

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)

2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析 郑庆锋, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)

夏季大气PM_{2.5}中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例 刘威杰, 石明明, 程敏, 黎荧, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)

呼包鄂地区冬季、夏季PM_{2.5}污染特征 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)

2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析 周静博, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)

基于模型模拟的成都市PM_{2.5}污染来源解析 许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)

北京市PM_{2.5}中砷污染特征 石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段菁春, 谭吉华, 陈荣志 (57)

夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析 易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)

安阳市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节特征及来源解析 孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)

新乡市夏冬季节PM_{2.5}稳定碳同位素特征分析 闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)

基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估 梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)

京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)

安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)

长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响 王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)

华东典型城市非道路移动机械排气烟度 鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昫, 黄成 (133)

国内外储油库VOCs排放现状与标准分析 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)

四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响 庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)

巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例 田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)

典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)

长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估 李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)

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 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)

白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)

松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评估 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)

鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)

臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响 刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)

镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制 吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)

一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制 廖丹雪, 单慧娟, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)

酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)

脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)

宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因 陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)

淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)

基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控 陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)

基于间歇饥饿的SNAD工艺运行 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)

反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)

硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现 刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)

高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)

中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评估 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)

北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)

长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)

宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响 王晶, 马丽娟, 刘泽华, 闵伟, 侯振安 (420)

基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)

塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征 陈云飞, 周金龙, 曹妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)

广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)

不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响 栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)

《环境科学》征订启事(89) 《环境科学》征稿简则(97) 信息(303, 329, 344)

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

周石磊¹, 孙悦¹, 张艺冉¹, 蒋永丰¹, 尹璐¹, 黄廷林², 李再兴¹, 罗晓¹, 战江¹, 王函¹

(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(UV-vis),对雄安新区-白洋淀冬季冰封期不同特征区域水体溶解性有机物(DOM)的空间分布、光谱特征以及来源进行解析. 结果表明,冬季冰封期白洋淀水体 DOM 吸收系数无特征峰,不同特征区域的差异显著;表层水体 DOM 与底层水体 DOM 的吸收系数差异不明显;冰封期白洋淀水体的 E3/E4 均大于 3.5,说明 DOM 以低腐殖质成分为主,E2/E3 为 6.35 ± 0.72 ,表明 DOM 中小分子量的居多,而且 SR 为 1.33 ± 0.14 均大于 1,显示 DOM 主要为生物源;三维荧光通过 PARAFAC 解析出 3 种组分,分别为类酪氨酸(C1)、类色氨酸(C2)和陆源腐殖质(C3);对 3 个组分进行相关性分析,结果显示 C1 与 C2 之间具有显著的相关性($P < 0.001$);白洋淀各个特征区域间的 DOM 总荧光强度和各荧光组分荧光强度呈现显著的差异($P < 0.01$);DOM 的总荧光强度以及各组分的荧光强度均呈现出唐河入淀口高、烧车淀低的特征,C1 + C2 是 DOM 的主要成分;冰封期白洋淀水体的 DOM 生物源指数(BIX)为 1.23 ± 0.18 ,荧光指数 FI 为 2.30 ± 0.16 (> 1.8),表明白洋淀 DOM 来源于生物活动并且以自生源为主,与腐殖程度指标(HIX)的结果相吻合;PCA 结合 Adonis 分析显示,白洋淀不同区域水体 DOM 的光谱特征差异明显($P < 0.05$),表层与底层的 DOM 光谱特征相近($P > 0.05$);并且组分 C1、C2、C3 与 DOM 特征参数(HIX、BIX、Fn280、Fn355)以及水质参数(总氮、高锰酸盐指数、溶解性总磷)构建的多元线性回归方程显著相关性($P < 0.001$). 综上,通过对冬季冰封期白洋淀各个典型淀区水体 DOM 光谱特征进行研究,可以为分析白洋淀水体有机物污染特征和白洋淀的水质管理提供技术支持.

关键词: 溶解性有机质(DOM);雄安新区;白洋淀;紫外-可见光谱;三维荧光光谱(EEMs)

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0213-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906007

Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period

ZHOU Shi-lei¹, SUN Yue¹, ZHANG Yi-ran¹, JIANG Yong-feng¹, YIN Lu¹, HUANG Ting-lin², LI Zai-xing¹, LUO Xiao¹, ZHAN Jiang¹, WANG Han¹

(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 excitation emission matrix spectroscopy (EEMs) technology combined with parallel factor analysis (PARAFAC) and ultraviolet-visible (UV-vis) spectra, we analyze the spatial distribution, spectral characteristics, and sources of dissolved organic matter (DOM) in Baiyangdian Lake, China, during a winter freezing period. Results showed that the UV-vis absorption spectrum of DOM had no obvious characteristic peak, and that the variation coefficient of absorption exhibited a significant difference ($P < 0.05$) among different districts of Baiyangdian Lake, but that there was no significant difference between the surface and bottom waters. The changes of E3/E4, E2/E3, and S_R showed that DOM had low humic and autochthonous characteristics. Two protein-like substances (C1 and C2) and one humic-like substance (C3) were identified by PARAFAC, with a significant correlation ($P < 0.001$) being found between C1 and C3, and C2 and C3. The total DOM fluorescence intensity and the fluorescence intensity of each component exhibited significant differences ($P < 0.01$) in the distribution among the different districts of Baiyangdian Lake, with the maximum value being associated with a sample from the Tanghe River and the minimum value being associated with a sample from Shaochedian. Moreover, the sum of C1 + C2 accounted for the major proportion of DOM. DOM exhibited a strong autochthonous characteristic based on the values of BIX, FI, and HIX. Principle component analysis (PCA) and Adonis analysis showed that the spectral characteristics of DOM exhibited a significant difference ($P < 0.05$) among the different districts. C1, C2, and C3 were significantly correlated ($P < 0.001$) with DOM indices (HIX, BIX, Fn280, and Fn355) and water quality parameters [total nitrogen (TN), permanganate index, and total dissolved phosphorus (TDP)] based on multiple linear regression. Our results contribute to previous investigations and provide findings that can assist in the future management and control of organic carbon pollution sources to Baiyangdian Lake.

收稿日期: 2019-06-02; 修订日期: 2019-08-20

基金项目: 河北科技大学引进人才科研启动基金项目(1181278);国家自然科学基金青年基金项目(51909056)

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 的特征解析以及生物可利用性, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

表 1 白洋淀采样点信息描述

Table 1 Description of sampling sites in Baiyangdian Lake

区域	样点	地点
自然区(ZRQ)	S21	藻荇淀 3
	S22	藻荇淀 1
	S23	藻荇淀 2
养殖区(YZQ)	S8	后塘
	S9	前塘
	S10	泛鱼淀
	S16	鲢鳙淀
	S18	端村 2
	S19	端村 1
旅游区(LYQ)	S3	烧车淀
	S4	文化苑
	S5	鸳鸯岛
入淀河口(RDHK)	S2	白沟引河
	S6	府河
	S11	潞笼河
	S20	唐河
	S24	瀑河
生活区(SHQ)	S25	萍河
	S1	枣林庄
	S7	采蒲台
	S12	范峪淀
	S13	平阳淀
	S14	涝王淀
	S15	小麦淀
S17	北田庄西淀	

表 2 紫外-可见光谱和三维荧光光谱相关参数描述

Table 2 Description of ultraviolet-visible absorption spectrum parameters and fluorescence spectrum parameters

光谱参数	参数定义	参数相关描述
吸收系数 $a(\lambda)$	$a(\lambda) = 2.303 \cdot D(\lambda) / r$, $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径, 单位为 m	a_{254} 和 a_{355} 表征 DOM 浓度 ^[20, 21]
E2/E3	250 nm 和 365 nm 处的紫外吸光度之比	表征 DOM 相对分子质量大小 ^[22, 23]
E3/E4	300 nm 和 400 nm 处的紫外吸光度之比	E3/E4 < 3.5 时腐殖质腐殖化较高, E3/E4 > 3.5 时腐殖化较低 ^[24]
E4/E6	465 nm 和 665 nm 处的紫外吸光度之比	表征 DOM 腐殖化程度和芳香性 ^[25]
S_R	光谱斜率比, 为 $S_{275-295} / S_{350-400}$	反映出 DOM 的来源与分子量信息 ^[26]
FI	$E_x = 370$ nm 时, $E_m = 470$ nm 与 $E_m = 520$ nm 处的强度比值 (FI = F_{470} / F_{520})	作为物质的来源的指示指标 ^[27, 28]
HIX	$E_x = 254$ nm 时, 435 ~ 480 nm 间荧光峰值与 300 ~ 345 nm 间荧光峰值积分值之商	表示 DOM 腐殖化程度 ^[29]
BIX	激发波长为 310 nm 时, 荧光发射波长在 380 nm 和 430 nm 处荧光强度的比值	内源物质对 DOM 的相对贡献 ^[30]
$\beta:\alpha$	激发波长为 310 nm 时, 荧光发射波长在 380 nm 处荧光强度与荧光发射波长在 420 ~ 435 nm 区间最大荧光强度的比值	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 ^[31]
F _{n280}	$E_x = 280$ nm 时, E_m 在 340 ~ 360 nm 间最大荧光强度	代表类蛋白质相对浓度水平 ^[32]
F _{n355}	$E_x = 355$ nm 时, E_m 在 440 ~ 470 nm 间最大荧光强度	代表类腐殖物质的相对浓度水平 ^[32]

1.4 数据分析

应用 R 软件对白洋淀冬季冰封期水体 DOM 的组分进行相关性分析, 利用 Origin 软件绘制相关图形, 在 SPSS (22.0) 软件进行多元回归分析, 应用单因素方差分析来研究冬季水体样品 DOM 间的差异性, 利用 Adonis^[33] 分析表层与底层、不同区域的 DOM 差异性。

和废水监测分析方法进行测定^[14], 过滤的水样装入玻璃瓶内保存在 4℃ 冰箱里以备 DOM 的光谱分析。

1.2 紫外-可见吸收光谱及相关指数测定

紫外-可见光谱采用 DR6000 分光光度计进行测定, 以 Mill-Q 水为空白, 用 10 mm 石英比色皿在 200 ~ 700 nm 范围内进行吸光度测定^[15]。紫外可见吸收光谱的相关参数计算如表 2 所示。

1.3 三维荧光光谱及相关指数测定

三维荧光光谱采用 F97 荧光分光光度计进行测定。设置的激发波长 (E_x) 范围从 200 ~ 450 nm, 波长间隔为 5 nm; 发射波长 (E_m) 范围从 250 ~ 550 nm, 波长间隔为 1 nm, 扫描速度为 1 000 nm·min⁻¹。利用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^[16]。利用 MATLAB 2014a 软件, 采用 N-way 和 DOMFluor 工具箱, 对冬季白洋淀 25 个采样点的表层和底层水样进行平行因子分析^[17], 与此同时通过核一致性分析进一步确定荧光组分数, 利用折半分析来分析结果的可靠性^[18]。荧光强度值用 RU 单位表示, RU 的计算方法详见文献^[19]。三维荧光光谱的相关参数计算如表 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 紫外-可见吸收光谱曲线特征

如图 2 所示, 白洋淀冬季冰封期表层水体和底层水体 DOM 吸收光谱中并无明显特征峰, 总体上吸收系数随波长增长呈指数形式递减, 在波长达到 450 nm 后吸收几乎为 0。从紫外吸收系数来看, 白洋

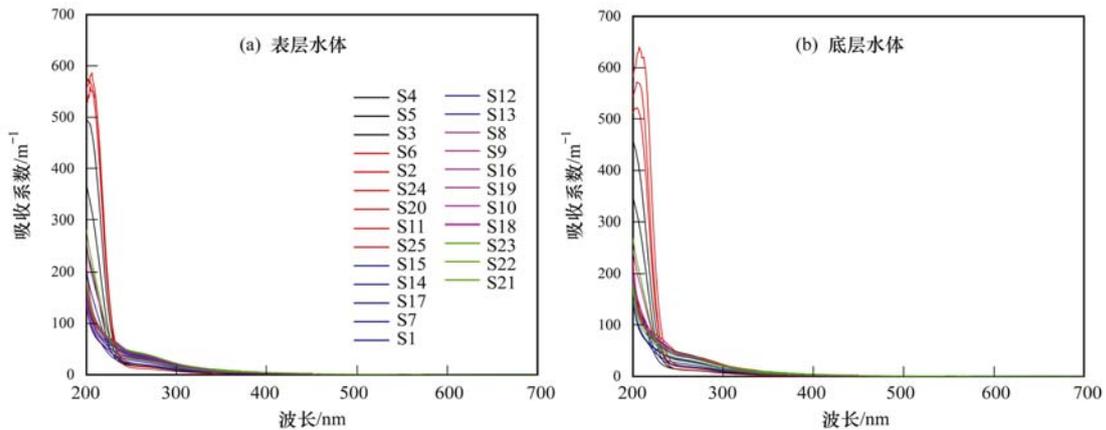


图2 白洋淀水体 DOM 的紫外-可见吸收光谱

Fig. 2 Ultraviolet-visible spectroscopy of DOM in water samples from Baiyangdian Lake

淀不同采样区域水体 DOM 的差异明显;入淀河口区(S2、S6、S11、S20、S24 和 S25)的紫外吸收系数最大,生活区(S1、S7、S12、S13、S14、S15 和 S17)以及养殖区(S8、S9、S10、S16、S18 和 S19)的紫外吸收系数最小;旅游区(S3、S4 和 S5)的样品点差异较大;同一个采样点表底的紫外吸收系数差异不大. 综上表明,冬季冰封期不同区域水体 DOM 性质上存在较大差异,但是同一采样点表层水体和底层水体的 DOM 性质差异不大.

2.2 紫外-可见吸收光谱特征参数分析

本研究用 a_{254} 和 a_{355} 表示 DOM 的相对浓度,图 3 表示冬季冰封期白洋淀不同特征区域 a_{254} 和 a_{355} 的变化情况. 从中可知,自然区水体的 a_{254} 和 a_{355} 明显高于其他特征区域;旅游区的 a_{254} 和 a_{355} 最小,并且与入淀河口区 ($P < 0.01$)、生活区 ($P < 0.01$)、养殖区 ($P < 0.001$) 以及自然区 ($P < 0.001$) 呈现显著差异;养殖区与生活区差异不显著 ($P > 0.05$),与这两个特征区域分布情况较一致;入淀河口区各个采样点的分布较分散,差异性较大. 与此同时,本研

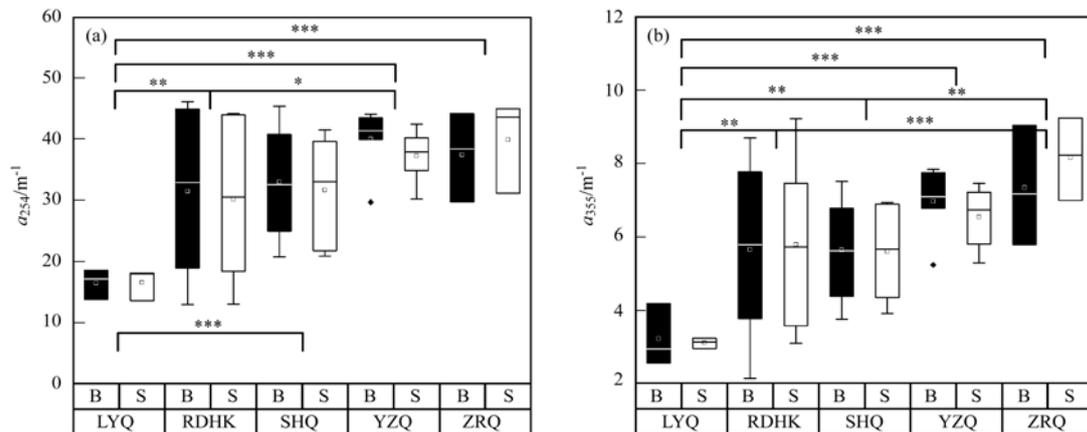
究中表层水体和底层水体的差异性不大,显示表底的 DOM 浓度较一致, a_{355} 的值与太湖梅梁湾^[34] 的数值相一致 (a_{355} 为 $2.57 \sim 6.77 \text{ m}^{-1}$).

为了进一步分析白洋淀冰封期水体 DOM 的特性,本研究分析了紫外-可见光谱中 E2/E3, E3/E4, E4/E6 以及 S_R 的变化情况(图 4),用来分析水体 DOM 腐殖质的腐殖化程度、芳香性、相对分子质量以及来源. 结果显示:养殖区(YZQ)的 E2/E3 最高,自然区(ZRQ)的 E2/E3 最小,即自然区 DOM 分子量最大,并且养殖区与旅游区(LYQ)、自然区的差异显著;本研究中大部分水样的 E3/E4 > 3.5 , 水体呈现低腐殖化为主的特征,并且养殖区与旅游区、自然区的差异显著;E4/E6 值与 DOM 腐殖化程度成反比,底层水体 DOM 的腐殖化程度要高于表层水体;本研究中该时期水体 $S_R > 1$, 其中旅游区的 S_R 值最高,表征 DOM 主要为生物源,白洋淀冰封时期水体 DOM 为生物源特征.

2.3 冰封期水体 DOM 荧光组分特征分析

2.3.1 DOM 的荧光组分解析

通过平行因子分析对冬季冰封期白洋淀水体

S 表示表层水体, B 表示底层水体; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$, 下同图3 白洋淀水体 DOM 的 a_{254} 和 a_{355} 变化情况Fig. 3 Changes of a_{254} and a_{355} of DOM in water samples from Baiyangdian Lake

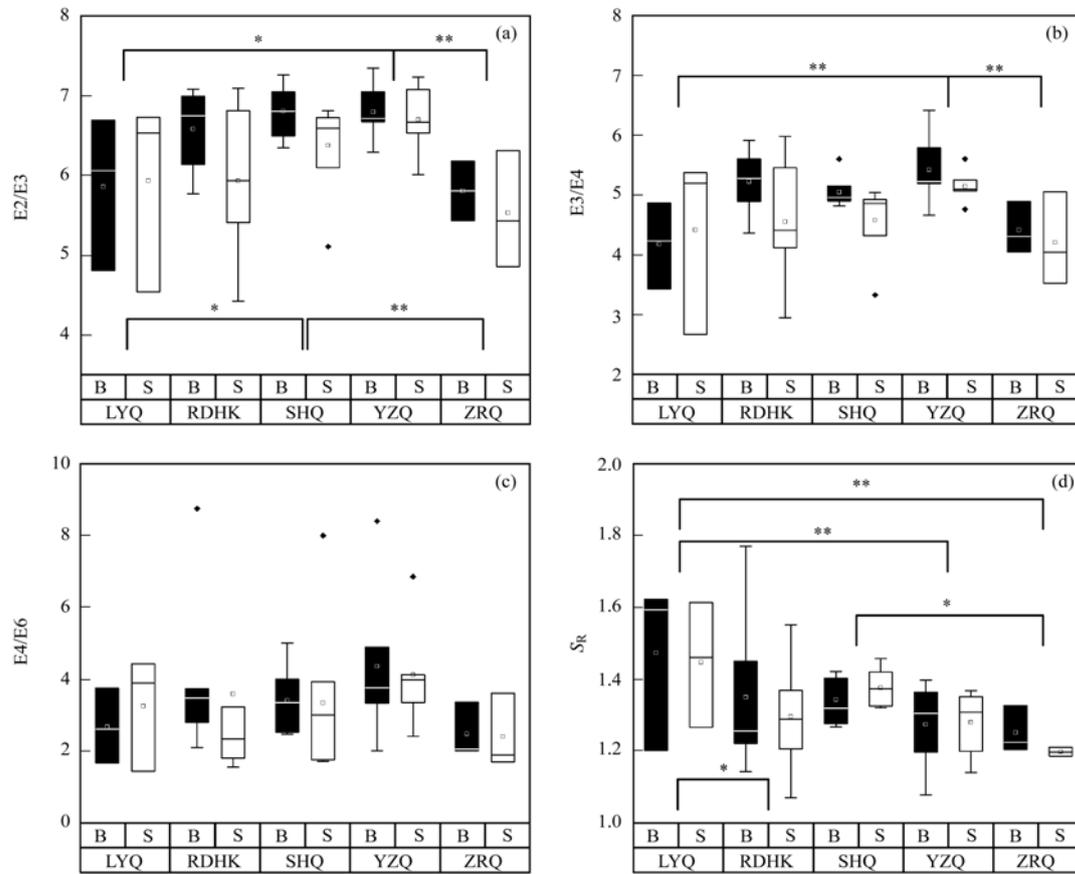


图4 白洋淀水体 DOM 的紫外-可见吸收光谱

Fig. 4 Ultraviolet-visible spectroscopy of DOM in water samples from Baiyangdian Lake

样品进行三维荧光解析,分析 DOM 的组分构成. 冰封期水体样品的各成分的荧光光谱如图 5 所示,共解析得到 3 种组分. 其中,组分 1 有 2 个激发峰为 230 nm 和 275 nm;组分 2 为 2 个激发峰为 235 nm 和 280 nm;组分 3 包含 1 个激发峰为 250 nm. 结合前人研究的成果(表 3),综合分析得到: C1 为类酪氨酸;C2 为类色氨酸;C3 为类陆源类腐殖质.

表 3 白洋淀水体样品 DOM 的荧光组分特征

Table 3 Characteristics of components of DOM in water samples from Baiyangdian Lake

组分	$E_x/E_m/\text{nm}$	物质	文献中的波长/nm
C1	275(230)/320	类酪氨酸	270 ~ 280/300 ~ 320 ^[35] , 227/329 ^[36]
C2	235(280)/350	类色氨酸	230/330 ^[37] , 280/350 ^[18]
C3	250/440	陆源类腐殖质	250/440 ^[18] , 250/461 ^[38]

2.3.2 DOM 的荧光组分强度及分布特征

图 6 展示的是冬季冰封期白洋淀各典型淀区采样点,表层水体与底层水体的三维荧光组分荧光强度以及相对丰度情况. 其中,图 6(a)和 6(c)为各特征区域表层和底层水体三维荧光组分荧光强度的变化情况;图 6(b)和 6(d)为各特征区域表层和底层水体三维荧光组分丰度占比情况.

结果显示:入淀河口区的唐河采样点、生活区的采蒲台采样点以及养殖区的端村采样点荧光强度较大;不同类型淀区采样点的各个荧光组分荧光强度差异明显,个别淀区内部差异显著;同一采样点的表层与底层水体各个荧光组分变化类似,差异性不大;类蛋白(C1 + C2)占比较大,表层 44.7% ~ 91.5%,底层 41.0% ~ 90.5%,呈现养殖区多,自然区少的特点;唐河、端村中(C1 + C2)占比最多,藻荇淀最少,与人类活动相一致;各特征区域表层和底层水体三维荧光组分丰度占比情况相似,底层各荧光组分荧光强度要高于表层水体,不同淀区采样点的差异显著.

2.4 DOM 的荧光特征参数分析

为了进一步分析冬季冰封期白洋淀各典型区域水体样品 DOM 的光谱特征,本文对 DOM 的荧光特征参数进行了分析,具体情况如图 7 所示.

Huguet 等^[30]和肖隆庚等^[39]指出 BIX 大于 1.0 时,为生物活动产生. 从图 7(a)可知,冬季冰封期各个采样点的 BIX 都大于 1,呈现出自生源特征,特别是入淀河口区的唐河采样点的水体样品中 BIX 达到 1.75(表层水体)和 1.76(底层水体)(生物活动特征明显). Lavone 等^[28]以及 McKnight 等^[40]提出

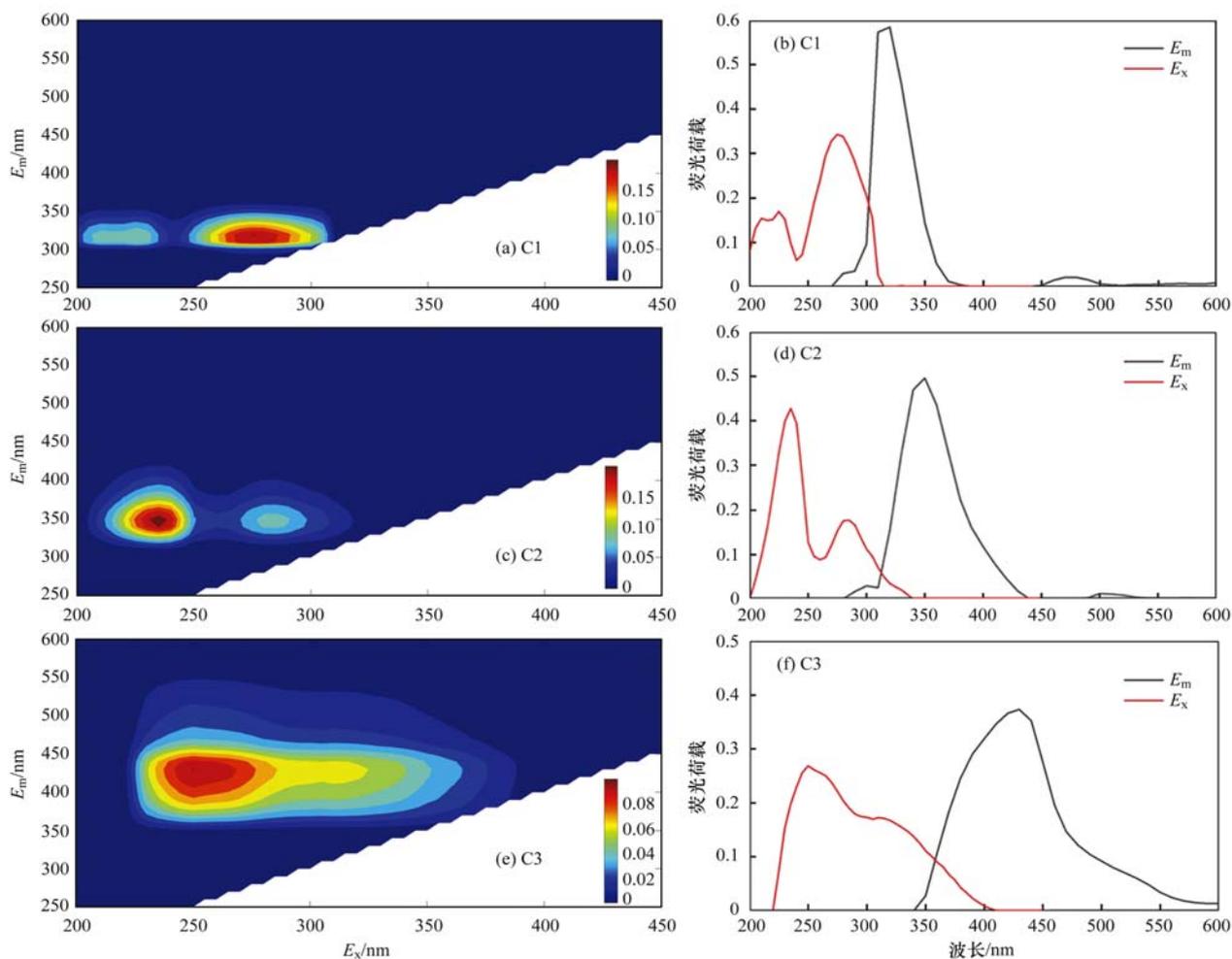


图 5 PARAFAC 解析出的 DOM 中 3 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 5 Fluorescence spectra of three components identified by PARAFAC

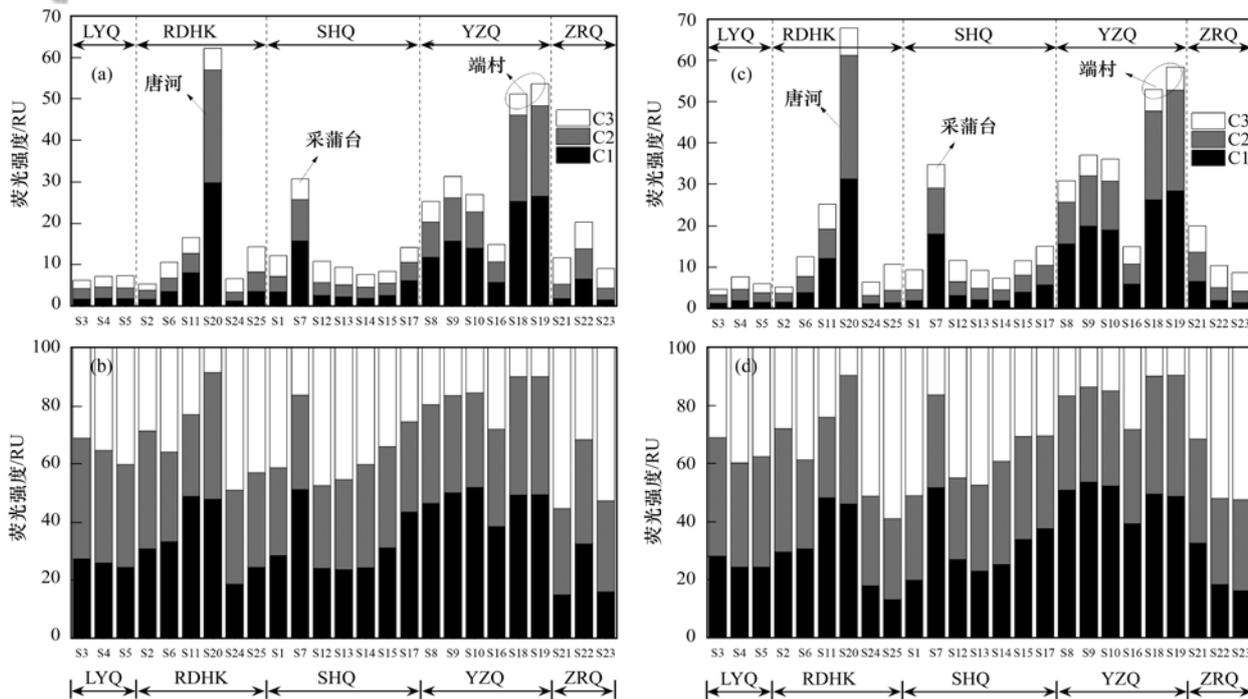


图 6 白洋淀水体 DOM 组分荧光强度和相对丰度

Fig. 6 Fluorescence intensity and percentages of components of DOM in water samples from Baiyangdian Lake

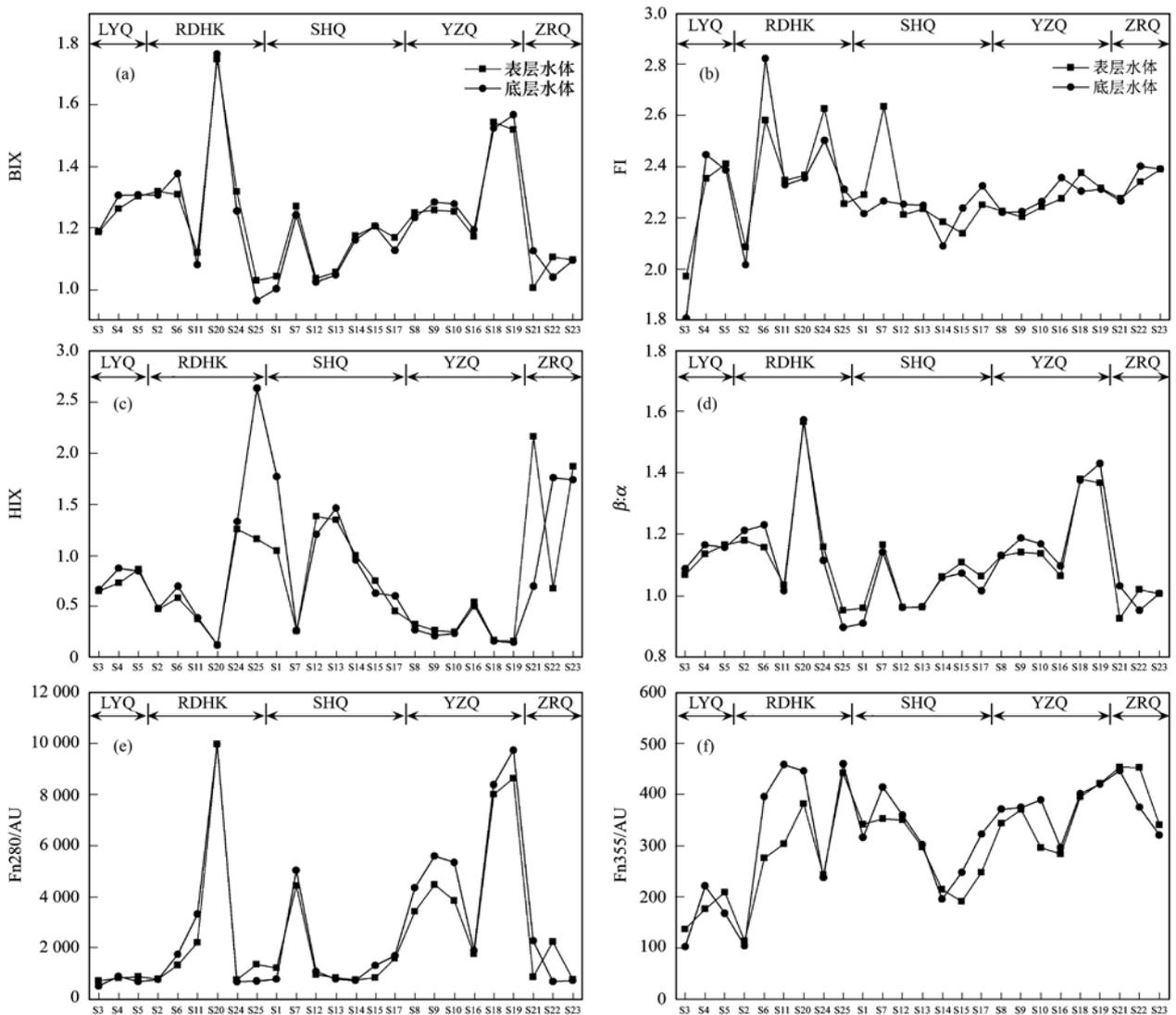


图7 白洋淀水体 DOM 的 BIX、FI、HIX、 $\beta:\alpha$ 、Fn280 以及 Fn355 分布情况

Fig. 7 BIX, FI, HIX, $\beta:\alpha$, Fn280, and Fn355 distributions of DOM in water samples from Baiyangdian Lake

FI 可以作为物质的来源以及 DOM 的降解程度的指示指标, $FI > 1.8$ 以自生源为主. 本研究中各个采样点的水体样品 FI 都大于 1.8 [图 7(b)], 说明该时期水体 DOM 为自生源, 其中, 入淀河口区府河采样点的 FI 最大, 达到 2.58 (表层水体) 和 2.82 (底层水体). 吕伟伟等^[41] 研究太湖北部天然有机质的荧光特征发现, 冬季 DOM 荧光指数 FI 和 BIX 分别在 1.65 ~ 2.50 和 1.00 ~ 1.27 之间, 均值分别为 2.02 ± 0.05 和 1.19 ± 0.02 , 整体处于较强的自生源特征.

Ohno^[42] 指出 $HIX < 4$ 表示以自生源为主. 本研究中各个采样点的 HIX 指数都小于 4 [图 7(c)], 表明该时期水体 DOM 腐殖化程度较弱, 与上述紫外-可见吸收光谱的结论非常吻合. 与吕伟伟等^[41] 研究太湖北部冬季天然有机质 HIX (0.43 ± 0.04) 的结果相一致, 处于较强的自生源特征. 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. 入淀河口区的唐河采样点的 $\beta:\alpha$ 最大达到 1.56 (表层水体) 和 1.57 (底层水体) [图 7(d)]; 自然区的 $\beta:\alpha$ 值最小, 表明该区域新生成的 DOM 比例较低. BIX、FI、HIX 以及 $\beta:\alpha$ 值不同区域的差异性显著.

Fn280 代表了类蛋白质组分相对浓度, Fn355 可以代表类腐殖质组分相对浓度, 两个指标分别用来表征自生源和陆源对水体 DOM 组分的贡献. 从整体上看, 冬季冰封期各个典型淀区采样点表层水体和底层水体样品的 Fn280 和 Fn355 差异不明显; 不同淀区的差异显著. 入淀河口区各采样点的 Fn280 差异性较大, 旅游区各个采样点间 Fn280 差异较小; 其中入淀河口区的唐河采样点底层水体 Fn280 最大, 达到 9954 AU, 说明唐河的类型蛋白组分浓度最大, 自生源特征更强, 与解析出的荧光组分以及 BIX 指数相一致 [图 7(e)]. 与此同时, 旅游区的 Fn280 值较小与该地区的荧光组分结果相一致. 冬

季冰封期的 Fn355 呈现出不同特征区域差异显著的特征,其中旅游区的 Fn355 最小与平行因子解析出的结果相一致[图 7(f)]. 对比冬季冰封期各个采样点的 Fn280 和 Fn355 值,可以看出该时期 Fn280 明显高于 Fn355,各个采样点呈现自生源特征更强、类蛋白质含量和占比更多的分布特征,与紫外-可见

光谱以及三维荧光组分构成相一致.

2.5 DOM 参数及环境因子相关性分析

为了研究冬季冰封期白洋淀水体的 DOM 特征,本研究基于紫外-可见光谱以及三维荧光光谱参数指标对表层水体和底层水体进行了相关性分析(图8). 其中图8(a)和图8(b)为冬季冰封期表层

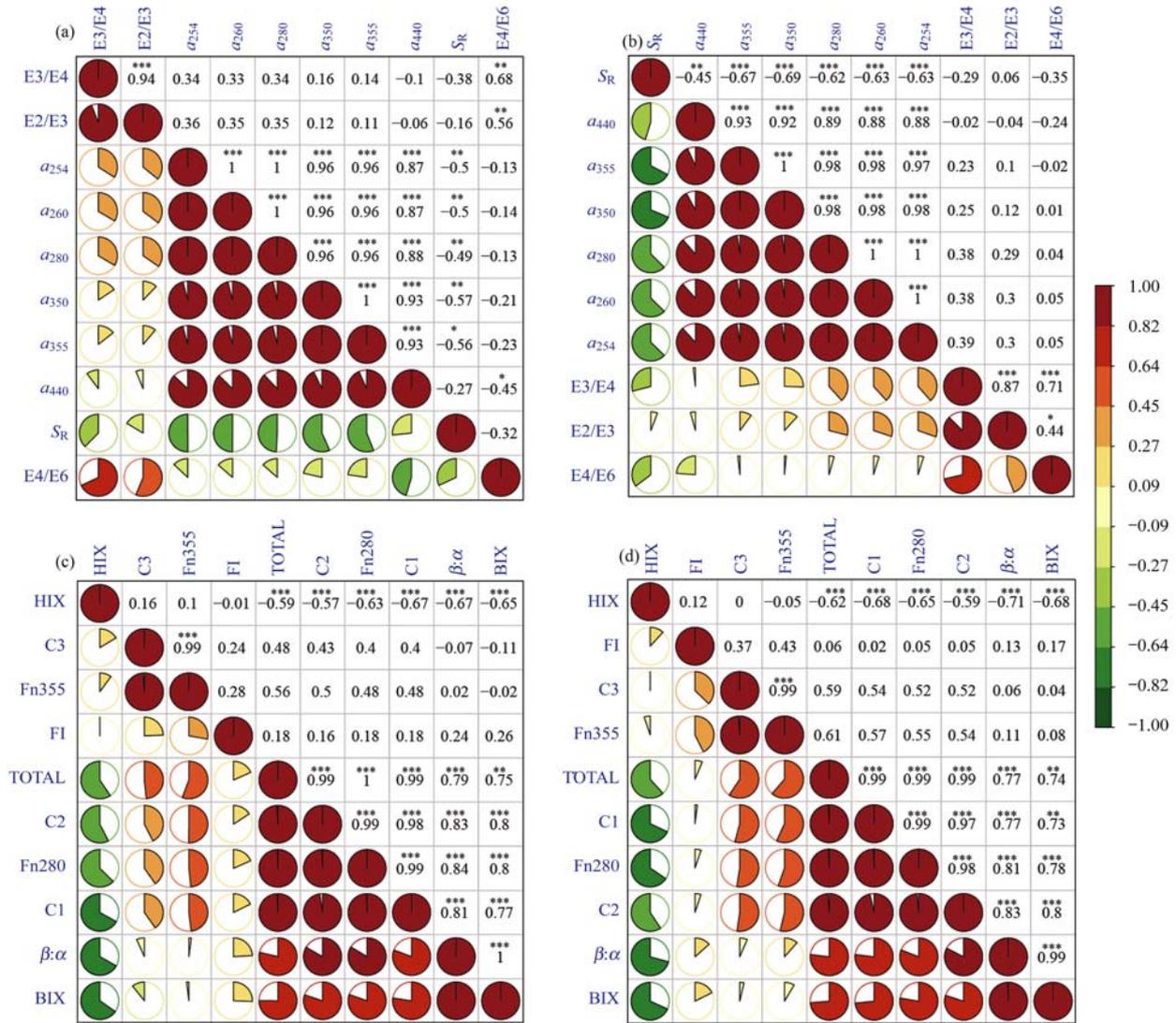


图 8 白洋淀水体 DOM 紫外-可见以及三维荧光参数指标的相关性分析

Fig. 8 Correlations of spectral characteristics of DOM in water samples (based on UV-vis and EEMs) from Baiyangdian Lake

表 4 荧光组分与特征参数及水质多元线性回归¹⁾

Table 4 Correlation matrix of DOM indices and three PARAFAC components of water samples from Baiyangdian Lake

位置	回归方程	样品个数	相关系数
表层水体	$C1 = 0.003 \times Fn280 - 0.003 \times Fn355 - 1.478 \times HIX - 7.094 \times BIX + 9.71$	25	0.995 ***
	$C2 = 0.983 \times HIX + 0.003 \times Fn280 - 0.642$	25	0.989 ***
	$C3 = 0.050 \times \text{高锰酸盐指数} - 0.013 \times TN - 0.290 \times TDP + 0.013Fn355 - 0.057$	25	0.976 ***
	总和 = $0.006 \times Fn280 + 0.013 \times Fn355 - 0.453 \times HIX - 4.994 \times BIX + 6.489$	25	0.998 ***
底层水体	$C1 = 0.003 \times Fn280 - 1.392 \times HIX - 7.007 \times BIX + 8.930$	25	0.993 ***
	$C2 = 1.611 \times HIX + 0.002 \times Fn280 + 6.111 \times BIX - 8.376$	25	0.981 ***
	$C3 = 0.046 \times \text{高锰酸盐指数} - 0.064 \times TN + 1.226 \times TDP + 0.013 \times Fn355 + 0.156$	25	0.986 ***
	总和 = $0.006 \times Fn280 + 0.014 \times Fn355 + 0.358 \times HIX - 0.643$	25	0.994 ***

1) *** 表示在 0.001 级别(双尾)相关性显著

和底层水体紫外-可见光谱参数指标的相关性分析;图 8(c)和图 8(d)为冬季冰封期表层和底层水体三维荧光光谱参数指标的相关性分析。

紫外-可见光谱参数指标相关性结果显示: E2/E3 与 E3/E4 呈显著正相关关系, 表层水体相关系数达到 0.94 ($P < 0.001$), 底层水体达到 0.87 ($P < 0.001$), 表明随着低腐殖化成分占比的增加, 腐殖化程度减弱; E2/E3 与 E4/E6 呈显著正相关关系 [表层水体, 0.56 ($P < 0.01$); 底层水体, 0.44 ($P < 0.05$)], 表明分子量高的 DOM 腐殖化程度相对较高; a_{254} 和 a_{260} 呈显著正相关关系 ($P < 0.001$) 表示疏水性和芳香性结构关系密切, 芳香性结构主要存在于疏水性组分中, 与高洁等^[26]研究溶解性有机质的结论相一致; 冰封期白洋淀表层水体和底层水体 DOM 紫外-可见光谱参数指标相关性呈现相似的变化。三维荧光光谱参数指标相关性结果显示: 冬季冰封期白洋淀表层水体和底层水体的 C1 和 C2 呈现显著相关, 相关系数达到 0.98 ($P < 0.001$) 和 0.97 ($P < 0.001$), 表明荧光组分 C1 和 C2 存在着相似的来源; 而 C1 和 C3 以及 C2 和 C3 的相关性不大, 并不显著, 表明 C1、C2 与 C3 来源不同; 表层水体和底层水体中各个采样点的三维荧光组分与特征指数的相关性相似, 比如, HIX 与 C1、C2、Fn280、 β : α 以及 BIX 呈现显著相关; C1 和 C2 与 Fn280 呈现显著的正相关关系, 相关系数达到 0.98 ($P < 0.001$) 和 0.99 ($P < 0.001$), 与 Fn280 代表的蛋白质相对浓度相一致; C3 与 Fn355 存在显著正相关关系, 表层水体和底层水体相关系数都达到 0.99 ($P < 0.001$), 与 C3 解析出为陆源腐殖质的成分相一致; 综上分析可得, 表层水体与底层水体的三维荧光光谱参数指标呈现相似关系。

图 9 为冬季冰封期白洋淀水体 DOM 各参数指标的 PCA 情况。结果表明, 基于表层水体 DOM 参数指标的 PCA 显示 [图 9(a)], PCA1 和 PCA2 共解释了整体变化的 73.51%; 基于底层水体 DOM 参数指标的 PCA 显示 [图 9(b)], PCA1 和 PCA2 共解释了整体变化的 74.83%; PCA 显示不同特征区域的采样点分布较分散, 同一区域的较集中 (除入淀河口区外), 表明不同特征区域的水体 DOM 特征存在差异; 基于 Adonis 分析不同区域的差异性, 表层水体不同区域的 $P = 0.012 < 0.05$, 底层水体不同区域的 $P = 0.004 < 0.01$, 表明不同区域水体 DOM 特征存在显著差异。基于全部水样的 PCA 显示 [见图 9(c)], PCA1 和 PCA2 共解释了整体变化的 73.74%, 同一采样点的表层和底层分布集中; 基于 Adonis 分析得出 $P = 0.885 > 0.05$, 表明冬季冰封期白洋淀表

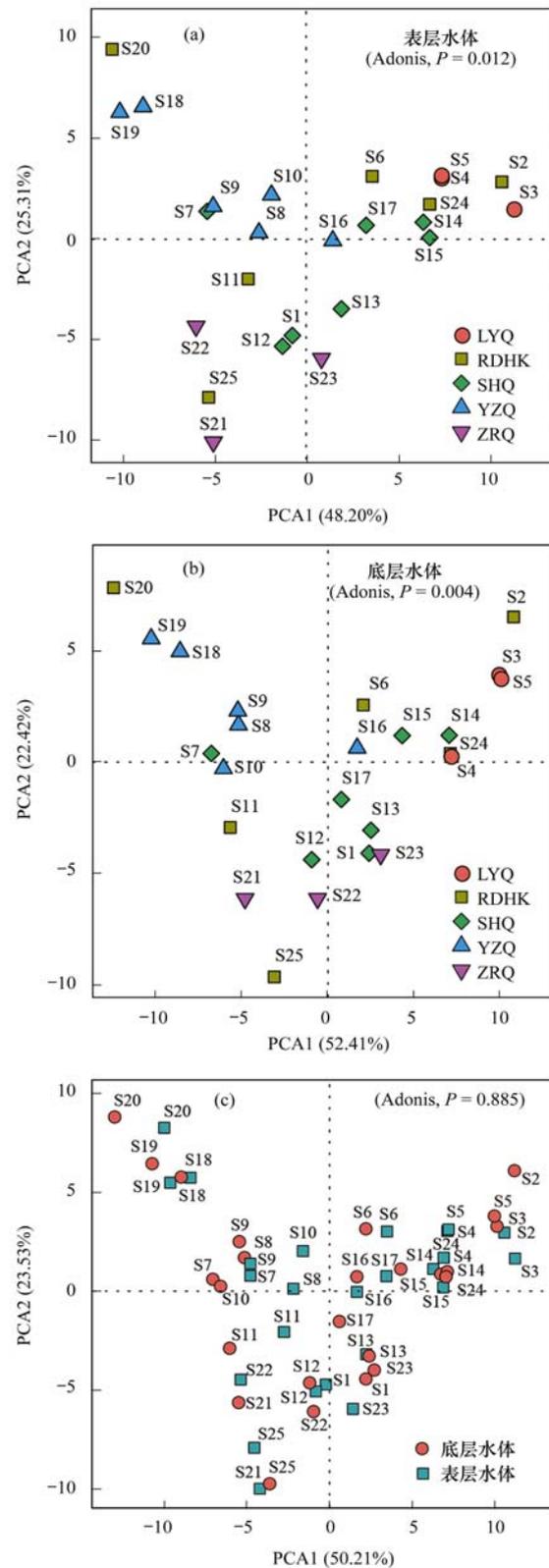


图 9 白洋淀水体 DOM 紫外-可见以及三维荧光参数指标的主成分分析

Fig. 9 Principal component analysis of DOM in water samples (based on UV-vis and EEMs) from Baiyangdian Lake

层水样和底层水样 DOM 的差异不显著。综上, 白洋淀不同特征区域水体 DOM 呈现明显的差别, 相同类型水体的 DOM 特征相似; 表层水体和底层水体

的 PCA 分析结果类似,都呈现明显的分区。

表 4 为冬季冰封期白洋淀水体样品的 3 个荧光组分与 DOM 参数以及水质参数的多元线性回归分析。结果表明,表层水体和底层水体中类酪氨酸 C1 以及类色氨酸 C2 与 Fn280、Fn355、HIX 以及 BIX 呈现显著相关($P < 0.001$);表层水体和底层水体中陆源腐殖质 C3 与高锰酸盐指数、TN、TDP 以及 Fn355 呈现显著相关($P < 0.001$)。因此,可以通过应用冬季冰封期白洋淀水体的 DOM 特征参数和水质参数对该时期 DOM 组分进行多元线性回归拟合,利于评估该时期水体溶解性有机物特征,便于管理人员对该时期有机污染物进行评价和控制。

3 结论

(1) 冬季冰封期,白洋淀水体的紫外-可见光谱显示水体 DOM 呈现生物源、低腐殖化的特征,并且芳香性结构主要存在于疏水性组分中。

(2) 三维荧光-平行因子解析出 2 种类蛋白(C1 和 C2)以及 1 种类腐殖质(C3),并且类蛋白(C1 + C2)占比较大;特征参数 FI、BIX 以及 HIX 表明 DOM 为自生源为主。

(3) PCA 以及 Adonis 分析得到不同淀区水体 DOM 的特征差异显著($P < 0.05$),表层水体和底层水体 DOM 差异不显著($P > 0.05$);多元线性回归可以很好地拟合水体的 DOM 特征参数和水质参数与水体 DOM 组分的关系,利于评估冬季冰封期水体 DOM 的特征。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郭卫东,黄建平,洪华生,等.河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性[J].环境科学,2010,31(6):1419-1427.
Guo W D, Huang J P, Hong H S, *et al.* Resolving excitation emission matrix spectroscopy of estuarine CDOM with parallel factor analysis and its application in organic pollution monitoring [J]. Environmental Science, 2010, 31(6): 1419-1427.
- [3] 冯可心,李永峰,姜霞,等.丹江口水库表层沉积物有色可溶性有机物空间分布特征及其来源分析[J].环境化学,2016,35(2):373-382.
Feng K X, Li Y F, Jiang X, *et al.* Distribution and source analysis of chromophoric dissolved organic matter in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(2): 373-382.
- [4] 王泽华,邹立,陈洪涛,等.西太平洋冬季上层水体有色溶解有机物的分布和转化特征[J].海洋学报,2018,40(10):180-189.
Wang Z H, Zou L, Chen H T, *et al.* Distribution and transformation of CDOM in the upper waters of western Pacific Ocean in winter [J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(10): 180-189.
- [5] Cui Q Q, Pan Y T, Zhang H X, *et al.* Elevated concentrations of perfluorohexanesulfonate and other per- and polyfluoroalkyl substances in Baiyangdian Lake (China): source characterization and exposure assessment [J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 684-691.
- [6] Xu F L, Wu W J, Wang J J, *et al.* Residual levels and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in freshwater fishes from Lake Small Bai-Yang-Dian, Northern China [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(2): 275-286.
- [7] Song X F, Wang P, Yu J J, *et al.* Relationships between precipitation, soil water and groundwater at Chongling catchment with the typical vegetation cover in the Taihang mountainous region, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(4): 787-796.
- [8] Zhang W Q, Jin X, Meng X, *et al.* Phosphorus transformations at the sediment-water interface in shallow freshwater ecosystems caused by decomposition of plant debris [J]. Chemosphere, 2018, 201: 328-334.
- [9] Zhao Y W, Liu Y X, Wu S R, *et al.* Construction and application of an aquatic ecological model for an emergent-macrophyte-dominated wetland: a case of Hanshiqiao wetland [J]. Ecological Engineering, 2016, 96: 214-223.
- [10] 洪志强,熊瑛,李艳,等.白洋淀沉水植物腐解释放溶解性有机物光谱特性[J].生态学报,2016,36(19):6308-6317.
Hong Z Q, Xiong Y, Li Y, *et al.* The spectra characterization on dissolved organic matter of submerged plant decomposition in Lake Baiyangdian [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6308-6317.
- [11] 袁冬海,崔骏,洪志强,等.白洋淀沉水植物腐解释放溶解性有机物与重金属的相互作用[J].环境工程学报,2016,10(5):2184-2192.
Yuan D H, Cui J, Hong Z Q, *et al.* Interaction between dissolved organic matter released by macrophyte decomposition and heavy metal in Lake Baiyangdian [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2184-2192.
- [12] 杜奕衡,刘成,陈开宁,等.白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J].湖泊科学,2018,30(6):1537-1551.
Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1537-1551.
- [13] 薛培英,赵全利,王亚琼,等.白洋淀沉积物-沉水植物-水系统重金属污染分布特征[J].湖泊科学,2018,30(6):1525-1536.
Xue P Y, Zhao Q L, Wang Y Q, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in sediment-submerged macrophyte-water systems of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1525-1536.
- [14] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [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] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Chen Y, Senesi N, Schnitzer M. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, **41**(2): 352-358.
- [26] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质 (DOM) 吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 151-162.
Gao J, Jiang T, Li L L, *et al.* Ultraviolet-visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils of water-level fluctuation zones of the three gorges reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 151-162.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, *et al.* Optical properties of dissolved organic matter (DOM): effects of biological and photolytic degradation [J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(3): 1015-1032.
- [32] Zhang Y L, Liu M L, Qin B Q, *et al.* Photochemical degradation of chromophoric-dissolved organic matter exposed to simulated UV-B and natural solar radiation [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1): 159-168.
- [33] Rui J P, Li J B, Wang S P, *et al.* Responses of bacterial communities to simulated climate changes in alpine meadow soil of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, **81**(17): 6070-6077.
- [34] 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.
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.
- [35] Chen X F, Chuai X M, Yang L Y, *et al.* Climatic warming and overgrazing induced the high concentration of organic matter in Lake Hulun, a large shallow eutrophic steppe lake in northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **431**: 332-338.
- [36] 蔡文良, 许晓毅, 罗固源, 等. 长江重庆段溶解性有机物的荧光特性分析[J]. *环境化学*, 2012, **31**(7): 1003-1008.
Cai W L, Xu X Y, Luo G Y, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the Chongqing section of Yangtze River [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(7): 1003-1008.
- [37] 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.
- [38] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 145-155.
- [39] 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 G, 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 Scientiarum Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 160-167.
- [40] 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.
- [41] 吕伟伟, 姚昕, 张保华. 太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3601-3613.
Lü W W, Yao X, Zhang B H. Fluorescence characteristics and environmental significance of organic matter in the northern part of lake Taihu in spring and winter [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3601-3613.
- [42] 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

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i>	(1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i>	(14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i>	(31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo	(50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i>	(57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i>	(65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xixiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i>	(90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i>	(98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i>	(106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i>	(125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i>	(133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i>	(146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i>	(155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i>	(166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, Jilili Abuduwaili, <i>et al.</i>	(173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i>	(183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i>	(194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i>	(213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhou, WEI Hao, <i>et al.</i>	(224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i>	(242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i>	(262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i>	(284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i>	(293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i>	(304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i>	(313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i>	(321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i>	(330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i>	(337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i>	(345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i>	(353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i>	(360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i>	(368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i>	(377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i>	(385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	(394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i>	(403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i>	(412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i>	(420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i>	(438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i>	(449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i>	(460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i>	(469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i>	(479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i>	(489)