

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附铅的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品晶 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响

李程遥^{1,2}, 黄廷林^{1,2*}, 温成成^{1,2}, 梁伟光^{1,2}, 林子深^{1,2}, 杨尚业^{1,2}, 李凯^{1,2}, 蔡晓春³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 3. 李家河水库管理有限公司, 西安 710016)

摘要: 为探究汛期暴雨径流对水库有机质的影响,以李家河水库为例,采用三维荧光光谱-平行因子法 (EEMs-PARAFAC) 及紫外-可见 (UV-Vis) 吸收光谱法分析径流过程中 4 个时期 (径流前、径流洪峰期、径流 1 周后和 6 周后) 溶解性有机质 (DOM) 含量及组分变化。结果表明:① 径流洪峰期水库水体浊度、DOC 含量显著升高 ($P < 0.01$), 洪峰期后逐步下降;② 紫外-可见光谱特征参数显示,径流洪峰期 $a(254)$ 和 $a(355)$ 显著升高 ($P < 0.01$), 而 E2/E3 和 E3/E4 显著降低 ($P < 0.01$), 表明暴雨径流使水库水体 DOM 的浓度、相对分子质量和腐殖化程度升高;③ 李家河水库共解析出 4 种荧光 DOM 组分,分别为陆源腐殖质组分 (C1、C2)、微生物腐殖质组分 (C3) 和类色氨酸组分 (C4), 径流洪峰期 C1 ~ C3 组分荧光强度显著升高 ($P < 0.05$), 表明暴雨径流大幅增加了水库 DOM 类腐殖质组分含量,洪峰期后 C1 ~ C4 组分荧光强度不断降低,表明径流后 DOM 不断沉降和降解。④ Pearson 相关性分析显示暴雨径流后水体 DOM 荧光强度和浊度呈现显著的相关性 ($r > 0.467$, $P < 0.05$), 表明 DOM 的减少和悬浮物沉降有关,主成分分析 (PCA) 表明暴雨径流事件的各个时期水库水质呈现出不同的特征。本研究阐明了暴雨径流对李家河水库 DOM 含量和组分短期及后续影响,为饮用水水库水质管理提供了科学支撑。

关键词: 李家河水库; 暴雨径流; 溶解性有机质 (DOM); 紫外-可见 (UV-Vis) 吸收光谱; 三维荧光光谱 (EEMs)

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1391-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007276

Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season

LI Cheng-yao^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2*}, WEN Cheng-cheng^{1,2}, LIANG Wei-guang^{1,2}, LIN Zi-shen^{1,2}, YANG Shang-ye^{1,2}, LI Kai^{1,2}, CAI Xiao-chun³

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Lijiahe Reservoir Management Co. Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: To explore the influence of storm runoff on reservoir organic matter during the flood season, the Lijiahe Reservoir was selected to analyze variations in the content and components of dissolved organic matter (DOM) during four periods (before runoff, flood peak period, 1 week after runoff, and 6 weeks after runoff) using three-dimensional fluorescence spectroscopy parallel factor analysis (EEMs-PARAFAC) and ultraviolet-visible (UV-Vis) spectra. The results showed that: ① the turbidity and DOC content of the reservoir increased significantly during the flood peak period ($P < 0.01$) and gradually decreased thereafter; ② the UV-Vis spectrum characteristics showed that $a(254)$ and $a(355)$ were significantly increased in the flood peak period ($P < 0.01$) while E2/E3 and E3/E4 were significantly decreased ($P < 0.01$), indicating that the concentration, relative molecular weight, and degree of DOM humification in the reservoir were increased by storm runoff; ③ four DOM components were identified as terrestrial humus (C1 and C2), microbial humus (C3), and a tryptophan-like component (C4). The fluorescence intensity of the C1-C3 components increased significantly during the flood peak period ($P < 0.05$), indicating that the increase in the DOM humic-like component was caused by the storm runoff. At the same time, a decrease in the fluorescence intensity of the C1-C4 components was observed after the flood peak period, indicating that DOM continuously settled and degraded after runoff; and ④ Pearson's correlation analyses showed that DOM fluorescence intensity and turbidity were significantly correlated ($r > 0.467$, $P < 0.05$), indicating that the observed decrease in DOM content was related to the sedimentation of suspended solids. A principal component analysis (PCA) showed that the water quality in the reservoir reflected the observed characteristics during the different runoff periods. Overall, this study reveals the effects of the storm runoff on DOM content and its components over the short and long term, providing scientific support for the management of drinking water quality.

Key words: Lijiahe Reservoir; storm runoff; dissolved organic matter (DOM); ultraviolet-visible (UV-Vis) spectrum; three dimensional excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs)

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2020-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979217); 陕西省重点研发计划项目 (2018ZDXM-SF-020, 2019ZDLSF06-01, 2019ZDLSF06-02)

作者简介: 李程遥 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水源水库污染物演替及水质改善, E-mail: xauatlichengyao@163.com

* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

湖泊与水库是我国重要的水源地且数量逐年增长^[1,2],其主要来水依托外源补给与汇入.因此,源水水库水体水质受输入性水体水质的影响较大,尤其是在水库蓄水的关时期雨季(或湿季).同时,异于河流水体,水库水体因低流速和长滞留时间致使内存水体水质发生着复杂的物化及生物变化^[3].在众多输入性污染物中,高含量的溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)对饮用水水质威胁较大,如气味和消毒副产物问题等^[4,5].因此,源水水库 DOM 的解析,尤其是暴雨径流过程对水库有机质影响的研究显得尤为重要.

溶解性有机质(DOM)是全球最大的有机碳库^[6],主要包括亲水性有机酸、类蛋白、类氨基酸、类腐殖酸和碳水化合物等^[7],湖泊、河流和水库通过接收、储存和处理大量 DOM 在全球碳循环中发挥着重要作用^[8-12].有色溶解有机物(CDOM)是 DOM 的“有色部分”,对紫外区和蓝光区的光线呈较好的吸收^[13],通过 CDOM 的特征吸收和荧光光谱可一定程度上揭示 DOM 的来源及组成特征^[14].早期研究表明陆地有机物是水生态系统中 DOM 的主要来源^[15],降雨径流所裹挟带入的高浓度陆地 DOM 占流域有机质的绝大部分^[16].暴雨径流期,土壤中的 DOM 可以通过地表径流和地下径流汇入河流或湖泊中^[17,18].针对降雨径流对湖库水体 DOM 的影响,国内外学者开展了广泛地研究. Zhang 等^[19]对天目湖流域 DOM 的研究指出,在湿季 DOM 类腐殖质组分占比增加,类蛋白组分占比减少. Warner 等^[20]

的研究表明,降雨事件有助于驱动饮用水湖泊溶解性有机碳(DOC)浓度和性质的短期突变,变化程度与湖泊停留时间及湿地面积占比有关. Packer 等^[21]对美国犹他州山区融雪径流中 DOM 动力学研究表明,土壤腐殖质是融雪径流中 DOM 的主要组分,且与汞的迁移有关. Jeznach 等^[22]对美国 Wachusett 水库春夏季极端降雨事件进行模拟,结果表明,DOC、UV₂₅₄等在极端降雨事件期间超过历史记录值,且降雨强度越大,相应指标越高.

已有汛期暴雨事件 DOM 的相关研究主要以季节、干湿季等大尺度为主,对于短时间分辨率下的高强度暴雨事件中水库 DOM 的变化以及后续 DOM 的沉降和降解等关注较少^[23].本研究以李家河水库为例,采用紫外-可见(UV-Vis)吸收光谱和三维荧光光谱-平行因子分析法(EEMs-PARAFAC)对2019年9~10月强降雨事件前后水库 DOM 变化进行解析,探究暴雨径流对水库有机质浓度和组分的短时及后续影响,以期水源水库制定合理有效的水质管理方案提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

李家河水库(图1)位于西安市蓝田县境内,于2015年建成蓄水,为西安市重要的饮用水供水水源之一^[24].李家河水库源起秦岭山脉,主要接纳东采峪、西采峪方向来水,上游被森林及农田覆盖,流域面积362 km²,水域面积2.18 km².

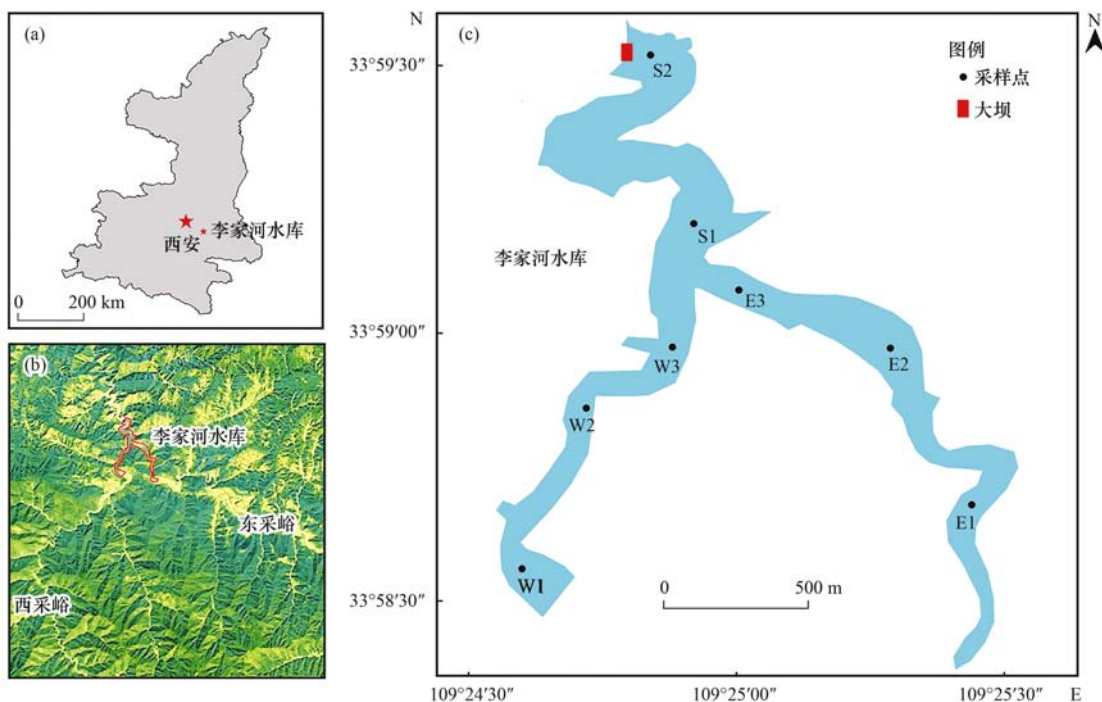


图1 李家河水库采样点位置分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Lijiahe Reservoir

李家河水库所处地带为温带季风性气候,四季分明,降雨主要集中在7~9月。2019年9月降雨量为231 mm,占全年总降雨量的32%,入库水量为2 729万 m^3 ,占全年总入库量的50%。如图2所示,9月强降雨事件主要集中在9月10~18日,总降雨量为199 mm,期间水位由838.5 m上升至864.5 m,库容增加2023万 m^3 ,最大日入库流量为118.6 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (9月15日)。9月19日至10月27日期间降雨量较少,没有出现暴雨天气,降雨多为短时少量降雨,总降雨量为72 mm,日入库流量较小,水位较为稳定。鉴于此次径流入库未达到泄洪水位(880 m),故暴雨径流后水位保持在867.5 m左右。

为了探究暴雨径流对水库水质的影响,在水库共布设8个取样点(图1),覆盖入库(东、西采峪:E1~E3和W1~W3)、汇流(S1)和主库区坝前(S2),研究点布设合理且全面,可有效反映水库暴雨径流期水质演替规律。

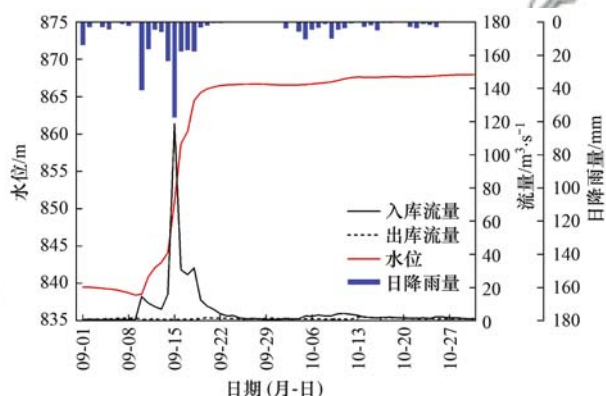


图2 2019年9~10月李家河水库入库流量、出库流量、水位和日降雨量变化

Fig. 2 Variations in inflow volume, outflow volume, water level, and daily rainfall in Lijiahe Reservoir from September to October 2019

1.2 水样采集与监测

本研究于径流前(9月8日)、径流洪峰期(9月15日)、径流1周后(9月24日)和径流6周后(10月27日)这4个时期开展李家河水库表层水体(0~2 m)原位监测取样。此外,为研究受暴雨径流影响后的水库水体CDOM的详细变化过程,于10月的2、10和17日对采样点S2表层水体增加采样,本研究共采集35个样品。现场采用HACH HydroLabDS5型水质分析仪测定水体浊度,用2 L预先清洗过的聚乙烯瓶收集水样,置于4℃冰箱避光保存,在48 h内完成各项指标的测定。

1.3 理化指标测定

根据文献[1]测定理化指标,总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,总磷(TP)和溶

解性总磷(DTP)采用钼锑抗分光光度法测定。TN、TP和DTP测定过程中每组样品设置两个全程序空白样品,在分析结果中扣除全程序空白值对检测结果进行修正。水样经0.45 μm Whatman GF/F滤膜过滤后,溶解性有机碳(DOC)采用有机碳分析仪(日本,岛津)测定。每批次检测设置不少于10%的平行样,本研究TN、TP、DTP和DOC平行样测定相对标准偏差范围分别为0.18%~0.87%、3.63%~7.07%、4.29%~9.43%和0.33%~5.21%。

1.4 紫外-可见吸收光谱的测定

经0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤后的水样采用DR6000型分光光度计(美国,HACH)测定紫外-可见吸收光谱,以Mill-Q超纯水为空白,用1 cm石英比色皿,以1 nm为扫描间隔,在200~800 nm范围内进行吸光度测定。吸收系数计算公式为^[25]:

$$a^*(\lambda) = 2.303D(\lambda)/r \quad (1)$$

$$a(\lambda) = a^*(\lambda) - a^*(700) \cdot \lambda/700 \quad (2)$$

式中, λ 为波长(nm); $a^*(\lambda)$ 为未经散射校正的波长为 λ 处的吸收系数(m^{-1}); $D(\lambda)$ 为波长 λ 处的吸光度; $a(\lambda)$ 为经过散射校正后的波长为 λ 处的吸收系数(m^{-1}); r 为光程路径(m)。本文选取254 nm和355 nm处的吸收系数 $a(254)$ ^[26]和 $a(355)$ ^[27]来表示CDOM的相对浓度,吸收系数越高代表CDOM相对浓度越高。E2/E3是250 nm和365 nm处的紫外吸光度之比,可以反映CDOM相对分子质量大小,其值越高,CDOM相对分子质量越小^[28]。E3/E4是300 nm和400 nm处的紫外吸光度之比,用来衡量CDOM腐殖化程度,其值越高,CDOM腐殖化程度越低^[25]。SUVA(260)为 $a(260)$ 和DOC浓度的比值,用来衡量CDOM疏水性组分比例,其值越大,疏水性组分比例越高^[29]。SUVA(280)为 $a(280)$ 和DOC浓度的比值,用来衡量CDOM芳香性强弱,其值越大,CDOM芳香性越强^[30]。

1.5 三维荧光光谱的测定

三维荧光光谱采用F-7000荧光分光光度计(日本,日立)进行测定。用Mill-Q超纯水做空白,激发波长(E_x)范围为200~450 nm,波长间隔5 nm,发射波长(E_m)范围为250~600 nm,波长间隔1 nm,扫描速度为12 000 $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。利用MATLAB 2018a软件中的DOMFluor工具箱,通过运行“N-way toolbox”和“DOMFluor toolbox”程序包,对导入的35个样品的荧光矩阵进行瑞利散射和拉曼散射的识别和剔除并进行平行因子分析,通过残差分析确定荧光组分数,利用折半分析来验证结果的可靠性^[31]。本研究用最大荧光强度(F_{max})来表征CDOM各组分的浓度^[32]。

腐殖化指数(HIX)^[30]为在 $E_x = 254\text{ nm}$ 时, E_m 在 $435 \sim 480\text{ nm}$ 和 $300 \sim 345\text{ nm}$ 荧光强度积分值之比,用来衡量腐殖化程度,HIX 值越高,腐殖化程度越高.生物源指数(BIX)^[33]为在 $E_x = 310\text{ nm}$ 时, E_m 在 380 nm 和 430 nm 处的荧光强度之比,用来衡量 DOM 自生源相对贡献率,也可以衡量 DOM 生物可利用性的高低.

1.6 数据分析

本研究采用 SPSS 21.0 软件进行 Pearson 相关性分析和配对 t 检验,采用 R 软件进行主成分分析(PCA),采用 Origin 2018 软件进行数值归一化,李家河水库水体浊度及 DOC 空间分布采用 ArcGIS 10.7 软件插值模块绘图分析,其余绘图及分析均采用 Origin 2018 软件.

2 结果与分析

2.1 径流前后水体氮磷、浊度和有机碳分布变化

2.1.1 氮、磷分布变化

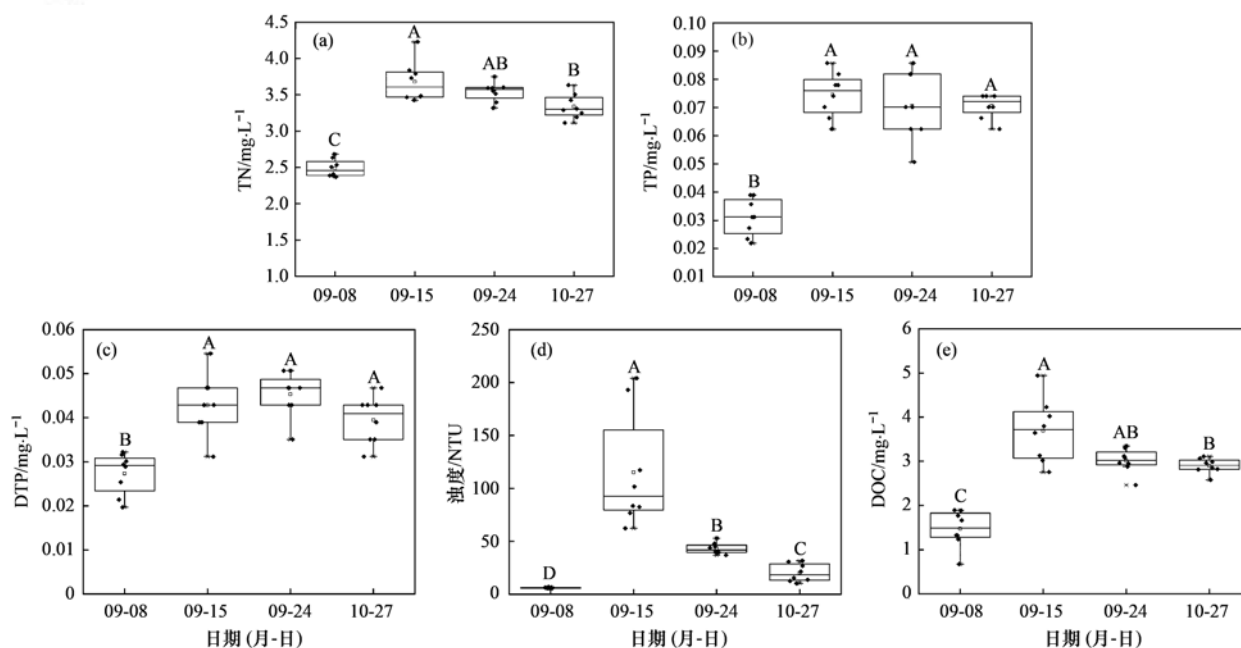
图 3 为李家河水库径流前后理化指标变化.如图 3(a)~3(c)所示,径流前(9月8日)氮、磷浓度相对较低,TN、TP 和 DTP 平均浓度为 2.49 、 0.031 和 $0.027\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时 TP 达到Ⅲ类水体标准($\text{TP} < 0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);径流洪峰期(9月15日)TN、TP 和 DTP 平均浓度均有所上升,显著高于暴雨径流前($P < 0.01$),达到 3.68 、 0.075 和 $0.043\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,尤其 TP 已超Ⅲ类标准;洪峰期后(9月24日和10月27日),TN、TP 和 DTP 浓度较径流洪峰期有所降

低,但仍高于径流前,表明在没有泄洪(排浊蓄清)的前提下,暴雨径流会大幅度降低水库水质,且水质短期无法依靠自净作用快速恢复.

2.1.2 浊度、DOC 分布变化

如图 3(d)~3(e)所示,李家河水库水体浊度和 DOC 浓度变化与氮、磷的变化趋势相似,暴雨径流导致水体浊度和 DOC 浓度在洪峰期显著升高($P < 0.01$),洪峰期后随着颗粒态悬浮物的不断沉降,浊度及 DOC 均有所下降.浊度和 DOC 浓度分别经历了从 $(6.2 \pm 0.4)\text{ NTU}$ 和 $(1.471 \pm 0.416)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (径流前)、 $(115.1 \pm 54.1)\text{ NTU}$ 和 $(3.691 \pm 0.719)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (径流洪峰期)到 $(20.3 \pm 8.5)\text{ NTU}$ 和 $(2.899 \pm 0.169)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (径流 6 周后,10月27日)的变化.

图 4 为李家河水库浊度和 DOC 浓度时空分布.从中可知,径流前(9月8日)浊度和 DOC 沿程空间分布均匀,径流洪峰期(9月15日)表现为上游入库区域高且沿程降低,上游 E1、E2、W1 和 W2 这 4 个采样点浊度和 DOC 浓度平均值分别为 154.0 NTU 和 $4.246\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均显著高于下游 E3、W3、S1 和 S2 这 4 个采样点的 76.3 NTU ($P < 0.01$) 和 $3.144\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P < 0.01$).这是因为在洪峰期上游来水浊度和有机物浓度较高,水体沿程不断被水库原有水体稀释且悬浮颗粒不断沉降.径流 1 周后(9月24日),浊度和 DOC 浓度表现为上游入库区域低但主库区高的特征,浊度和 DOC 浓度最大值均在距离水库大坝最近的 S2 采样点.原因是水库大坝阻隔了有



组间不存在相同字母表示差异性显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),组间平均值大小顺序为 $A > B > C > D$

图 3 径流前后 TN、TP、DTP、浊度和 DOC 变化

Fig. 3 Variations in TN, TP, DTP, turbidity, and DOC before and after storm runoff

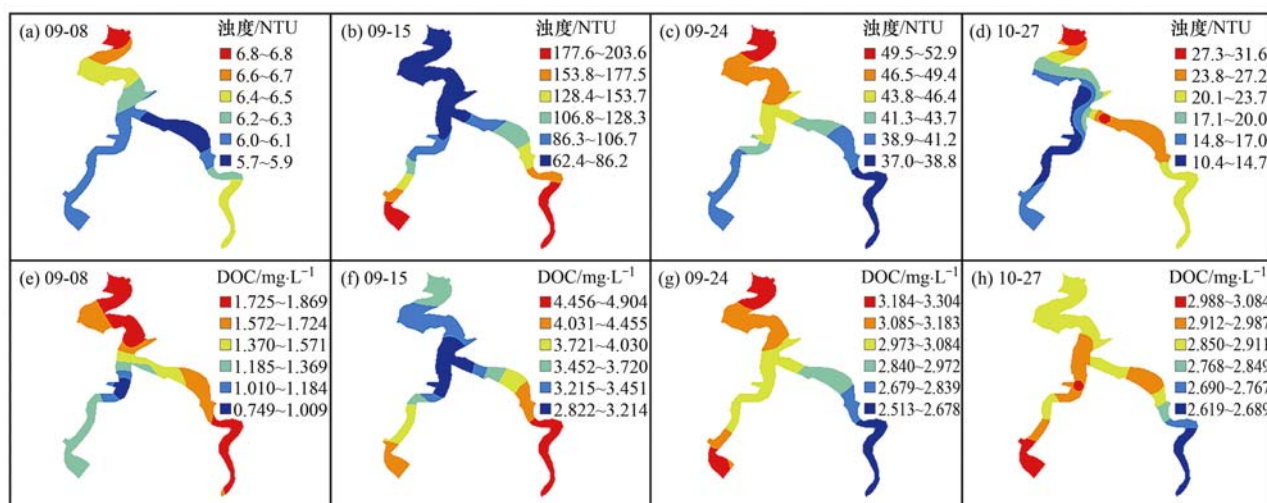


图4 径流前后浊度和DOC时空分布

Fig. 4 Spatio-temporal patterns of turbidity and DOC before and after storm runoff

机质传输,致使有机质在坝前区域积累.径流6周后(10月27日),随着悬浮颗粒的持续沉降以及水体的不断混合,水库浊度和DOC浓度空间分布趋于均匀.

2.2 径流前后水体紫外-可见吸收光谱特征分析

图5为李家河水库径流前后DOM相关的紫外-可见吸收光谱特征指标变化.如图5(a)~5(b)所示,以 $a(254)$ 和 $a(355)$ 为代表的DOM浓度与DOC浓度变化一致,即径流前DOM浓度较低,径流洪峰期显著增加($P < 0.01$),洪峰期后,其值逐步下降,表明暴雨径流裹挟大量有机质,使水库DOM浓度短期大幅增加,径流结束后依托悬浮物的沉降及水体自净,水库有机污染得到一定改善.

如图5(c)~5(d)所示,相较于暴雨径流前,径流洪峰期 $E2/E3$ 和 $E3/E4$ 值显著降低($P < 0.01$),表明暴雨径流输入主要以腐殖质类大分子DOM为主,洪峰期后, $E2/E3$ 值升高但 $E3/E4$ 值降低,表明输入型大分子DOM通过水体自净逐步转化为小分子且DOM腐殖化程度不断增加.

如图5(c)~5(d)所示,径流洪峰期较径流前SUVA(260)和SUVA(280)的平均值没有显著差异但略有降低,说明径流来水与水库水体芳香性程度和疏水性组分含量相近.洪峰期后SUVA(260)和SUVA(280)均有下降趋势,说明DOM芳香性和疏水性组分含量不断降低.

2.3 径流前后CDOM三维荧光特征分析

2.3.1 径流前后CDOM组分解析

通过平行因子分析法对李家河水库35个水样进行三维荧光解析,共获得4种CDOM组分,其光谱图和荷载图见图6.从中可知,已解析的4种组分可分为类腐殖质(C1、C2和C3)和类蛋白(C4)两大

类,其中,C1($E_x/E_m = 275/482$ nm)和C2($E_x/E_m = 245/434$ nm)组分为陆源腐殖质^[34,35],C3($E_x/E_m = 305/398$ nm)组分属于微生物腐殖质,与细菌以及藻类细胞释放的胞外腐殖质类似^[36],C4($E_x/E_m = 280/334$ nm)组分为类蛋白组分的类色氨酸基团,主要为自生源如藻类降解产生,也可能来源于人类生活污水排放^[37].

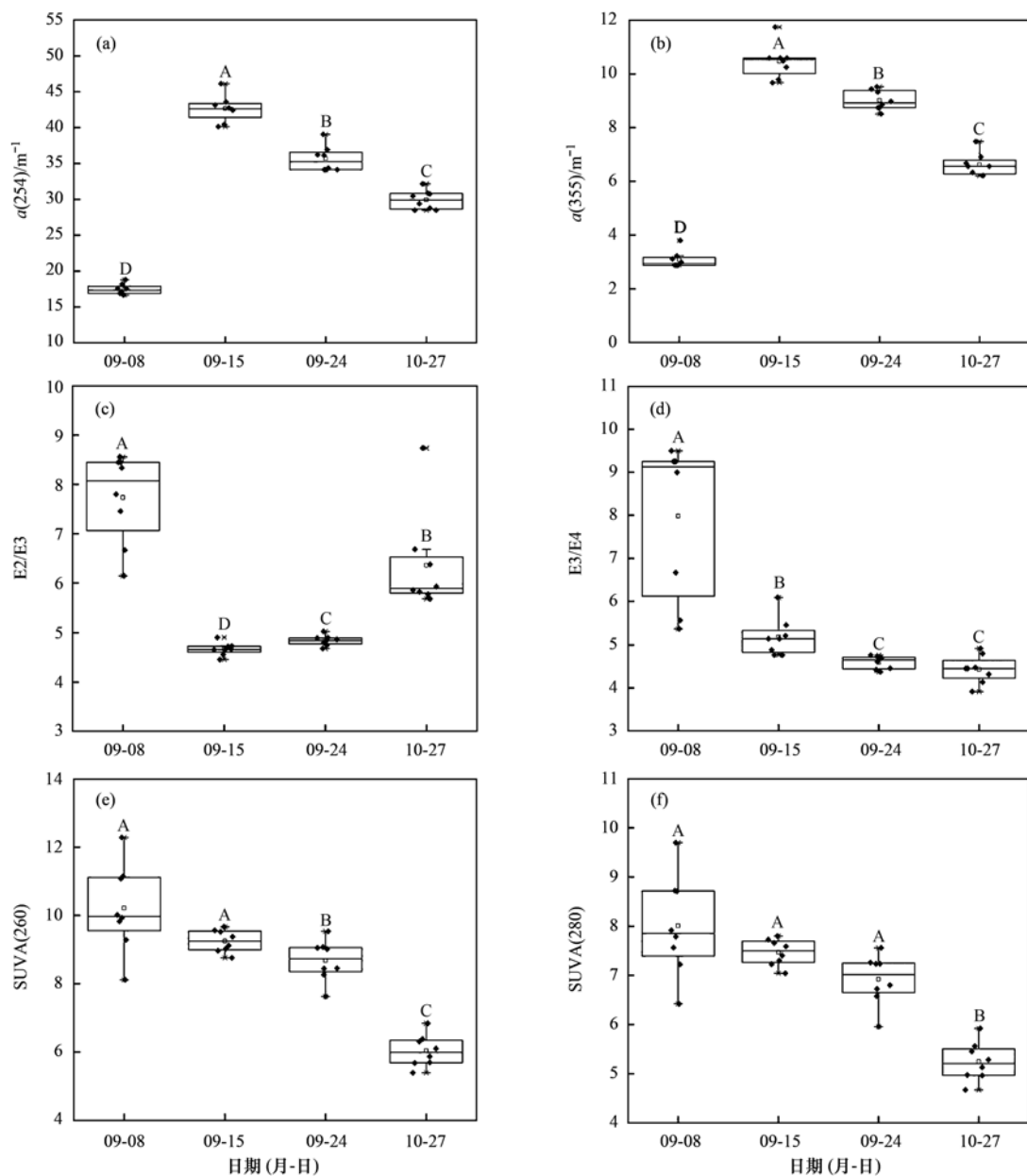
2.3.2 径流前后CDOM荧光组分变化

图7为李家河水库暴雨径流前后CDOM各组分荧光强度及占比变化.如图7(a)~7(d)所示,径流前C1~C3组分(类腐殖质)荧光强度分别为(588 ± 23)、(947 ± 29)和(626 ± 25) A. U.,径流洪峰期分别为(1301 ± 108)、(1827 ± 156)和(1096 ± 146) A. U.,较径流前显著升高($P < 0.01$),洪峰期后C1~C3组分荧光强度均有下降趋势,至10月27日分别降至(1081 ± 59)、(1516 ± 65)和(1085 ± 37) A. U.,即类腐殖质荧光强度呈现先增加后降低的趋势.径流前、径流洪峰期和径流6周后(10月27日)C4组分(类蛋白)的荧光强度分别为(825 ± 200)、(395 ± 84)和(334 ± 27) A. U.,即类蛋白组分含量呈逐步降低趋势.

如图7(e)~7(f)所示,暴雨径流发生后类腐殖质(C1~C3)占比呈上升趋势,类蛋白(C4)占比呈下降趋势,可能原因是暴雨径流CDOM主要以陆源腐殖质为主,暴雨径流输入增加了水库类腐殖质(C1~C3)的相对含量及占比,径流结束后类腐殖质组分含量持续下降,但可能是由于类蛋白组分更易降解,含量下降幅度更大,导致类腐殖质占比持续升高.

2.3.3 径流前后CDOM荧光特征参数分析

Huguet等^[33]的研究指出 $HIX < 4$ 代表弱腐殖



组间不存在相同字母表示差异性显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 组间平均值大小顺序为 $A > B > C > D$

图5 径流前后 $a(254)$ 、 $a(355)$ 、 $E2/E3$ 、 $E3/E4$ 、 $SUVA(260)$ 和 $SUVA(280)$ 变化

Fig. 5 Variations in $a(254)$, $a(355)$, $E2/E3$, $E3/E4$, $SUVA(260)$, and $SUVA(280)$ before and after storm runoff

化特征,如图7(g)所示,9月8日李家河水库 HIX 平均值为 2.91,说明径流之前李家河水库 CDOM 腐殖化程度相对较低。9月15日、9月24日和10月27日,HIX 逐渐升高,其平均值分别为 5.56、7.36 和 8.46,这也和 C1~C3 组分占比的分布较为一致,说明径流发生后 CDOM 腐殖化程度持续升高。

BIX 在 0.6~0.7 之间时,CDOM 具有较低的自生源特征,BIX 在 0.7~0.8 之间时,CDOM 具有中度自生源特征,BIX 在 0.8~1.0 之间时,CDOM 具有较强的自生源特征^[33]。如图7(h)所示,李家河水库在径流前 BIX 平均值为 0.82,CDOM 自生源特征较强,主要由自身环境产生。由于暴雨径流大量外源有机物的输入,BIX 平均值在9月15日显著下降至

0.68 ($P < 0.01$)。径流结束后自生源特征不断增强,BIX 平均值在9月24日和10月27日分别为 0.71 和 0.76,达到中度自生源特征。

2.4 径流后 CDOM 沉降和降解过程分析

以9月15日至10月27日 S2 采样点开展暴雨径流发生后 CDOM 组分的降解过程的分析,具体过程为:以9月15日为第1d,10月27日为第43d,对该期间 S2 采样点的 DOC 浓度、CDOM 各组分三维荧光相应参数及紫外-可见吸收光谱特征参数同除以相应的最大值进行归一化处理。如图8(a)所示,C1~C4 组分荧光强度及 DOC 浓度在洪峰期后呈现不同程度的降低,其中 C4 组分降低幅度最大。如图8(b)所示, $SUVA(260)$ 和 $SUVA(280)$ 不断降低表

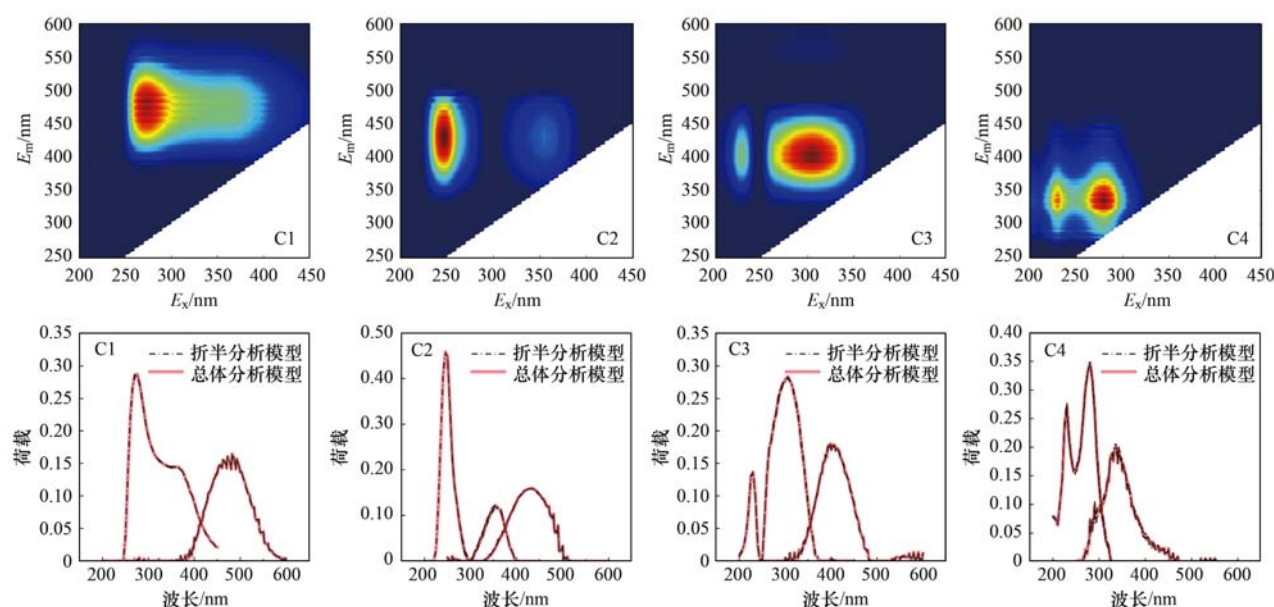


图6 李家河水库4种DOM荧光组分光谱及其激发发射荷载

Fig. 6 Fluorescence spectra of four CDOM components in Lijiahe Reservoir

明在 DOM 降解过程中,其疏水性和芳香性组分含量不断降低,E3/E4 值的降低表明水体腐殖化程度不断升高.如图 8(c)所示,E2/E3 和 HIX 的不断升高表明 DOM 降解过程中相对分子质量不断降低且水体腐殖化程度不断升高,BIX 的不断升高表明径流后 CDOM 生物可利用性不断升高.综上所述,S2 采样点 CDOM 在径流后的变化过程进一步印证了李家河水库 CDOM 在径流后的总体变化趋势.

图 9 为径流发生后的水体浊度与 C1 ~ C4 组分荧光强度的相关性分析结果.从中可知,浊度与 C1 ~ C4 组分荧光强度相关性显著 ($r > 0.467$, $P < 0.05$),表明径流后随着水体浊度降低,CDOM 各荧光组分也随之降低,反映了径流后水体颗粒沉降是 DOM 降解的重要过程.

2.5 DOM 组分与环境因子相关性分析

为进一步明晰暴雨径流前后 DOM 组分及特征参数与水质因子间的关系,开展了主成分分析 (PCA),其中 PC1 和 PC2 分别解释了 66.8% 和 18.6%,总共解释 85.4% 的变化,表明 PCA 分析可有效反映暴雨径流前后 DOM 的总体变化过程,具体结果见图 10.如图 10(a)所示,PC1 与 3 类腐殖质 (C1、C2、C3)、氮磷 (TN、TP、DTP)、浊度、DOC、 $a(254)$ 、 $a(355)$ 和 HIX 呈正相关,与类蛋白 (C4)、SUVA(260)、SUVA(280)、E2/E3、E3/E4 和 BIX 呈负相关,这表明 PC1 代表了暴雨径流对水库的影响,使水库溶解性有机质、氮磷、浊度和腐殖化程度增加. PC2 与 SUVA(260)、SUVA(280)、C4 和 E3/E4 呈正相关,与 E2/E3 和 BIX 呈负相关,这表明 PC2 代表高芳香性和疏水性、高类蛋白组分含量、低

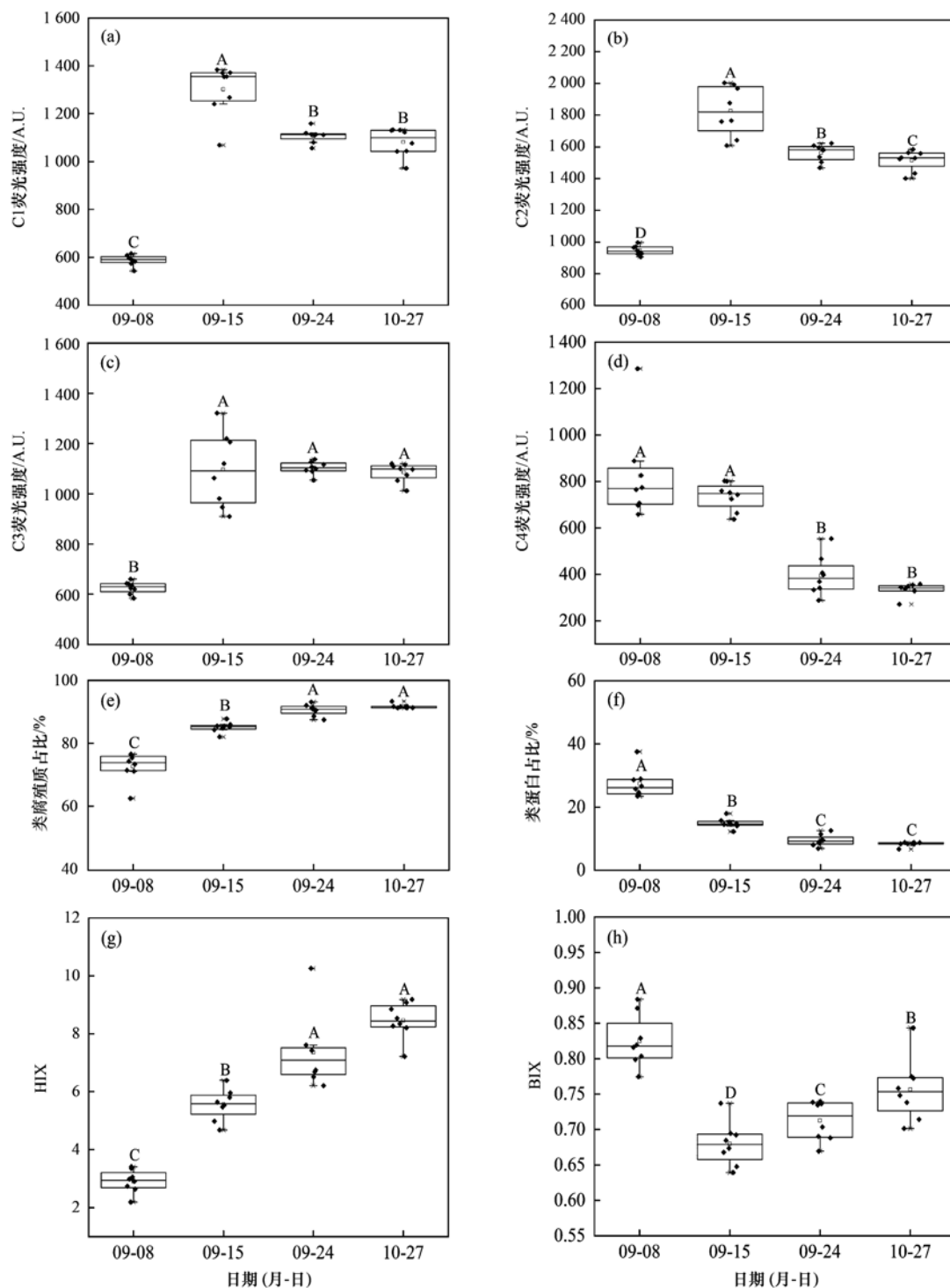
腐殖化程度、低分子量和低自生源贡献率的水质特征.不同时期的水样在主成分上的得分如图 10(b)所示,径流前(9月8日)的水样主要分布在 PC1 得分较低处,径流后(9月15日、9月24日和10月27日)的水样主要分布在 PC1 得分较高处,且9月15日至10月27日水样的 PC1 和 PC2 评分不断降低.这些分布的不同进一步印证了李家河水库径流前后 DOM 的变化过程.

3 讨论

3.1 暴雨径流对水库 DOM 的影响

地表水体有机质主要来源于内源过程及陆源输入^[38],短时强降雨将导致流域内有机质被大量裹挟至水体.本研究中,水库暴雨径流期 DOM 浓度急剧升高且后续污染周期较长(图 3 ~ 7),河流“拦坝化”阻碍了碳、氮和磷等营养物质传输^[39],致使 DOM 在水库积累,高强度大流量输入的 DOM 难以短期内沉降及自净降解,造成水库水质长周期污染.

土壤中的有机质主要存在于表层(0 ~ 10 cm)土层^[38].在非汛期 DOM 主要通过地下水流经有机物含量较低的矿物土层输出,这限制了陆地 DOM 向水库的输入;汛期上层土层中有机物被强暴雨径流裹挟,致使陆地 DOM 从表层土壤层向水库的输入^[36].由于李家河水库流域主要为森林及少量农田覆盖,夏秋季大量枯萎植物和动物新陈代谢产物及残体落在土壤表面,其主要为腐殖质,故在本研究中,暴雨径流期水库类腐殖质(C1 ~ C3)急剧增加而类蛋白组分下降(图 7),总之,汛期强降雨的淋溶作用是水库 DOM 污染及含量、组分变化的主要原因.



组间不存在相同字母表示差异性显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 组间平均值大小顺序为 $A > B > C > D$

图 7 径流前后 CDOM 组分荧光强度、相对占比及 HIX、BIX 变化

Fig. 7 Variations in fluorescence intensity, relative proportions of CDOM components, HIX, and BIX before and after storm runoff

3.2 径流后沉降及降解过程对水库 DOM 的影响

水库水体会通过颗粒沉降来完成污染物的去除^[3]. 暴雨径流期, 水库接纳的泥沙本身含有相当数量的黏土矿物和胶体物质, 可吸附较多种类的有机类污染物, 并通过泥沙沉降减少水体中污染物含量^[40]. 本研究中, 浊度与 DOM 荧光组分 (C1 ~ C4) 呈显著相关 (图 9), 表明通过颗粒沉降可去除部分 DOM. 但 DOM 各组分 (C1 ~ C4) 降解效率不同 [图 8

(a)], 主要原因是腐殖质的去除主要依托腐殖质与泥沙的桥联作用, 腐殖质携带不同的官能团与泥沙的结合效果不同^[41]; 而疏水性组分 (以 SUVA (260) 值表征) 降低 [图 8(b)] 的主要原因是可溶性腐殖酸易与疏水性有机物结合^[42], 其可随腐殖质沉降去除. 此外, DOM 各荧光组分与浊度相关性存在差异, 除本身吸附去除效能的差异外, 各组分降解去除效果差异也可能是此现象的原因.

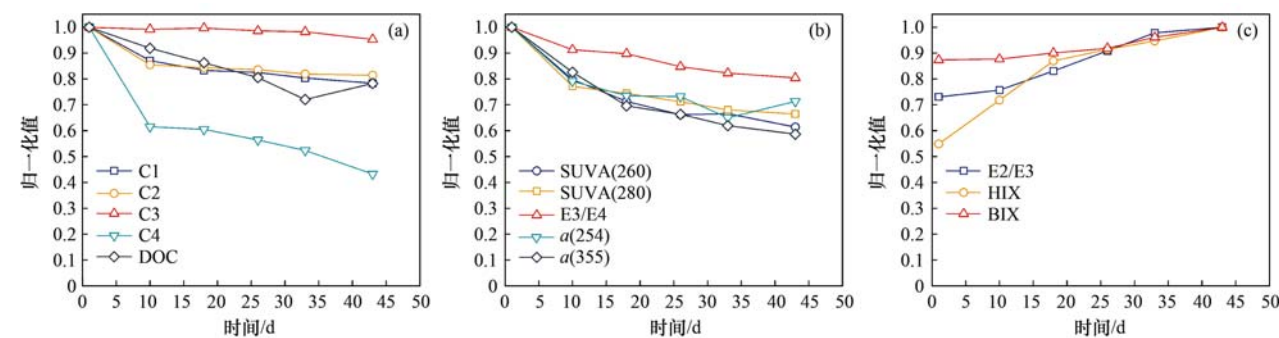


图 8 S2 采样点径流后 DOM 组分荧光强度、DOC、紫外吸收光谱特征参数、三维荧光光谱特征参数变化

Fig. 8 Variations in fluorescence intensity of DOM, DOC, UV-Vis spectrum characteristic parameters, and EEMs characteristic parameters at S2 site before and after storm runoff

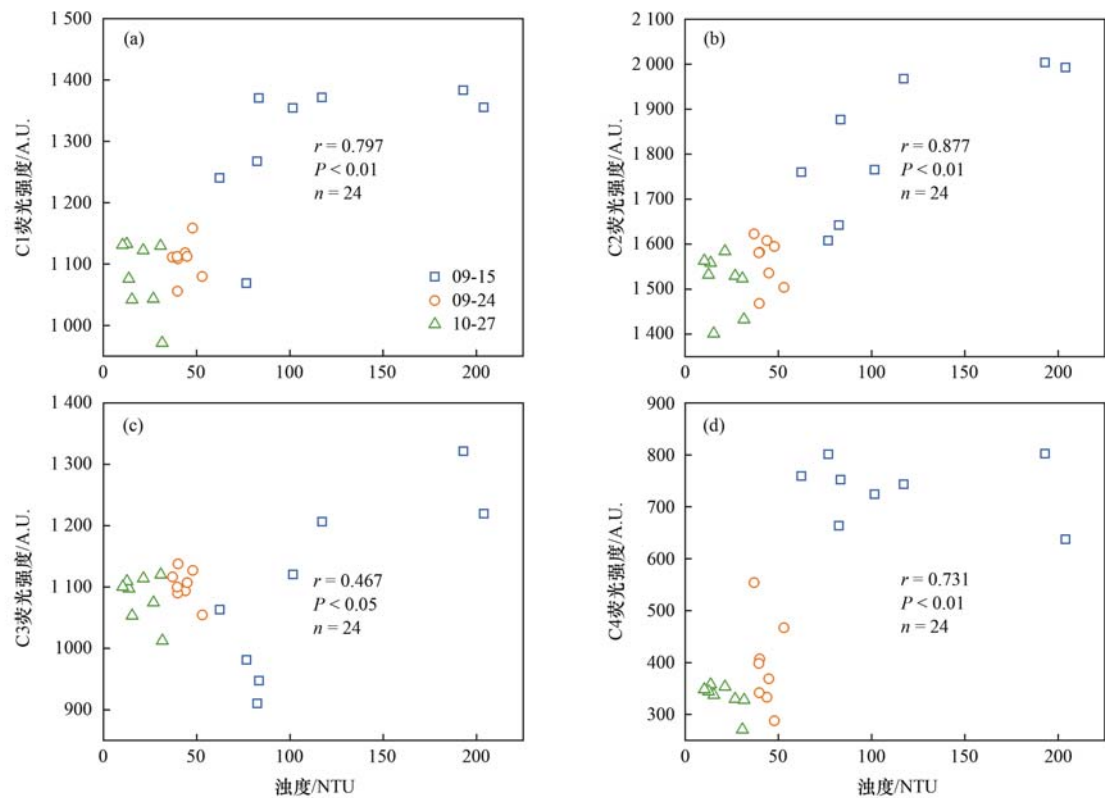


图 9 径流后水体浊度和 C1 ~ C4 组分荧光强度的相关性

Fig. 9 Correlation analysis of turbidity and fluorescence intensity of C1-C4 components before and after storm runoff

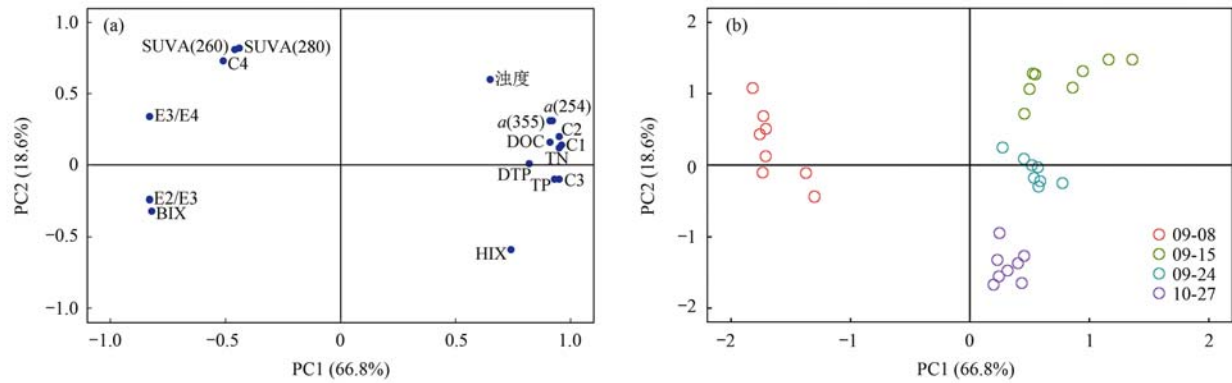


图 10 暴雨径流前后 DOM 特征参数和水质因子的 PCA 分析

Fig. 10 Principal components analysis of DOM characteristic parameters and water quality factors before and after storm runoff

微生物降解及光化学降解是水库 DOM 的主要降解过程. 外源输入的 DOM 主要以大分子类的腐殖质为主(图 7), 难以被水生生物直接吸收利用^[43], 但这类高分子量的 DOM 含诸多可吸收太阳光的显色基团, 易发生化学降解反应^[44], 将其转化为易生物吸收降解的小分子^[45]. 本研究中, 径流过后, 类腐殖质组分含量的持续降低及 BIX 值与 E2/E3 值的升高[图 8(c)], 表明该阶段 DOM 逐步转化为小分子量组分且生物可利用性不断升高; 另外, 暴雨径流后, 类腐殖质组分占比升高而类蛋白组分占比持续下降, 且 HIX 值与 E3/E4 值的不断升高[图 8(c)], 表明水体腐殖化程度加大, 主要是微生物优先降解不稳定的类蛋白质所致^[46], 因此本研究结果证实了 DOM 的微生物和光化学降解的存在. 综上所述, 由于水库的低流速和滞留作用, 增加了水库 DOM 的累积, 但长停留时间也有助于 DOM 依托水体自净得到部分控制, 但该过程周期较长^[3]. Warner 等^[20]的研究提出的一种暴雨事件中湖泊 DOC 响应模式, 即水力停留时间较长的湖泊在发生暴雨径流后 30d 内 DOC 浓度始终保持在高于径流前的水平, 与本文的研究结果类似.

4 结论

(1) 暴雨径流输入导致水库水体营养盐、有机物等含量显著提高, 径流过后, 虽 TN、TP、DTP 和 DOC 浓度以及浊度逐步下降, 但该过程持续时间较长, 暴雨径流造成了水库长周期污染.

(2) 紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱特征参数显示暴雨径流短期内使 DOM 浓度和相对分子质量显著增加, 腐殖化程度显著升高, 生物可利用性降低, 径流过后 DOM 浓度逐渐下降, DOM 腐殖化程度和生物可利用性不断升高, 疏水性和芳香性组分含量不断降低.

(3) 水库暴雨径流 DOM 输入性污染主要通过沉降及降解作用去除, 而单纯依托沉降及降解作用实现有机物控制, 将引起水库水体长时间污染. 因此, 鉴于短时强降雨的高污染特征及长周期水体水质恢复, 暴雨径流输入对水库 DOM 影响的研究具有重要意义.

参考文献:

- [1] 温成成, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1227-1235.
Wen C C, Huang T L, Li N, *et al.* Effects of artificial destratification and induced-natural mixing on water quality improvement in a drinking water reservoir[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- [2] 曾康, 黄廷林, 马卫星, 等. 暴雨径流对分层水库水质的影响[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(9): 4979-4986.
Zeng K, Huang T L, Ma W X, *et al.* Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(9): 4979-4986.
- [3] Maavara T, Chen Q W, Van Meter K, *et al.* River dam impacts on biogeochemical cycling [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, **1**(2): 103-116.
- [4] Zhou Y Q, Jeppesen E, Zhang Y L, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter of black waters in a highly eutrophic Chinese lake: freshly produced from algal scums? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **299**: 222-230.
- [5] Tomlinson A, Drikas M, Brookes J D. The role of phytoplankton as pre-cursors for disinfection by-product formation upon chlorination[J]. Water Research, 2016, **102**: 229-240.
- [6] Johnson M S, Lehmann J, Couto E G, *et al.* DOC and DIC in flowpaths of amazonian headwater catchments with hydrologically contrasting soils[J]. Biogeochemistry, 2006, **81**(1): 45-57.
- [7] Driscoll C T, Lehtinen M D, Sullivan T J. Modeling the acid-base chemistry of organic solutes in Adirondack, New York, lakes[J]. Water Resources Research, 1994, **30**(2): 297-306.
- [8] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. Ecosystems, 2007, **10**(1): 172-185.
- [9] Huang C C, Zhang L L, Li Y M, *et al.* Carbon and nitrogen burial in a plateau lake during eutrophication and phytoplankton blooms[J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 296-304.
- [10] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. Limnology and Oceanography, 2009, **54**(6): 2298-2314.
- [11] Tranvik L J, Cole J J, Prairie Y T. The study of carbon in inland waters-from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle[J]. Limnology and Oceanography Letters, 2018, **3**(3): 41-48.
- [12] Williamson C E, Brenttrup J A, Zhang J, *et al.* Lakes as sensors in the landscape: optical metrics as scalable sentinel responses to climate change [J]. Limnology and Oceanography, 2014, **59**(3): 840-850.
- [13] Nelson N B, Siegel D A. The global distribution and dynamics of chromophoric dissolved organic matter [J]. Annual Review of Marine Science, 2013, **5**: 447-476.
- [14] 周石磊, 孙悦, 苑世超, 等. 岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2635-2645.
Zhou S L, Sun Y, Yuan S C, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of chromophoric dissolved organic matter in sediment Interstitial water from Gangnan Reservoir[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2635-2645.
- [15] Zhou Y Q, Yao X L, Zhang Y L, *et al.* Response of dissolved organic matter optical properties to net inflow runoff in a large fluvial plain lake and the connecting channels[J]. Science of the Total Environment, 2018, **639**: 876-887.
- [16] Xian Q S, Li P H, Liu C, *et al.* Concentration and spectroscopic characteristics of DOM in surface runoff and fracture flow in a cropland plot of a loamy soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, **622-623**: 385-393.
- [17] Ward N D, Bianchi T S, Medeiros P M, *et al.* Where carbon goes when water flows: carbon cycling across the Aquatic Continuum[J]. Frontiers in Marine Science, 2017, **4**, doi: 10.3389/fmars.2017.00007.

- [18] Zhang W, Tang X Y, Xian Q S, *et al.* A field study of colloid transport in surface and subsurface flows [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **542**: 101-114.
- [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] Warner K A, Saros J E. Variable responses of dissolved organic carbon to precipitation events in boreal drinking water lakes [J]. *Water Research*, 2019, **156**: 315-326.
- [21] Packer B N, Carling G T, Veverica T J, *et al.* Mercury and dissolved organic matter dynamics during snowmelt runoff in a montane watershed, Provo River, Utah, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135297.
- [22] Jeznach L C, Hagemann M, Park M H, *et al.* Proactive modeling of water quality impacts of extreme precipitation events in a drinking water reservoir [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **201**: 241-251.
- [23] Yang L Y, Guo W D, Chen N W, *et al.* Influence of a summer storm event on the flux and composition of dissolved organic matter in a subtropical river, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **28**: 164-171.
- [24] 徐进, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (7): 3049-3057.
- Xu J, Huang T L, Li K, *et al.* Pollution sources and the stratification effects on water quality in Lijiahe Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (7): 3049-3057.
- [25] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 山东省周村水库季节演替中沉积物上覆水溶解性有机物的紫外-可见与三维荧光光谱特征 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31** (5): 1344-1356.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Seasonal variations of ultraviolet-visible and excitation emission matrix spectroscopy characteristics of overlying water dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir, Shandong Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31** (5): 1344-1356.
- [26] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 基于 UV-vis 及 EEMs 解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量 DOM 的光谱特征及来源 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (1): 172-184.
- Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter with different relative molecular weight from rainwater from summer and autumn in the Zhoucun Reservoir based on UV-Vis and EEMs [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (1): 172-184.
- [27] 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 等. 岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (10): 4530-4538.
- Fan S Y, Qin J H, Liu Y Y, *et al.* Seasonal variations of DOM spectral characteristics in the surface water of the upstream Minjiang River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (10): 4530-4538.
- [28] 李璐璐, 江韬, 卢松, 等. 利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质 (DOM) 浓度 [J]. *环境科学*, 2014, **35** (9): 3408-3416.
- Li L L, Jiang T, Lu S, *et al.* Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) absorption spectrum to estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) concentration in water, soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir areas [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (9): 3408-3416.
- [29] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 等. 三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (6): 2082-2092.
- Wang Q L, Jiang T, Zhao Z, *et al.* Spectral characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in waters of typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir areas [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (6): 2082-2092.
- [30] 梁俭, 江韬, 卢松, 等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (7): 2506-2514.
- Liang J, Jiang T, Lu S, *et al.* Spectral characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) releases from soils of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas: fluorescence spectra [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (7): 2506-2514.
- [31] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **6** (11): 572-579.
- [32] Wang H, Wang Y H, Zhuang W E, *et al.* Effects of fish culture on particulate organic matter in a reservoir-type river as revealed by absorption spectroscopy and fluorescence EEM-PARAFAC [J]. *Chemosphere*, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124734.
- [33] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40** (6): 706-719.
- [34] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 2008, **108** (1-2): 40-58.
- [35] Osburn C L, Handsel L T, Mikan M P, *et al.* Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (16): 8628-8636.
- [36] Shi Y, Zhang L Q, Li Y P, *et al.* Influence of land use and rainfall on the optical properties of dissolved organic matter in a key drinking water reservoir in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134301.
- [37] Sankar M S, Dash P, Singh S, *et al.* Effect of photobiodegradation and biodegradation on the biogeochemical cycling of dissolved organic matter across diverse surface water bodies [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **77**: 130-147.
- [38] Hood E, Gooseff M N, Johnson S L. Changes in the character of stream water dissolved organic carbon during flushing in three small watersheds, Oregon [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111** (G1), doi: 10.1029/2005JG000082.
- [39] Maavara T, Parsons C T, Ridenour C, *et al.* Global phosphorus retention by river damming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112** (51): 15603-15608.
- [40] 薛爽, 洪悦, 刘影, 等. 泥沙沉降对水体中溶解性有机物光谱学特性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37** (4): 1330-1340.
- Xue S, Hong Y, Liu Y, *et al.* Effect of sediment subsiding on the spectroscopic characteristics of dissolved organic matter in waters [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37** (4): 1330-1340.
- [41] 刘启贞, 李九发, 徐灿华, 等. 盐度和腐殖酸共同作用下的长江口泥沙絮凝过程研究 [J]. *海洋学报*, 2008, **30** (3): 140-147.
- Liu Q Z, Li J F, Xu C H, *et al.* Flocculation process of fine-

- grained sediments by the combining effect of salinity and humus in the Changjiang Estuary in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, **30**(3): 140-147.
- [42] Kile D E, Chiou C T. Water solubility enhancements of DDT and trichlorobenzene by some surfactants below and above the critical micelle concentration[J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, **23**(7): 832-838.
- [43] Skoog A, Wedborg M, Fogelqvist E. Decoupling of total organic carbon concentrations and humic substance fluorescence in an extended temperate estuary[J]. *Marine Chemistry*, 2011, **124**(1-4): 68-77.
- [44] 赵紫凡, 孙欢, 苏雅玲. 基于紫外-可见光吸收光谱和三维荧光光谱的腐殖酸光降解组分特征分析[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 1088-1098.
- Zhao Z F, Sun H, Su Y L. Photodegradation response of humic acid using UV-visible absorption and excitation-emission matrix spectra[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 1088-1098.
- [45] Kieber D J, McDaniel J, Mopper K. Photochemical source of biological substrates in sea water: implications for carbon cycling [J]. *Nature*, 1989, **341**(6243): 637-639.
- [46] 张柳青, 石玉, 李元鹏, 等. 不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2149-2157.
- Zhang L Q, Shi Y, Li Y P, *et al.* Bioavailability characteristics of chromophoric dissolved organic matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping under different hydrological scenarios [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2149-2157.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020年12月29日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2019年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2019年度总被引频次12 057,影响因子2.256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polys to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)