

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征 ..... 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)

基于 LUR 模型的中国 PM<sub>2.5</sub> 时空变化分析 ..... 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)

长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 ..... 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)

春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 ..... 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)

成都双流夏秋季环境中 VOCs 污染特征 ..... 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)

佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 ..... 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)

四川省人为源大气污染物排放清单及特征 ..... 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)

炼焦工序颗粒物排放特征 ..... 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)

小流域大气氮干湿沉降特征 ..... 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)

流域氮素主要输出途径及变化特征 ..... 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)

生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 ..... 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)

长江上游农业源溪流雨季中 N<sub>2</sub>O 间接排放特征 ..... 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)

不同氮污染特征河流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度、释放通量与排放系数 ..... 王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)

多种同位素手段的硝酸盐污染源解析, 以会仙湿地为例 ..... 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)

典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ<sup>18</sup>O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例 ..... 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)

沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 ..... 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)

2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 ..... 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)

周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 ..... 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)

三峡库区沉积物中镍污染特征评价 ..... 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)

四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 ..... 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)

大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 ..... 周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)

模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征 ..... 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)

典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化 ..... 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)

4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 ..... 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)

微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 ..... 王木兰, 姜玥璐 (5514)

广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因素分析 ..... 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)

磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 ..... 尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)

臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 ..... 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)

水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 ..... 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)

“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 ..... 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)

静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 ..... 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)

多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 ..... 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)

主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 ..... 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)

不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 ..... 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)

主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 ..... 付昆明, 付冀, 李慧, 姜姍, 仇付国, 曹秀芹 (5596)

厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 ..... 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)

低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 ..... 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)

复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 ..... 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)

不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 ..... 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)

某大型神渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 ..... 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)

亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 ..... 辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)

岩溶区典型灌丛植物根系从枝菌根真菌群落结构解析 ..... 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)

模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 ..... 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)

添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 ..... 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)

长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 ..... 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)

黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 ..... 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)

生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 ..... 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)

CO<sub>2</sub> 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 ..... 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)

基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 ..... 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)

中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 ..... 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)

《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录 ..... (5740)

《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)

# 周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征

周石磊<sup>1</sup>, 张艺冉<sup>1</sup>, 黄廷林<sup>2\*</sup>, 李再兴<sup>1</sup>, 罗晓<sup>1</sup>

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 运用三维荧光光谱(EEMs)技术结合平行因子分析法(PARAFAC)以及紫外-可见光谱技术,对周村水库热分层形成过程中沉积物间隙水中溶解性有机物(DOM)的垂向分布及光谱特性进行分析。结果表明:周村水库沉积物间隙水DOM的紫外-可见吸收光谱吸收系数的变异系数在-400%~400%之间,表明其性质在不同深度上存在差异;E2/E3变化说明随着热分层的形成,富里酸所占DOM的比例也随之升高;E3/E4>3.5以及 $S_R > 1$ 表明DOM为生物源,以富里酸为主;荧光光谱中出现了类富里酸峰(C1、C3)、类蛋白峰(C2、C5)和类腐殖酸峰(C4、C6);类富里酸以及类蛋白是DOM的主要构成组分;DOM总荧光强度、各组分荧光强度随着热分层形成过程呈下降趋势,垂向间和采样点的分布差异明显;热分层形成过程中水库沉积物间隙水的高BIX、FI、 $\beta:\alpha$ 以及低HIX,表明沉积物间隙水DOM以生物活动的内源为主,具有低腐殖化,强自生源特征。

**关键词:** 溶解性有机物(DOM); 间隙水; 紫外-可见光谱; 三维荧光光谱; 水库; 热分层

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5451-13 DOI: 10.13227/j.hjcx.201804058

## Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir

ZHOU Shi-lei<sup>1</sup>, ZHANG Yi-ran<sup>1</sup>, HUANG Ting-lin<sup>2\*</sup>, LI Zai-xing<sup>1</sup>, LUO Xiao<sup>1</sup>

(1. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on three-dimensional fluorescence spectra (EEMs) combined with parallel factor analysis (PARAFAC), and ultraviolet-visible (UV-Vis) spectra, we analyzed the vertical distribution and characteristics of dissolved organic matter in sediment interstitial water during the formation stage of thermal stratification in the Zhoucun Reservoir. The results show that the UV-Vis absorption coefficient varies between -400% and 400%, indicating the different properties of DOM (dissolved organic matter) at different depths. The changes of E2/E3 show that the proportion of fulvic acid in DOM increases with the stratification of the reservoir and fulvic acid accounts for the main proportion with autochthonous characteristics based on E3/E4 > 3.5 and  $S_R > 1$ . Two fulvic-like substances (C1, C3), two protein-like substance (C2, C5), and two humic-like substances (C4, C6) were identified with the PARAFAC model. Moreover, fulvic-like and protein-like substances account for most of substances. The total DOM fluorescence intensity and the fluorescence intensity of each component show a decreasing trend with the occurrence of stratification and exhibit significant vertical and temporal differences. Based on the analysis of FI, HIX, BIX, and  $\beta:\alpha$  in sediment interstitial water, the high BIX, FI,  $\beta:\alpha$  and low HIX indicate that the DOM of sediment interstitial water has strong autochthonous components and original characteristics of aquatic bacteria.

**Key words:** dissolved organic matter (DOM); interstitial water; UV-Vis spectrum; three-dimensional fluorescence spectrum; reservoir; thermal stratification

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)主要包括亲水性有机酸、类蛋白、类氨基酸、类腐殖酸(胡敏酸和富里酸)和碳水化合物等构成的有机物的总称<sup>[1]</sup>。其中,类腐殖酸物质较难降解(40%~80%)<sup>[2]</sup>,类氨基酸物质容易降解以及被微生物利用(1%~3%)<sup>[3,4]</sup>,并且不同环境特征的溶解性有机质的种类和特征差异明显。众所周知,溶解性有机质是地球生态系统的重要组成部分,在微

生物代谢过程<sup>[5]</sup>以及地球化学循环中能与许多金属和有机污染物相结合<sup>[6]</sup>,因而对物质的化学形

收稿日期: 2018-04-08; 修订日期: 2018-05-25

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); 优博培育基金项目(6040317010)

作者简介: 周石磊(1987~),男,博士,讲师,主要研究方向为水质微污染控制与水资源保护, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

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

态、迁移转化具有重要影响；同时作为重要碳库，对全球碳循环发挥重要作用<sup>[7]</sup>。因此，对 DOM 的组成以及光谱特征的分析，可以进一步认识 DOM 的环境行为以及其生态环境效应。

近几年，采用紫外-可见光谱以及三维荧光光谱技术<sup>[8]</sup>对 DOM 进行特征辨析已成为重要的研究手段，但大多数工作还局限于河流、湖泊以及海洋的水体中。比如：程庆霖等<sup>[9]</sup>利用平行因子分析法 (PARAFAC) 解析了滇池水样的三维荧光光谱，揭示了其有色溶解性有机质 (CDOM) 组分的分布特征，并利用主成分分析法对影响滇池水体 CDOM 的主控因素进行了研究；江韬等<sup>[10]</sup>对三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 的吸收光谱特征进行分析，表明 DOM 季节性变化差异明显，并且周边生态系统和土地利用类型对湖泊 DOM 差异影响显著；刘堰杨等<sup>[11]</sup>对川西高海拔河流中溶解性有机质 (DOM) 紫外-可见光吸收光谱特征进行解析，揭示了高原河流 CDOM 芳香性较强、疏水性组分丰富、分子结构较为复杂性质，并且高通量陆源腐殖质的输入明显影响了溶解性有机物的特征；周倩倩等<sup>[12]</sup>结合三维荧光-平行因子分析对舟山渔场的有色溶解性有机物的特征进行研究，表明该区域 DOM 主要受长江输入和舟山岛居民工农业生产等活动的影响；闫丽红等<sup>[13]</sup>分析了渤海有色溶解有机物的三维荧光光谱特征。

饮用水水源水库作为水体生态系统的重要组成部分，其水体的污染控制对人民的饮水安全越来越重要。由于水库的修建改变了原有的水力特征，使水体呈现季节性热分层。特别在热分层稳定期底层的厌氧环境，有机物的厌氧分解导致色度升高、臭味异常等环境问题。并且这种随水库季节分层产生的底层水体的内源污染具有周期性特征。然而，关于水源水库水体、沉积物以及间隙水的 DOM 分布演变特征的解析关注较少，特别是水体热分层演变过程中 DOM 的特征分析鲜有报道。由于沉积物间隙水是沉积物与其上覆水体之间进行物质交换的重要介质，对沉积物间隙水中 DOM 的研究将有助于估算沉积物溶解性有机物的扩散通量以及探索有机物的迁移转化规律。

周村水库在夏季形成稳定的热分层，水体分层造成的底部水体水质恶化，对城市供水安全构成了严重威胁<sup>[14]</sup>。目前，关于周村水库 DOM 的研究主要集中于夏季稳定分层期<sup>[15, 16]</sup>以及冬季混合期<sup>[17]</sup>的水体 DOM 光谱特征分析，以及水库混合初期的

沉积物间隙水的 DOM 特征解析<sup>[18]</sup>。近年来对于水库在热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的研究鲜有报道，对周村水库热分层形成过程中，主库区不同深度沉积物间隙水 DOM 的分布特征及光谱特征还缺乏研究。因此本文利用三维荧光光谱技术结合平行因子分析法以及紫外-可见光谱技术，重点研究周村水库热分层形成过程中，沉积物间隙水 DOM 的光谱特征及其影响因素，以期为水库水质改善、污染防治以及运行管理提供科学依据和理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点及样品提取

周村水库位于山东省枣庄市孟庄镇周村，水面面积 8.54 km<sup>2</sup>、总库容 8 404 万 m<sup>3</sup>，是枣庄市主要的城市供水水源地。结合曾明正等<sup>[14]</sup>的研究，该水库在 2~5 月是水库水体热分层形成期间。因此本实验于 2016 年 2~5 月选取了周村水库主库区 3 个采样点采集柱状沉积物样品的间隙水，结合紫外-可见光谱以及三维荧光光谱技术来分析间隙水 DOM 的光谱特征。与此同时，采用 GPS 进行站点定位，分别为 W1 (34°56'43"N、117°40'54"E)、W2 (34°56'52"N、117°41'E)、W3 (34°56'47"N、117°41'8"E)。采样点分布的具体位置见文献<sup>[18]</sup>。采用柱状取泥器采集沉积物样品，采样完成后在现场迅速将沉积物沿深度方向按 2 cm 间隔切割分层，并用封口袋密封，储于敷有冰袋的箱子保存后迅速将样品带回实验室。使用冷冻离心机对沉积物样品离心分离 10 min，转速 6 000 r·min<sup>-1</sup>，离心后的水样用玻璃纤维滤膜 (预先于 450℃ 灼烧 5 h) 过滤，装入玻璃瓶内保存在 4℃ 冰箱里。24 h 内完成相关水质指标的测定以及紫外-可见光谱和三维荧光光谱的扫描。

### 1.2 紫外-可见光谱测定及特征分析

紫外-可见光谱采用 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 200~700 nm 范围内进行吸光度测定。本文采用如下公式计算吸收系数<sup>[1, 19]</sup>：

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

$$a(\lambda) = a^*(\lambda) - \frac{a^*(700) \cdot \lambda}{700} \quad (2)$$

$$a(\lambda) = a(440) \exp[S(440 - \lambda)] \quad (3)$$

式中， $\lambda$  为波长，单位为 nm； $a^*(\lambda)$  和  $a(\lambda)$  分别为未经散射校正的波长为  $\lambda$  处的吸收系数和经过

散射校正过后的波长为  $\lambda$  处的吸收系数, 单位为  $\text{m}^{-1}$ ;  $D(\lambda)$  为吸光度;  $r$  为光程路径, 单位为  $\text{m}$ ;  $S$  为指数函数曲线光谱斜率,  $\mu\text{m}^{-1}$ . 国内外的研究中通常选取  $a_{254}$ 、 $a_{355}$  以及  $a_{440}$  来表示溶解性有机质的相对浓度. 由于不同波段代表 DOM 的不同特征, 因此本研究对不同波段的 DOM 的吸光度进行非线性拟合, 得到不同波段的光谱斜率. 具体如下: 拟合 275 ~ 295、350 ~ 400、280 ~ 320、320 ~ 500、280 ~ 500 nm 波段的光谱斜率得到  $S_{275 \sim 295}$ 、 $S_{350 \sim 400}$ 、 $S_{280 \sim 320}$ 、 $S_{320 \sim 500}$ 、 $S_{280 \sim 500}$ , 计算  $S_R$  (为  $S_{275 \sim 295}/S_{350 \sim 400}$ ). 其中  $S_{280 \sim 320}$  表示短波段的 DOM 特征,  $S_{320 \sim 500}$  表示长波段的 DOM 特征,  $S_R$  反映 DOM 的来源以及分子量大小,  $S_{280 \sim 500}$  反映紫外波段的 DOM 吸光度的衰减特点.

E2/E3 是 250 nm 和 365 nm 处的紫外吸光度之比, 可以估算 DOM 分子量的大小, E2/E3 值与分子量大小成反比, E2/E3 值越大, 分子量越小<sup>[20, 21]</sup>. E3/E4 是 300 nm 和 400 nm 处的紫外吸光度之比<sup>[5, 21]</sup>, 用来衡量腐殖质的腐殖化程度和芳香性.

### 1.3 三维荧光光谱测定及特征指数

三维荧光光谱采用 F97 荧光分光光度计进行测定. 设备的激发波长、发射波长以及扫描速度等参数设置同文献[17]. 为避免内过滤效应的影响, 荧光测定前样品用超纯水稀释<sup>[22]</sup>. 利用超纯水扣除散射影响, 并结合 Delaunay 三角形内插值法修正去除拉曼峰散射和瑞利散射<sup>[23]</sup>. 采用 PARAFAC<sup>[24]</sup> 对三维荧光光谱进行解析, 并通过残差最小确定荧光组分数, 利用折半分析来分析结果的可靠性. 荧光指数 FI<sup>[25, 26]</sup> 是表征 DOM 中腐殖质来源的指数, 定义为激光波长为 370 nm 时, 荧光发射光谱在 470 nm 与 520 nm 处的强度比值 ( $FI = F_{470}/F_{520}$ ), 这个比值反映了芳香氨基酸与非芳香物对 CDOM 荧光强度的相对贡献率, 因而可以作为物质的来源以及 DOM 的降解程度的指示指标; 腐殖程度指标 HIX<sup>[27]</sup> 曾被定义为在 254 nm 激光波长下 435 ~ 480 nm 间荧光峰值与 300 ~ 345 nm 间荧光强度积分值之商 ( $F_{435 \sim 480}/F_{300 \sim 345}$ ), HIX 指数越高则 DOM 腐殖化程度越高<sup>[28]</sup>; 生物源指数指标 BIX<sup>[29]</sup> 是激发波长为 310 nm 时, 发射波长在 380 nm 和 430 nm 处荧光强度的比值 ( $BIX = F_{380}/F_{430}$ ), 它也被用来估计内源物质对间隙水中 DOM 相对贡献; 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<sup>[30]</sup>, 反映新生 DOM 在整体 DOM 中所占比例, 是

评估水体生物活性的重要依据.

## 2 结果与讨论

### 2.1 紫外-可见吸收光谱曲线特征

周村水库在热分层形成过程中, 沉积物间隙水 DOM 的光谱吸收系数总体上呈现指数衰减, 在 220 nm 处有个峰值, 在波长达到 540 nm 后吸收几乎为 0 (图 1). 编号形式 X-Y, 其中 X 为 W1/W2/W3, 分别表示采样点 1 号/2 号/3 号; 其中 Y 为 S/M/B, 分别表示间隙水表层 (0 ~ 2 cm)/中层 (2 ~ 4 cm)/底层 (4 ~ 6 cm). DOM 的光谱吸收系数在时间域以及空间域上存在较大的差异 (图 1). 2 ~ 4 月的 DOM 吸收系数在空间域上 (垂向间以及不同采样点) 的差异明显, 在垂向呈现随着深度增加吸收系数减少的趋势. 吸收系数的变异系数在 -400% ~ 400% 之间, 表明随着热分层的形成不同深度沉积物间隙水 DOM 性质上存在较大差异.

### 2.2 紫外-可见吸收光谱特征参数分析

周村水库在热分层形成过程中, 各个采样点沉积物间隙水 DOM 在 254、350 以及 440 nm 处吸收系数的均值随着沉积物深度的增加呈现减少的趋势 (图 2). 结果表明表层沉积物间隙水的 DOM 丰度高于深层沉积物间隙水 DOM 的丰度, 与黄廷林等<sup>[31]</sup> 研究周村水库沉积物 TOC 含量随深度增加而下降的结论相一致. 但是本研究间隙水中 DOM 吸收系数在热分层形成过程中规律不明显.

S 值能提供 DOM 组成特征信息 (分子量大小、光化学反应活性), 可以表征 DOM 分子组成的差异. 本研究通过对 280 ~ 320、320 ~ 500、280 ~ 500 nm 波段的光谱斜率得到  $S_{280 \sim 320}$ 、 $S_{320 \sim 500}$ 、 $S_{280 \sim 500}$  值 (图 2). 结果表明: 各个波段的 S 值呈现相似分布规律; 各个采样点的垂向间隙水 DOM 的 S 值差异显著; 各个采样点的间隙水 DOM 的 S 值季节间的差异显著; 拟合得到的  $S_{280 \sim 320}$ 、 $S_{320 \sim 500}$  和  $S_{280 \sim 500}$  相似, 表明短波段、长波段以及紫外波段 DOM 的分布特征相似.

E2/E3 值越高表明 DOM 分子量越小. 本研究 3 个采样点不同深度间隙水的 E2/E3 值 (图 3) 大体在 2.65 ~ 14.30 之间, 均值为 6.51, 这与牛城等<sup>[20]</sup> 研究三峡库区沉积物 DOM 的 E2/E3 值较为接近. 除 2 号采样点的表层以及中层沉积物间隙水之外, 其余各个采样点的间隙水 E2/E3 值随着水库热分层的形成大体呈现上升趋势, 表明 DOM 分子

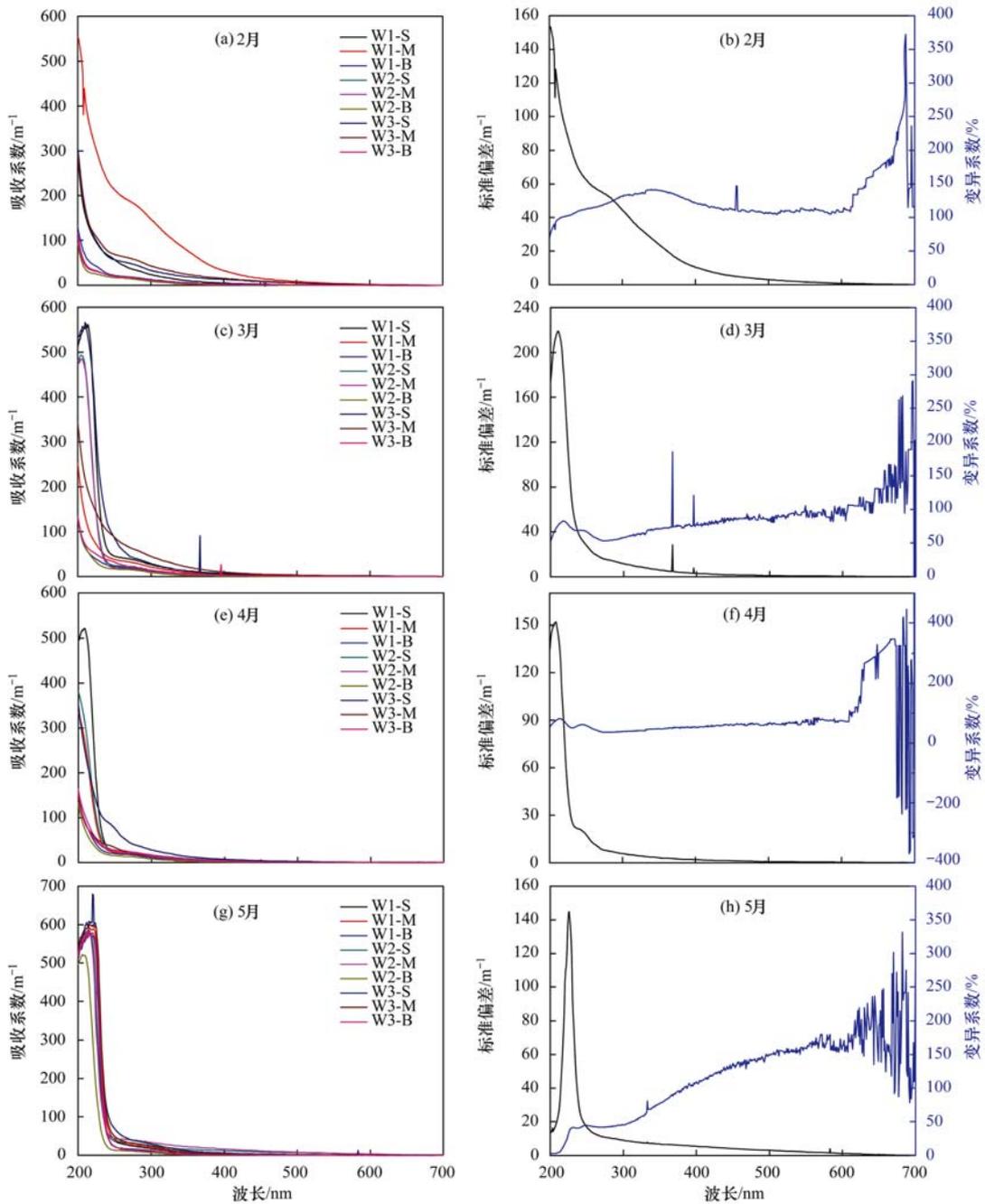


图 1 3 个采样点沉积物间隙水 DOM 的紫外-可见吸收光谱

Fig. 1 Ultraviolet-visible spectroscopy of DOM in sediment interstitial water of three sampling sites

量变小, 富里酸所占的比例逐渐增加, 这与水库水体温度增加, 细菌活性增强有关. 与此同时, 除 2 号采样点的表层以及中层沉积物间隙水之外, 其余各个采样点的间隙水 E2/E3 值随着水库热分层的形成大体呈现上升趋势. 本研究的 E3/E4 值(图 3) 大体在 2.07 ~ 13.64 之间, 均值为 5.73. 本研究表明: 当 E3/E4 < 3.5 时腐殖质以腐殖酸为主, E3/E4 > 3.5 时以富里酸为主. 本实验 E3/E4 值(图 3) 随着热分层的形成逐渐增加; 各个采样点的 E3/E4 值大体

都大于 3.5. 表明间隙水中 DOM 腐殖化程度较弱, 芳香性较弱, 是以富里酸为主, 与上述解析的结果相吻合. 有研究表明<sup>[21, 32]</sup>:  $S_R(S_{275-295}/S_{350-400})$  值越高, DOM 分子量越低, 意味着 DOM 被光漂白及微生物降解的活性降低;  $S_R > 1$  时, 表征 DOM 主要为生物源;  $S_R < 1$  时, 表征 DOM 主要为外源. 本研究中  $S_R$  值在 0.85 ~ 1.50 之间, 均值为 1.13, 表明该时期间隙水中的 DOM 主要是生物源. 这与该时期水体温度增加, 微生物活性加强相一致.

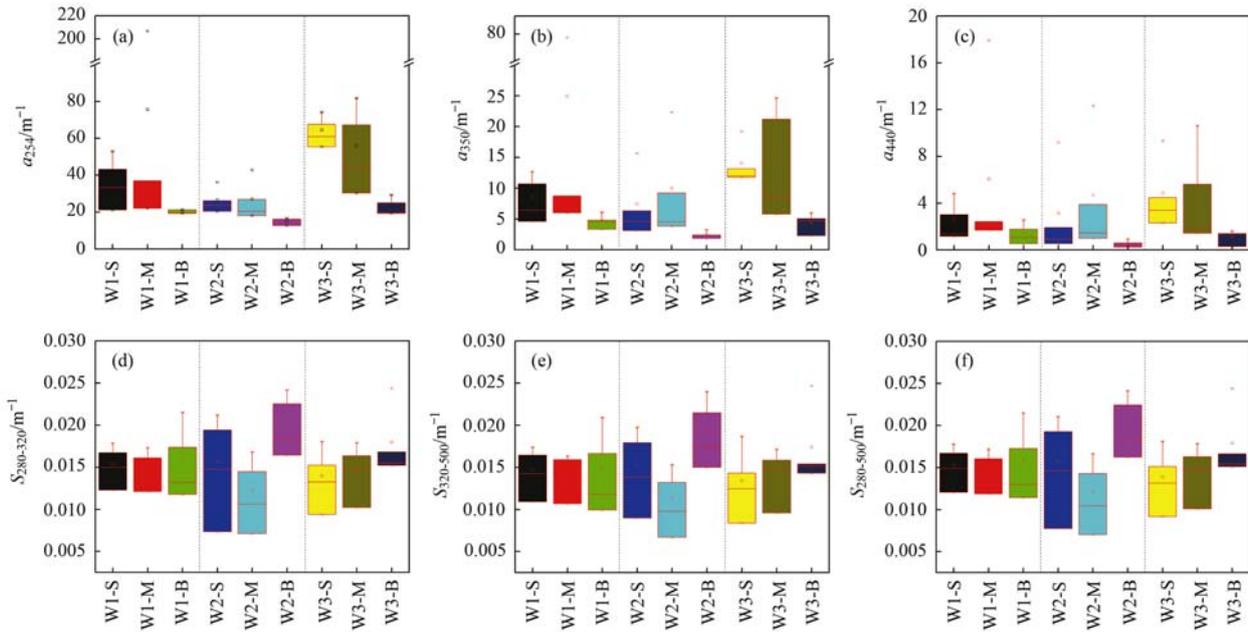


图 2 周村水库沉积物间隙水 DOM 的  $a_{254}$ 、 $a_{350}$ 、 $a_{440}$  和  $S_{280-320}$ 、 $S_{320-500}$ 、 $S_{280-500}$

Fig. 2 The  $a_{254}$ ,  $a_{350}$ , and,  $a_{440}$  and  $S_{280-320}$ ,  $S_{320-500}$ , and,  $S_{280-500}$  of DOM in sediment interstitial water of the Zhoucun Reservoir

### 2.3 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分特征

#### 2.3.1 DOM 的荧光组分分析

基于对 3 个采样点不同深度的间隙水样品的三维荧光光谱进行平行因子分析, 解析热分层形成过程中不同深度间隙水 DOM 的组分构成. PARAFAC 对组分数很敏感, 建模过程中选择适当的组分数对模型的效果影响较大. 只有选择正确的组分数目而且信噪比合适, 解析的结果才能反映真实的谱图. 从图 4 可以看到, 成分从 5 变为 6 时, 残差平方和急剧变小, 而从  $F=6$  变成  $F=7$  时, 残差平方和变化不大, 初步确定成分  $F=6$  最合适. 然后通过对  $F=6$  时的结果经过折半分析, 结果 Split1-2 与 Split3-4 吻合, 因此最终确定成分  $F=6$  最合适.

在热分层形成过程中, 沉积物间隙水共有 6 个

荧光组分(表 1 和图 5), 其中包括两个类富里酸组分(C1、C3)、两个类腐殖质组分(C4、C6)以及两个类蛋白组分(C2、C5). 结合前人研究的成果(表 1), 综合分析得到: C1 的荧光峰位置是 255/360 nm ( $E_x/E_m$ ) 为类富里酸(紫外区富里酸); C3 的荧光峰位置是 330/410 nm ( $E_x/E_m$ ), 为类富里酸中可见区类富里酸; 荧光 C4 的荧光峰位置是 370/450 nm ( $E_x/E_m$ ), 为类腐殖质 C 峰; C6 的荧光峰位置是 265/525 nm ( $E_x/E_m$ ), 为陆源性类腐殖质, 主要来源为生物降解后的有机物, 可能与缩醛和缩酮的异构体所占百分比有关; C2 的荧光峰位置是 275/290 nm ( $E_x/E_m$ ) 为类蛋白质(类酪氨酸/类色氨酸的 B 峰); C5 的荧光峰位置是 280/340 nm ( $E_x/E_m$ ) 为类蛋白(本土色氨酸/类色氨酸 T 峰).

表 1 沉积物间隙水 DOM 荧光组分分析

Table 1 Characteristics of the six different components in sediment interstitial water

组分	$E_x/E_m$	物质	文献值
C1	255/360	类富里酸(紫外区富里酸)	230 ~ 270/370 <sup>[18, 32]</sup>
C2	275/290	类蛋白质(类酪氨酸/类色氨酸的 B 峰)	270 ~ 275/300 ~ 304 <sup>[33-36]</sup>
C3	330/410	类富里酸(可见光区富里酸)	320/400 <sup>[37]</sup> ; 310 ~ 360/370 ~ 450 <sup>[17, 32]</sup>
C4	370/450	长波类腐殖质	370/440 <sup>[12]</sup> ; 350 ~ 440/430 ~ 510 <sup>[32]</sup>
C5	280/340	类蛋白(本土色氨酸/类色氨酸 T 峰)	280/338 ~ 340 <sup>[38, 39]</sup> ; 275/340 <sup>[40]</sup> ; 285/336 <sup>[35]</sup>
C6	265/525	类腐殖酸(生物降解的陆源腐殖类物质)	265/525 <sup>[9]</sup>

#### 2.3.2 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分强度及分布特征

如图 6 可见, 编号形式 X-Y-Z, 其中 X 为 W1/W2/W3, 分别表示采样点 1 号/2 号/3 号; 其中 Y

为 2/3/4/5, 分别表示采样时间 2 月/3 月/4 月/5 月; 其中 Z 为 S/M/B, 分别表示间隙水表层(0 ~ 2 cm)/中层(2 ~ 4 cm)/底层(4 ~ 6 cm). 沉积物间隙水的总荧光强度随着深度的增加大体呈下降趋势,

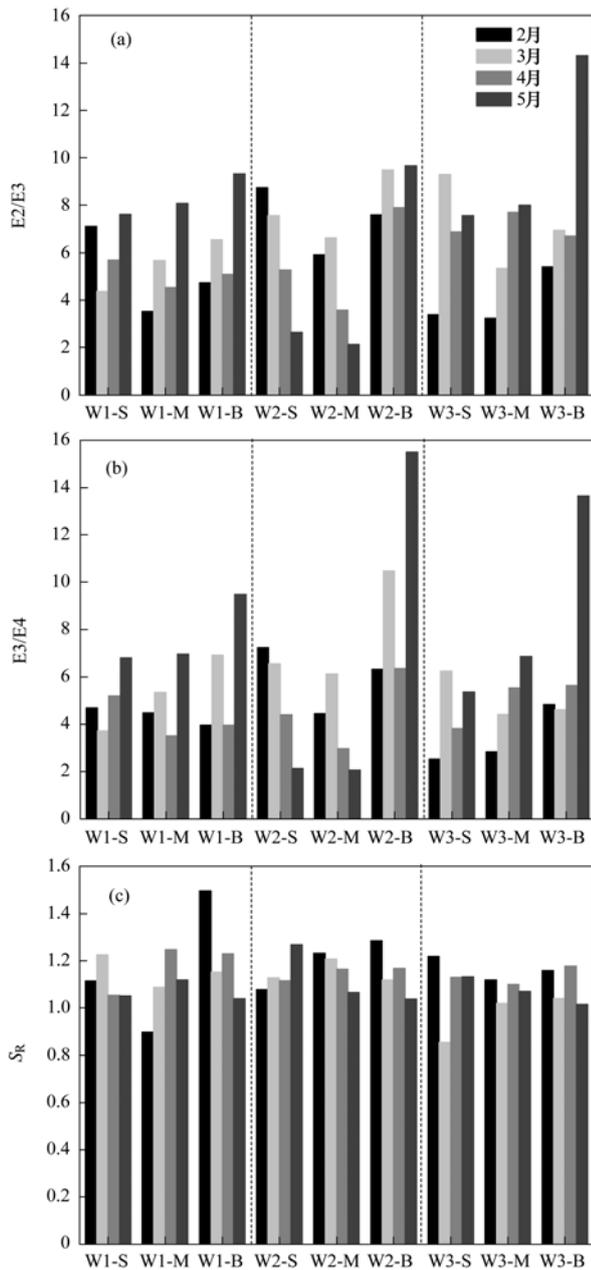


图3 周村水库沉积物间隙水 DOM 的 E2/E3、E3/E4 和 S<sub>R</sub>  
Fig. 3 Absorption coefficient ratios E2/E3 and E3/E4 and S<sub>R</sub> of DOM in sediment interstitial water of the Zhoucun Reservoir

这与 DOM 在 254、350 以及 440 nm 处吸收系数随深度增加而降低的规律相一致。不同采样点的荧光组成差异明显,特别是采样点 3 处类富里酸(C1)所占 DOM 比例随着热分层的形成是增加的,并且沿深度方向先增后减,在总荧光强度中占有很大比例;在 4 个组分中,C1 和 C3 属于富里酸,相对含量在 12.84%~75.90%之间,其含量远远高于类蛋白(C2 和 C5, 10.30%~64.26%)、类腐殖质(C4 和 C6, 12.09%~33.44%),说明富里酸是沉积物间隙水 DOM 的主要成分,与本文中 E2/E3 得出富

里酸为主的结论相一致,并且与易文利等<sup>[41]</sup>对长江中下游浅水湖泊沉积物腐殖质组分的研究一致。

各个采样点的荧光强度变化如下:1 号采样点总荧光强度从 2 月的 34 918.22 a. u. (0~2 cm)、42 586.41 a. u. (2~4 cm) 以及 15 322.77 a. u. (4~6 cm) 变化到 5 月的 9 542.68 a. u. (0~2 cm)、12 170.49 a. u. (2~4 cm) 以及 5 479.85 a. u. (4~6 cm); 2 号采样点总荧光强度从 2 月的 10 376.23 a. u. (0~2 cm)、5 078.96 a. u. (2~4 cm) 以及 3 579.80 a. u. (4~6 cm) 变化到 5 月的 9 154.95 a. u. (0~2 cm)、7 315.31 a. u. (2~4 cm) 以及 3 948.94 a. u. (4~6 cm); 3 号采样点总荧光强度从 2 月的 16 940.03 a. u. (0~2 cm)、7 176.78 a. u. (2~4 cm) 以及 4 732.51 a. u. (4~6 cm) 先上升到 3 月的 29 899.70 a. u. (0~2 cm)、19 540.70 a. u. (2~4 cm) 以及 11 834.34 a. u. (4~6 cm),再下降到 5 月的 18 743.33 a. u. (0~2 cm)、12 667.28 a. u. (2~4 cm) 以及 7 601.27 a. u. (4~6 cm)。在热分层形成过程中,3 个采样点的表层沉积物间隙水中富里酸(C1+C3)、类蛋白(C2+C5)以及腐殖质(C4+C6)所占的比例呈现明显的差异,从 2 月的(28.61±21.30)%、(50.02±15.82)% 以及(21.37±6.57)% 变化到从 5 月的(51.57±27.82)%、(25.73±25.53)% 以及(22.70±2.89)%;中层沉积物间隙水 DOM 中富里酸、类蛋白以及腐殖质所占的比例,从 2 月的(29.87±7.20)%、(43.11±13.80)% 以及(27.02±6.61)% 变化到从 5 月的(45.99±22.80)%、(30.15±21.50)% 以及(23.86±2.28)%;底层沉积物间隙水 DOM 中富里酸、类蛋白以及腐殖质所占的比例,从 2 月的(37.74±2.76)%、(32.80±5.06)% 以及(29.46±3.65)% 变化到从 5 月的(49.94±16.84)%、(23.69±12.18)% 以及(26.36±5.27)%。在各个采样点沉积物垂向间隙水的各荧光组分强度以及所占比例也存在差异。

DOM 中各组分荧光强度皮尔逊相关性分析,结果如表 2 所示。紫外区富里酸(C1)与可见光区富里酸(C3)以及长波类腐殖质(C4)具有显著的相关性;类蛋白质(C2)与可见光区富里酸(C3)、长波类腐殖质(C4)、类蛋白(C5)以及类腐殖酸(生物降解的陆源腐殖类物质)(C6)具有显著的相关性;可见光区富里酸(C3)与长波类腐殖质(C4)以及类蛋白(C5);长波类腐殖质(C4)与类蛋白(C5)以及类腐殖酸(C6)具有显著的相关性;类蛋白

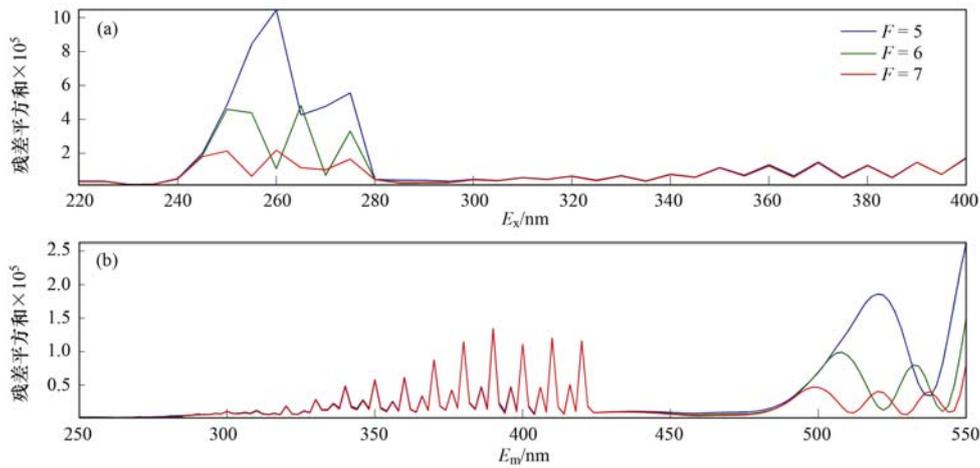


图 4 沉积物间隙水荧光组分的残差分析

Fig. 4 Residual analysis of EEM samples in sediment interstitial water

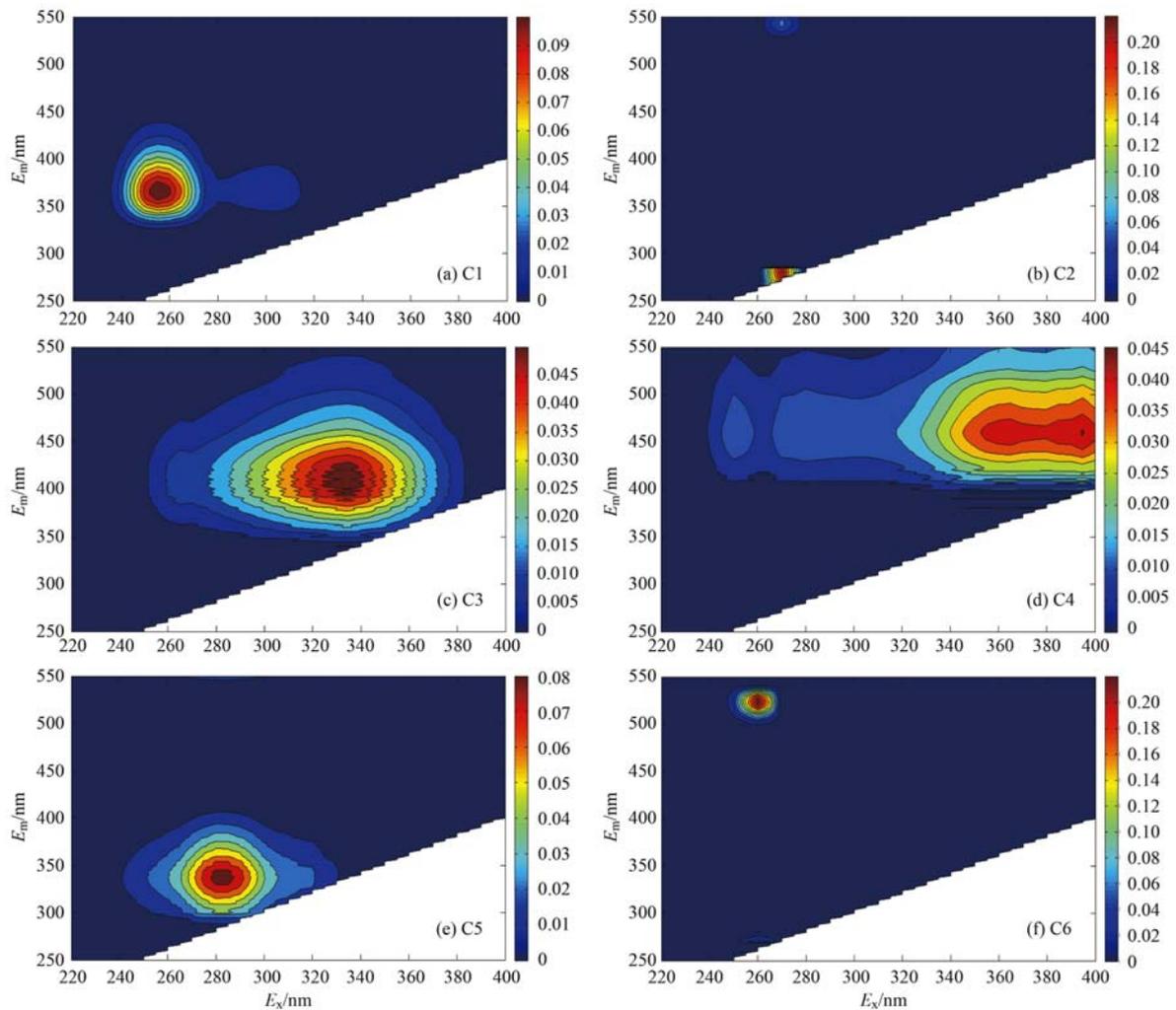


图 5 采样点沉积物间隙水中 DOM 的三维荧光光谱图

Fig. 5 3-D fluorescence spectra of sediment interstitial water at the sampling sites

(C5)与类腐殖酸(C6)具有显著的相关性.

结果表明:在水库热分层形成过程中,沉积物间隙水 DOM 中的富里酸类、腐殖质类以及类蛋白

物质有着相同的来源,并且在热分层过程中微生物的代谢活动使各个荧光组分间着发生转化和传递,与课题组前期的研究相一致<sup>[18]</sup>.

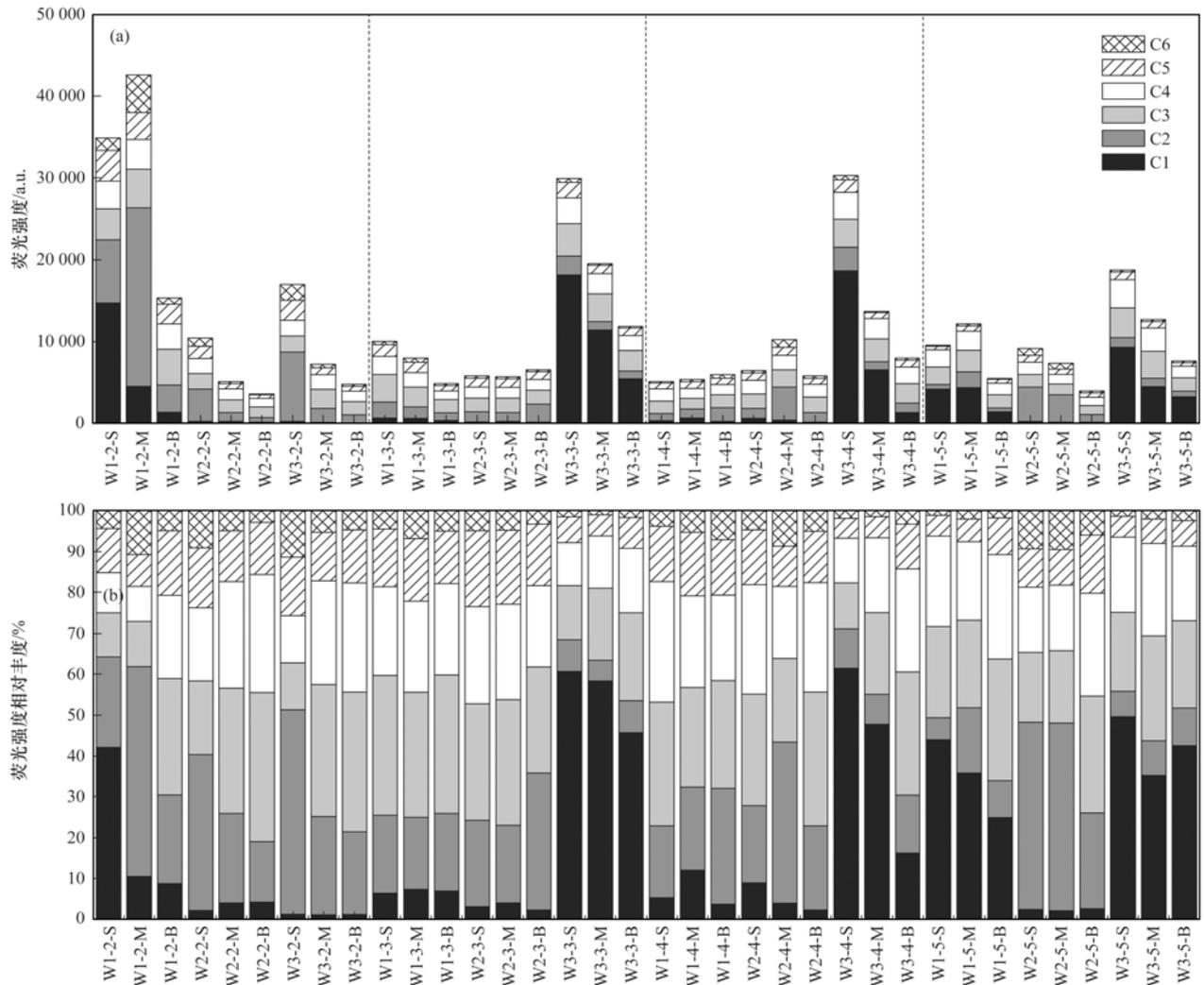


图 6 周村水库间隙水 DOM 组分荧光强度和相对丰度

Fig. 6 Fluorescence intensity and component percentages in sediment interstitial water of the Zhoucun Reservoir

表 2 沉积物间隙水的 6 个荧光组分的相关性<sup>1)</sup>

Table 2 Correlations of six components in sediment interstitial water of the Zhoucun Reservoir

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.000					
C2	0.126	1.000				
C3	0.660 **	0.476 **	1.000			
C4	0.747 **	0.475 **	0.949 **	1.000		
C5	0.406 *	0.764 **	0.679 **	0.671 **	1.000	
C6	0.091	0.995 **	0.458 **	0.455 **	0.760 **	1.000

1) \*\* 表示  $P < 0.01$  (双尾) 显著相关, \* 表示  $< 0.05$  (双尾) 显著相关, 下同

### 2.4 沉积物间隙水 DOM 的荧光特征参数分析

Huguet 等<sup>[29]</sup> 和肖隆庚等<sup>[42]</sup> 指出 BIX 在 0.6 ~ 0.7 之间时, 具有较少的自生组分; BIX 在 0.7 ~ 0.8 之间时, 具有中度新近自生源特征; BIX 在 0.8 ~ 1.0 之间时, 具有较强的自生源特征; 大于 1.0 时, 为生物活动产生. 本实验中 BIX 在 0.85 ~ 1.84 之间(图 7), 均值为 1.10, 说明在热分层形成过程

中不同深度的沉积物间隙水的 DOM 为生物活动产生、具有很强的自生源特征, 这与上述间隙水中 DOM 的紫外可见光谱以及三维荧光组分解析的结论一致. Lavonen 等<sup>[26]</sup> 以及 McKnight 等<sup>[43]</sup> 等提出 FI 与 DOM 的骨架特征有显著相关性, 可以反映芳香氨基酸与非芳香物对 CDOM 荧光强度的相对贡献率, 因而可以作为物质的来源以及 DOM 的降解

程度的指示指标. 本研究表明:FI > 1.8 以自生源为主, FI < 1.2 以陆源输入为主. 本研究中水库 3 个采样点 FI 值(图 7)的范围在 1.67 ~ 2.27 之间, 均值为 1.86, 说明不同深度 DOM 中腐殖质主要来源于自生源, 与程远月等<sup>[44]</sup>对近岸海域间隙水中 DOM 的腐殖质来源于微生物相一致(FI 值接近 1.9). 并且与 McKnight 等<sup>[43]</sup>研究得到的本土富里酸 FI 值为 1.7 ~ 1.9(具有较低的芳香性)的研究相吻合. Huguet 等<sup>[45]</sup>和 Ohno 等<sup>[46]</sup>指出 HIX < 4 表示

以自生源为主. 本研究中 3 个采样点在热分层形成过程中, 不同深度沉积物间隙水的 HIX 指数都小于 4(图 7), DOM 腐殖化程度较弱, 说明间隙水中生物细菌活动较强, 这与上述紫外-可见吸收光谱的结论非常吻合. 新鲜度指数( $\beta:\alpha$ )反映了新产生的 DOM 在整体 DOM 中所占的比例. 本研究中新鲜度指数的范围 0.82 ~ 1.62 之间, 均值为 1.03. 综上所述, 在水库水体热分层形成过程中, 沉积物间隙水中的 DOM 呈现出低腐殖化, 强自生源特征.

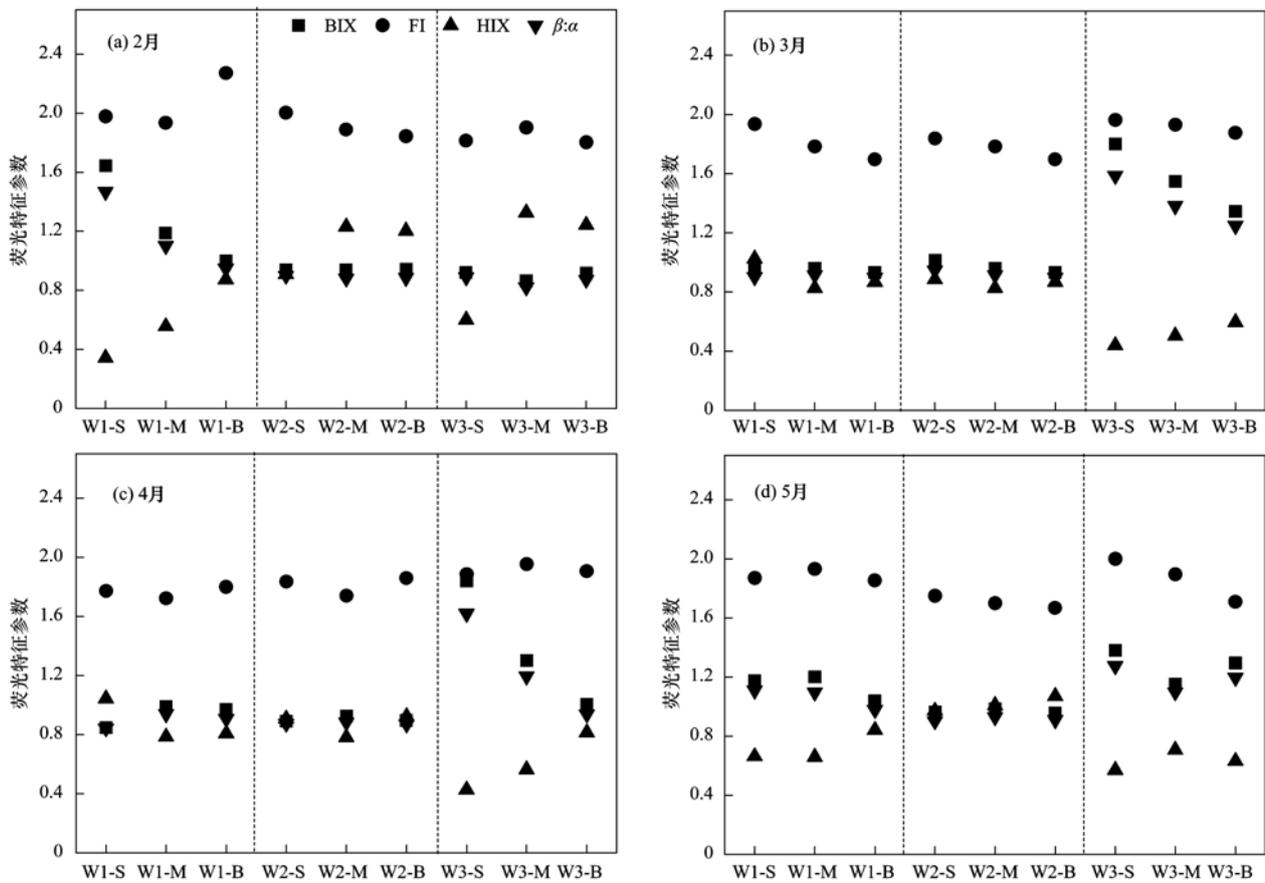


图 7 3 个采样点不同深度间隙水中 FI、HIX、BIX、 $\beta:\alpha$

Fig. 7 FI, HIX, BIX, and  $\beta:\alpha$  of sediment interstitial water at three sampling sites with different depths

## 2.5 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分与特征指数的相关分析

为了研究在水库水体热分层形成过程中, 沉积物间隙水的 DOM 荧光组分的时空分布特征以及特征指数的关系, 本研究基于 3 个采样点的间隙水荧光组分和环境因子进行了主成分分析(PCA)和皮尔逊相关性分析. 如图 8 所示, PCA1 和 PCA2 分别解释了总体的 56.57% 和 30.58%、主要由于 PCA1 的作用使样本点分散, 总共解释了 87.15%, 能够很好反映总体的变化; 同一个采样点的间隙水的样本分布较集中, 不同采样点的相对分散; 随着水库热

分层的形成, 各个采样点不同深度间隙水的 DOM 也发生了明显的变化, 与前文关于荧光组分强度和比例的结论相一致. 随着热分层的形成, 各个采样点的 DOM 特征发生明显的变化, 表明热分层阶段沉积物间隙水 DOM 演变活跃; 不同采样点间 DOM 的差异明显, 说明水库不同区域的沉积物特征以及理化环境差异显著.

表 3 为沉积物间隙水的 6 个荧光组分与特征指数的相关性, 结果表明: C1 (紫外区富里酸) 与 BIX 以及  $\beta:\alpha$  显现显著的正相关性、其相关系数为 0.978 ( $P < 0.01$ ) 和 0.976 ( $P < 0.01$ ), 与 HIX 为显

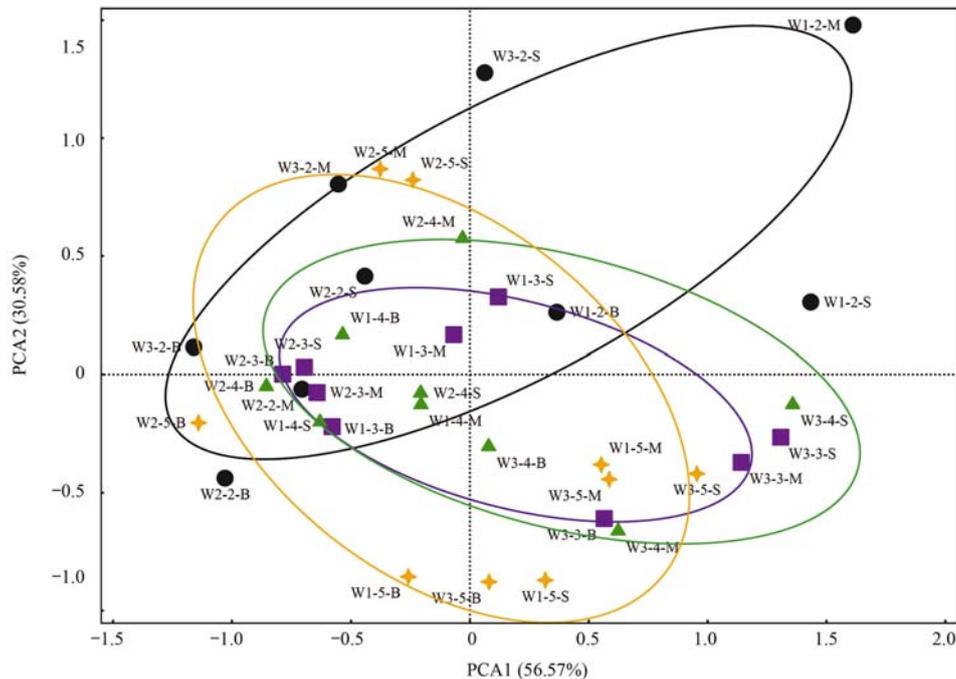


图 8 3 个采样点不同深度间隙水 DOM 特征的主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis of sediment interstitial water at three sampling sites with different depths

著负相关  $-0.754 (P < 0.01)$ , 表明热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 中紫外区富里酸主要源于微生物作用; C2 (类蛋白质-类酪氨酸) 与  $a_{254}$ 、 $a_{350}$  以及  $a_{440}$  显现显著的正相关性, 其相关系数为  $0.823 (P < 0.01)$ 、 $0.875 (P < 0.01)$  和  $0.745 (P < 0.01)$ , 表明热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 中类酪氨酸与 DOM 的相对丰度关系密切; C3 (可见光区富里酸) 与 BIX、FI、 $\beta:\alpha$  以及 DOM 的相对丰度 ( $a_{254}$ 、 $a_{350}$ 、 $a_{440}$ ) 显现显著的正相关性 ( $P < 0.01$ ), 与 HIX 为显著负相关  $-0.591$

( $P < 0.01$ ); C4 与 BIX、FI、 $\beta:\alpha$  以及 DOM 的相对丰度 ( $a_{254}$ 、 $a_{350}$ ) 显现显著的正相关性 ( $P < 0.01$ ), 与 HIX 为显著负相关  $-0.682 (P < 0.01)$ ; C5 与 FI 以及 DOM 的相对丰度 ( $a_{254}$ 、 $a_{350}$ 、 $a_{440}$ ) 显现显著的正相关性 ( $P < 0.01$ ), 与 HIX 为显著负相关  $-0.480 (P < 0.01)$ ; C6 与 DOM 的相对丰度 ( $a_{254}$ 、 $a_{350}$ 、 $a_{440}$ ) 显现显著的正相关性 ( $P < 0.01$ ). 综上所述, 在热分层形成过程中沉积物间隙水的 DOM 呈现弱腐殖化、强自生源特征.

表 3 沉积物间隙水的 6 个荧光组分与特征指数的相关性

Table 3 Correlation matrix of the DOM quality indices and scores of the three PARAFAC components

项目	BIX	FI	HIX	$\beta:\alpha$	$a_{254}$	$a_{350}$	$a_{440}$	E2/E3	E3/E4	$S_R$
C1	0.978 **	0.384 *	-0.754 **	0.976 **	0.421 *	0.168	0.050	0.228	-0.066	-0.416 *
C2	0.115	0.179	-0.304	0.113	0.823 **	0.875 **	0.745 **	-0.348 *	-0.244	-0.218
C3	0.627 **	0.753 **	-0.591 **	0.632 **	0.676 **	0.513 **	0.333 *	-0.081	-0.248	-0.166
C4	0.702 **	0.725 **	-0.682 **	0.711 **	0.658 **	0.474 **	0.315	-0.031	-0.246	-0.219
C5	0.361 *	0.490 **	-0.480 **	0.359 *	0.595 **	0.540 **	0.440 **	-0.229	-0.282	-0.033
C6	0.079	0.176	-0.285	0.078	0.813 **	0.871 **	0.746 **	-0.370 *	-0.259	-0.203

### 3 结论

(1) 水库沉积物间隙水 DOM 的紫外-可见光谱中, 吸收光谱曲线在 220 nm 处有个特征峰, 吸收系数的变异系数波动较大, 沉积物间隙水 DOM 性质上存在较大差异. 沉积物间隙水较高的 E2/E3、

E3/E4  $> 3.5$ 、 $S_R > 1$ , 表明间隙水中 DOM 以富里酸为主, 腐殖化程度以及芳香性较弱, 主要为生物源.

(2) 水库沉积物间隙水 DOM 存在 6 个荧光组分, 分别为 2 个类富里酸组分 (C1:  $E_x/E_m = 255/360$  nm 和 C3:  $E_x/E_m = 330/410$  nm), 2 个类腐殖质

组分 (C4:  $E_x/E_m = 370/450$  nm 和 C6:  $E_x/E_m = 265/525$  nm) 以及 2 个类蛋白组分 (C2:  $E_x/E_m = 275/290$  nm 和 C5:  $E_x/E_m = 280/340$  nm); 类富里酸和类蛋白是其主要组成部分; 随着热分层的形成, 沉积物间隙水的总荧光强度呈现下降趋势, 各荧光组分的强度和构成比例空间上呈现显著差异。

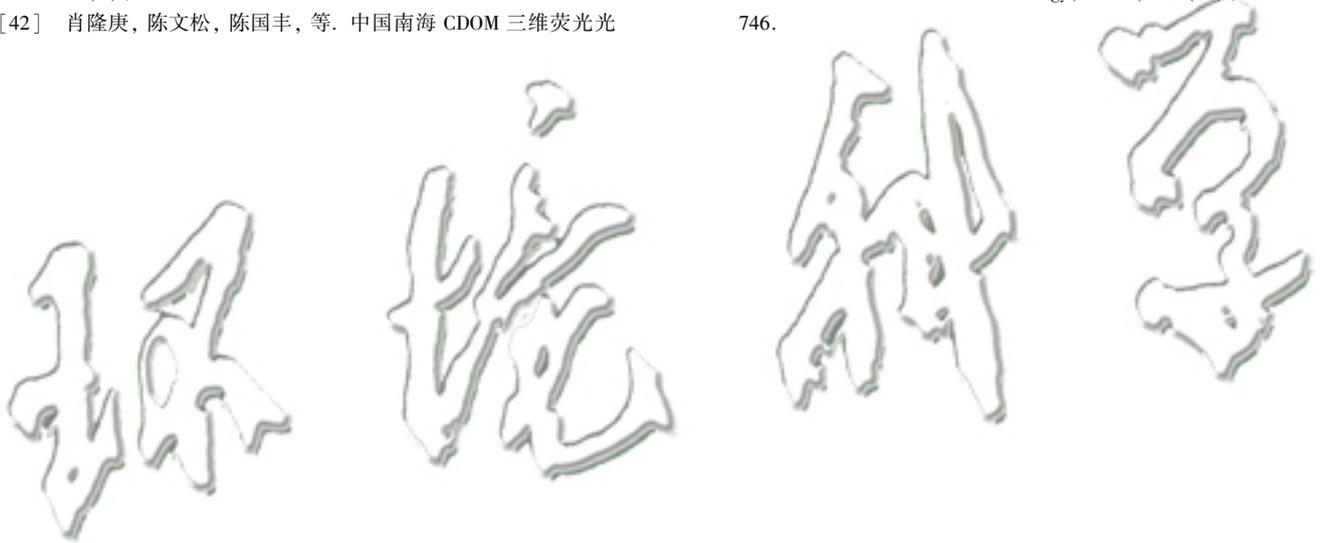
(3) 各项荧光特征参数 (FI、BIX、HIX 及  $\beta:\alpha$ ) 显示出, 周村水库在热分层形成过程中, 沉积物间隙水 DOM 以生物活动的内源为主, 具有低腐殖化, 强自生源特征。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] Harvey G R, Boran D A. The geochemistry of humic substances in seawater[A]. In: Aiken G R, McKnight D M, Wershaw R L *et al* (Eds.). *Humic Substances in Soil, Sediment, and Water* [M]. New York: Wiley, 1985.
- [ 3 ] Maie N, Scully N M, Pisani O, *et al*. Composition of a protein-like fluorophore of dissolved organic matter in coastal wetland and estuarine ecosystems[J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 563-570.
- [ 4 ] Wang Z G, Cao J, Meng F G. Interactions between protein-like and humic-like components in dissolved organic matter revealed by fluorescence quenching[J]. *Water Research*, 2015, **68**: 404-413.
- [ 5 ] Kirchman D L. The contribution of monomers and other low-molecular weight compounds to the flux of dissolved organic material in aquatic ecosystems [A]. In: Findlay S E G, Sinsabaugh R L (Eds.). *Aquatic Ecosystems: Interactivity of Dissolved Organic Matter* [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2003. 217-241.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Aufdenkampe A K, Mayorga E, Raymond P A, *et al*. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, **9**(1): 53-60.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.  
Cheng Q L, Zheng B H, Wang S R, *et al*. Optical signatures of chromophoric dissolved organic matter in water body of tien lake [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(3): 698-703.
- [ 10 ] 江韬, 卢松, 王齐磊, 等. 三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2073-2081.
- [ 11 ] Jiang T, Lu S, Wang Q L, *et al*. Absorption spectral characteristic dynamics of dissolved organic matter (DOM) from a typical reservoir lake in Inland of three gorges reservoir areas: implications for Hg species in waters [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2073-2081.
- [ 12 ] 刘堰杨, 秦纪洪, 孙辉. 川西高海拔河流中溶解性有机质 (DOM) 紫外-可见光吸收光谱特征[J]. *环境科学学报*, doi: 10.13671/j. hjkxxb. 2018. 0128.
- [ 13 ] Liu Y Y, Qin J H, Sun H. UV-VIS spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) of the natural alpine rivers in the western sichuan province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, doi: 10.13671/j. hjkxxb. 2018. 0128.
- [ 14 ] 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 等. 舟山渔场有色溶解有机质 (CDOM) 的三维荧光-平行因子分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 163-171.
- [ 15 ] Zhou Q Q, Su R G, Bai Y, *et al*. Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in zhoushan fishery using excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 163-171.
- [ 16 ] 闫丽红, 苏荣国, 段亚丽, 等. 渤海有色溶解有机物的三维荧光光谱特征[J]. *海洋与湖沼*, 2013, **44**(5): 1162-1169.
- [ 17 ] Yan L H, Su R G, Duan Y L, *et al*. The fluorescence excitation emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the bohai sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, **44**(5): 1162-1169.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 方开凯, 黄廷林, 张春华, 等. 淮河流域周村水库夏季 CDOM 吸收光谱特征、空间分布及其来源分析[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(1): 151-159.
- [ 21 ] Fang K K, Huang T L, Zhang C H, *et al*. Summer absorption characteristics, spatial distribution and source analysis of CDOM in Zhoucun Reservoir in Huaihe catchment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(1): 151-159.
- [ 22 ] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- [ 23 ] Huang T L, Fang K K, Zhang C H, *et al*. Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter from Zhoucun Reservoir in summer based on fluorescence spectroscopy and PARAFAC [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- [ 24 ] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4577-4585.
- [ 25 ] Huang T L, Fang K K, Zhang C H, *et al*. Optical characteristics of dissolved organic matter from two different full mixed reservoirs in winter based on UV-vis and EEMs [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4577-4585.
- [ 26 ] 张春华, 黄廷林, 方开凯, 等. 同温混合初期主库区沉积物

- 间隙水 DOM 的光谱特征——以周村水库为例[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 3048-3055.
- Zhang C H, Huang T L, Fang K K, *et al.* Spectral characteristics of DOM in sediment interstitial water of the main reservoir area during the initial stage of isothermal mixing: a case study of Zhoucun Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 3048-3055.
- [19] Keith D J, Yoder J A, Freeman S A. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett Bay, Rhode Island: implications for phytoplankton in coastal waters[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **55**(5): 705-717.
- [20] 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.
- [21] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质(DOM)的紫外-可见光谱特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 933-941.
- Li L L, Jiang T, Yan J L, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of three gorges reservoir areas [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 933-941.
- [22] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 基于三维荧光光谱—平行因子分析技术的蠡湖 CDOM 分布特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 517-524.
- Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Distribution of chromophoric dissolved organic matter in Lihu lake using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 517-524.
- [23] 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.
- [24] 刘海龙, 吴希军, 田广军. 三维荧光光谱技术及平行因子分析法在绿茶分析及种类鉴别中的应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 685-689.
- Liu H L, Wu X J, Tian G J. Three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor analysis as a complementary technique for green tea characterization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(5): 685-689.
- [25] 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.
- [26] Lavonen E E, Kothawala D N, Tranvik L J, *et al.* Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production[J]. *Water Research*, 2015, **85**: 286-294.
- [27] Ohno T, Fernandez I J, Hiradate S, *et al.* Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties[J]. *Geoderma*, 2007, **140**(1-2): 176-187.
- [28] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al.* Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(1): 45-50.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 李帅东, 姜泉良, 黎焯, 等. 环滇池土壤溶解性有机质(DOM)的光谱特征及来源分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, **37**(5): 1448-1454.
- Li S D, Jiang Q L, Li Y, *et al.* Spectroscopic characteristics and sources of dissolved organic matter from soils around Dianchi lake, Kunming[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(5): 1448-1454.
- [33] 闫丽红, 陈学君, 苏荣国, 等. 2010年秋季长江口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 51-60.
- Yan L H, Chen X J, Su R G, *et al.* Resolving characteristic of CDOM by excitation-emission matrix spectroscopy combined with parallel factor analysis in the seawater of outer Yangtze estuary in autumn in 2010[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 51-60.
- [34] 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.
- [35] 李奕洁, 宋贵生, 胡素征, 等. 2014年夏季长江口有色溶解有机物(CDOM)的分布、光学特性及其来源探究[J]. 海洋与湖沼, 2015, **46**(3): 670-678.
- Li Y J, Song G S, Hu S Z, *et al.* Optical characterization, distribution and sources of chromophoric dissolved organic material (CDOM) in the Changjiang River estuary in July 2014 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, **46**(3): 670-678.
- [36] Chen M L, Lee J H, Hur J. Effects of sampling methods on the quantity and quality of dissolved organic matter in sediment pore waters as revealed by absorption and fluorescence spectroscopy [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(19): 14841-14851.
- [37] 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.

- [38] Borisover M, Laor Y, Parparov A, *et al.* Spatial and seasonal patterns of fluorescent organic matter in lake Kinneret (Sea of Galilee) and its catchment basin[J]. *Water Research*, 2009, **43**(12): 3104-3116.
- [39] Ni B J, Fang F, Xie W M, *et al.* Characterization of extracellular polymeric substances produced by mixed microorganisms in activated sludge with gel-permeating chromatography, excitation - emission matrix fluorescence spectroscopy measurement and kinetic modeling [J]. *Water Research*, 2009, **43**(5): 1350-1358.
- [40] Ziegmann M, Abert M, Müller M, *et al.* Use of fluorescence fingerprints for the estimation of bloom formation and toxin production of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Water Research*, 2010, **44**(1): 195-204.
- [41] 易文利, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物腐殖质组分赋存特征[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(1): 21-28.  
Yi W L, Wang S R, Yang S W, *et al.* Humus distribution and forms in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the yangtze river[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(1): 21-28.
- [42] 肖隆庚, 陈文松, 陈国丰, 等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 160-167.  
Xiao L Q, Chen W S, Chen G F, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the South China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 160-167.
- [43] 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.
- [44] 程远月, 郭卫东, 胡明辉. 近岸沉积物再悬浮期间所释放溶解有机物的荧光特征[J]. *地球化学*, 2008, **37**(1): 51-58.  
Cheng Y Y, Guo W D, Hu M H. Fluorescence characteristics of dissolved organic matter released from estuarine sediments during resuspension[J]. *Geochimica*, 2008, **37**(1): 51-58.
- [45] 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.
- [46] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.



## CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants .....	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM <sub>2.5</sub> in China Based on the LUR Model .....	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta .....	..... HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing .....	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn .....	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China .....	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process .....	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments .....	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China .....	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer .....	..... SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River .....	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N <sub>2</sub> O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features .....	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland .....	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and δ <sup>18</sup> O in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City .....	..... WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River .....	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River .....	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir .....	..... ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains .....	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains .....	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding .....	..... YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City .....	..... WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions .....	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i> .....	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs .....	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide .....	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region .....	..... LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process .....	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process .....	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions .....	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process .....	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions .....	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria .....	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community .....	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process .....	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature .....	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments .....	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health .....	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site .....	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir .....	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions .....	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland .....	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO <sub>2</sub> -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field .....	..... BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil .....	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region .....	..... QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill .....	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO <sub>2</sub> Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios .....	..... TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP .....	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China .....	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)