

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄朝峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪镡, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源

黄廷林¹, 方开凯¹, 张春华¹, 周石磊¹, 曾明正¹, 刘飞¹, 夏超¹, 丛海兵²

(1. 西安建筑科技大学, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225009)

摘要: 利用三维荧光光谱(EEMs)并结合平行因子分析(PARAFAC)模型, 解析了 2015 年 8 月夏季周村水源水库中溶解性有机物(DOM)的组分并利用主成分分析法对影响水体 DOM 的主要因素及其相对贡献量进行了研究. 结果表明, 周村水库水体中的 DOM 可分为 3 个组分, 分别为类富里酸荧光组分 C1(260, 350/420 nm)、类蛋白荧光组分 C2(280/360 nm)和类腐殖酸组分 C3(270, 390/530 nm), 且 3 个组分具有同源性; 各组分平面分布均匀, 入库口总荧光强度略高; 较高的荧光指数 FI, 较高的自生源指标 BIX, 较低的腐殖化指标 HIX 以及接近于 1 的新鲜度指数(β/α)综合表明夏季周村水库 DOM 的来源以自生源为主, 并结合主成分分析得出, 内源对 DOM 贡献率高达 70.96%. 与此同时, 周村水库水体 DOM 各组分与 $a_{ph}(440)$ 拟合相关性较好. 因此可以通过对 DOM 三维荧光光谱的研究, 有助于水库管理者更有目的地进行污染源的控制和治理, 同时可以在一定程度上指示周村水库水体富营养化水平.

关键词: 溶解性有机物; 平行因子分析(PARAFAC); 周村水库; 荧光特性; 主成分分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3394-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.018

Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC

HUANG Ting-lin¹, FANG Kai-kai¹, ZHANG Chun-hua¹, ZHOU Shi-lei¹, ZENG Ming-zheng¹, LIU Fei¹, XIA Chao¹, CONG Hai-bing²

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Key Laboratory of Environmental Engineering, Shaanxi Province, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The fluorescent components were examined using excitation emission matrix fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis technique for samples collected in August, 2015 from Zhoucun Reservoir. Principal component analysis was used to study the main factors and their relative contributions to DOM. Three fluorescent components were identified by PARAFAC, including fulvic-like component(C1; 260, 350/420 nm), protein-like(C2; 280/360 nm) and humic-like(C3; 270, 390/530 nm) which showed the same source. The even spatial distribution of each component, higher total fluorescence intensity in storage port, high fluorescence index, high biological index, low humification index and the freshness index which was close to one showed that the DOM had a strong autochthonous contribution. The results of PCA showed that the autochthonous contribution reached 70.86%, and those three components of Zhoucun Reservoir could be connected with $a_{ph}(440)$ by nonlinear multiple regression which means we can use the three-dimensional fluorescence spectrum results of DOM to control the pollution sources and indicate the eutrophication degree of Zhoucun Reservoir.

Key words: dissolved organic matter(DOM); PARAFAC; Zhoucun Reservoir; fluorescence property; principal component analysis

溶解性有机物(DOM)广泛存在于天然水体中, 其主要成分包括富里酸、胡敏酸、氨基酸和碳水化合物等^[1]. DOM 来源可分为陆源(径流的输入)和内源(藻类和微生物的新陈代谢及降解), 研究水体的 DOM 分布特征及其来源有助于研究水体生态系统的碳循环.

三维荧光光谱-激发发射矩阵光谱(EEMs)是近年来广泛用于研究 DOM 来源及动力学特征的一种

荧光光谱分析技术. 国内外研究者对 DOM 吸收光谱特征、DOM 物质组分、DOM 来源等进行了大量研究, 但主要集中在富营养湖泊^[2, 3]、海洋^[4, 5]及河口^[6, 7]等水域. 然而, 针对中度富营养型水源水库

收稿日期: 2016-02-01; 修订日期: 2016-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(51478378); 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02)

作者简介: 黄廷林(1962~), 男, 教授, 主要研究方向为水资源保护与微污染控制, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

水体的 DOM 特性分析鲜有报道。

周村水库建成于 1960 年,位于山东省枣庄市中区,水库流域面积 121 km²,总库容 8 404 万 m³,水面面积 8.54 km²,是枣庄市主要的城市供水水源地。20 世纪 90 年代,由于在水库大量投放饵料致使鱼类大量繁殖,剩余饵料以及鱼类排泄物严重影响水库水质,导致城市供水一度中断。近年来水库管理局开始实施相应的保护措施,如对网箱养殖全面禁止,由此使库区水质得到改善,并重新恢复供水。但是曾明正等^[8]对周村水库水质长期监测结果显示:夏季,周村水库水深 5m 以下溶解氧基本恒定并处于缺氧甚至厌氧状态,沉积物中重金属锰的释放使下层水体锰浓度高达 1.24 mg·L⁻¹,超标约 12 倍。Guéguen 等^[9]学者研究发现 DOM 与水体重金属的迁移转换密切相关,Beggs 等^[10]指出溶解性有机物与水厂的消毒副产物联系紧密,因此研究水库水体 DOM 特征意义重大。本研究利用 EEMs-PARAFAC 手段,探讨了周村水库 DOM 各荧光组分的分布特征、来源及其与水体营养水平间的关系,以期为周村水库水环境管理提供依据,有助于水库管理者更有目的地进行污染源的控制和治理。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与预处理

于 2015 年 8 月,在周村水库用 GPS 定位系统对研究区采样点精确定位,共设置了 24 个采样站点采集表层水样,站点涵盖了周村水库各个支流及不同类型的水域(图 1)。采样过程中利用 3 L 有机玻璃采样器采集表层(0~50 cm)水样,水样采集后立即用孔径 0.45 μm 的 Millipore 聚碳酸酯滤膜过滤,冷冻避光保存用于 DOC 和荧光光谱的测定。

1.2 样品的测定

1.2.1 三维荧光光谱分析

采用上海棱光荧光分光光度计 F97 进行三维荧光光谱测定,配以 1 cm 石英比色皿,仪器光源为 150 W 氙灯,PMT 电压设为 700 V,波长误差 ±1 nm,其中激发和发射单色仪的狭缝宽度分别为 10 nm 和 10 nm,扫描光谱进行仪器自动校正。激发波长(E_x)范围从 220~400 nm,波长间隔为 5 nm;发射波长(E_m)范围从 250~550 nm,波长间隔为 1 nm,扫描速度为 1 000 nm·min⁻¹。利用 Mili-Q 超纯水扫描结果对测定结果进行荧光光谱的拉曼散射校正。

利用 MATLAB 2014a 软件把 24 个样品的荧光

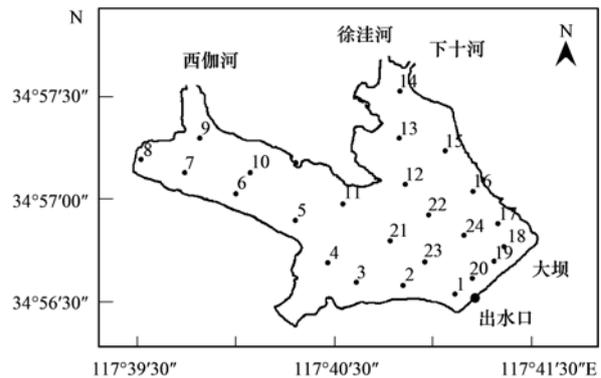


图 1 周村水库采样点示意

Fig. 1 Sampling map of Zhoucun Reservoir

矩阵组合,参考 Stedmon 等的教程^[11],运用 N-way 和 DOMFluor 工具箱手段对这个矩阵组进行平行因子分析。由于水样原始荧光光谱中存在拉曼峰散射,因此将原始荧光数据扣除超纯水三维荧光数据并进行 Delaunay 三角形内插值法修正^[12],利用半拆分析来验证分析结果的可靠性。

1.2.2 DOM 吸收光谱分析

采用 DR6000 分光光度计(美国 HACH 公司)进行测定以 Mill-Q 水为空白,用 1 cm 石英比色皿在 200~800 nm 范围内进行光吸收测定。本研究采用波长 440 nm 处的吸收系数来表征浮游植物吸收系数 $a_{ph}(440)$ ^[13]。采用如下公式计算和校正浮游植物吸收系数:

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

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

式中, $a^*(\lambda)$ 和 $a(\lambda)$ 分别为未经散射校正的波长为 λ 处的吸收系数和经过散射校正过后的波长为 λ 处的吸收系数,单位: m⁻¹; λ 为波长,单位: nm; r 为光程路径,单位: m。

1.2.3 溶解性有机碳(DOC)、溶解性总氮(DTN)和叶绿素的分析

DOC 采用总有机碳分析仪(ET1020A)进行测定。溶解性总氮(DTN)的测定参照文献^[14]。叶绿素的测定采用热乙醇萃取法^[15]。

1.3 荧光光谱参数分析

荧光指数(FI)是 $E_x = 370$ nm 时, E_m 在 470 nm 和 520 nm 处的荧光强度比值,反映了芳香氨基酸与非芳香物对 DOM 荧光强度的相对贡献率,可以作为物质的来源以及 DOM 的降解程度的指示指标^[16];腐殖化指标(HIX)是 $E_x = 254$ nm 下, E_m 在 435~480 nm 荧光强度积分值和 300~345 nm 荧光积分值之比,是反映有机物中腐殖质含量或腐殖化

程度的指示剂^[17]; 自生源指标 (BIX) 是 $E_x = 310$ nm 时, E_m 在 380 nm 与 430 nm 处的荧光强度比值, 是用来反映 DOM 中自生贡献比例的指标^[17]; 新鲜度指数 ($\beta : \alpha$) 是 $E_x = 310$ nm 时, E_m 在 380 nm 处荧光强度与 E_m 在 420 ~ 435 nm 区间最大荧光强度的比值, 反映了新产生的 DOM 在整体 DOM 中所占的比例, 是评估水体生物活性的重要依据^[18].

2 结果与讨论

2.1 水库的荧光组分特征分析

图 2 选取了水库不同区域的几个代表点的水样三维荧光图谱进行绘制, DOM 的三维荧光光谱特征表明, 所有类型水样 DOM 的荧光峰主要有 3 类 (A 峰、B 峰和 C 峰). 本研究根据 PARAFAC 模型更准确地辨识出周村水库水域 24 个采样点的 DOM 中有 3 个荧光组分 (图 3 和表 1), 分别为 C1 (260, 350/

420 nm)、C2 (280/360 nm) 和 C3 (270, 390/530 nm). 其中 C1 与 C3 都属于类腐殖质 (HS), Koivula 等^[19] 将腐殖质按溶解性不同分为胡敏酸 (HA, 腐殖酸)、富里酸 (FA, 黄腐酸) 和胡敏素 (Humins). 傅平青^[20] 和 Cory 等^[21] 指出由于胡敏酸的芳香性大于富里酸, 其激发和发射波长存在一定的红移, 组分 C1 发射波长较短表示可见类富里酸; C3 (270, 390/530 nm) 则反映了长波类腐殖质的荧光特性, 表示胡敏酸, 它与程庆霖等^[22] 在滇池水体识别出的组分 C3 (265/525 nm) 相似, Cory 等^[21] 在研究 Nymph 与 Fryxell Lake 的 DOM 中也报道了同类组分 (330/520 nm); C2 具有高激发波长类蛋白荧光组分特征^[23], 荧光峰 (280/360 nm) 的位置与色氨酸单体的荧光峰 (220 ~ 230 nm, 270 ~ 280/340 ~ 350 nm) 相似, 说明 C2 为类色氨酸, 该结果与何小松等^[24] 解析地下水 DOM 荧光光谱的结果相似 (<240, 275/350 nm).

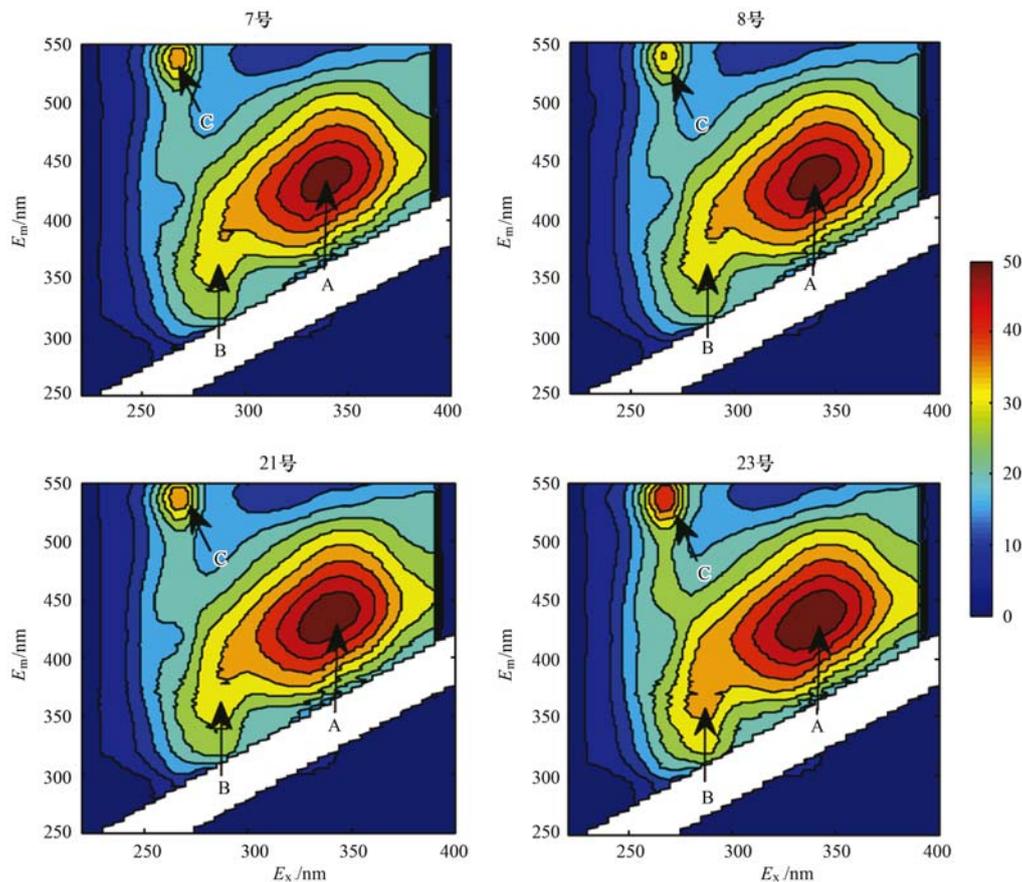


图 2 典型的 4 个采样点 DOM 的三维荧光光谱图

Fig. 2 Three dimensional fluorescence spectra of DOM from four typical sampling sites

表 1 PARAFAC 解析出周村水库 3 个荧光组分的特征

Table 1 Characteristics of the three different components identified by the PARAFAC model in Zhoucun Reservoir

组分	E_x /nm	E_m /nm	物质	参考文献中物质对应的波长
C1	260, 350	420	可见类富里酸	310 ~ 360/370 ~ 450 nm ^[20] , <250 (360)/440 nm ^[25]
C2	280	360	类蛋白 (类色氨酸)	280/344 nm ^[25] , <250, 280/358 nm ^[26] , <240, 275/350 nm ^[24]
C3	270, 390	530	胡敏酸	330/520 nm ^[21] , 265/525 nm ^[22]

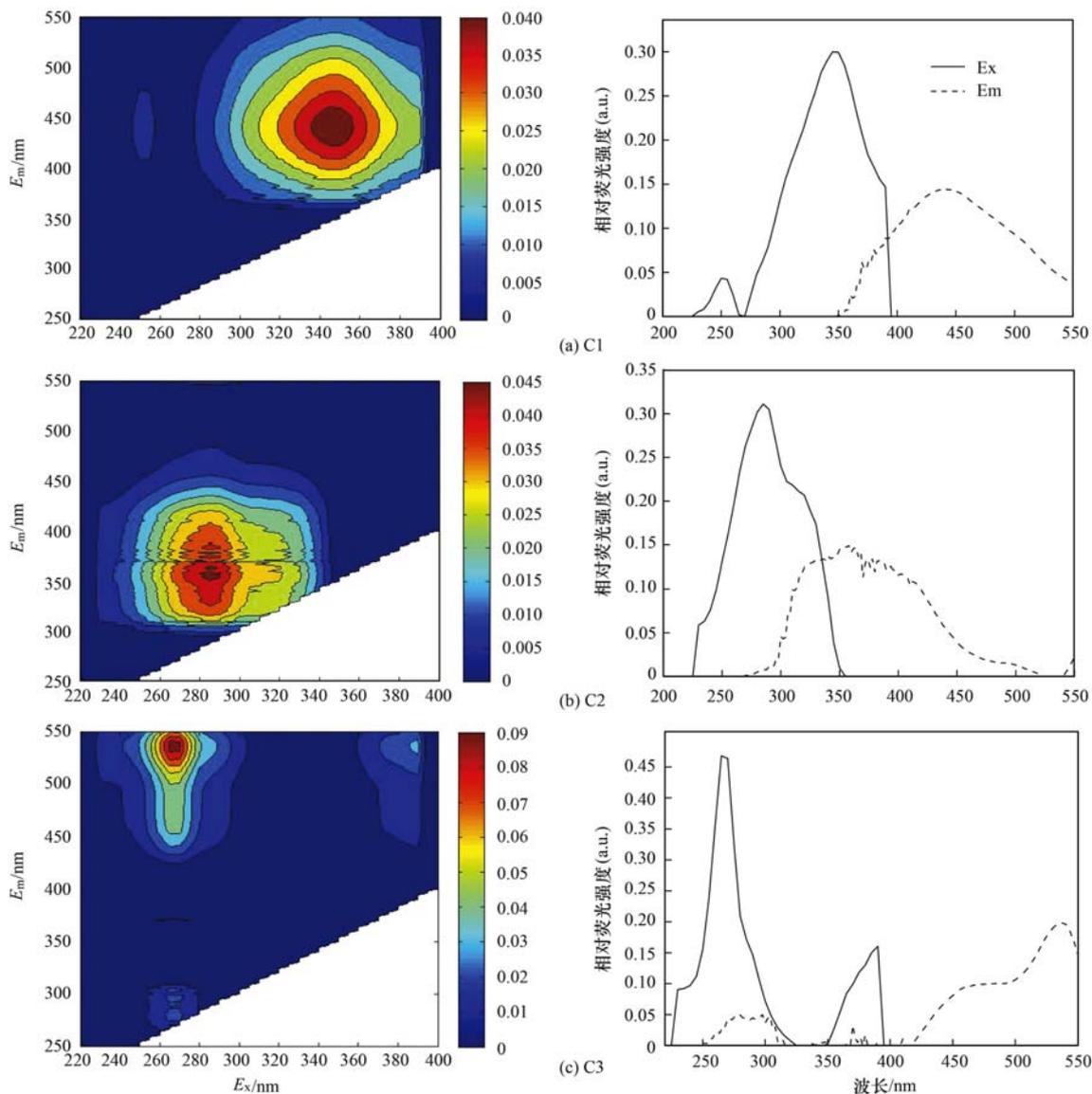


图3 PARAFAC 解析出的周村水库 3 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 3 Fluorescence spectra of three previously identified PARAFAC components from Zhoucun Reservoir

2.2 荧光组分分布特征及其荧光特性分析

一般情况下,总荧光强度可以用来表征 DOM 的浓度高低。从图 4 来看,DOM 的 3 个组分在周村水库水域中所占质量分数比较均衡,其中类富里酸最多,所占质量分数高达 $51.38\% \pm 1.41\%$,类蛋白次之($31.65\% \pm 0.81\%$),胡敏酸只占 $16.97\% \pm 1.93\%$ 。本研究对 3 个荧光组分作相关性分析(表 2),结果显示 C1、C2 和 C3 均显著相关($P < 0.01$),表明 DOM 样本中类腐殖质和类蛋白质存在同源性。各组分的荧光强度在水库全平面上的分布呈现显著差异性($P < 0.01$),本研究利用 Arcgis 10.1 软件结合克里金插值法^[27]对周村水库全平面 DOM 总荧光强度进行了拟合(图 5),发现靠近上游的水域

DOM 总荧光强度相对较高,7 号和 8 号取样点 F_{\max} 分别达到 2 521.84 和 2 479.39 (水库 DOM 平均 $F_{\max} = 2 258.32$),2 个取样点位于西伽河的入库区附近,一方面可能是由于径流的输入给水库水体带来部分 DOM;另一方面,学者 Rochelle-Newalle 等^[28]认为浮游植物进入稳定生长期后,其释放的溶解性有机物再经微生物分解产生类腐殖质,微生物的自身活动释放类蛋白质。7 号和 8 号取样点的叶绿素浓度分别为 $131.53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $129.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而库区(21、22、23 和 24 号)的叶绿素浓度均值为 $(15.06 \pm 1.30) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,因此西伽河入库口水域水深较浅为藻类的生物量及生长率最高的区域,浮游植物的新陈代谢及其降解产生 DOM;或者由于风浪的作

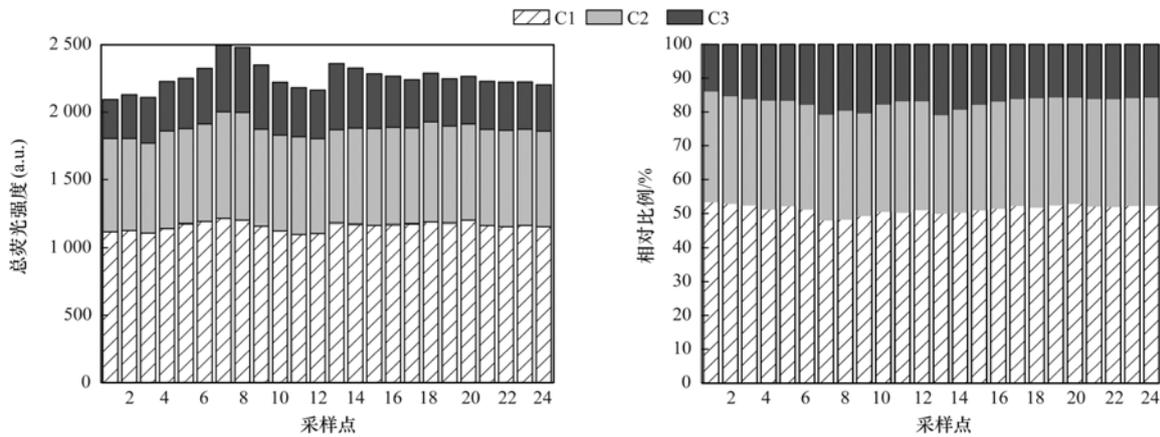


图 4 周村水库 DOM 荧光组分的相对比例

Fig. 4 Relative proportions of DOM fluorescent components in Zhoucun Reservoir

表 2 3 个荧光组分荧光强度的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation between fluorescence intensity of the three fluorescent components

	C1	C2	C3
C1	1	0.614 **	0.542 **
C2		1	0.600 **
C3			1

1) ** 表示 $P < 0.01$

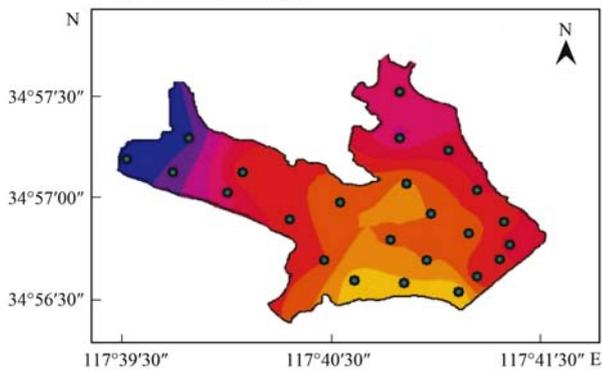
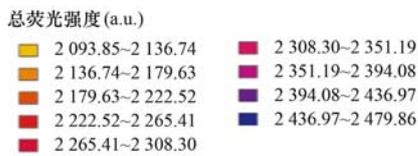


图 5 周村水库总荧光强度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the total fluorescence intensity in Zhoucun Reservoir

用下,沉积物的再悬浮释放出 DOM.

水库水体 DOM 荧光光谱特征值见图 6. 荧光指数 FI (fluorescence index) 可表征水体 DOM 腐殖质来源^[29], Fellman 等^[16]对荧光组分及指标的生态定义中指出 $FI > 1.8$ 以自生源为主, $FI < 1.2$ 以陆源输入为主. 本研究区域 FI 范围为 1.57 ~ 1.74, 均值为 1.63, 接近 1.8, 表明夏季周村水库 DOM 来源以内

源为主. 自生源指标 BIX (biological index) 则反映水体 DOM 自生源贡献^[17], 其值在 0.6 ~ 0.8 表明自生源贡献较少主要为陆源输入, 大于 1 时主要为生物或细菌等来源, 0.8 ~ 1.0 则表明 DOM 来源介于两者之间, 该水库的 BIX 范围为 0.93 ~ 0.97, 均值为 0.94, 接近于 1, 两者综合表明水体 DOM 来源受到陆源和内源混合影响, 但内源为主要形式. 腐殖化指数 HIX (humification index) 反映了水体 DOM 的腐殖化程度^[30], 其值小于 3 表明 DOM 呈微弱腐殖化特征及有重要的近期自生源, 10 ~ 16 则表示 DOM 以陆源为主, DOM 新鲜度指数 ($\beta: \alpha$) 则反映了新生 DOM 在整体 DOM 中所占比例^[16], 研究区域的 HIX 均值为 1.30, 变化范围在 1.18 ~ 1.40 之间 (远小于 3), 表明呈微弱腐殖化特征且以近期自生源为主, 该结果与 DOM 新鲜度指数 ($\beta: \alpha$) 表征结果一致 (0.89 ± 0.014). 本研究结果与卢松等^[31]关于长寿湖的结果相似 ($FI = 1.61 \pm 0.03$; $HIX = 4.36 \pm 0.76$; $BIX = 0.86 \pm 0.02$; $\beta: \alpha = 0.82 \pm 0.03$), 同样具有较强的生物来源属性.

2.3 水库的荧光组分来源及其指示作用分析

主成分分析 (PCA) 是一种可以用少量有代表性的因子来说明多个变量复杂信息的多元统计方法, 利用主成分分析可以解释 DOM 荧光组分的特征变量, 并利用这些特征变量进行来源分析^[32]. 为了进一步探讨周村水库的 DOM 来源特征, 首先本研究用 SPSS 16.0 软件将 24 个水样的 DOC、DTN、 $\alpha_{ph}(440)$ 和各荧光组分的含量数据进行 KMO 和 Bartlett 球形验证, 结果 KMO 为 0.656 ($KMO > 0.5$), Sig. 值为 0, 样品满足主成分分析要求, 然后将上述数据作为自变量, 数据转换采用 log

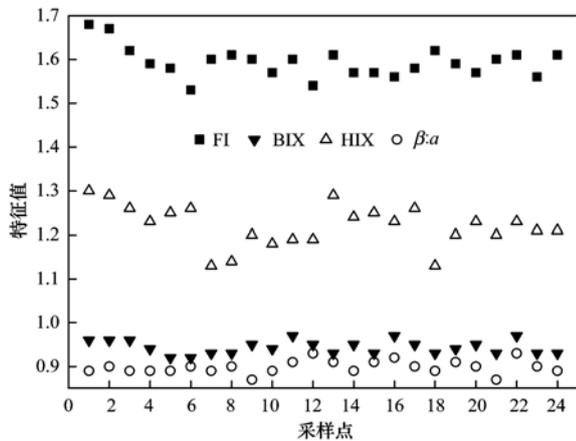
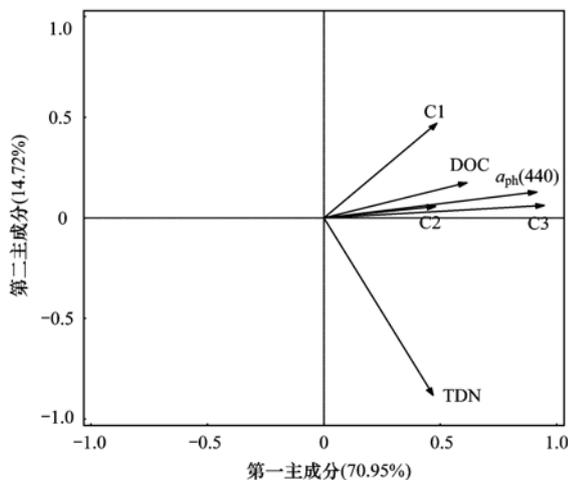


图6 周村水库 DOM 的 4 个荧光指数

Fig. 6 Four fluorescence indices of DOM in Zhoucun Reservoir

transformation 形式,对线性模型的数据进行中心化处理,用 PCA 排序轴为因变量,利用 Canoco 5 进行主成分分析. 结果显示,Canoco-PCA 前两个轴的累计方差解释信息可高达 85.68% (图 7),符合贡献率大于 85% 的原则^[33],因此可用两个主因子解释这些参数的变化.

图7 3 个组分荧光强度、吸收系数 $a_{ph}(440)$ 、DOC 及 DTN 的主成分分析Fig. 7 PCA of PARAFAC data, absorption coefficient $a_{ph}(440)$, DOC and DTN

由第一主成分可以看出,周村水库水体中 DOM 组分 C1、C2、C3 与 $a_{ph}(440)$,水质参数(DOC 和 DTN)在第一主成分上有着较强的相关性,且提取因子高,均为正相关(表 3). 这也就暗示了第一主成分中有机物及水质指标具有同源性. 由于 $a_{ph}(440)$ 表征浮游植物的吸收系数,藻类的代谢及降解产生的有机物为内源,类蛋白组分(C2)则主要通过微生物活动降解衰老死亡的细胞所形成,所以第一主成分反映了周村水库水体中大部分溶解性有

有机物及其营养物的来源为内源,对水体的贡献率为 70.96%. 第二主成分除了 C1 其余提取因子都很小,表明类富里酸的来源除了内源外还有径流的输入,此成分对 DOM 的来源贡献率为 14.72%. 综上,夏季周村水库全平面的 DOM 来源以内源为主,各组分来源性比较一致,同时径流对于溶解性有机物贡献较低.

表3 3 个组分荧光强度、吸收系数 $a_{ph}(440)$ 、DOC 及 DTN 的主成分分析结果Table 3 Analysis results of PCA of PARAFAC data, absorption coefficient $a_{ph}(440)$, DOC and DTN

项目	主成分	
	1	2
C1	0.486	0.470
C2	0.480	0.058
C3	0.947	0.062
DTN	0.469	-0.882
DOC	0.614	0.175
$a_{ph}(440)$	0.913	0.129

通过主成分分析,可以明确夏季周村水库 DOM 来源,其中内源贡献率高达 70.96%,外源贡献率为 14.72%. C1 为可见类富里酸,在第一主成分上的提取因子达到 48.6%,显示出很强的内源性特征. 在第二主成分上的提取因子(47%),相比 C2 和 C3, C1 外源性较强. 结合 7 月总降雨量为 69 mm 可见,部分富里酸随地表径流与渗透冲刷土壤后带入水体的可能性很大. 组分 C3 为胡敏酸,其在第一主成分上的提取因子最高(94.7%),故内源性最强,浮游植物的生长及降解可成为水库水域可见类富里酸与胡敏酸组分的重要来源,该结果与 Zhang 等^[34]研究的太湖结果相同. C2 为类色氨酸,在第一主成分上的提取因子明显高于第二主成分上,其来源主要为水生生物新陈代谢产生的氨基酸类物质,但也有部分来源于生活污水及禽畜废水随河流输入. 该结果与郭卫东等^[26]研究的闽江结果类似.

Wilson 等^[35]曾研究发现水域沿岸农田数量增加会导致水体 DOM 中新生有机物含量增加,腐殖化程度降低. 卢松等^[31]对比了两个沿岸生态系统存在差异的水域,其结果显示沿岸以农业用地为主的长寿湖自生源特征明显高于沿岸以森林系统为主的大洪海. 本文研究的周村水库周边土地以耕地、畜牧、居民用地为主. 周边居民生活污水、农业面源污染及高生化指标的禽畜废水的输入,使底泥生物可利用性增强^[36],进而导致水库水体内源代谢活动增强,这可能是该水域 DOM 自生源特征明显的

原因之一。另外,周村水库曾于 20 世纪 90 年代在库区大规模养鱼,水生养殖所形成的污染物对水库水体造成了严重的内源污染,内源污染通常伴随着沉积物的积累,其沉积物污染也日趋严重,黄廷林等^[37]曾研究发现周村水库沉积物达重度污染,存在较大的安全风险,这也可能是该水库 DOM 自生源特征明显的另一个重要的原因。因此,建议水库管理局在对周村水库污染治理中应着重考虑内源污染的治理,本实验的下一步工作需要进一步确认沉积物中的溶解性有机物对水体 DOM 的贡献量,以期水库管理局制定污染管理和治理的政策提供更加

科学的数据支撑。

另外,主成分分析中 DTN、DOC 和 $a_{ph}(440)$ 与 DOM 各组分都靠得比较接近(图 7),因此指标的变化需要 3 个荧光组分共同解释。本研究运用 Origin 8 对 DTN、DOC、 $a_{ph}(440)$ 和各荧光组分进行多元线性回归拟合(表 4),其中浮游植物吸收系数 $a_{ph}(440)$ 的拟合相关系数较高($r = 0.565$, $P < 0.01$),因此可以通过 DOM 的三维荧光特性研究,在一定程度上指示水库水体的营养化水平,可以作为水库富营养化监测的检测手段,为水库以后的管理提供技术支持。

表 4 DTN、DOC 和 3 个荧光组分的线性关系

Table 4 Linear regression equation model for DTN, DOC and three fluorescence components

回归方程	样品个数(n)	相关系数(r)	P 值
$DOC = 1.730 \times C1 - 5.310 \times C2 + 6.668 \times C3 + 2.329$	24	0.235	0.028
$TDN = -9.354 \times C1 + 3.000 \times C2 + 4.760 \times C3 + 1.975$	24	0.333	0.019
$a_{ph}(440) = 7.852 \times C1 - 16.007 \times C2 + 21.082 \times C3 + 0.106$	24	0.565	<0.01

3 结论

(1)运用平行因子分析的方法解析出夏季周村水库水体中 DOM 可分为类富里酸(260,350/420 nm),类蛋白(280/360 nm)和胡敏酸(270,390/530 nm)三类。

(2)DOM 的 3 个组分具有同源性,各组分在全平面上基本呈现均匀分布的特征,总荧光强度靠近入库口相对略高,通过各项荧光光谱指标(FI、BIX、HIX 及 $\beta:\alpha$)的分析,并结合了主成分分析得出夏季周村水库 DOM 以自生源为主,其对周村水库贡献率为 70.96%,该结果可能与周村水库周边污水的输入以及沉积物的严重污染有关。通过多元线性回归发现周村水库水体 $a_{ph}(440)$ 与溶解性有机物组分有强相关性($r = 0.565$, $P < 0.01$),表明夏季周村水库水体 DOM 的光谱特征在一定程度上可以指示其富营养化水平

(3)通过对 DOM 荧光光谱的研究,建议周村水库的污染治理应以内源污染的治理为主。下一步工作需要进一步确认沉积物中的溶解性有机物对水体 DOM 的贡献量,以期水库管理局制定污染管理和治理的政策提供更加科学的数据支撑。

参考文献:

- [1] Chen M L, Price R M, Yamashita Y, *et al.* Comparative study of dissolved organic matter from groundwater and surface water in the Florida coastal Everglades using multi-dimensional spectrofluorometry combined with multivariate statistics [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(6): 872-880.
- [2] Kothawala D N, Stedmon C A, Müller R A, *et al.* Controls of dissolved organic matter quality: evidence from a large-scale boreal lake survey [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(4): 1101-1114.
- [3] 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 等. 巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3186-3193.
- [4] Tanaka K, Kuma K, Hamasaki K, *et al.* Accumulation of humic-like fluorescent dissolved organic matter in the Japan Sea [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 5292.
- [5] 闫丽红, 陈学君, 苏荣国, 等. 2010 年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 51-60.
- [6] Dong Q Q, Li P H, Huang Q H, *et al.* Occurrence, polarity and bioavailability of dissolved organic matter in the Huangpu River, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(9): 1843-1850.
- [7] 郭卫东, 黄建平, 洪华生, 等. 河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1419-1427.
- [8] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [9] Guéguen C, Dominik J. Partitioning of trace metals between particulate, colloidal and truly dissolved fractions in a polluted river: the Upper Vistula River (Poland) [J]. *Applied Geochemistry*, 2003, **18**(3): 457-470.
- [10] Beggs K M H, Summers R S. Character and chlorine reactivity of dissolved organic matter from a mountain pine beetle impacted watershed [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(13): 5717-5724.
- [11] 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.
- [12] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic

- fluorophores in southeastern US coastal waters: correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [13] 殷燕, 吴志旭, 张运林, 等. 新安江水库夏季 CDOM 吸收光谱特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3207-3214.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 550-552.
- [16] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: a review[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2452-2462.
- [17] 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.
- [18] Parlanti E, Wörz K, Geoffroy L, *et al.* Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(12): 1765-1781.
- [19] Koivula N, Hänninen K. Concentrations of monosaccharides in humic substances in the early stages of humification [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**(2): 271-279.
- [20] 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: 中国科学院地球化学研究所, 2004.
- [21] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [22] 程庆霖, 郑丙辉, 王圣瑞, 等. 滇池水体有色溶解性有机质(CDOM)三维荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(3): 698-703.
- [23] 王江涛, 关哈斯高娃, 赵卫红, 等. 东海海水中荧光溶解性有机物质的三维荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(5): 1345-1348.
- [24] 何小松, 席北斗, 张鹏, 等. 地下水中溶解性有机物的季节变化特征及成因[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 862-870.
- [25] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697.
- [26] 郭卫东, 杨丽阳, 王福利, 等. 水库型河流溶解性有机质三维荧光光谱的平行因子分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(2): 427-430.
- [27] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] Rochelle-Newall E, Fisher T R. Production of chromophoric dissolved organic matter fluorescence in marine and estuarine environments: an investigation into the role of phytoplankton[J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 7-21.
- [29] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.
- [30] 程远月, 王帅龙, 胡水波, 等. 海草生态系中 DOM 的三维荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(1): 141-145.
- [31] 卢松, 江韬, 张进忠, 等. 两个水库型湖泊中溶解性有机质三维荧光特征差异[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 516-523.
- [32] 林辉, 郭卫东, 徐静, 等. 厦门湾溶解性有机物的三维荧光光谱特征及其来源解析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(2): 404-408.
- [33] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. *统计研究*, 2013, **30**(8): 25-31.
- [34] Zhang Y L, van Dijk M A, Liu M L, *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence [J]. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [35] Wilson H F, Xenopoulos M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **2**(1): 37-41.
- [36] Jaffé R, McKnight D, Maie N, *et al.* Spatial and temporal variations in DOM composition in ecosystems: the importance of long-term monitoring of optical properties [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, **113**(G4): G04032.
- [37] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 166-172.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i>	(3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i>	(3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i>	(3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i>	(3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i>	(3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i>	(3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i>	(3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan	(3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing	(3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i>	(3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i>	(3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i>	(3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i>	(3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i>	(3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i>	(3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i>	(3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i>	(3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i>	(3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i>	(3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i>	(3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo	(3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i>	(3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i>	(3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i>	(3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i>	(3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i>	(3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i>	(3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i>	(3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i>	(3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i>	(3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i>	(3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i>	(3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui	(3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i>	(3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i>	(3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i>	(3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia	(3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i>	(3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong	(3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行