

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征

周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓

(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)

摘要: 使用紫外-可见光谱(UV-vis)和三维荧光光谱-平行因子分析法(EEM-PARAFAC), 分析了白洋淀2019年春季、夏季和秋季沉积物间隙水中溶解性有机物(DOM)的来源及分布特征。结果表明, 白洋淀夏季沉积物间隙水DOM的相对浓度显著高于春秋两季; E2/E3值显示夏季的间隙水DOM分子量要高于春秋两季。使用EEM-PARAFAC从间隙水中提取了3种类蛋白组分(C1、C2、C3)和2类腐殖质组分(C4、C5); 类蛋白是DOM的主要构成组分, 占比达到(63.56 ± 16.07)%。DOM总荧光强度、各组分荧光强度及其相对丰度季节差异不显著, 空间差异显著; 养殖区的类蛋白物质占主体, 自然区的类腐殖质物质占主体。沉积物间隙水的高BIX、FI、 β : α 以及低HIX, 表明沉积物间隙水DOM具有低腐殖化、强自生源特征。与此同时, 环境因子与荧光组分的回归分析可以为管理者预测沉积物间隙水水质提供支持。

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; 平行因子分析; 白洋淀

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3730-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011063

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake

ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, ZHANG Zi-wei, SUN Yue, YAO Bo, CUI Jian-sheng, LI Zai-xing, LUO Xiao

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: The sources and distribution of dissolved organic matter (DOM) in the interstitial water of Baiyangdian Lake sediments were analyzed using the ultraviolet-visible absorption spectrum (UV-vis) method and three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC). Results showed that the DOM concentrations and molecular weight were significantly higher in summer than in spring and autumn, based on a_{254} and E2/E3 values. Three protein-like substance (C1, C2, and C3) and two humic-like substances (C4, C5) were identified with the PARAFAC model. Moreover, protein-like substances accounted for the majority of DOM, reaching (63.56 ± 16.07)%. Total DOM fluorescence intensity, the fluorescence intensity of each component, and the relative abundance exhibited significant spatial variation among the different functional zones in Baiyangdian Lake. Protein-like substances were mainly found in the breeding area, whereas humic-like substances mainly occurred in the natural area. The high BIX, FI, β : α , and low HIX indicated that DOM in sediment interstitial water exhibited low humification and highly autochthonous characteristics. Moreover, the perfect regression equations between water quality and the fluorescent components could provide a useful reference for managers aiming to protect the ecosystem of Baiyangdian Lake.

Key words: dissolved organic matter (DOM); interstitial water; UV-vis spectra; three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectra; parallel factor analysis; Baiyangdian Lake

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是一类包括亲水性有机酸、类蛋白、类氨基酸以及类腐殖酸的混合体有机物的总称^[1]。众所周知, DOM不仅作为碳循环的重要载体, 是地球碳素地球化学循环的重要组成部分^[2]; 而且还能与许多金属和有机污染物相结合, 发生复杂的化学反应^[3]; 同时也可作为有机碳源, 参与异养微生物的代谢过程, 进而影响微生物群落结构的生态演变^[4]。因此, 可通过对DOM的解析, 进一步认识环境中相关元素的地球化学循环过程。

近些年来, 研究者发现可以通过对DOM中可产生荧光的物质进行解析, 进而分析DOM的组成

及特征。由于简便、高灵敏度的特点, 紫外-可见光谱以及三维荧光光谱技术成为解析DOM的重要研究手段^[2,5,6], 广泛应用于河流^[7]、湖泊^[8]、水库^[9]以及海洋^[10]等环境中。众所周知, 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媒介和场所, 沉积物间隙水的理化环境对沉积物-上覆水的元素循环有重要影响^[11-13]。因此, 对沉积物间隙水中DOM的研究, 将不仅有助于探索有机物的迁移转化

收稿日期: 2020-11-06; 修订日期: 2021-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909056); 河北科技大学引进人才科研启动基金项目(1181278); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN2021064)

作者简介: 周石磊(1987~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为天然水体DOM的特征解析, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

规律;而且还对研究该环境中元素的地球化学循环提供必要支撑。

自雄安新区设立以来,白洋淀作为新区重要的生态屏障,其生态环境的好坏直接影响新区的建设。沉积物间隙水作为白洋淀沉积物和水体进行物质交换的重要场所,对白洋淀生态环境的演变具有重要作用。依据历史承载功能,白洋淀被划分为不同功能区(自然区、旅游区、生活区、养殖区以及入淀区),淀区环境的差异会造成元素地球化学循环演变的不同。目前,涉及白洋淀 DOM 的研究主要为本课题组关于冬季冰封期的 DOM 光谱特征以及与微生物演变的解析^[14];对于白洋淀非冰封期沉积物间隙水 DOM 的研究鲜有报道,尤其是针对不同典型淀区沉积物间隙水 DOM 的分布特征及光谱特征还缺乏研究。因此,本文利用紫外-可见光谱技术以及三维荧光光谱技术结合平行因子分析法,重点研究白洋淀在非冰封期各典型淀区中沉积物间隙水 DOM 的组成、光谱特征以及环境因子的相关性,以期为研究白洋淀 DOM 循环过程以及水体生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点及样品提取

白洋淀位于河北省保定市(北纬 $38^{\circ}44' \sim 38^{\circ}59'$;东经 $115^{\circ}45' \sim 116^{\circ}26'$),总面积 366 km^2 ,是华北平原最大的淡水湖泊。白洋淀属于大清河流域,年平均气温 $7.3 \sim 12.7^{\circ}\text{C}$ 、年平均降水量 $\sim 564 \text{ mm}$,冰封期为 12 月至来年 2 月,非冰封期为 3 ~ 11 月^[15]。本实验于 2019 年 4 月(春季)、7 月(夏季)以及 10 月(秋季),选取了白洋淀各典型淀区 25 个采样点采集表层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。采样点分布的具体位置见图 1。沉积物间隙水参照前期研究的方法^[16],具体如下:用彼得森采泥器采集表层沉积物,样品采集完成后迅速用封口袋密封,储于敷有冰袋的箱子保存;沉积物样品带回实验室后,使用冷冻离心机对沉积物样品进行离心(10 min ,转速 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$),离心后的水样即为沉积物间隙水。间隙水用 $0.45 \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜(预先于 450°C 灼烧 5 h)过滤后进行光谱测定,装入玻璃瓶内保存在 4°C 冰箱里。48 h 内完成相关水质指标(溶解性总磷、溶解性总氮、硝氮和氨氮)以及光谱的测定。

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

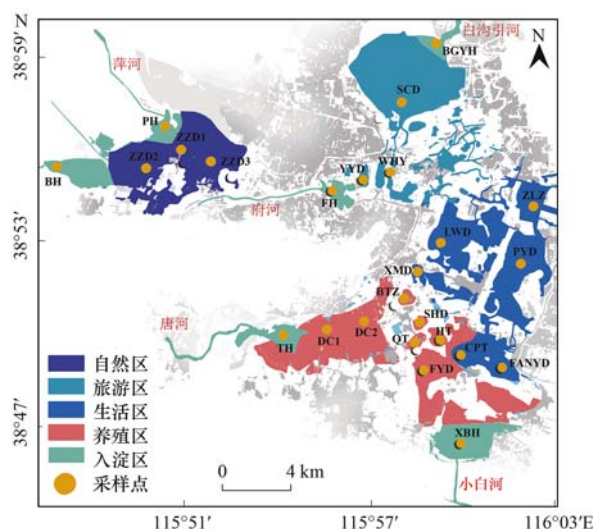


图 1 白洋淀沉积物间隙水采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of sediment interstitial water in Baiyangdian Lake

石英比色皿在 $200 \sim 700 \text{ nm}$ 范围内进行吸光度测定。本文采用如下公式计算吸收系数:

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

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

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

式中, λ 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 λ 处的吸收系数和经过散射校正后的波长为 λ 处的吸收系数,单位为 m^{-1} ; $D(\lambda)$ 为吸光度; r 为光程路径,单位为 m ; S 为指数函数曲线光谱斜率, μm^{-1} 。本研究选取 a_{254} 来表示 DOM 的相对浓度^[17]。与此同时,通过如下紫外光谱参数反映 DOM 的相关特征。具体如下:计算 S_R (为 $S_{275-295}/S_{350-400}$) 反映 DOM 的来源,其值越大自生源特征越强^[18]; $E2/E3$ 值与 DOM 分子量的大小成反比^[19]; $E3/E4$ 值与腐殖质的腐殖化程度和芳香性成反比^[19]。

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。设备的主要参数如下:激发波长范围为 $250 \sim 600 \text{ nm}$,步长间隔为 1 nm ;发射波长范围为 $200 \sim 450 \text{ nm}$,步长间隔为 5 nm ;扫描速度为 $2400 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。三维荧光光谱的荧光强度进行拉曼单位(R. U)的标准化处理,具体操作详见文献^[20]。采用 PARAFAC 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^[9,21]。三维荧光光谱的相关指数如下:荧光指数(FI)可表征 DOM 中腐殖质来源^[22];腐殖化指数(HIX)被用来表示 DOM 的腐殖化程度,HIX 值与 DOM 腐殖化程度成正比^[23];生物源指数(BIX)被用来估计内源物质对 DOM 的相对贡献^[24];新鲜度指数(β/α)反映 DOM

中新生 DOM 的所占比例,可评估水体生物活性^[17]. Fn280 和 Fn355 分别反映 DOM 中类蛋白和类腐殖质的相对丰度^[14].

1.4 数据分析

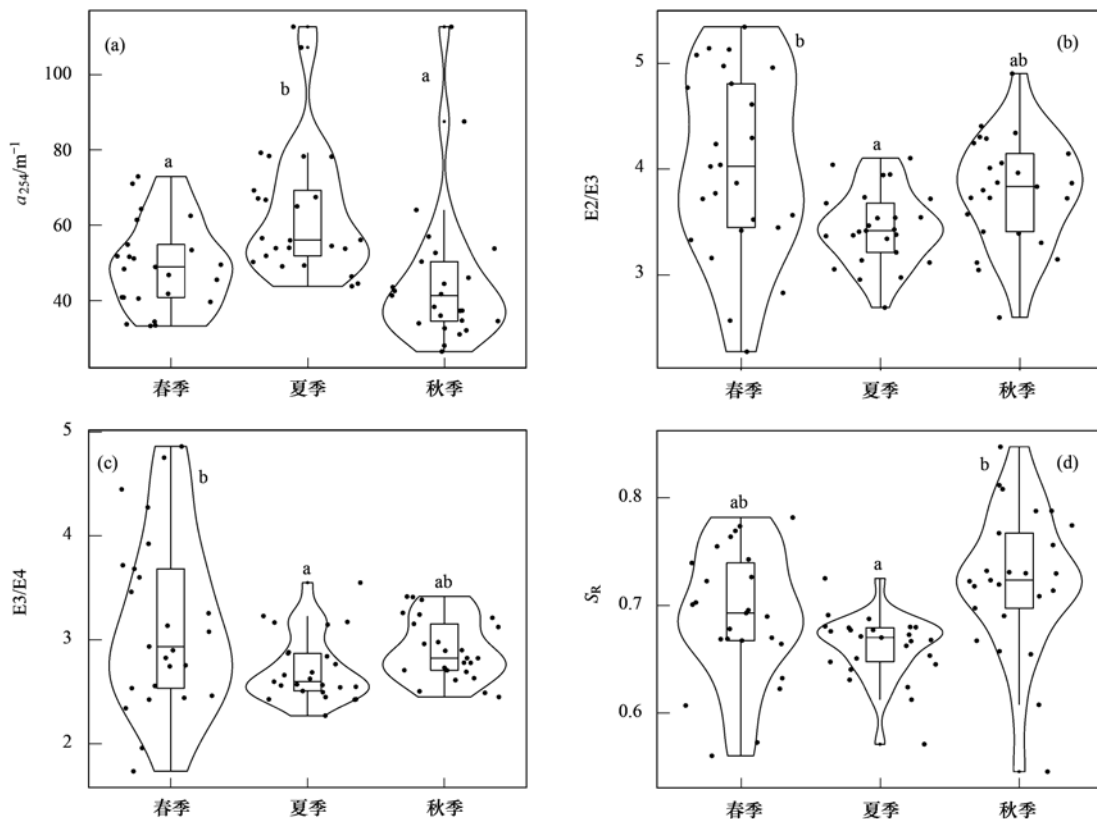
采用 Matlab R2014a 软件进行三维荧光光谱的平行因子分析. 采用 R 软件进行主成分分析 (PCA)、皮尔逊相关性分析以及单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 紫外-可见吸收光谱特征

白洋淀不同季节和不同区域的沉积物间隙水

DOM 在 254 处吸收系数如图 2 和图 3 所示,结果表明夏季沉积物间隙水 DOM 的相对浓度要显著高于春季和秋季,达到 $(63.60 \pm 17.77) \text{ m}^{-1}$ [图 2(a)]; 春季、夏季以及秋季的 a_{254} 都是呈现自然区最高、旅游区最低的分布特点 [图 3(a)], 自然区达到 $(60.23 \pm 4.83) \text{ m}^{-1}$ (春季)、 $(90.60 \pm 33.63) \text{ m}^{-1}$ (夏季) 和 $(62.55 \pm 25.80) \text{ m}^{-1}$ (秋季); 旅游区为 $(37.85 \pm 7.76) \text{ m}^{-1}$ (春季)、 $(54.57 \pm 1.24) \text{ m}^{-1}$ (夏季) 和 $(33.71 \pm 8.85) \text{ m}^{-1}$ (秋季). 表明白洋淀 DOM 在季节上呈现夏季高和春秋低,在空间上为自然区高和旅游区低的分布特点.



黑色点为采样点,图形轮廓为样本分布情况,不同小写字母表示存在显著差异

图 2 白洋淀不同季节沉积物间隙水 DOM 的 a_{254} 、 $E2/E3$ 、 $E3/E4$ 和 S_R

Fig. 2 Seasonal changes in a_{254} , $E2/E3$, $E3/E4$, and S_R of DOM in sediment interstitial water of Baiyangdian Lake

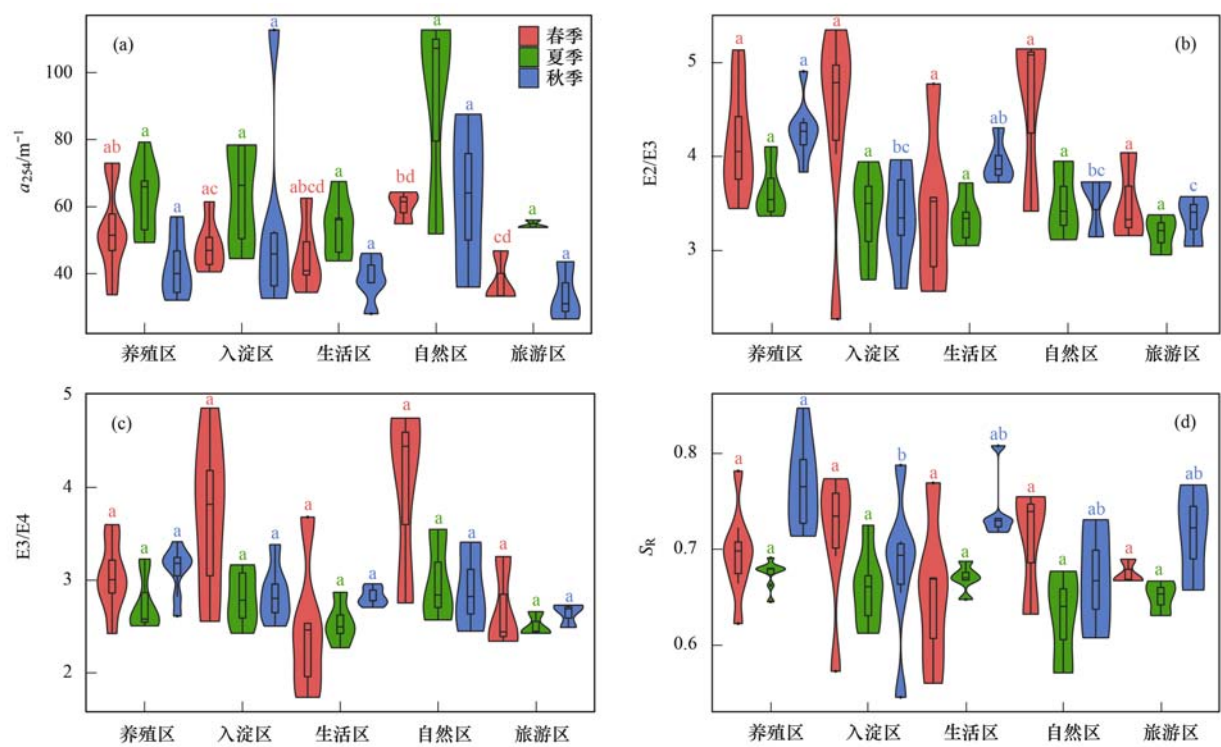
$E2/E3$ 值越高表明 DOM 分子量越小. 本研究中夏季间隙水的 $E2/E3$ 值为 (3.45 ± 0.35) , 小于春季 (4.04 ± 0.87) 和秋季 (3.79 ± 0.52) , 表明夏季 DOM 分子量要高于春季和秋季. 与此同时, 在空间分布上, 春季 $E2/E3$ 值分布如下: 自然区 > 入淀区 > 养殖区 > 旅游区 > 生活区; 夏季 $E2/E3$ 值分布如下: 养殖区 > 入淀区 > 自然区 > 生活区 > 旅游区; 秋季 $E2/E3$ 值分布如下: 养殖区 > 生活区 > 自然区 > 入淀区 > 旅游区. 本实验春季间隙水的 $E3/E4$ 值 [图 2(c)] 为 (3.15 ± 0.84) , 高于夏季 (2.72 ± 0.32) 和秋季 (2.91 ± 0.30) , 表明春季的间隙水 DOM 腐殖化程度和芳香性较弱. 与此同时, 在空间

分布上, 入淀区和自然区间隙水的 $E3/E4$ 值要高于其他功能区. 本研究中秋季间隙水的 S_R 值 [图 2(d)] 为 0.72 ± 0.07 , 高于春季 (0.69 ± 0.06) 和夏季 (0.66 ± 0.03) , 整体 $S_R < 1$ 表明间隙水 DOM 主要为外源输入特征. 与此同时, 在空间分布上 (图 3), 除了秋季养殖区与入淀区外, 其他季节各个功能区不存在空间差异 ($P > 0.05$).

2.2 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分特征分析

2.2.1 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分分析

在热分层形成过程中, 沉积物间隙水共有 5 个荧光组分 (表 1 和图 4), 其中包括 3 种类蛋白组分 ($C1$ 、 $C2$ 、 $C3$) 以及 2 种类腐殖质组分 ($C4$ 、



不同小写字母表示存在显著差异

图3 白洋淀不同区域沉积物间隙水 DOM 的 a_{254} 、E2/E3、E3/E4 和 S_R

Fig. 3 Spatial changes in a_{254} , E2/E3, E3/E4, and S_R of DOM in sediment interstitial water of Baiyangdian Lake

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280/325 nm (E_x/E_m)为类蛋白质;C2的荧光峰位置是240/350 nm (E_x/E_m),为类蛋白质(类酪氨酸/类色氨酸的T峰);荧光C3的荧光峰位置是275/300 nm (E_x/E_m),为类蛋白质(类酪氨酸/类色氨酸的B峰);C4的荧光峰位置是250/420 nm (E_x/E_m),为微生物类腐殖质;C5的荧光峰位置是265/540 nm (E_x/E_m)为类腐殖酸(生物降解的陆源腐殖类物质).

表1 沉积物间隙水 DOM 的5种荧光组分特征

Table 1 Characteristics of the five different components in sediment interstitial water				
组分	$E_x/E_m/nm$	物质	文献值/nm	
C1	280/325	类蛋白质	275/313 ^[25] ; 275/336 ^[26] ; 280/325 ^[27] ; 289/330 ^[28]	
C2	240/350	类蛋白质(类酪氨酸/类色氨酸的T峰)	240/355 ^[29] ; 235/350 ^[30] ; 230/350 ^[25]	
C3	275/300	类蛋白质(类酪氨酸/类色氨酸的B峰)	270/308 ^[27] ; 275/302 ^[31]	
C4	250/420	微生物类腐殖质	255/420 ^[32] ; 250/420 ^[33] ; 240/415 ^[34,35]	
C5	265/540	类腐殖酸(生物降解的陆源腐殖类物质)	275/530 ^[36] ; 265/525 ^[35]	

2.2.2 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分强度及分布特征

白洋淀不同季节沉积物间隙水 DOM 组分荧光强度(除 C4 和 C5 外)和相对丰度不存在显著的季节差异($P > 0.05$). 荧光组分 C1 的荧光强度为(0.63 ± 0.69)R.U(夏季)~(0.75 ± 0.86)R.U(春季),相对丰度为(21.72 ± 15.10)% (夏季)~(25.60 ± 18.01)% (秋季); 荧光组分 C2 的荧光强度为(0.56 ± 0.53) (秋季) R.U ~ (0.64 ± 0.70) R.U(春季),相对丰度为(19.98 ± 10.66)% (春季)~(22.29 ± 11.90)% (夏季); 荧光组分 C3 的荧光强度为(0.39 ± 0.31) (夏季) R.U ~ (0.49 ± 0.34)

R.U(春季),相对丰度为(18.06 ± 11.17)% (夏季)~(20.72 ± 10.13)% (春季); 荧光组分 C4 的荧光强度为(0.36 ± 0.14) R.U(秋季)~(0.48 ± 0.16) R.U(夏季),相对丰度为(17.82 ± 7.63)% (秋季)~(23.31 ± 10.71)% (夏季); 荧光组分 C5 的荧光强度为(0.31 ± 0.23) R.U(夏季)~(0.41 ± 0.27) R.U(春季),相对丰度为(14.63 ± 8.76)% (夏季)~(17.35 ± 8.31)% (春季); 类蛋白组分(C1 + C2 + C3)的荧光强度为(1.65 ± 1.32) R.U(夏季)~(1.89 ± 1.54) R.U(春季),相对丰度为(62.07 ± 16.50)% (夏季)~(66.07 ± 15.55)% (秋季); 类腐殖质组分(C4 + C5)的荧光强度为(0.72 ± 0.42)

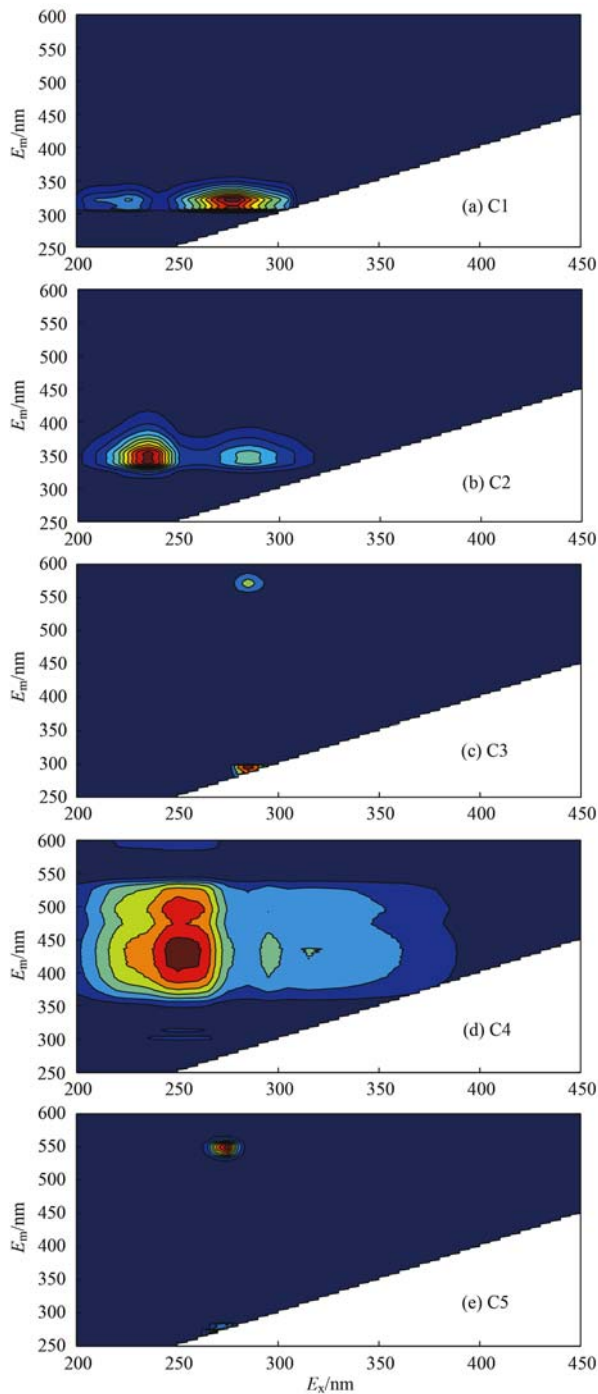


图4 采样点沉积物间隙水中 DOM 的三维荧光光谱

Fig. 4 Three-dimensional fluorescence spectra of sediment interstitial water at sampling sites

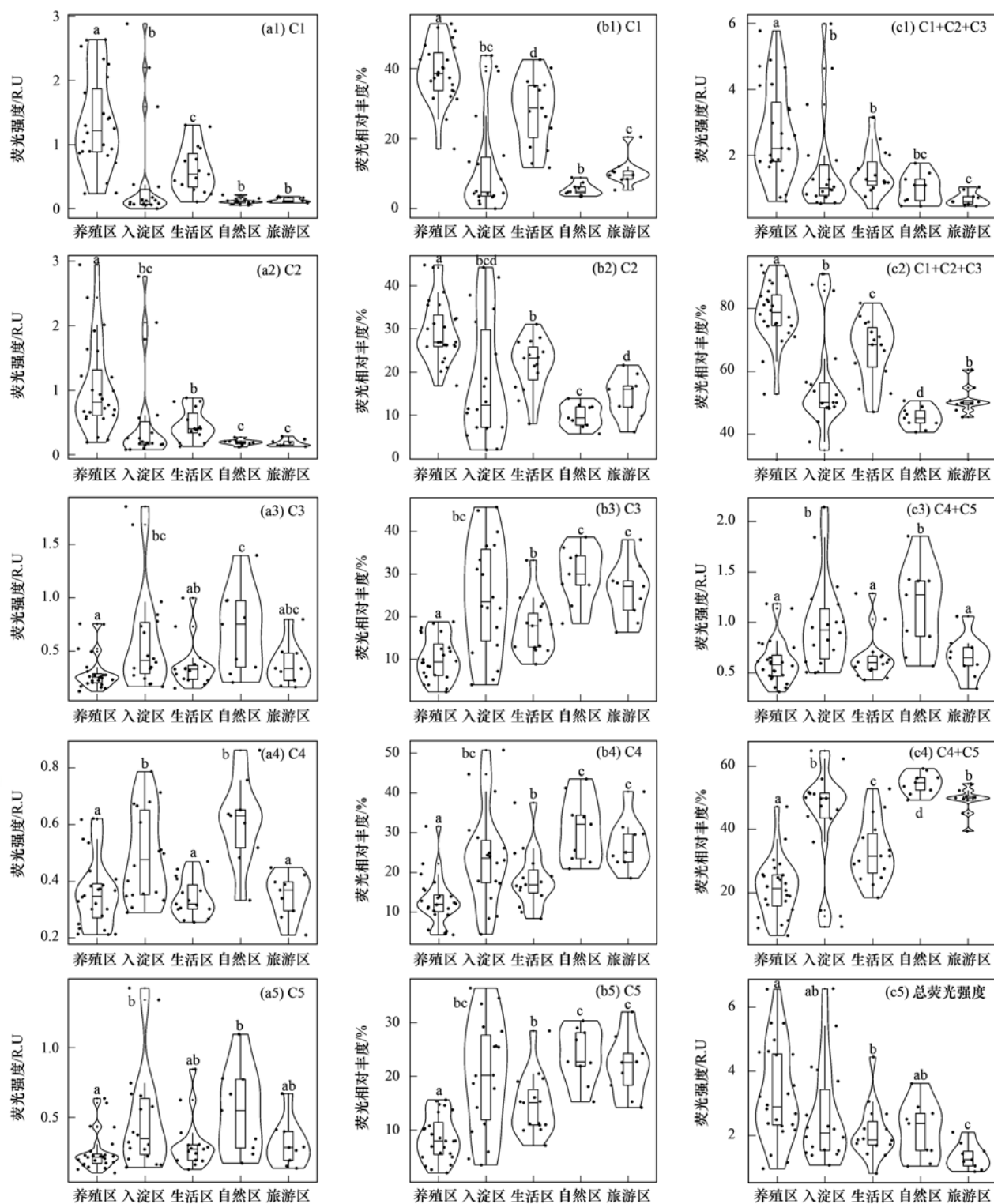
R. U (秋季) $\sim (0.82 \pm 0.34)$ R. U (春季), 相对丰度为 $(33.93 \pm 15.55)\%$ (秋季) $\sim (37.93 \pm 16.50)\%$ (夏季); 总荧光强度不存在显著的季节差异 ($P > 0.05$).

如图5可见, 白洋淀不同区域沉积物间隙水 DOM 组分荧光强度和相对丰度存在显著的季节差异 ($P < 0.05$). 荧光组分 C1 和 C2 的荧光强度和相对丰度分布如下: 养殖区 > 生活区 > 入淀区 > 旅游区 > 自然区. 养殖区和生活区的荧光强度 C1 和 C2

显著高于入淀区、旅游区和自然区 ($P < 0.05$). 养殖区和生活区的荧光组分 C1 的荧光强度为 (1.35 ± 0.73) R. U 和 (0.62 ± 0.37) R. U, 相对丰度为 $(38.97 \pm 8.49)\%$ 和 $(27.80 \pm 9.74)\%$; 养殖区和生活区的荧光组分 C2 的荧光强度为 (1.05 ± 0.71) R. U 和 (0.47 ± 0.25) R. U, 相对丰度为 $(29.42 \pm 7.10)\%$ 和 $(21.69 \pm 6.11)\%$. 荧光组分 C3 的荧光强度分布为: 自然区 > 入淀区 > 生活区 > 旅游区 > 养殖区, 相对丰度为: 自然区 > 旅游区 > 入淀区 > 生活区 > 养殖区. 入淀区和自然区中荧光组分 C4 的荧光强度不存在显著差异 ($P > 0.05$), 明显高于养殖区、生活区和旅游区; 养殖区荧光组分 C4 的相对丰度最低, 显著低于自然区和旅游区. 养殖区荧光组分 C5 的荧光强度和相对丰度最低, 达到 (0.25 ± 0.14) R. U 和 $(8.59 \pm 4.24)\%$; 自然区的荧光强度和相对丰度最高, 达到 (0.54 ± 0.31) R. U 和 $(23.83 \pm 5.11)\%$. 类蛋白组分 C1 + C2 + C3 的荧光强度分布为: 养殖区 > 入淀区 > 生活区 > 自然区 > 旅游区, 相对丰度为: 养殖区 > 生活区 > 入淀区 > 旅游区 > 自然区; 其中养殖区的荧光强度和相对丰度最高达到 (2.70 ± 1.41) R. U 和 $(78.65 \pm 9.32)\%$. 类腐殖质组分 C4 + C5 的荧光强度分布为: 自然区 > 入淀区 > 旅游区 > 生活区 > 养殖区, 相对丰度为: 自然区 > 旅游区 > 入淀区 > 生活区 > 养殖区; 其中自然区的荧光强度和相对丰度最高, 达到 (1.15 ± 0.43) R. U 和 $(54.69 \pm 3.36)\%$; 养殖区的荧光强度和相对丰度最低, 达到 (0.61 ± 0.22) R. U 和 $(21.35 \pm 9.32)\%$. 总荧光强度的分布如下: 养殖区 > 入淀区 > 自然区 > 生活区 > 旅游区, 其荧光强度为 (3.31 ± 1.48) 、 (2.62 ± 1.54) 、 (2.15 ± 0.88) 、 (2.11 ± 0.86) 和 (1.34 ± 0.40) R. U.

2.3 沉积物间隙水 DOM 的荧光特征参数分析

本研究显示各季节间和不同功能区间 FI 值不存在显著差异 [$P > 0.05$, 图6(a)], 春季、夏季和秋季的 FI 值为 2.03 ± 0.19 、 1.99 ± 0.14 和 1.97 ± 0.20 ; 养殖区、入淀区、生活区、自然区和旅游区的 FI 值为 1.98 ± 0.17 、 1.95 ± 0.18 、 2.03 ± 0.17 、 1.98 ± 0.10 和 2.10 ± 0.24 ; FI 值说明白洋淀间隙水 DOM 中腐殖质主要来源于自生源. 春季、夏季和秋季的 BIX 值为 1.27 ± 0.32 、 1.14 ± 0.24 和 1.23 ± 0.29 ; 养殖区的 BIX 值最高, 达到 1.42 ± 0.29 ; 自然区的 BIX 值最低, 为 0.96 ± 0.09 ; 不同功能区存在一定差异 [图6(b)]. 本研究中沉积物间隙水的 HIX 指数都小于 4 [图6(c)], DOM 腐殖化程度较弱, 说明间隙水中生物细菌活动较强. 白洋淀间隙水 HIX 值在不同季节间差异不显著, 不同区域



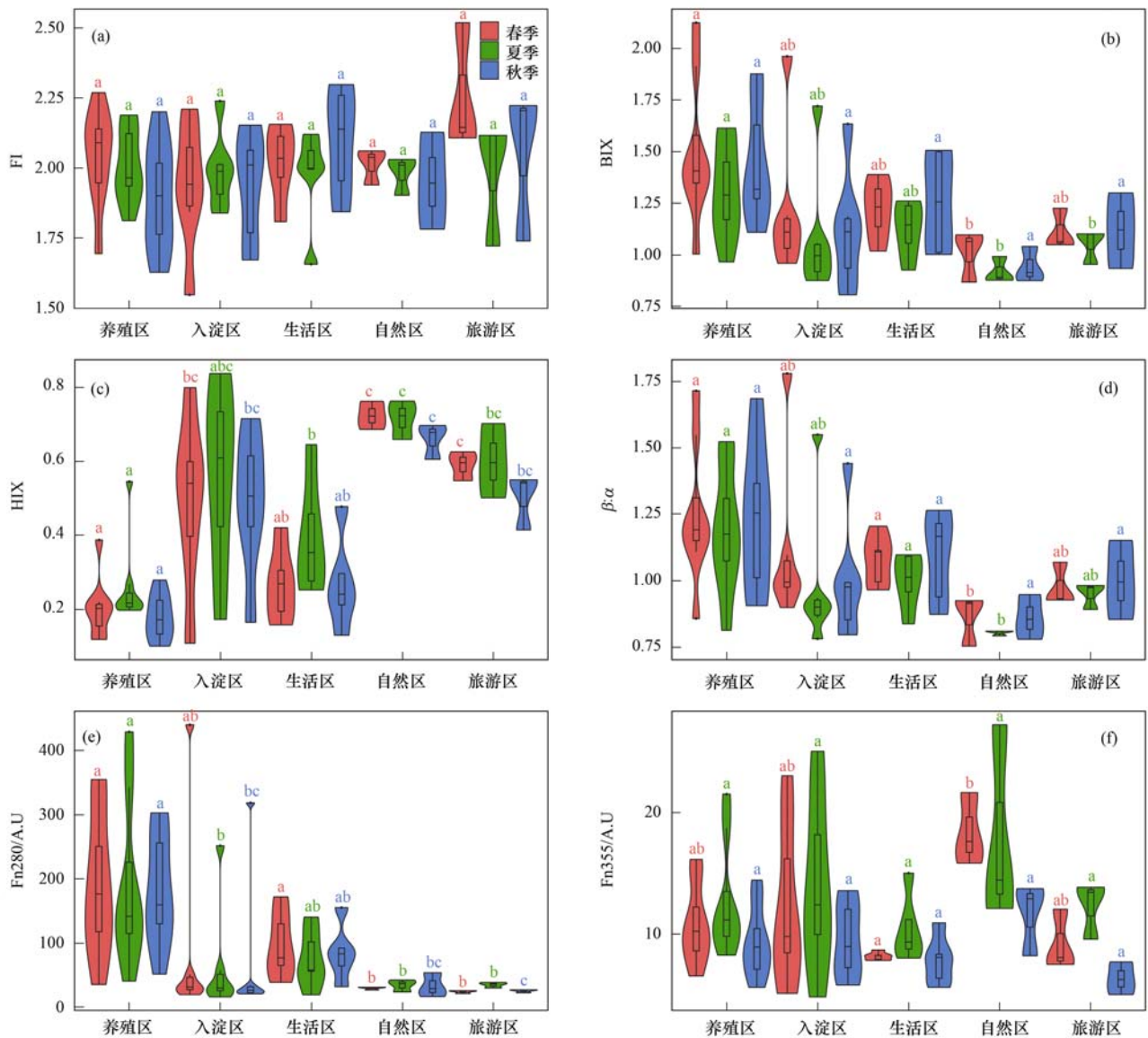
不同小写字母表示存在显著差异

图5 白洋淀不同区域间隙水 DOM 组分荧光强度和相对丰度

Fig. 5 Spatial changes in fluorescence intensity and percentages in sediment interstitial water of Baiyangdian Lake

间存在一定差异;空间上的分布为:自然区 > 旅游区 > 入淀区 > 生活区 > 养殖区。新鲜度指数($\beta:\alpha$)分布特征与 BIX 指数类似,季节间差异不显著、空间上存在一定差异。 $\beta:\alpha$ 指数具体分布为:养殖区 (1.23 ± 0.25) > 生活区 (1.06 ± 0.13) > 入淀区 (1.04 ± 0.27) > 旅游区 (0.98 ± 0.09) > 自然区

(0.84 ± 0.07) [图 6(d)]. Fn280 指数在空间分布上存在显著差异 ($P < 0.05$),养殖区、入淀区以及生活区明显高于自然区和旅游区 [图 6(e)]; Fn355 指数在空间分布上存在显著差异 ($P < 0.05$),自然区的 Fn355 指数最高,达到 (15.98 ± 5.62) A. U;生活区的 Fn355 指数最低,为 ($8.85 \pm$



不同小写字母表示存在显著差异

图6 白洋淀不同区域间隙水中 FI、HIX、BIX、 $\beta:\alpha$ 、Fn280 和 Fn355 的变化情况

Fig. 6 Spatial changes in FI, HIX, BIX, $\beta:\alpha$, Fn280, and Fn355 in sediment interstitial water of Baiyangdian Lake

2.22) A. U [图 6(f)].

2.4 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分与特征指数的相关分析

DOM 中各组分荧光强度皮尔逊相关性分析结果如图 7 所示. 在春季 [图 7(a)], 类蛋白组分 C1 与类蛋白组分 C2 具有显著的相关性, 相关系数达到 0.97 ($P < 0.001$); 类蛋白质 (C3) 与类腐殖质 (C5) 具有显著的相关性, 相关系数达到 1.00 ($P < 0.001$); 组分 C1 和 C2 与类蛋白质 C1 + C2 + C3 存在显著相关; 组分 C3、C4 和 C5 与类腐殖质物质 C4 + C5 存在显著相关. C1 和 C2 与 $\beta:\alpha$ 指数和 Fn280 指数显著正相关 ($P < 0.001$), 与 HIX 指数显著负相关 ($P < 0.001$). 在夏季 [图 7(b)], 类蛋白组分 C1 与类蛋白组分 C2 具有显著的相关性, 相关系数达到 0.97 ($P < 0.001$); 类蛋白质 (C3) 与类腐

殖质 C4 和 C5 具有显著的相关性; 组分 C1 和 C2 与类蛋白质 (C1 + C2 + C3)、BIX 指数、 $\beta:\alpha$ 指数和 Fn280 指数显著正相关 ($P < 0.001$), 与 HIX 指数显著负相关 ($P < 0.001$). 组分 C3、C4 和 C5 与类腐殖质物质 (C4 + C5) 和 HIX 指数和 Fn355 指数存在显著正相关, 与 BIX 指数存在显著负相关. 从整体上看 [图 7(d)], 组分 C1 与组分 C2 具有显著的相关性, 相

关系数达到 0.95 ($P < 0.001$)；C3 与 C4 和 C5 具有显著的相关性；C4 与 C5 具有显著的相关性；组分 C1 和 C2 与类蛋白质 (C1 + C2 + C3)、BIX 指数、 β : α 指数和 Fn280 指数显著正相关 ($P <$

0.001)，与 C3、(C4 + C5)、HIX 指数显著负相关 ($P < 0.001$)。组分 C3、C4 和 C5 与类腐殖质物质 (C4 + C5) 和 HIX 指数存在显著正相关，与 β : α 指数和 BIX 指数存在显著负相关。

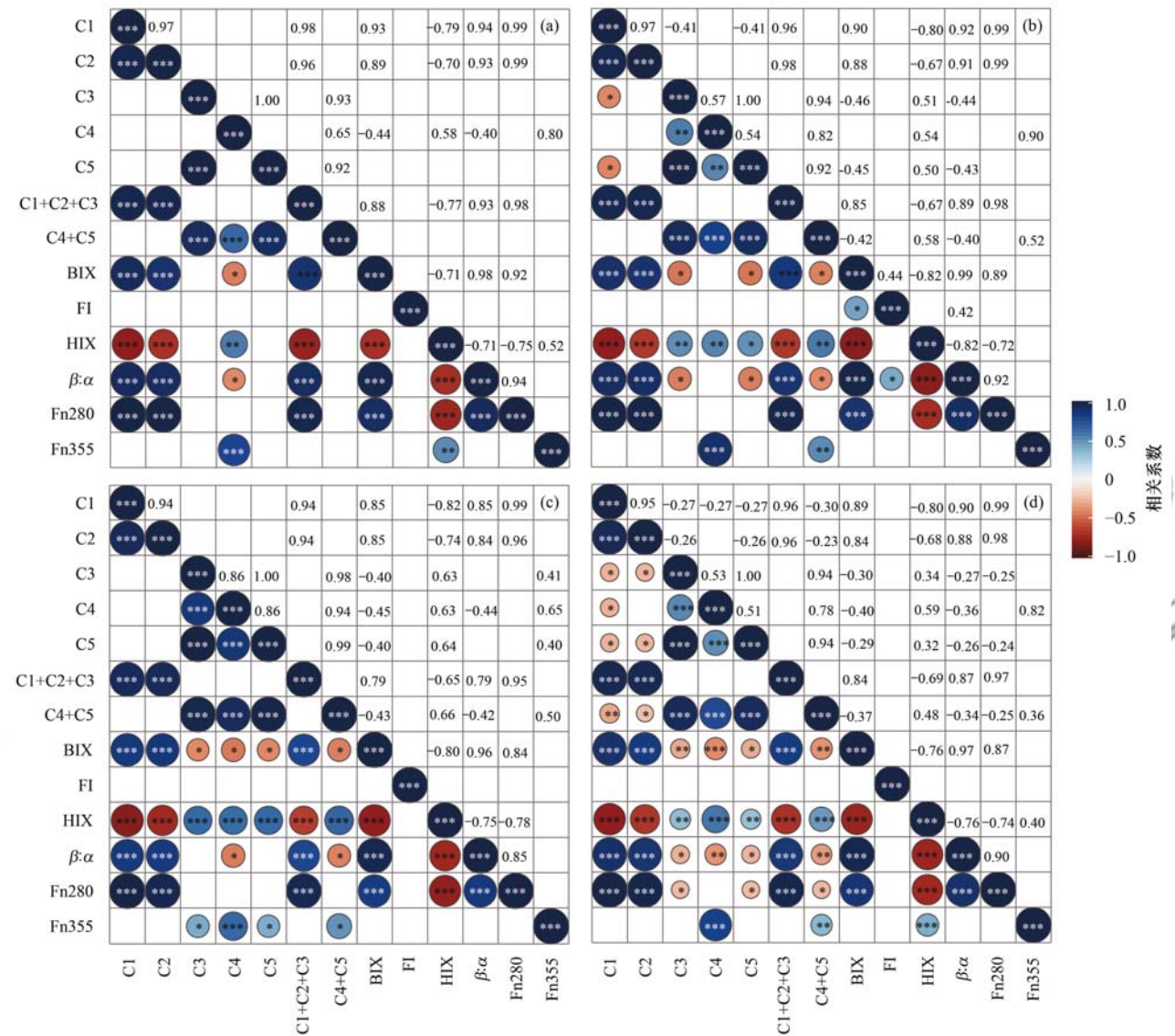


图7 白洋淀间隙水 DOM 组分及光谱特征指数的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis among the fluorescent components and fluorescent indices of DOM in the sediment interstitial water of Baiyangdian Lake

白洋淀沉积物间隙水 DOM 的荧光组分和光谱特征与环境因子的相关性如图 8 所示,类蛋白质和类腐殖质物质较好地分散为两类,详细结果如下. 在春季[图 8(a)],类腐殖质物质 (C4 + C5) 与氨氮呈现显著正相关;类腐殖质组分 C4 与环境因子溶解性总氮和氨氮呈现显著正相关 ($P < 0.001$); Fn355 指数与溶解性总氮、氨氮、溶解性总磷和硝氮呈现显著正相关. 在夏季[图 8(b)],类腐殖质组分 C4、类腐殖质物质 (C4 + C5) 以及 Fn355 指数与溶解性总氮、氨氮、溶解性总磷和硝氮呈现显著正相关;组分 C3 和 C5 与硝氮呈现显著正相关 ($P <$

0.01). 在秋季[图 8(c)],类蛋白组分 C3、类腐殖质组分 C4、C5、类腐殖质物质 (C4 + C5)、HIX 指数以及 Fn355 指数与溶解性总氮、氨氮、溶解性总磷和硝氮呈现显著正相关. 在整体上[图 8(d)],类蛋白组分 C3、类腐殖质组分 C4、C5、类腐殖质物质 (C4 + C5)、HIX 指数以及 Fn355 指数与溶解性总氮、氨氮、溶解性总磷和硝氮呈现显著正相关; BIX 指数和氨氮呈现显著负相关 ($P < 0.05$).

2.5 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分及特征指数与水质参数的相关分析

为了研究白洋淀在季节演变过程中沉积物间隙

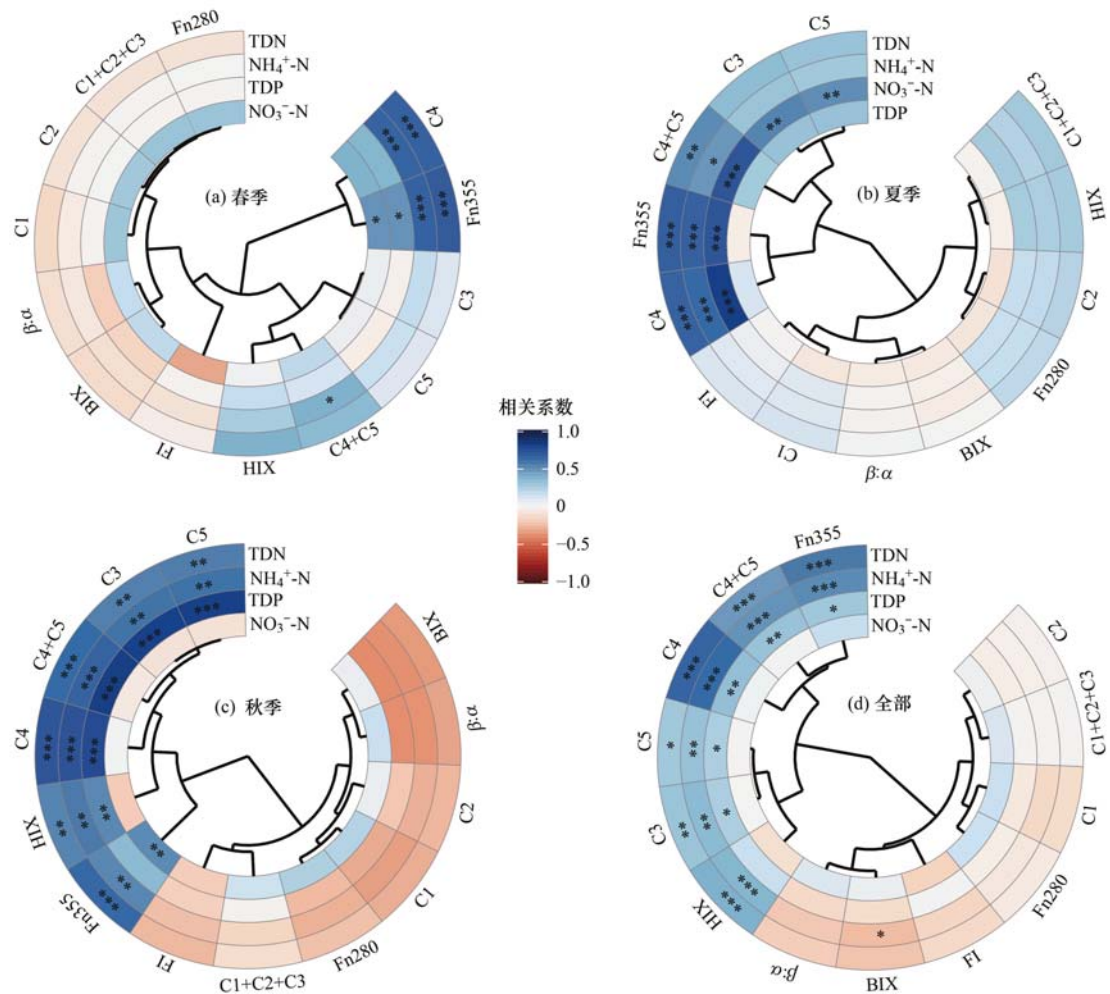


图8 白洋淀间隙水 DOM 组分和光谱特征指数与环境因子的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between the fluorescent components, fluorescent indices, and environment factors of DOM in the sediment interstitial water of Baiyangdian Lake

水的 DOM 荧光组分的时空分布特征,本研究基于 5 个功能区 25 个采样点的间隙水荧光组分和光谱特征进行了主成分分析(PCA).如图 9 所示,春季 PC1 和 PC2 分别解释了总体的 59.99% 和 19.94% [图 9(a)];夏季 PC1 和 PC2 分别解释了总体的 64.73% 和 17.86% [图 9(b)];秋季 PC1 和 PC2 分别解释了总体的 65.96% 和 18.99% [图 9(c)];全部数据的 PC1 和 PC2 分别解释了总体的 61.73% 和 17.06% [图 9(d)];结果显示主要由于 PC1 的作用使样本点分散,组分 C3、C4 和 C5 分布相对集中,组分 C1 和 C2 分布相对集中,与前文相关性分析的结果相一致;组分 C3、C4、C5、HIX 指数以及 Fn355 指数与组分 C1、C2、BIX 指数、 $\beta:\alpha$ 指数和 Fn280 指数分别分布在 PC1 的正半轴与负半轴.

通过对沉积物间隙水荧光组分与主成分的回归分析可得(表 2),在春季 PC1 与荧光组分 C1 呈现显著的正相关,与荧光组分 C3 和 C4 呈现显著的负相关;PC2 与荧光组分 C1 和 C5 呈现显著的正相关,与荧光组分 C4 呈现显著的负相关.在夏季 PC1 与

光组分 C4 和 C5 呈现显著的正相关,与荧光组分 C1 呈现显著负相关;PC2 与荧光组分 C2、C3 和 C4 呈现显著负相关.在秋季 PC1 与荧光组分 C4 和 C5 呈现显著的正相关,与荧光组分 C1 呈现显著负相关;PC2 与荧光组分 C2、C3 和 C4 呈现显著负相关.在全部数据 PC1 与荧光组分 C4 和 C5 呈现显著的正相关,与荧光组分 C1 呈现显著负相关;PC2 与荧光组分 C1、C2、C4 和 C5 呈现显著负相关.

与此同时,本研究还对荧光组分与环境因子进行了回归分析(表 3).结果显示:在春季 TDN 与组分 C4 显著正相关, NO_3^- -N 与组分 C4 和 C1 显著正相关, NH_4^+ -N 与组分 C4 显著正相关;在夏季 TDN 与组分 C2 和 C3 显著正相关、与 C5 显著负相关, NO_3^- -N 与组分 C4 显著正相关, NH_4^+ -N 与组分 C4 显著正相关;在秋季 TDN 与组分 C4 显著正相关, NO_3^- -N 与组分 C4 和 C1 显著正相关、与组分 C2 和 C3 显著负相关, NH_4^+ -N 与组分 C4 显著正相关, TDP 与组分 C5 显著正相关;在全部数据分析中 TDN 与组分 C4 显著正相关, NO_3^- -N 与组分 C4 和

呈现自然区高、旅游区低的特点($P > 0.05$). 本研究中夏季相对浓度较高,可能与该时期水体环境扰动(白洋淀水深较浅易受风浪影响)以及间隙水中微生物活性强度有关;自然区相对较高,可能与自然区中两条入淀河流的输入有关. 三维荧光光谱的平行因子分析结果显示,共得到 3 个类蛋白组分和两个类腐殖质组分. 各个荧光组分和总荧光强度季节差异不显著($P > 0.05$),空间差异显著($P < 0.05$). 类蛋白组分(C1 + C2 + C3)的荧光强度分布为:养殖区 > 入淀区 > 生活区 > 自然区 > 旅游区,相对丰度为:养殖区 > 生活区 > 入淀区 > 旅游区 > 自然区;类腐殖质组分 C4 + C5 的荧光强度分布为:自然区 > 入淀区 > 旅游区 > 生活区 > 养殖区,相对丰度为:自然区 > 旅游区 > 入淀区 > 生活区 > 养殖区. 养殖区的类蛋白物质占主体,自然区的类腐殖质物质占主体. 本研究的相关结论与各自功能区历史上承载的功能相匹配,养殖区由于历史上过量饵料的沉降会带来类蛋白物质的增多,自然区水生植被的死亡腐烂分解会增多腐殖质的含量. 与此同时,前人相关研究也支持了本研究的结论. 比如,朱爱菊等^[37]研究养虾塘水体 CDOM 发现主要成分为两种类蛋白组分,占比分别为 21.13% ~ 49.02% 和 30.18% ~ 40.05%;谢理等^[38]研究滇池挺水植物茭草和芦苇降解过程时发现类腐殖酸的荧光强度增强. 张文浩等^[39]研究太白山自然保护区水体 CDOM 发现自然水体 CDOM 组分以类腐殖质物质为主,占比达到 82% ~ 96%.

3.2 沉积物间隙水 DOM 的来源及特征解析

本研究中 DOM 的紫外-可见吸收光谱的 E2/E3 显示夏季的间隙水 DOM 分子量要高于春秋季,同时旅游区的相较于其他功能区 DOM 分子量要高一些. 另外,本研究中 E3/E4 值都小于 3.5,表明腐殖质以胡敏酸为主^[40]. 本研究中沉积物间隙水 DOM 的 FI 值均 > 1.8,表明 DOM 主要以自生源为主^[22],与张文浩等^[39]研究太白山自然保护区水体 CDOM 发现自然水体 CDOM 的结果相一致(FI 值介于 2.0 ~ 2.1). HIX 指数均 < 4,表明 DOM 主要以自生源为主^[23],与白洋淀水体更新缓慢和内源累积较多有关. BIX 指数绝大多数都 > 1.0,表明 DOM 主要以生物活动产生且具有很强的自生源特征^[24]. 另有研究表明,BIX 指数可以反映 DOM 中类蛋白物质含量,BIX 指数越大、类蛋白组分的贡献越大^[40],这一规律与本研究结果相一致. 本研究中 BIX 指数与 DOM 中类蛋白组分(C1 + C2 + C3)呈现显著正相关,其相关系数达到 0.79 ~ 0.88 ($P < 0.001$). β : α 指数分布显示养殖区新生的 DOM 占比要高于生活

区、入淀区、旅游区和自然区^[17],表明养殖区环境适宜、利于间隙水中生物的生长活动. 养殖区具有最高的 Fn280 指数和最低的 Fn355 指数,自然区呈现相反的分布特征,与这两个功能区的荧光组成相一致. 本研究发现 Fn280 指数与 DOM 中类蛋白组分(C1 + C2 + C3)呈现显著正相关,其相关系数达到 0.95 ~ 0.98 ($P < 0.001$); Fn355 指数与 DOM 中类蛋白组分(C4 + C5)呈现显著正相关,其相关系数达到 0.36 ~ 0.52 ($P < 0.05$).

3.3 沉积物间隙水 DOM 的环境指示分析

沉积物间隙水 DOM 在水体生态系统中扮演着促进营养物质,尤其是氮磷元素循环的驱动者的角色^[41]. 由于氮和磷是引发水体富营养化的主要因素,因此开展 DOM 与氮、磷相关水质的相关性分析和回归分析是非必要. 一方面,不仅可以探讨白洋淀沉积物间隙水环境中 DOM 与水质的关系;另一方面,还可以借助其相关性来指示环境中氮磷的变化,方便监测和生态环境的保护. 本研究中高 FI 指数和 BIX 指数以及低 HIX 指数显示,白洋淀沉积物间隙水的 DOM 呈现出弱腐殖化、强自生源、高生物活性的特征,但是不同功能区分布存在一定差异. 本研究中荧光组分和环境因子相关性分析以及回归分析表明了不同季节间环境因子与荧光组分的关系,借助回归方程可以为将来评估和预测沉积物间隙水的水质提供参考. 其中,夏季的硝氮($R^2 = 0.67$, $P < 0.001$)和溶解性总氮($R^2 = 0.50$, $P < 0.001$),秋季的氨氮($R^2 = 0.52$, $P < 0.001$)和溶解性总磷($R^2 = 0.66$, $P < 0.001$)的相关系数都大于 0.5,具有较强的环境指示意义,并且荧光组分 C4 发挥的贡献最大.

4 结论

(1) 白洋淀夏季沉积物间隙水 DOM 的相对浓度显著高于春秋季. 沉积物间隙水较高的各项荧光特征参数(FI、BIX、HIX 及 β : α) 显示出,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.

(2) 沉积物间隙水 DOM 存在 5 种荧光组分,分别为 3 种类蛋白组分,2 种类腐殖质组分;养殖区的类蛋白物质占主体,自然区的类腐殖质物质占主体;各荧光组分的强度和构成比例季节差异不显著($P > 0.05$),空间差异显著($P < 0.05$). 环境因子与荧光组分的回归分析可以为白洋淀间隙水的水质特征预测提供一定的支持.

参考文献:

- [1] Song F H, Wu F C, Feng W Y, et al. Depth-dependent

- variations of dissolved organic matter composition and humification in a plateau lake using fluorescence spectroscopy [J]. *Chemosphere*, 2019, **225**: 507-516.
- [2] Shang Y X, Song K S, Jacinthe P A, *et al.* Characterization of CDOM in reservoirs and its linkage to trophic status assessment across China using spectroscopic analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **576**: 1-11.
- [3] Zhang Y P, Zhang B, He Y L, *et al.* DOM as an indicator of occurrence and risks of antibiotics in a city-river-reservoir system with multiple pollution sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **686**: 276-289.
- [4] Song F H, Wu F C, Xing B S, *et al.* Protonation-dependent heterogeneity in fluorescent binding sites in sub-fractions of fulvic acid using principle component analysis and two-dimensional correlation spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1279-1287.
- [5] Song K S, Shang Y X, Wen Z D, *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis[J]. *Water Research*, 2019, **150**: 403-417.
- [6] Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Pollutant removal performance and microbial enhancement mechanism by water-lifting and aeration technology in a drinking water reservoir ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135848.
- [7] Zhang L, Fang W K, Li X C, *et al.* Strong linkages between dissolved organic matter and the aquatic bacterial community in an urban river[J]. *Water Research*, 2020, **184**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116089.
- [8] Liu D, Du Y X, Yu S J, *et al.* Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River[J]. *Water Research*, 2020, **168**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115132.
- [9] 周石磊, 孙悦, 苑世超, 等. 岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2635-2645.
- Zhou S L, Sun Y, Yuan S C, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of chromophoric dissolved organic matter in sediment interstitial water from Gangnan Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2635-2645.
- [10] Tang X Y, Cui Z G, Bai Y, *et al.* Indirect photodegradation of sulfathiazole and sulfamerazine: Influence of the CDOM components and seawater factors (salinity, pH, nitrate and bicarbonate) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **750**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141762.
- [11] Xu J, Zhang Y, Zhou C B, *et al.* Distribution, sources and composition of antibiotics in sediment, overlying water and pore water from Taihu Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **497-498**: 267-273.
- [12] Stopelli E, Duyen V T, Mai T T, *et al.* Spatial and temporal evolution of groundwater arsenic contamination in the Red River delta, Vietnam; Interplay of mobilisation and retardation processes[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137143.
- [13] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 山东省周村水库季节演替中沉积物上覆水溶解性有机物的紫外—可见与三维荧光光谱特征[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(5): 1344-1356.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Seasonal variations of ultraviolet-visible and excitation emission matrix spectroscopy characteristics of overlying water dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir, Shandong Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(5): 1344-1356.
- [14] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 213-223.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spatial distribution, spectral characteristics, and sources analysis of dissolved organic matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District during the winter freezing period [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 213-223.
- [15] Yang Y F, Yi Y J, Wang W J, *et al.* Generalized additive models for biomass simulation of submerged macrophytes in a shallow lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135108.
- [16] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 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[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5451-5463.
- Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* 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[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5451-5463.
- [17] Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Microbial aerobic denitrification dominates nitrogen losses from reservoir ecosystem in the spring of Zhoucun reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 998-1010.
- [18] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [19] Li P H, Hur J. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: a review [J]. *Critical Reviews In Environmental Science and Technology*, 2017, **47**(3): 131-154.
- [20] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940.
- [21] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于 UV-vis 和 EEMs 解析白洋淀冬季冰封期间隙水 DOM 的光谱特征及来源[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 604-614.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spectral characteristics and sources of DOM in sediment interstitial water from Baiyangdian Lake in Xiong'an new area during the winter freezing period based on UV-Vis and EEMs[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 604-614.
- [22] 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.
- [23] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.
- [24] 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.
- [25] Zhao C, Wang Z H, Wang C Y, *et al.* Photocatalytic degradation of DOM in urban stormwater runoff with TiO₂ nanoparticles under UV light irradiation: EEM-PARAFAC analysis and influence of co-existing inorganic ions[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 177-188.
- [26] Yamin G, Borisover M, Cohen E, *et al.* Accumulation of humic-

- like and proteinaceous dissolved organic matter in zero-discharge aquaculture systems as revealed by fluorescence EEM spectroscopy[J]. *Water Research*, 2017, **108**: 412-421.
- [27] Li J C, Wang L Y, Geng J J, *et al.* Distribution and removal of fluorescent dissolved organic matter in 15 municipal wastewater treatment plants in China[J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126375.
- [28] Ly Q V, Kim H C, Hur J. Tracking fluorescent dissolved organic matter in hybrid ultrafiltration systems with TiO₂/UV oxidation via EEM-PARAFAC[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, **549**: 275-282.
- [29] 李淑娟, 葛利云, 邓欢欢. 复合垂直流人工湿地净化过程中 DOM 的三维荧光光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(4): 946-950.
- Li S J, Ge L Y, Deng H H. Excitation-emission matrix fluorescence spectra characteristics of dom in integrated vertical flow constructed wetland for treating eutrophic water [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(4): 946-950.
- [30] Cheng C, Wu J, You L D, *et al.* Novel insights into variation of dissolved organic matter during textile wastewater treatment by fluorescence excitation emission matrix [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **335**: 13-21.
- [31] Murphy K R, Hambly A, Singh S, *et al.* Organic matter fluorescence in municipal water recycling schemes: toward a unified PARAFAC model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2909-2916.
- [32] An Y, Zhou Z, Qiao W M, *et al.* Simultaneous removal of phosphorus and dissolved organic matter from a sludge *in situ* reduction process effluent by coagulants [J]. *RSC advances*, 2017, **7**(67): 42305-42311.
- [33] Xu D L, Bai L M, Tang X B, *et al.* A comparison study of sand filtration and ultrafiltration in drinking water treatment: Removal of organic foulants and disinfection by-product formation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 322-331.
- [34] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [35] 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.
- [36] Dos Santos J V, Fregolente L G, Moreira A B, *et al.* Humic-like acids from hydrochars; study of the metal complexation properties compared with humic acids from anthropogenic soils using PARAFAC and time-resolved fluorescence [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **722**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137815.
- [37] 朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 等. 亚热带河口陆基养虾塘水体 CDOM 三维荧光光谱平行因子分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 164-171.
- Zhu A J, Sun D Y, Tan J, *et al.* Parallel factor analysis of fluorescence excitation emission matrix spectroscopy of cdom from the mid-culture period of shrimp ponds in a subtropical estuary [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 164-171.
- [38] 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 等. 滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3458-3466.
- Xie L, Yang H, Qu X X, *et al.* Dissolved organic matter release of zizania caduciflora and phragmites australis from lake dianchi [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3458-3466.
- [39] 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 等. 太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4958-4969.
- Zhang W H, Zhao D L, Wang X Y, *et al.* Absorption and three dimensional fluorescence spectra of CDOM in the water of the Taibaishan Nature Reserve[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4958-4969.
- [40] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- Chen Z Y, Li S Y. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the three gorges reservoir area under the background of urbanization [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- [41] Chen M L, Hur J. Pre-treatments, characteristics, and biogeochemical dynamics of dissolved organic matter in sediments; a review[J]. *Water Research*, 2015, **79**: 10-25.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)