, 即沉积环境对有机质的保存能力是造成 DCS、MV 和 GGQ 沉积物垂向分布有差异的主要原因。

(3) 在新库阶段, 澜沧江水库 TOC 主要与上游来流补充有关; 在老库阶段, 其 TOC 主要与周围补充有关。

(4) MV 在时空尺度上处于第一级段, 以累积上游来流 TOC 为主; GGQ 处于第二级段, 主要消耗分解上游来流 TOC; DCS 处于第三级段, 主要积累水库周边 TOC 来源。

参考文献:

- [1] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**(1): 130-137.
- [2] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river-floodplain systems [A]. In: Dodge D P (Ed.). *Proceedings of the International Large River Symposium* [C]. Ontario: Canadian Special Publications Fisheries and Aquatic Sciences, 1989.
- [3] Ward J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, **8**(1): 2-8.
- [4] Hooper R P, Aulenbach B T, Kelly V J. The national stream quality accounting network: a flux-based approach to monitoring the water quality of large rivers [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1089-1106.
- [5] Meybeck M, Helmer R. The quality of rivers: from pristine stage to global pollution [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, **75**(4): 283-309.
- [6] Vörösmarty C J, Sharma K P, Fekete B M, *et al.* The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world [J]. *Ambio*, 1997, **26**(4): 210-219.
- [7] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [8] Humborg C, Danielsson Å, Sjöberg B, *et al.* Nutrient land-sea fluxes in oligotrophic and pristine estuaries of the Gulf of Bothnia, Baltic Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **56**(3-4): 781-793.
- [9] 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.
- [10] Schlesinger W H, Melack J M. Transport of organic carbon in the world's rivers [J]. *Tellus*, 1981, **33**(2): 172-187.
- [11] Ittekkot V. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions [J]. *Nature*, 1988, **332**(6163): 436-438.
- [12] Ni H G, Lu F H, Luo X L, *et al.* Riverine inputs of total organic carbon and suspended particulate matter from the Pearl river delta to the coastal ocean off south China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **56**(6): 1150-1157.
- [13] 韩志伟, 刘丛强, 吴攀, 等. 大坝拦截对河流水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.
- [14] Yu H Y, Rezaee R, Wang Z L, *et al.* A new method for TOC estimation in tight shale gas reservoirs [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, **179**: 269-277.
- [15] Liu E F, Shen J, Hang E L, *et al.* A geochemical record of recent anthropogenic nutrient loading and enhanced productivity in lake Nansihu, China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, **44**(1): 15-24.
- [16] 滕明德, 迟峰, 高庚申. 万峰湖总有机碳空间分布特征 [J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(2): 35-39.
Teng M D, Chi F, Gao G S. Spatial characteristics of total organic carbon in Wanfeng Reservoir [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(2): 35-39.
- [17] Kim B, Choi K, Kim C, *et al.* Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, lake Soyang, Korea [J]. *Water Research*, 2000, **34**(14): 3495-3504.
- [18] 张永领. 河流有机碳循环研究综述 [J]. *河南理工大学学报 (自然科学版)*, 2012, **31**(3): 344-351.
Zhang Y L. The review of the research of the riverine organic carbon cycle [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2012, **31**(3): 344-351.
- [19] dos Santos M A, Matvienko B, Rosa L P, *et al.* Gross greenhouse gas emissions from Brazilian Hydro reservoirs [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al.* (Eds.). *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes; Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments* [C]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 267-291.
- [20] Shi W Q, Chen Q W, Yi Q T, *et al.* Carbon emission from cascade reservoirs: spatial heterogeneity and mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 12175-12181.
- [21] 赵海娟, 肖琼, 吴夏, 等. 漓江地表水体有机碳来源 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3200-3208.
Zhao H J, Xiao Q, Wu X, *et al.* Sources of organic carbon in the surface water of Lijiang river [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3200-3208.
- [22] Stepanauskas R, Moran M A, Bergamaschi B A, *et al.* Sources, bioavailability, and photoreactivity of dissolved organic carbon in the Sacramento-San Joaquin river delta [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **74**(2): 131-149.
- [23] Wang X C, Chen R F, Gardner G B. Sources and transport of dissolved and particulate organic carbon in the Mississippi river estuary and adjacent coastal waters of the northern Gulf of Mexico [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 241-256.
- [24] Waterson E J, Canuel E A. Sources of sedimentary organic matter in the Mississippi river and adjacent Gulf of Mexico as revealed by lipid biomarker and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ analyses [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**(4): 422-439.
- [25] 望雪, 程豹, 杨正健, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5):

- 2126-2134.
Wang X, Cheng B, Yang Z J, *et al.* Differences in diffusive fluxes of nutrients from sediment between the natural river areas and reservoirs in the Lancang river basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2126-2134.
- [26] 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 等. 澜沧江流域水体悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 空间差异及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4964-4971.
Tang Y C, Xu P, Yang Z J, *et al.* Spatial difference and causes analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of suspended particulate matter in the Lancang river basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4964-4971.
- [27] Delmas R, Galy-Lacaux C, Richard S. Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 993-1003.
- [28] Rosa L P, Aurelio Dos Santos M, Matvienko B, *et al.* Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(7): 1443-1450.
- [29] Kelly C A, Rudd J W M, Bodaly R A, *et al.* Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental reservoir [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(5): 1334-1344.
- [30] Galy-Lacaux C, Delmas R, Kouadio G, *et al.* Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**(2): 503-517.
- [31] Abril G, Guérin F, Richard S, *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): GB4007.
- [32] Minor E C, Simjouw J P, Mulholland M R. Seasonal variations in dissolved organic carbon concentrations and characteristics in a shallow coastal bay[J]. *Marine Chemistry*, 2006, **101**(3-4): 166-179.
- [33] Fearnside P M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-una dam [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, **10**(4): 675-691.
- [34] 彭兴跃, 洪华生, 商少凌. 台湾海峡真光层有机碳动力学研究——DOC大幅度的日变化[J]. *海洋学报*, 1997, **19**(3): 57-65.
- [35] Wood A M, Rai H, Garnier J, *et al.* Practical approaches to algal excretion[J]. *Marine Microbial Food Webs*, 1992, **61**: 21-38.
- [36] Ahn C Y, Chung A S, Oh H M. Rainfall, phycocyanin, and N: P ratios related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir[J]. *Hydrobiologia*, 2002, **474**(1-3): 117-124.
- [37] Han B P, Armengol J, Garcia J C, *et al.* The thermal structure of Sau reservoir (NE: Spain): a simulation approach [J]. *Ecological Modelling*, 2000, **125**(2-3): 109-122.
- [38] 李秋华, 商立海, 李广辉, 等. 万峰湖浮游植物群落的时空分布[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 1031-1038.
Li Q H, Shang L H, Li G H, *et al.* Temporal and spatial characteristics of phytoplankton community in Wanfeng Reservoir [J]. *Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 1031-1038.
- [39] 马龙, 吴敬禄. 安固里淖湖积物中总有机碳含量及其碳同位素的环境意义[J]. *自然资源学报*, 2009, **24**(6): 1099-1104.
Ma L, Wu J L. Environmental significance from organic carbon and its isotope of Angulinao lake sediment[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, **24**(6): 1099-1104.
- [40] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1301-1346.
- [41] Parks S J, Baker L A. Sources and transport of organic carbon in an Arizona river-reservoir system[J]. *Water Research*, 1997, **31**(7): 1751-1759.
- [42] 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.
- [43] Van Coillie R, Visser S A, Campbell P G C, *et al.* Evaluation de la dégradation du bois de conifères immergés durant plus d'un demi-siècle dans un réservoir[J]. *Annales de Limnologie*, 1983, **19**(2): 129-134.
- [44] Huttunen J T, Väisänen, Hellsten S K, *et al.* Fluxes of CH_4 , CO_2 , and N_2O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(1): 1003.
- [45] 李思亮, 刘丛强, 丁虎, 等. $\delta^{13}\text{C}$ -DIC在河流风化和碳生物地球化学过程中的应用[J]. *地球环境学报*, 2012, **3**(4): 929-935.
Li S L, Liu C Q, Ding H, *et al.* The application of $\delta^{13}\text{C}$ -DIC on weathering and biogeochemical processes of carbon in rivers [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, **3**(4): 929-935.
- [46] 杨玉雪, 向鹏, 卢玮琦, 等. 贵州乌江渡水库沉积速率及碳氮埋藏通量估算[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(1): 66-73.
Yang Y X, Xiang P, Lu W Q, *et al.* The sedimentation rate and burial fluxes of carbon and nitrogen in Wujiangdu reservoir, Guizhou, China [J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(1): 66-73.
- [47] 李昶. 不同水库淤积形态对总有机碳、总氮埋藏通量的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
Li C. The impacts of different types of reservoir siltation on the burial fluxes of total organic carbon and total nitrogen [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)