

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

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(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于δ ¹³ C观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性

黄廷林¹, 方开凯¹, 张春华¹, 周石磊¹, 曾明正¹, 龙圣海¹, 李扬¹, 夏超¹, 从海兵²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225009)

摘要: 结合紫外吸收光谱 (UV-vis) 与三维荧光光谱技术 (EEMs), 并利用平行因子分析的方法, 对两个混合型水库 (周村水库和金盆水库) 水体中 DOM 的来源及差异性进行了分析。结果显示, 两个水库水体均存在 3 个荧光组分, 分别为长波类腐殖质 (350/460 nm)、可见类富里酸 (335/410 nm) 和类蛋白 (260, 285/360 nm)。但是两水库水体的 DOM 荧光强度及组分构成比例均存在显著差异 ($P < 0.01$), 两个水库均以类腐殖质为主, 但相比金盆水库, 周村水库水体中类腐殖质含量相对较低, 类蛋白含量较高。周村水库 DOM 组分间的相关性大于金盆水库, 表明后者的 DOM 来源更为复杂。通过荧光指数 FI, 自生源指标 BIX, 腐殖化指标 HIX 以及新鲜度指数 (β/α) 综合对比表明: 冬季, 在径流量小的情况下, 以耕地、畜牧、居民用地为主, 沉积物内源污染严重的周村水库水体的 DOM 以自生源为主; 沿岸以森林生态系统为主的金盆水库的 DOM 则来自混合输入。结果表明混合型水库水文条件及沿岸生态环境特征是决定 DOM 来源与特征的关键因素之一。

关键词: 溶解性有机物; 水库; 紫外可见吸收光谱; 三维荧光光谱; 平行因子分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4577-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606016

Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs

HUANG Ting-lin¹, FANG Kai-kai¹, ZHANG Chun-hua¹, ZHOU Shi-lei¹, ZENG Ming-zheng¹, LONG Sheng-hai¹, LI Yang¹, XIA Chao¹, CONG Hai-bing²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, 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 differences in the resource and characteristics of DOM between Zhoucun Reservoir and Jinpen Reservoir were studied by fluorescence ultraviolet-visible (UV-vis) and excitation-emission matrix spectra combined with parallel analysis (EEMs-PARAFAC). The results showed that three fluorescent components were identified by PARAFAC model in Zhoucun Reservoir and Jinpen Reservoir, including long wave humus-like component (C1: 350/460 nm), visible fulvic-like (C2: 335/410 nm) and protein-like (C3: 260, 285/360 nm). However, the fluorescence intensity and the relative proportions of DOM exhibited significant difference ($P < 0.01$) in two reservoirs. Moreover, the concentration of protein-like component in Zhoucun Reservoir was higher than that in Jinpen Reservoir, while the concentration of humus-like component presented the opposite trend. Based on the comparison of fluorescence index, biological index, humification index and the freshness index, the DOM of Zhoucun Reservoir where the land-use type was cultivated, livestock and residential, the internal pollution of sediments was serious, indicating a strong autochthonous component and aquatic bacterial origin, whereas the DOM of Jinpen Reservoir dominated by forest system had a higher terrigenous contribution in winter. From all the results, hydrological conditions of the reservoir and the characteristics of coastal ecological environment were important factors to influence the DOM sources and characteristics.

Key words: dissolved organic matter (DOM); reservoir; UV-vis; EEMs; PARAFAC

溶解性有机物 (DOM) 广泛存在于各个水域中, 其成分主要有蛋白质、小分子有机酸、腐殖质 (富里酸和胡敏酸)、氨基酸和碳水化合物, 而腐殖质是 DOM 中最为主要的成分, 约占了 50% ~ 80%^[1], 同时 DOM 与全球碳循环有着密切的关系^[2], 作为水域中最为主要的碳源, 它又是水生环境食物网中重要的一环。Osburn 等^[3] 学者研究发现 DOM 还是很多微生物重要的营养物质, 尤其在水体环境中 DOM 中分子量相对较小的成分为微生物的主要营养源。

因此, 了解 DOM 地球化学特征有助于进一步认识水体生态环境。

DOM 在紫外可见波段有强烈吸收, 吸收光谱能用于表征 DOM 组分, 光谱斜率 (S 值) 的不同可用于了解 DOM 组成的差异性。紫外可见光谱分析 (UV-

收稿日期: 2016-06-04; 修订日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (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

vis)作为一种快速简单的方法,在研究 DOM 上已经得到了越来越多的使用^[4, 5]. 与此同时,三维荧光光谱(EEMs)成为近年来用于研究 DOM 的一种新型光谱指纹分析技术,可方便快捷地揭示其中所含的类腐殖质和类蛋白荧光团的组成信息^[6, 7]. 目前常用荧光指数 FI、腐殖化指 HIX、自生源指标 BIX 和新鲜度指数(β : α)表示 DOM 的不同来源^[8, 9]. 另外,三维荧光结合平行因子分析(PARAFAC)技术又是近年来研究溶解性有机物的常用分析技术,能较好地解析出 DOM 成分,在研究水体溶解性有机物中得到广泛应用^[10, 11]. 但有关水源水库溶解性有机物的光学特性的研究还不多见,且大多集中于夏季及秋季水体. 比如,虞丹尼等^[12]研究得出应用 EEMs 表征水体中的 DOM 对检测三峡水库水体污染及水质变化具有重要的参考价值;李思佳等^[13]研究发现秋季查干湖 CDOM 浓度明显高于新立城水库水体. 特别是对于水源水库,随着秋季气温的降低,表层水体的温度不断下降、导致表层水体的密度增加,上层水体向下层迁移,造成上下层水体在垂向上发生对流混合,最终导致水库水体热分层结构失稳;随着外界气温的进一步降低,表层水体的向下混合的程度越大、当下潜水体温度与底层水体温度一致时,最终实现水库上下水体水温、溶解氧、电导率,以及各种营养盐的混合,达到整体均一的状态,水库完成自然混合(翻库). 由于 4℃ 时水体的密度最大,因此随着气温的进一步降低(导致表层水温的降低),混合状态下的水库进一步持续进行上下水层间的混合(直至表层水体低于 4℃). 由于翻库现象的自然发生,导致分层时期蓄积于下层水体的营养盐和还原性物质被交换至上层水体,更易引发水质污染事件. 考虑到周村水库和金盆水库的低温混合期发生在 11 月~次年 3 月^[14]和 12 月~次年 2 月^[15]. 因此,本文研究的时期两个不同特征水库水体呈现完全持续混合状态. 考虑到两水库持续混合这一独特的自然特征,研究此时水库水体 DOM 特征更易反映水库内源污染(底层沉积物向上层水体的持续扩散)的影响,然而这对这一特征

时期的水源水库的相关研究更鲜见报道.

因此,本研究结合紫外可见光谱和三维荧光光谱,同时利用平行因子分析的方法,对比了冬季同一纬度下不同特征的完全混合型水库 DOM 的光学特征,并结合了水库水文条件及沿岸生态环境特征分析了两个水库 DOM 差异性的原因,丰富了关于亚热带水源水体 DOM 的调查资料,以期为研究水源水库的 DOM 的特征提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样点与样品的采集

周村水库于山东省枣庄市市中区境内,位于淮河流域运河水系西伽河上游,水库控制流域面积 121 km²,总库容 8 404 万 m³,水面面积 8.54 km²,属省重点中型水库,为目前枣庄市主要的城市供水水源地. 周村水库处于中纬度亚热带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥. 水库周边土地用地以耕地、畜牧、居民用地为主,人为扰动较大. 20 世纪 90 年代时,水库网箱养殖活动兴起,养殖规模迅速扩大,鱼类数量大大超过了水库所能承受的范围,大量的剩余饵料以及鱼类排泄物造成水库水质的严重污染,导致城市供水一度中断. 近年来水库管理局出台了网箱养殖的全面禁止等相应的保护措施,才使水质得到改善,重新恢复供水,但库底多年积累的沉积物并没有得到有效地清除.

金盆水库与周村水库基本处于同一纬度,其具体位于陕西省西安市周至县境内,距西安 86 km,是一项以城市供水为主,兼有农灌、发电、防洪等综合作用的大型(Ⅱ)水利工程. 水库控制流域 1 481 km²,最大库容 2 亿 m³,主库区最大水面面积 4.68 km²,水库水源源自秦岭太白山北麓的黑河水,从其河流汇入口至主库区全长 13 km,属于大水深峡谷型水库. 周边地势险峻,植被茂盛,人类活动干扰少.

2016 年 1 月分别采集 24 个周村水库表层水样本,14 个金盆水库表层水样(图 1 和表 1),站点分别涵盖了两个水库库区全部水域.

表 1 周村水库和金盆水库的基本形态特征

Table 1 Basic morphological characteristics of Zhoucun Reservoir and Jinpen Reservoir

水库	地理位置	建成年份	水库类型	日平均供水量/m ³	总库容/m ³	周边土地用地
周村水库	山东枣庄	1959	中型	4~5 万	8 404 万	耕地、畜牧、居民用地
金盆水库	陕西西安	2001	大型	76 万	2 亿	森林

1.2 DOM 吸收光谱分析

水样用 Whatman GF/F 膜(0.45 μm)过滤后,

用 DR6000 紫外分光光度计测定 280~320、320~500 和 700 nm 处的吸光度 $D(\lambda)$. 采用如下公式计

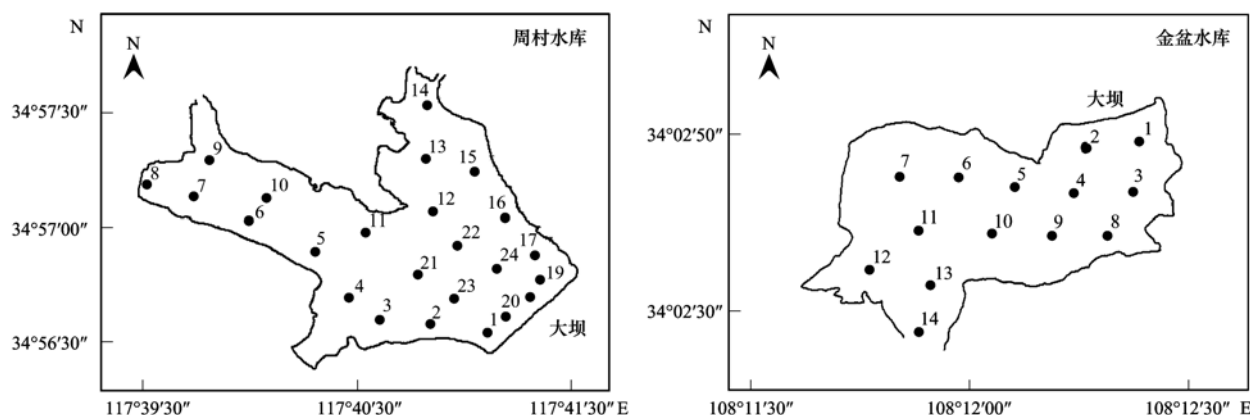


图 1 两个水库的采样点示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Zhoucun Reservoir and Jinpen Reservoir

算和校正 DOM 的吸收系数^[13]:

$$a(\lambda) = 2.303 \cdot D(\lambda)/r - a'(700) \cdot \lambda/700 \quad (1)$$

式中, $a(\lambda)$ 为经过散射校正过后的波长为 λ 处的吸收系数, m^{-1} ; λ 为波长, nm ; r 为光程路径, m .

DOM 吸收光谱从紫外到可见波长随波长的增加大致呈现指数衰减规律, 一般用如下公式进行表示^[16]:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (3)$$

式中, λ_0 为参照波长, nm , 一般选取 440 nm ; S 为指数函数曲线光谱斜率, μm^{-1} ; 本研究采用最小二乘法对短波段 $280 \sim 320 \text{ nm}$ 和长波段 $320 \sim 500 \text{ nm}$ 之间波段进行非线性拟合, 得到不同 S 值.

1.3 三维荧光光谱分析

水样 DOM 的三维荧光光谱采用上海棱光荧光分光光度计 F97 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 $\pm 1 \text{ nm}$, 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 $220 \sim 400 \text{ nm}$, 波长间隔为 5 nm ; 发射波长 (E_m) 范围从 $250 \sim 550 \text{ nm}$, 波长间隔为 1 nm , 扫描速度为 $1000 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$. 测定结果扣除 Mili-Q 超纯水三维荧光数据并进行 Delaunay 三角形内插值法修正去除拉曼峰散射和瑞利散射^[17]. 利用 MATLAB 2014a 软件把 38 个样品的荧光矩阵组合, 采用 N-way 和 DOMFluor 工具箱进行平行因子分析. 参照 Stedmon 等的教程^[18], 通过核一致性分析确定荧光组分数, 利用折半分析来分析结果的可靠性. 荧光指数 (FI) 是 $E_x = 370 \text{ nm}$ 时, E_m 在 470 nm 和 520 nm 处的荧光强度比值^[19]; 腐殖化指标 (HIX) 是 $E_x = 254 \text{ nm}$ 下, E_m 在 $435 \sim 480 \text{ nm}$ 荧光

强度积分值和 $300 \sim 345 \text{ nm}$ 荧光积分值之比^[20]; 自生源指标 (BIX) 是 $E_x = 310 \text{ nm}$ 时, E_m 在 380 nm 与 430 nm 处的荧光强度比值^[21]; 新鲜度指数 (β : α) 是 $E_x = 310 \text{ nm}$ 时, E_m 在 380 nm 处荧光强度与 E_m 在 $420 \sim 435 \text{ nm}$ 区间最大荧光强度的比值^[10].

1.4 水质参数分析

所采集的样品用 Whatman GF/F 膜 ($0.45 \mu\text{m}$) 过滤后进行水质基本指标测试. 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^[22].

2 结果与讨论

2.1 水库 DOM 吸收光谱特征分析

本研究采用波长 355 nm 处的 DOM 吸收系数来表征 DOM 浓度^[23], 周村水库 DOM 吸收系数 $a(355)$ 平均值为 $(1.28 \pm 0.14) \text{ m}^{-1}$, 变化范围为 $1.00 \sim 1.63 \text{ m}^{-1}$, 低于金盆水库 $a(355)$ 的 $(3.10 \pm 0.19) \text{ m}^{-1}$, 变化范围为 $2.88 \sim 3.57 \text{ m}^{-1}$. 由此可见, 周村水库冬季 DOM 浓度相对较低. 通过分析两个水库 $a(355)$ 与水质指标间的相关性, 可揭示 DOM 浓度与主要的水质指标间的联系. 相关性结果显示: 溶解性有机物的吸收系数 $a(355)$ 与 DOC 浓度和 DTN 浓度存在极显著正相关 ($P < 0.01$), 周村水库 $a(355)$ 与 DOC 和 DTN 决定系数分别为 0.537 和 0.667 , 高于金盆水库的 0.405 和 0.665 . 上述现象表明水质指标与溶解性有机物具有相同的来源.

殷燕等^[24]在研究新安江水库 CDOM 吸收光谱时, 拟合了 $280 \sim 320 \text{ nm}$ 和 $320 \sim 500 \text{ nm}$ 波段的斜率 S 值得出短波段 S 值高于长波段. 本研究同时拟合了两个水库 DOM 吸收光谱 $280 \sim 320 \text{ nm}$ 和 320

~500 nm 波段的斜率 S 值(图 2). 从均值看, 冬季周村水库 $S_{280 \sim 320}$ (20.63 ± 1.65) μm^{-1} 与 $S_{320 \sim 550}$ (20.85 ± 2.08) μm^{-1} 基本相同, 表明短波波段的 S 值与长波段相接近, 而金盆水库 $S_{320 \sim 550}$ (23.09 ± 4.51) μm^{-1} 是 $S_{280 \sim 320}$ (16.69 ± 0.62) μm^{-1} 的 1.32 倍, 表明长波段 S 值要高于短波段, Carder 等^[25]研究认为 DOM 物质构成中腐殖酸和富里酸的

相对比例会影响 S 值大小, 腐殖酸比例越高、富里酸比例越低, 则 DOM 分子量越大, S 值越小. 由此可知, 金盆水库 DOM 的组成中长波段腐殖酸等大分子所占比例较高. 运用 SPSS 16.0 对两个水库的 $S_{280 \sim 320}$ 和 $S_{320 \sim 550}$ 进行单因素方差分析, 结果显示 P 值小于 0.01, 可见两个水库不同结构的 DOM 浓度分布上都存在显著的差异.

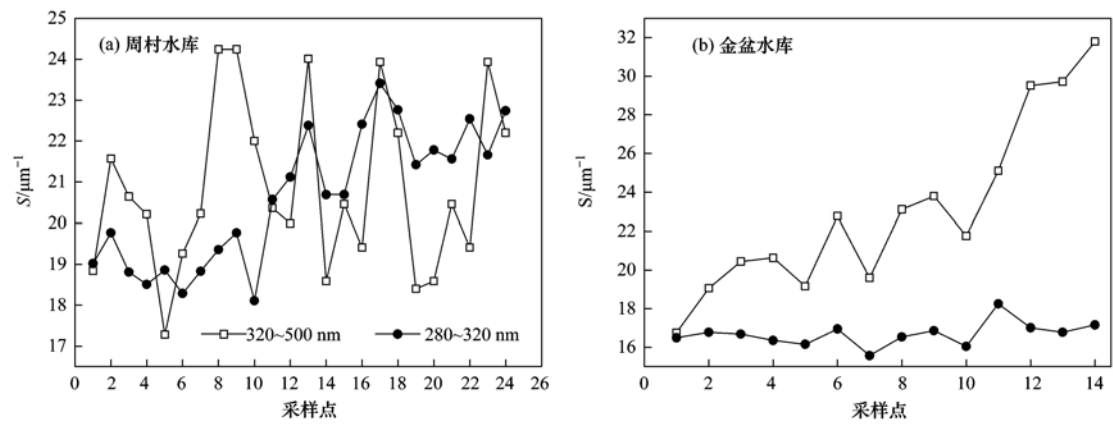


图 2 两个水库不同拟合波段的 S 值
Fig. 2 The S values derived from different fitting band ranges

2.2 水库的荧光组分特征分析

利用 PARAFAC 方法解析两个水库水样三维荧光光谱, 解析出 3 个荧光组分(图 3 和表 2), 分别为 C1 (350/460 nm)、C2 (335/410 nm) 和 C3 (260, 285/360 nm), 由于 C1 和 C2 另外两个荧光峰强度相对较弱, 本文暂不讨论. 经文献对比可知, C1 的激发和发射波长均在传统 C 峰 ($E_x/E_m = 325 \sim 370/420 \sim 480$ nm)^[26] 范围内,

具有长波类腐殖质的荧光性质, 主要成分为胡敏酸; C2 为可见类富里酸, 曾在河流、河口等中被观测到, 受水体自身及人类活动影响, 蔡文良等^[27]解析嘉陵江重庆段 DOM 三维荧光光谱时发现了类富里酸组分(250, 320/400 nm); C3 属于典型的类蛋白组分, 主要为色氨酸基团, Stedmon 等^[18]曾在 Horsens Estuary 水域中同样发现了组分 7 (280/344 nm).

表 2 两个水库的 3 个荧光组分的特征

Table 2 Characteristics of the three different components in two Reservoirs				
组分	E_x/nm	E_m/nm	物质	参考文献中物质对应的波长
C1	350	460	长波类腐殖质	320 ~ 360/420 ~ 480 nm ^[28]
C2	335	410	可见类富里酸	250, 320/400 nm ^[27] ; 310 ~ 360/370 ~ 450 nm ^[29]
C3	260, 285	360	类蛋白(色氨酸)	270 ~ 280/320 ~ 350 nm ^[30] ; 280/344 nm ^[18]

2.3 荧光组分分布特征分析

总荧光强度在一般情况下可以用来表征 DOM 的浓度高低. 通过研究周村水库 24 个采样点及金盆水库 14 个采样点的总荧光强度图(图 4)发现, 在总荧光强度上, 周村水库的 DOM 浓度相对较低, 该结果与上述 $a(355)$ 对比结果相同. 图 4 也可明显看出, 周村水库靠近上游水域的 DOM 浓度相比库区相对较低, 该结果与金盆水库正好相反. 结合表 3 来看, DOM 的 3 个组分在两个水库水域中分布比较均衡, 其中周村水库长波类腐殖质平均荧光强度为

550.38 ± 18.20 ($P > 0.05$), 所占比例达 40.09%, 可见类富里酸占 36.41% (500.01 ± 22.01) ($P > 0.05$), 类蛋白占 23.51% (322.88 ± 15.76) ($P > 0.05$); 金盆水库长波类腐殖质平均所占比例高达 55.32% (929.29 ± 29.88) ($P > 0.05$), 可见类富里酸占 35.2% (591.24 ± 18.86) ($P > 0.05$), 类蛋白却只占 9.48% (161.13 ± 48.45) ($P > 0.05$). 通过单因素方差分析结果显示, 两个水库的 DOM 各组分荧光强度存在极显著差异 ($P < 0.01$). Coble^[31]和 Rochelle-Newalle 等^[32]研究发现类腐殖质荧光由

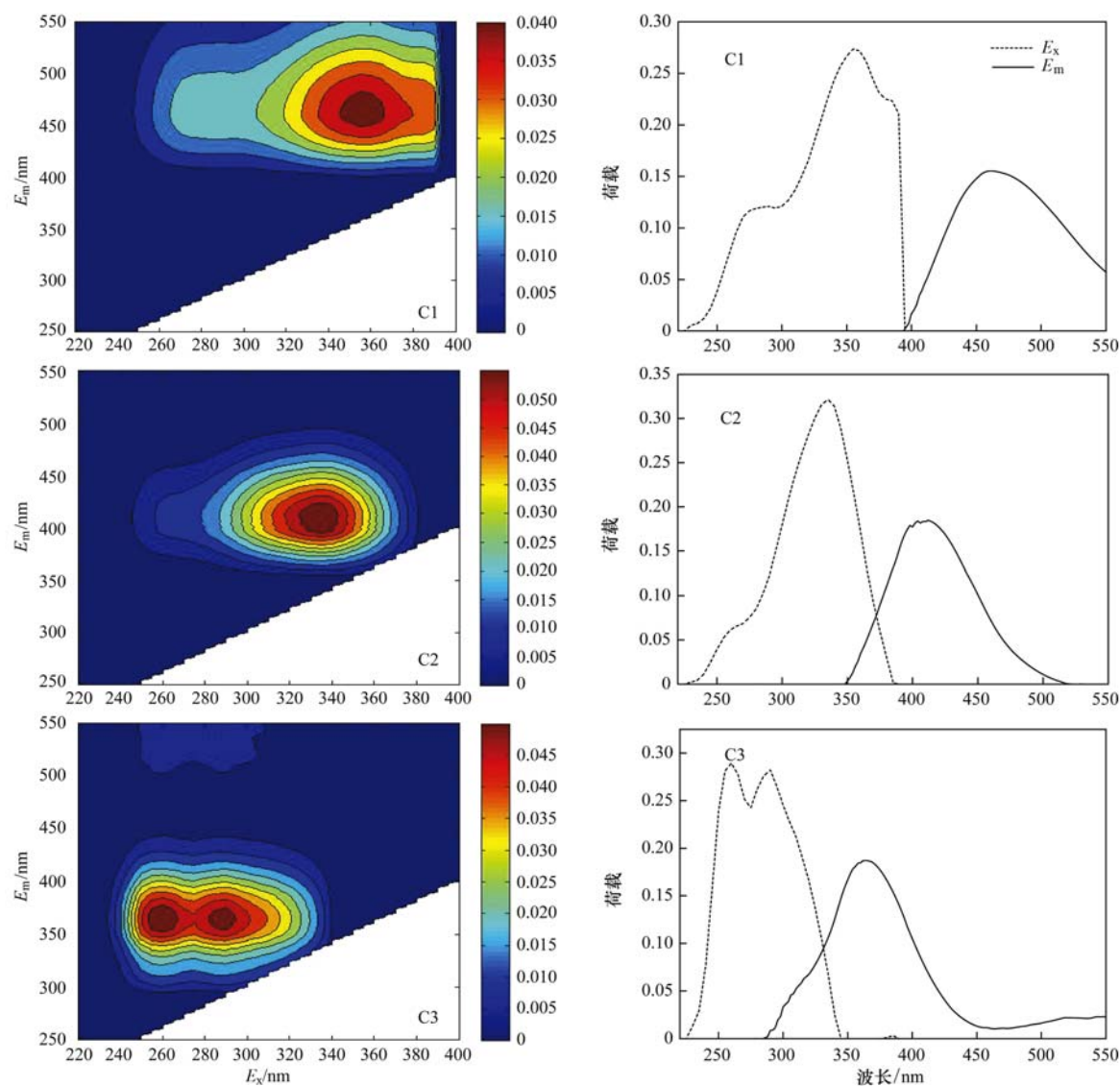


图3 PARAFAC 解析出两个水库的 3 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 3 Fluorescence spectra of three previously identified PARAFAC components from two Reservoirs

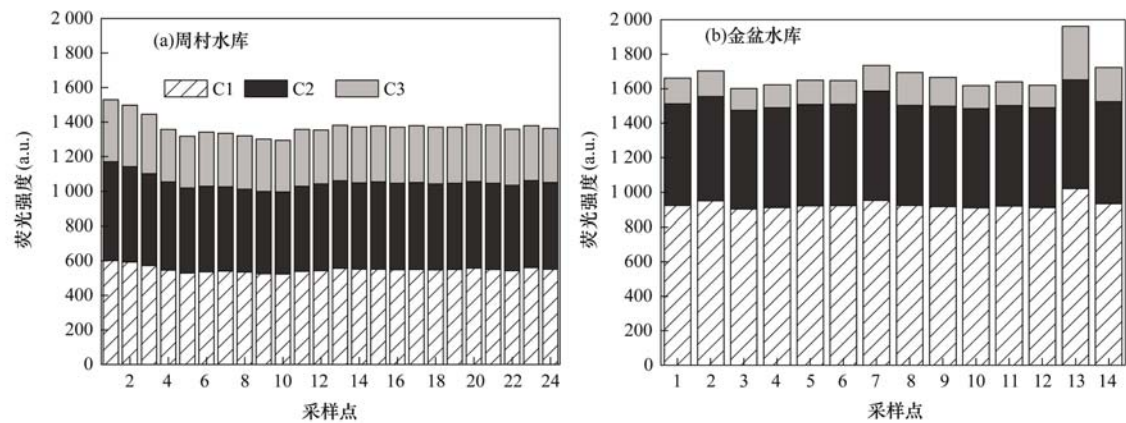


图4 两个水库的 DOM 组分的荧光强度

Fig. 4 Fluorescence intensity of DOM fluorescent components in two Reservoirs

径流携带的部分腐殖质以及内源浮游动植物释放的有机物经过细菌进一步降解后产生;类蛋白主要由微生物及水生生物新陈代谢作用产生.总体上金盆水库的类腐殖质荧光强度明显高于周村水库 DOM,说明金盆水库腐殖化程度相对较高.而周村水库的类蛋白荧光强度及平均相对比例都高于金盆水库,这可能和周村水库周边人为扰动较大,居民生活污

水和生化指标的禽畜污水输入以及内源污染严重有关.本研究对两个水库 3 个荧光峰分别作相关性分析(表 4),结果显示 C1、C2 和 C3 均显著相关($P < 0.01$),表明两个水库的 DOM 样本中类腐殖质和类蛋白质存在同源性,但相比之下周村水库的 DOM 组分之间相关性高于金盆水库,表明后者 DOM 组分来源更为复杂.

表 3 两个水库 DOM 平均荧光强度及差异性

项目	C1	C2	C3	总荧光强度
周村水库	550.38 ± 18.20	500.01 ± 22.01	322.88 ± 15.76	1 373.21 ± 53.73
金盆水库	929.29 ± 29.88	591.24 ± 18.86	161.13 ± 48.45	1 681.65 ± 90.31
P 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

表 4 两个水库水体 DOM 不同组分间的相关性¹⁾

Table 4 Relationships(r^2) among individual PARAFAC components for samples collected from two Reservoirs							
周村水库	C1	C2	C3	金盆水库	C1	C2	C3
C1	1	0.953 **	0.877 **	C1	1	0.872 **	0.867 **
C2		1	0.803 **	C2		1	0.584 **
C3			1	C3			1

1) ** 表示 $P < 0.01$

2.4 荧光特征指数及差异性分析

荧光指数 FI 可用来表征溶解性有机物中腐殖质的来源,FI > 1.8 以自生源为主,FI < 1.2 以陆源输入为主^[19, 33].图 5(a)所示,周村水库 FI 范围为 1.79 ~ 1.89,表明冬季周村水库 DOM 来源基本以自生源为主;金盆水库的荧光指数范围为 1.65 ~ 1.78,表明水体 DOM 是混合来源,既有细菌和藻类的胞外释放的内源,也有径流带来的陆生植物和土壤有机质的外源输入.

腐殖化指数 HIX 反映了水体 DOM 的腐殖化程

度. HIX > 16 代表 DOM 具有强腐殖化特征,以陆源输入为主; 6 < HIX < 10 代表较强腐殖化特征,且有较弱自生源特征; 4 < HIX < 6 代表弱腐殖化特征,及较强自生源特征; 小于 4 表示自生源为主^[34].周村水库研究区域的 HIX 均值为 1.72,变化范围在 1.62 ~ 1.89 之间,远小于 4,表明以自生源为主,该结果与其 DOM 新鲜度指数($\beta: \alpha$)表征结果一致(0.89 ± 0.02);金盆水库 HIX 均值为 4.30,变化范围在 2.14 ~ 5.75 之间,大于 4,该指数表示金盆水库 DOM 呈弱腐殖化特征及较强自生源特征,其

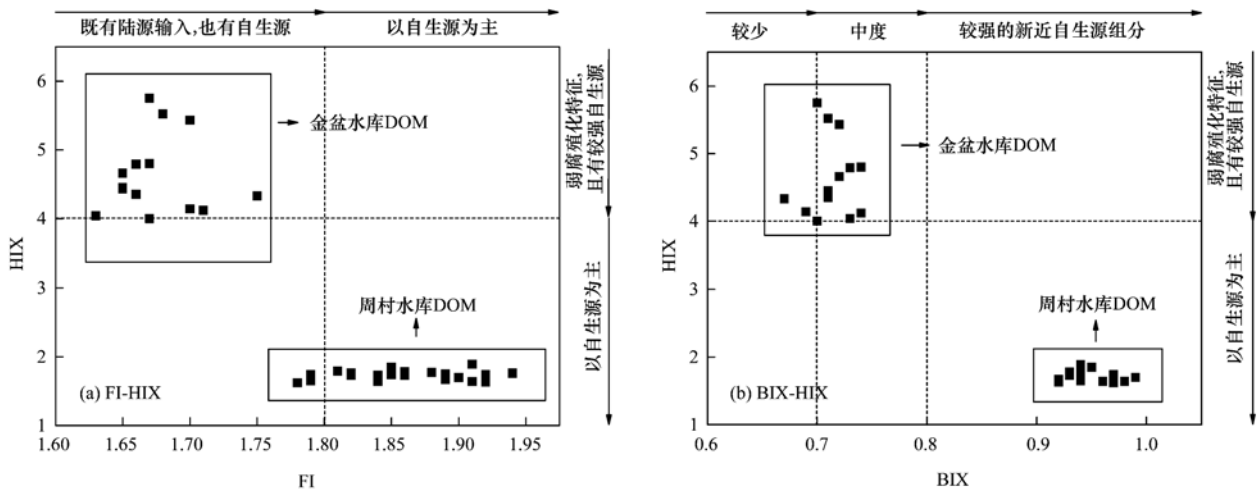


图 5 两水库 DOM 样本的 FI-HIX 和 BIX-HIX 分布

Fig. 5 FI-HIX and BIX-HIX distributions of DOM from two reservoirs

DOM 新鲜度指数($\beta:\alpha$)则为(0.71 ± 0.02).

自生源指数 BIX 可用来反映水体中自生源的相对贡献,自生源指数越高,说明 DOM 降解程度增加、新生的自生源 DOM 增加^[35]. 由图 5(b)可知,周村水库全平面各个取样点的表层水样 BIX 全部大于 0.80,均值达到 0.94,且接近于 1,表明水体具有明显的自生源组分;相比周村水库,金盆水库 BIX 均值只有 0.71,水体显示中度自生源特征.

运用 SPSS 16.0 分别对两个水库的 FI、HIX、 $\beta:\alpha$ 及 BIX 进行单因素方差分析,其 P 值都小于 0.01,该结果表明两个水库的各项荧光特征指数均存在极显著差异.

结合荧光组分分布特征及三维荧光的 4 个特征参数可以发现,两个水库水体的 DOM 特征及其来源存在明显差异.而造成 DOM 差异可能源于水库自身的水库类型、运行历史条件,周边水质和沉积物特点以及周边土地利用类型的不同.两个水库都处于中纬度亚热带大陆性季风气候区,冬季降雨稀少,水库的径流量显著小于夏季,周村水库的入库径流量为 $1.83 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,小于金盆水库平均入库径流量 $2.39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;金盆水库为峡谷型深水水库,周村水库为平原型水库.

周村水库兴建于 1959 年,1960 年开始蓄水,20 世纪 90 年代又曾在库区大规模养鱼,网箱养殖对水库水体造成了严重的内源污染,曾明正等^[14]对周村水库水质进行了长期的监测发现,虽然近年来政府取缔了网箱养鱼,但是水体仍处于富营养状态,在夏秋季,周村水库水体浮游植物密度较高,冬季浮游植物的死亡及分解使水库水体中类蛋白质物质明显增多.刘瑞霞等^[35]研究辽河流域水体同样发现严重的内源污染是其水体类蛋白含量高的主要原因.伴随着沉积物的积累,水体中颗粒有机物的沉降积累,使沉积物污染也日趋严重,黄廷林等^[36]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.因此,冬季水库完全混合下底泥污染物的释放也可能是该水库 DOM 自生源特征明显的重要原因.同时,由于两水库的运行年份不同,多年积累作用下造成周村水库的类蛋白类荧光物质要高于金盆水库,特别是在冬季水库水体低温持续混合作用下,更能表现出类蛋白质物质的差异性.另外,周村水库主要的入库河流包括西伽河、下十河和徐洼河,农业污水、生活废水以及畜牧业污水的输入使水体有机质负荷高,其水体 DOM 具有较低的 HIX 和高 $\beta:\alpha$. Carstea 等^[37]学者发现周边以城市用地为主的

Tineretului Lake,其 HIX 同样为 1.02 ~ 1.78,对应的 BIX 为 0.82 ~ 1.17;卢松等^[10]在研究以农田、林地及居民用地为主的长寿湖时也得出同样的结果(FI 为 1.57 ~ 1.67; HIX 为 3.18 ~ 6.30; BIX 为 0.81 ~ 0.87; $\beta:\alpha$ 为 0.78 ~ 0.90);宋晓娜等^[38]研究同样为富营养化水域的太湖时,发现其 FI 值也达到 1.54 ~ 1.96. 与本文的关于周村水库 DOM 特征指数的研究结论相一致.

金盆水库建成于 2001 年,属于较新的水利工程,其上游集水流域位于秦岭,土地利用类型是以杂果林和阔叶林为主的原始森林,人为干扰小,邱二生^[15]对金盆水库上游入库径流水质进行了监测,其结果发现径流水质状况良好,氮磷营养盐及铁、锰等水质指标均优于《国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》中三类水体的要求;Zhou 等^[39]研究发现金盆水库沉积物 TN 仅为 $(1252 \pm 101) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 为 $(769 \pm 24) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,沉积物污染程度处于最低级级别.因此,金盆水库冬季不存在严重的内源污染.但金盆水库冬季径流量高于周村水库,周边的土壤腐殖质发育程度高,水体中陆源腐殖质较多,沿岸的枯物落入水体,其后续的降解也成为 DOM 的重要来源,由此陆源输入为该水库的 DOM 不可忽视的来源之一. Kothawala 等^[40]研究以森林系统为主的 Lumpen 时同样得出了该结论(FI = 1.28; $\beta:\alpha = 0.41$).但由于金盆水库处于中纬度亚热带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,降雨量少,相对的径流量也小,因此该季节金盆水库水体 DOM 来源为混合输入,陆源输入的特征并不是特别明显.

3 结论

(1)通过两个水库 DOM 吸收系数 $a(355)$ 的对比得出,金盆水库 DOM 浓度高于周村水库,且与水质指标具有同源性.周村水库短波段 S 值与长波段相接近,而金盆水库长波段 S 值要高于短波波段,可见两个水库的 DOM 有很大的差别($P < 0.01$).

(2)通过平行因子分析得出两水库 DOM 样本中均存在 3 个荧光组分,可分为长波类腐殖质(350/460 nm),可见类富里酸(335/460 nm)和类蛋白(260,285/360 nm)三类.冬季周村水库库区总荧光强度相比入库口相对较高,而金盆水库正好相反,各组分在全平面上基本呈现均匀分布的特征,两水库 DOM 样本中的 3 个组分具有同源性,其存在显著差异性($P < 0.01$).两个水库 DOM 均以类腐殖质为主,但周村水库类蛋白含量明显高于金盆水库.

(3)通过各项荧光光谱指标(FI、BIX、HIX 及 β/α)的差异性分析,综合得出冬季周村水库 DOM 以内源为主,而金盆水库 DOM 来自混合输入,此差异源于水库自身特征、历史条件、水质、沉积物特点及周边土地利用类型。

参考文献:

- [1] Aiken G R, Mcknight D M, Wershaw R L, *et al.* Humic substances in soil, sediment, and water: geochemistry, isolation, and characterization[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [2] Neff J C, Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and a model[J]. *Ecosystems*, 2001, **4**(1): 29-48.
- [3] Osburn C L, Retamal L, Vincent W F. Photoreactivity of chromophoric dissolved organic matter transported by the Mackenzie River to the Beaufort Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2009, **115**(1-2): 10-20.
- [4] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption characteristics in relation to fluorescence in Lake Taihu, China, a large shallow subtropical lake[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 43-52.
- [5] 牛城, 张运林, 朱广伟, 等. 天目湖流域 DOM 和 CDOM 光学特性的对比[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(9): 998-1007.
Niu C, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Comparison of optical properties of DOM and CDOM in Lake Tianmuhu catchment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 998-1007.
- [6] 王志刚, 刘文清, 李宏斌, 等. 三维荧光光谱法分析巢湖 CDOM 的空间分布及其来源[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 275-279.
Wang Z G, Liu W Q, Li H B, *et al.* Analysis of CDOM spatial distribution variations in Chaohu Lake and its sources by three dimensional fluorescence excitation-emission matrix[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(2): 275-279.
- [7] 虞敏达, 张慧, 何小松, 等. 河北洮河溶解性有机物光谱学特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3194-3202.
Yu M D, Zhang H, He X S, *et al.* Spectral characteristic of dissolved organic matter in Xiaohu River, Hebei [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3194-3202.
- [8] 陈雪霜, 江韬, 卢松, 等. 三峡库区消落带水体 DOM 不同分子量组分三维荧光特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 884-892.
Chen X S, Jiang T, Lu S, *et al.* Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of different molecular weight fractionations of dissolved organic matter in the water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir Areas [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 884-892.
- [9] 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.
- [10] 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.
Lu S, Jiang T, Zhang J Z, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristic differences of dissolved organic matter (DOM) from two typical reservoirs[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 516-523.
- [11] 祝鹏, 华祖林, 李惠民. PARAFAC 法解析太湖水体 DOM 三维荧光光谱[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(6): 1619-1625.
Zhu P, Hua Z L, Li H M. PARAFAC method used for analysis of three-dimensional fluorescence spectra of DOM in Taihu lake [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(6): 1619-1625.
- [12] 虞丹尼, 周光明, 吉芳英, 等. 三峡水库溶解有机质的三维荧光光谱研究[J]. *化学学报*, 2011, **69**(8): 960-966.
Yu D N, Zhou G M, Ji F Y, *et al.* Research on fluorescence excitation emission matrix of dissolved organic matters from the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2011, **69**(8): 960-966.
- [13] 李思佳, 宋开山, 赵莹, 等. 查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 112-122.
Li S J, Song K S, Zhao Y, *et al.* Absorption characteristics of particulates and CDOM in Waters of Chagan lake and Xinlicheng reservoir in autumn[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 112-122.
- [14] 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.
Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate Reservoir-Zhoucun Reservoir in North of China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [15] 邱二生. 黑河水库水质及藻类监测和水体分层研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
Qiu E S. Research on water quality, algae monitoring and thermal stratification in Heihe Reservoir [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [16] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
Cheng Y Y, Wang S L, Hu S B, *et al.* The fluorescence characteristics of dissolved organic matter (DOM) in the seagrass ecosystem from Hainan by fluorescence excitation-emission matrix

- spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(1): 141-145.
- [21] 陈小锋, 揣小明, 刘涛, 等. 江苏省西部湖泊溶解性有机物光谱学特征和来源解析[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 259-266.
- Chen X F, Chuai X M, Liu T, *et al.* Characteristics and source identification of the dissolved organic matter in the lakes of west Jiangsu by spectroscopy[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(2): 259-266.
- [22] 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.
- State Environmental Protection Administration of China. *Analysis in Water and Wastewater* (4th ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [23] 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.
- [24] 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.
- Yin Y, Wu Z X, Zhang Y L, *et al.* Absorption characteristics and sources analysis of CDOM in Xin'anjiang Reservoir in summer [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3207-3214.
- [25] Carder K L, Steward R G, Harvey G R, *et al.* Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(1): 68-81.
- [26] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 1-12.
- Wu F C, Wang L Y, Li W, *et al.* Natural organic matter and its significance in terrestrial surface environment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(1): 1-12.
- [27] 蔡文良, 许晓毅, 杜娟, 等. 嘉陵江重庆段 DOM 三维荧光光谱的平行因子分析[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(3): 276-281.
- Cai W L, Xu X Y, Du X, *et al.* Parallel factor analysis with EEM on dissolved organic matter in chongqing section of Jialing River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(3): 276-281.
- [28] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 基于三维荧光和平行因子分析法的太湖水体 CDOM 组分光学特征[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(3): 375-382.
- Huang C C, Li Y M, Wang Q, *et al.* Components optical property of CDOM in Lake Taihu based on three-dimensional excitation emission matrix fluorescence [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(3): 375-382.
- [29] 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]. 广州: 中国科学院研究生院, 2004.
- Fu P Q. Dissolved organic matter in natural aquatic environments and its complexation with metal ions: a study based on fluorescence spectroscopy [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [30] Leenheer J A, Croué J P. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(1): 18A-26A.
- [31] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [32] Rochelle-Newall E J, 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 刘瑞霞, 李斌, 刘娜娜, 等. 辽河流域与英国中部河湖水体中溶解有机质的荧光特性[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2321-2328.
- Liu R X, Li B, Liu N N, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in freshwaters from Liaohe Basin and Midland of UK [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2321-2328.
- [36] 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.
- Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 166-172.
- [37] Carstea E M, Ioja C I, Savastru R, *et al.* Spatial characterization of urban lakes [J]. *Romanian Reports in Physics*, 2013, **65**(3): 1092-1104.
- [38] 宋晓娜, 于涛, 张远, 等. 利用三维荧光技术分析太湖水体溶解性有机质的分布特征及来源[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(11): 2321-2331.
- Song X N, Yu T, Zhang Y, *et al.* Distribution characterization and source analysis of dissolved organic matters in Taihu Lake using three dimensional fluorescence excitation-emission matrix [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(11): 2321-2331.
- [39] Zhou Z Z, Huang T L, Li Y, *et al.* Sediment pollution characteristics and *in situ* control in a deep drinking water reservoir [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, doi: 10.1016/j.jes.2016.05.006.
- [40] Kothawala D N, Von Wachenfeldt E, Koehler B, *et al.* Selective loss and preservation of lake water dissolved organic matter fluorescence during long-term dark incubations [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **433**: 238-246.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《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12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 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