

引黄水源水库平—丰水期有色可溶性有机物 (CDOM) 的来源、组成及差异分析*

杨永锐, 史建超**, 易齐涛, 张 劲, 王廉祥

(烟台大学土木工程学院, 烟台 264005)

摘 要: 为探究引黄水源水库——门楼水库平水期和丰水期有色可溶性有机物 (CDOM) 的组成特征、来源及差异, 运用紫外—可见光谱技术 (UV-vis) 和三维荧光光谱 (EEMs) 技术, 结合平行因子分析法 (PARAFAC) 分析 2022 年 5 月 (平水期) 和 2022 年 7 月 (丰水期) 有色可溶性有机物含量及组分变化。研究结果表明: PARAFAC 识别出 2 类荧光组分, 分别是 C1 ($E_x = 355$ nm, $E_m = 476$ nm, 类腐殖质组分) 和组分 C2 ($E_x = 225$ nm, $E_m = 320$ nm, 类蛋白组分); 丰水期 CDOM 组分荧光强度显著高于平水期。CDOM 光谱参数表明, 门楼水库水体处于中营养状态, 水体 CDOM 受新生内源和外源输入共同影响, 以自生源为主; 水库 CDOM 具有相对分子量小、腐殖化程度较弱的特点。丰水期水库富营养化水平和 CDOM 相对浓度低于平水期; 丰水期 CDOM 疏水性组分比例和芳香化程度高于平水期。水质理化指标、CDOM 组分和光谱参数相关性分析结果表明 $SUVA_{260}$ 和 $SUVA_{280}$ 与 DOC 呈显著负相关, 说明紫外—可见光谱参数在一定程度上可以用来估算 DOC 的浓度; $Chl.a$ 浓度作为表征浮游植物生物量的指标, 与 DOC、 a_{254} 呈显著正相关。研究揭示了门楼水库水体 CDOM 的荧光特征、组分来源响应机制和水期差异, 为进一步探究 CDOM 在引黄水源水库的环境行为特性、对水体富营养化的贡献以及对其它污染物环境行为的影响等提供基础资料。

关键词: 引黄工程; 门楼水库; 有色可溶性有机物 (CDOM); 平行因子分析; 水期差异

Variation analysis of source and composition of CDOM in a source water reservoir of Yellow River diversion project during normal and wet seasons*

Yang Yongrui, Shi Jianchao**, Yi Qitao, Zhang Jin & Wang Lianxiang

(School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, P.R.China)

Abstract: In order to investigate the characteristics, sources and variations in the composition of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) during the normal and rainy seasons in the reservoir of the Yellow River Diversion Source Reservoir-Menlou Reservoir, UV-vis and EEMs techniques combined with PARAFAC were used to analyse the changes in CDOM content and components in May 2022 (normal season) and July 2022 (rainy season). The results of the study showed that PARAFAC identified 2 types of fluorescent fractions, C1 ($E_x = 355$ nm, $E_m = 476$ nm, humus-like fraction) and C2 ($E_x = 225$ nm, $E_m = 320$ nm, protein-like fraction). The fluorescence intensity of the CDOM fraction was significantly higher in wet seasons than in normal seasons. The spectral parameters of CDOM indicated that the water body of Menlou Reservoir was in a mesotrophic state, and the CDOM of the water body was mainly autogenous due to the combined effects of endogenous and exogenous inputs. The reservoir CDOM was characterized by low relative molecular weight and low humification. The levels of eutrophication and the relative concentrations of CDOM in the reservoir were lower in the wet season than in the normal season, and the proportion of hydrophobic components and the degree of aromatization of CDOM were higher than in the normal season. Correlation analysis of water physical and chemical indicators, CDOM components and spectral parameters showed that $SUVA_{260}$ and $SUVA_{280}$ were significantly negatively correlated with DOC, indicating that UV-Vis spectral parameters could be used to estimate the concentration of DOC to some extent; $Chl.a$ concentration, as an indicator characterizing phytoplankton biomass, was significantly and positively correlated with DOC, a_{254} . The study re-

* 2022-08-14 收稿; 2022-11-14 收修改稿。

山东省自然科学基金项目 (ZR2020QE225) 资助。

** 通信作者; E-mail: shijianchao@ytu.edu.cn。

vealed the fluorescence characteristics, component source response mechanism and water period variation of CDOM in the water body of Menlou Reservoir, providing basic data for further investigation of the environmental behavior characteristics of CDOM in the Yellow River Diversion Water Source Reservoir, its contribution to water eutrophication and its influence on the environmental behavior of other pollutants.

Keywords: Yellow River diversion project; Menlou Reservoir; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); parallel factor analysis; variation in the water season

溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)作为生态系统的重要组成部分,主要由亲水性有机酸、类蛋白、类氨基酸、类腐殖酸和碳水化合物等组成^[1]。有色溶解有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)是 DOM 中能够强烈吸收紫外辐射及蓝光波段的有机物^[2],不同环境特征的有色可溶性有机物种类和特征具有明显的差异^[3]。一般认为,水生生态系统中的 CDOM 主要来源于水体内源(水生植物、浮游植物和微生物的原位生产和分解)和外源输入(包括降水、径流和废水)^[4]。然而,随着人类活动的增加,如工业化、城市化、农业和灌溉实践,CDOM 的外源输入急剧增加,并随后通过影响碳的生物地球化学循环而极大地改变了 CDOM 的质量和数量^[5]。此外,由于 CDOM 无处不在并具有环境意义,对其监测帮助人们更好地了解水生环境^[6]。因此,水生生态系统中 CDOM 的来源、浓度以及与 CDOM 相关的环境因素的研究热度越来越高。紫外可见光谱以及三维荧光光谱分析因其高灵敏的特点,已成为研究 CDOM 的组成和光谱特征的重要手段,目前广泛应用于河口^[7]、沉积物^[8-10]、海洋^[11-12]和地下水^[13]等环境中 CDOM 的特征研究。

近年来,随着城镇化率的不断提高,人们对地下水资源的开采已经过量,水库在城镇供水系统中的角色越来越重要,已成为许多城市的主要供水水源,而高含量的 CDOM 产生的气味和消毒副产物等问题对饮用水水质威胁较大^[14],追踪饮用水源地湖库中 CDOM 的动态可以改善饮用水源的保护和管理^[15],因此,关于水库 CDOM 的特征研究也逐渐成为热点。例如,黄廷林等^[16]对周村水库 CDOM 进行了三维荧光分析,判断了周村水库夏季 CDOM 的来源及分布特征;周蕾等^[17]对天目湖水库 CDOM 来源与组成特征进行了分析,并得出 CDOM 组成受降雨量、径流输入、水体温度、热分层、浮游植物生物量以及光和微生物降解等因素的共同影响的结论;王斌等^[9]收集了茜坑水源水库的表层沉积物和上覆水样品,进行了表层沉积物与上覆水的 CDOM 光谱特征差异分析,判断出沉积物存在向上覆水释放有机质的潜力,可能对后续水处理工艺产生一定影响;周石磊等^[18]对岗南水库沉积物间隙水 CDOM 的组成和特征进行解析,并拟合了岗南水库 CDOM 荧光组分与水质参数的线性回归方程,利于对冰封期水体进行 CDOM 特征评估。然而,对于引黄水库不同水期 CDOM 光谱特征及其差异的研究却鲜有报道,有关引黄水库 CDOM 荧光组分特征和来源仍需进一步探究和明确。

胶东引黄调水工程属于南水北调工程的重要组成,作为山东境内重要的水利基础设施,该工程具有优化资源配置、缓解胶东地区水资源供需矛盾及改善当地的生态环境的重大意义。门楼水库作为引黄调水工程的重要枢纽,具有承上启下的重要作用。同时,作为烟台市重要的水源水库,市区 70% 以上工业生产和居民生活用水都来自该水库,其水质安全对当地居民的生活有十分重要的影响。作为引黄水源水库的典型,门楼水库 CDOM 来源、组成特征和水期差异的研究,对评估引黄水源水库有机物来源和富营养化控制具有重要意义。因此,本研究以烟台市门楼水库为研究对象,利用 UV-vis 及 EEMs 分析技术,对 2022 年 5 月(平水期)和 2022 年 7 月(丰水期)水库主库区表层水体 CDOM 进行剖析,并对平水期和丰水期的差异进行分析,将有助于了解以该水库为典型的引黄水库 CDOM 的来源、结构、水期差异以及对其生态环境效应的影响,对于维系引黄水库水生生态系统平衡和水质安全具有重要作用。同时丰富我国引黄水源水库的 CDOM 相关资料,为进一步探究 CDOM 在引黄水源水库的环境行为特性、对水体富营养化的贡献以及对其它污染物环境行为的影响等提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

门楼水库(37°24'N, 121°12'E)为大(二)型水库,位于山东省烟台市福山区门楼镇,与福山城区相隔 11 km,位于大沽夹河的西支流—内夹河下游,是烟台市主要的城市供水水源地。建库之初,水库功能以防洪灌

溉为主,1982年后以供应市区用水为主,兼顾农灌。水库控制流域面积 1079 km²,包括该市 9 个乡镇和城区,总库容 2.44 亿 m³,兴利库容 1.26 亿 m³,死库容 0.1 亿 m³,每天对市区供水 10⁵ m³,市区 70% 以上工业生产和居民生活用水都来自该水源水库。烟台门楼水库是一座大型多功能水库,被烟台人民誉为福山区一颗璀璨明珠。流域地处暖温带东亚季风大陆性气候区,四季分明,气候温和,多年平均气温 11.5℃,年总日照时数 2667.0 h,多年平均降水量 753.1 mm,水面蒸发量 1115.1 mm,降水量年内极不均匀^[19]。按照多年降水量的高低,将月平均降水量最多的 4 个月份 6—9 月份列为丰水期,4—5 月和 9—10 月列为平水期,其中丰水期降水量占全年降水量的 68% (图 1)。

1.2 样品采集与处理

本研究于 2022 年 5 月(平水期)和 2022 年 7 月(丰水期)对门楼水库表层水体(0.2 m)进行采样,为了探究不同水期水库水质及 CDOM 特征的影响,共设置了 27 个采样点(图 2),水库除主库区外其他区域水深较浅,因此所有采样点均设置于主库区,样点设置整体规律为沿水库库形设置两列,样点之间距离约为 500 m。采集后的水样放于预先清洗过的聚乙烯瓶中,将采样瓶放置于 4℃ 保温箱内避光保存,并立即带回实验室分析测试。

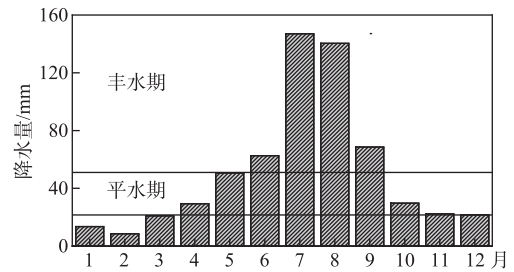


图 1 1981—2010 年烟台市月平均降水量

Fig.1 Average monthly precipitation in Yantai City from 1981 to 2010

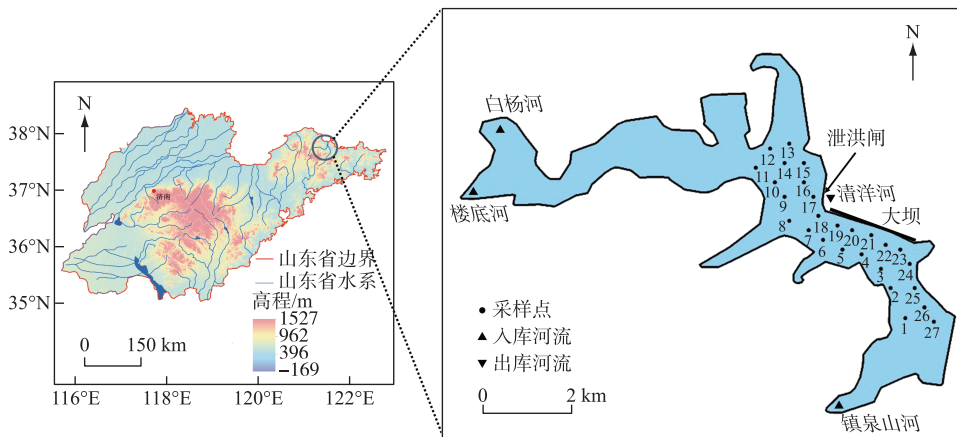


图 2 门楼水库位置及样点分布

Fig.2 Location and sampling sites distribution of Menlou Reservoir

1.3 样品分析方法

1.3.1 水质理化参数测定 水样根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)进行处理、测定。水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,使用岛津公司总有机碳分析仪测定溶解性有机碳(DOC)浓度;叶绿素 a(Chl.a)浓度采用热乙醇反复冻融法提取,并通过荧光光度法进行测定;总氮(TN)浓度采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法进行测定。

1.3.2 三维荧光光谱测定 采用 F97 Pro 荧光分光光度计进行三维荧光光谱的测定。设置参数如下:激发波长(Ex)设置范围为 200~400 nm,波长间隔为 5 nm;发射波长(Em)为 250~550 nm,波长间隔为 1 nm,扫描速度为 10000 nm/min,激发和发射带宽设定为 5 nm。利用超纯水扣除散射影响,所有样品的三维荧光光谱均需进行空白扣除以减少样品中非目标信号的干扰^[20]。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^[21]。为去除水样中悬浮物以及微生物等物质的干扰,测样前使用 0.45 μm 针孔滤膜过滤。本研

究用最大荧光强度(F_{\max})来表征 CDOM 各组分的浓度^[22]。

1.3.3 紫外可见吸收光谱的测定 采用 THERMO 分光光度计进行紫外-可见光谱扫描,以超纯水为空白,使用 10 mm 石英比色皿在 190~700 nm 范围内进行吸光度测定,扫描间隔为 1 nm。用所得结果按照如下公式计算 CDOM 吸收系数^[23-25]:

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

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

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

式中, $a(\lambda)$ 为波长 λ 下的吸收系数(m^{-1}); $a^*(\lambda)$ 为波长 λ 下的未校正吸收系数(m^{-1}); λ 为波长(nm); $D(\lambda)$ 为吸光度; L 为光程路径(m); S 为指数函数曲线光谱斜率(μm^{-1})。

1.4 数据处理与分析

本研究 CDOM 三维荧光数据采用 Matlab 2017b 调用 DOMFluor 工具箱^[26]进行 PARAFAC 分析,将样品的荧光矩阵组合构建新的三维矩阵组进行处理。分析过程包括数据处理,去除异常值并利用核一致性结果,初步确定组分数范围,通过使用残差分析和对半分析来验证模型组件的正确数量,该分析使用 Tucker 同余系数比较模型和数据集的 4 个单独拆分之间的激发和发射负载。根据三维荧光数据识别荧光组分,分别计算各种荧光参数,并通过荧光强度数据计算组分相对贡献率。采用 IBM SPSS Statistics 25 进行均值、标准差和均值间差异显著性水平 t 检验等数据统计分析;采用 ArcGIS 10.3 软件绘制水库位置及样点分布图,其余图片采用 Origin Pro 2021 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 三维荧光光谱

2.1.1 水体 CDOM 荧光特征组成 利用 PARAFAC 方法解析不同水期水样三维荧光图谱,对平水期和丰水期共 54 个水样进行解析,共鉴别出两种组分(图 3),其中包括一个类腐殖质组分(C1)和一个类蛋白组分(C2)。结合前人相关研究成果(表 1),综合分析得到:组分 C1($E_x = 355 \text{ nm}$, $E_m = 476 \text{ nm}$)为长波类腐殖质物质,具有一个激发峰和发射峰,对应荧光峰 C 峰(320~360 nm/420~460 nm)区域,该类物质分子量较大、易光降解且生物可利用性差^[27-28],与人为和农业影响因素相关。组分 C2($E_x = 225 \text{ nm}$, $E_m = 320 \text{ nm}$)具有一个激发峰和发射峰,位于传统的 T 峰区域(220~230 nm/320~350 nm),该荧光组分与色氨酸类物质产生的光谱峰相似^[29-30],属于生物降解的类蛋白质物质,大多数是陆生植物或土壤有机质自生源产生过程生成的蛋白质成分或其降解出来较少的缩氨酸^[30]。

自然水体 CDOM 来源主要包括外源(如陆生源和人为源)和内源(如微生物新陈代谢和胞外分泌物)^[31]。自然水体中 CDOM 组分通常以腐殖质型为主^[32],而受到微生物代谢和人类活动影响的水体类蛋白组分含量较高。为了明晰 CDOM 组分的相对贡献情况,对各组分荧光强度数据进行分析计算,得出门楼水库 27 个样点平水期和丰水期各组分荧光强度及相对贡献率(图 4)。整体来看,丰水期 CDOM 荧光强度显著高于平水期。地表水体有机质主要来源于内源产生及陆源输入。平水期表层水体平均水温为 18.9℃,丰水期为 27.9℃,丰水期升高的水温促进了水体微生物活动^[30],并加快了水体中有机物的分解和沉积物中有机物的释放,是导致 CDOM 荧光强度增加的原因之一;此外,土壤中的有机质在平水期主要通过地下水流经有机物含量较低的矿物土层输出,这对陆源 CDOM 向水库的输入是很大的限制,而丰水期降雨及地表径流增加,径流裹挟土壤有机质含量最高的表层(0~10 cm)土层中的 CDOM 汇入水库^[33],是导致 CDOM 荧光强度增加的重要原因。平水期长波类腐殖质 C1 组分的相对贡献率在 52.8%~74.1%之间,均值为 59.8%±6.2%。丰水期 C1 组分的相对贡献率在 50.5%~57.7%之间,均值为 52.7%±1.9%。平水期 C1 组分所占比例在 1~17 号样点并无显著差异,但在 18~27 号样点有明显上升,这是由于 18~27 号样点位于城镇附近,与其它样点比受人类活动和农业影响较大,导致 C1 组分较其它样点有明显升高。同时,丰水期 C2 组分所占比例在 18~27 号样点有明显增加,这是由于 18~27 号样点临近库边,丰水期丰富的径流将岸边陆生植物及土壤有机质自生源过程中产生的类蛋白质成分和生活污水排放产生的类蛋白质组分^[15]流入附近,导致 C2 组

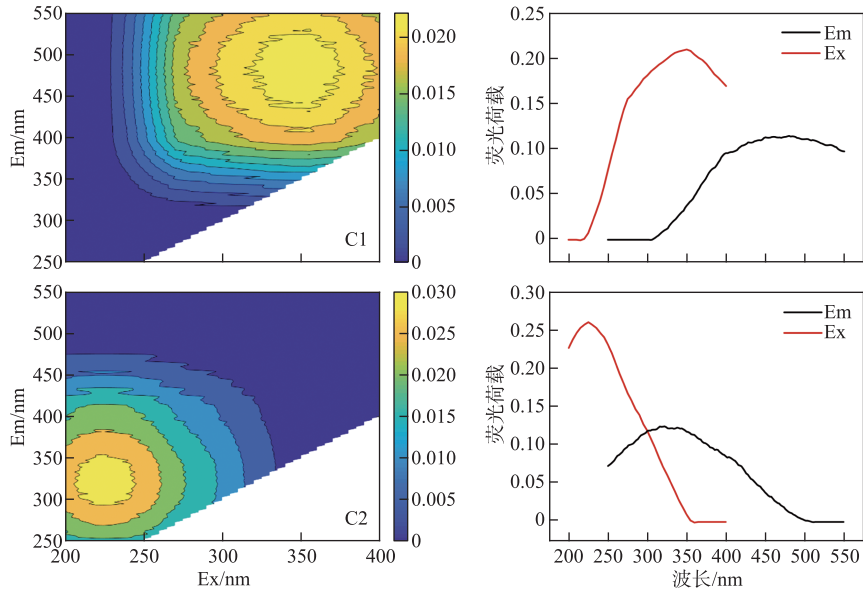


图 3 PARAFAC 解析出 2 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig.3 PARAFAC resolves two fluorescence components and their excitation emission wavelength positions

表 1 2 种荧光组分光谱特征

Tab.1 Spectral characteristics of two fluorescence components

组分	物质	本研究		其他研究	
		激发波长/nm	发射波长/nm	激发波长/nm	发射波长/nm
C1	长波类腐殖质	355	476	350~440	430~510 ^[34]
C2	短波类色氨酸	225	320	220~230	320~350 ^[35]

分荧光强度升高。

2.1.2 水体 CDOM 荧光参数分析 为了进一步分析门楼水库平水期和丰水期水体样品 CDOM 的光谱特征, 本文对 CDOM 的荧光特征参数进行了分析。如图 5 所示, 水体中 CDOM 的来源、腐殖化程度以及自生源特性可以通过荧光指数 (fluorescence index, *FI*)、腐殖化指数 (humification index, *HIX*) 和自生源指数 (index of recent autochthonous contribution, *BIX*) 来表示^[9]; 水体生物活性可以通过新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 来指示^[36]; 水体 CDOM 组分相对浓度可以通过 $F_{n_{280}}$ 和 $F_{n_{355}}$ 来评价。

FI 定义为激发波长为 370 nm 时, 发射波长 470 与 520 nm 荧光强度的比值, 该值可以作为物质的来源及 CDOM 的降解程度的指示指标^[37], 当 $FI < 1.2$ 时, CDOM 以陆源输入为主; $FI > 1.8$ 时, CDOM 以自生源为主^[38]。如图 5a 所示, 平水期样品 *FI* 在 1.00~3.48 之间, 均值为 1.66; 丰水期样品 *FI* 在 0.92~1.68 之间, 均值为 1.26。不同水期样品 *FI* 均值都在 1.2~1.8 范围内, 表明水库 CDOM 具有自生源和陆源双重来源, 其自生源 CDOM 主要来自水库底部沉积物释放及微生物代谢, 而陆源 CDOM 是由径流或人类活动产生。丰水期样品 *FI* 均值显著低于平水期 ($P \leq 0.05$), 表明丰水期 CDOM 组分中陆源输入比例增加, 与丰水期降水多、水库径流增加、外源输入贡献量高相一致。

HIX 是在激发波长为 255 nm 下, 435~480 nm 发射波长处荧光强度积分值和 300~345 nm 荧光积分值之比^[39]。研究表明, *HIX* 值越高, CDOM 腐殖化程度越大^[40]。当 $HIX < 1.5$ 时, 说明 CDOM 腐殖化程度较弱, 表示 CDOM 以自生源为主。平水期样品 *HIX* 在 1.01~2.01 之间 (均值 1.31); 丰水期样品 *HIX* 在 0.92~1.68 之间 (均值 1.26) (图 5a, b)。两者无显著差异, 表明平、丰水期水体门楼水库 CDOM 腐殖化程度都较弱, 以

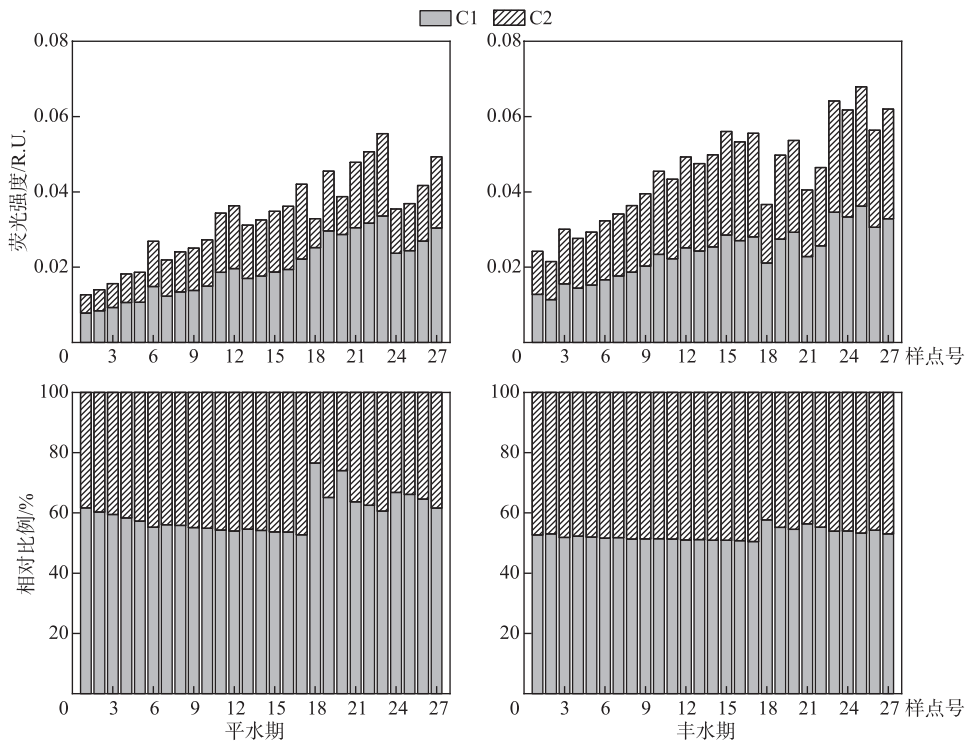


图4 平—丰水期门楼水库水体 CDOM 组分荧光强度及相对比例

Fig.4 Fluorescence intensity and relative proportion of CDOM components of water bodies in Menlou Reservoir in normal and wet seasons

自生源为主,丰水期径流来水与水库水体腐殖化程度相近,导致水库水体腐殖质程度无明显变化。

BIX 是激发波长 310 nm 时,380 nm 处发射波长与 430 nm 处发射波长的比值,该值主要表征 CDOM 自生贡献的比例^[41], BIX 越大,自生源特性越强。当 $0.8 < BIX < 1.0$ 时,CDOM 具有较强的自生源特征。如图 5b 所示,平水期样品 BIX 在 0.44~1.45 之间,均值为 0.93;丰水期样品 BIX 在 0.70~1.14 之间,均值为 0.89。两次均值均在 0.8~1.0 范围内,且差异较小,表明两个水期门楼水库 CDOM 均呈现较强的自生源特性,且自生源贡献比例无明显差异,这与上文对荧光参数 HIX 分析所得的结论一致。

$\beta:\alpha$ 被定义为激发波长为 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,是评估水体生物活性的重要依据,反映了新产生的 CDOM 在整体 CDOM 中所占的比例, $\beta:\alpha$ 越大表明水体生物活性越强^[16]。平水期样品 $\beta:\alpha$ 在 0.30~0.99 之间,均值为 0.79;丰水期样品 $\beta:\alpha$ 在 0.61~1.04 之间,均值为 0.78(图 5c),两者无显著差异,表明水期变化对新产生的 CDOM 占整体的比例没有大的影响。这是由于丰水期内源产生与外源输入的 CDOM 同时升高,但其相对比例并未发生明显差异,因此新产生的 CDOM 占整体的比例未发生大的变化。与上文 CDOM 组分荧光强度及相对比例所得结论一致。

$F_{n_{280}}$ 是在 280 nm 激发波长下,340~360 nm 发射波长荧光强度的最大值,代表类蛋白质物质相对浓度水平,可以表征自生源 CDOM 对水体 CDOM 的贡献率^[42]; $F_{n_{355}}$ 是在 355 nm 激发波长下,440~470 nm 发射波长荧光强度的最大值,代表类腐殖质的相对浓度水平,可以用来判断陆源 CDOM 对水体 CDOM 的组成的贡献^[43]。平水期 $F_{n_{280}}$ 均值为 3.82 ± 0.34 ,丰水期 $F_{n_{280}}$ 均值为 5.80 ± 0.63 (图 5d),丰水期均值显著高于平水期 ($P \leq 0.05$),表明丰水期门楼水库类蛋白质物质浓度相较于平水期有明显升高,这是由于丰水期升高的水温促进了水体和沉积物中微生物的代谢^[30],加快了有机物的分解和释放,与上文 CDOM 荧光强度相对比例分析

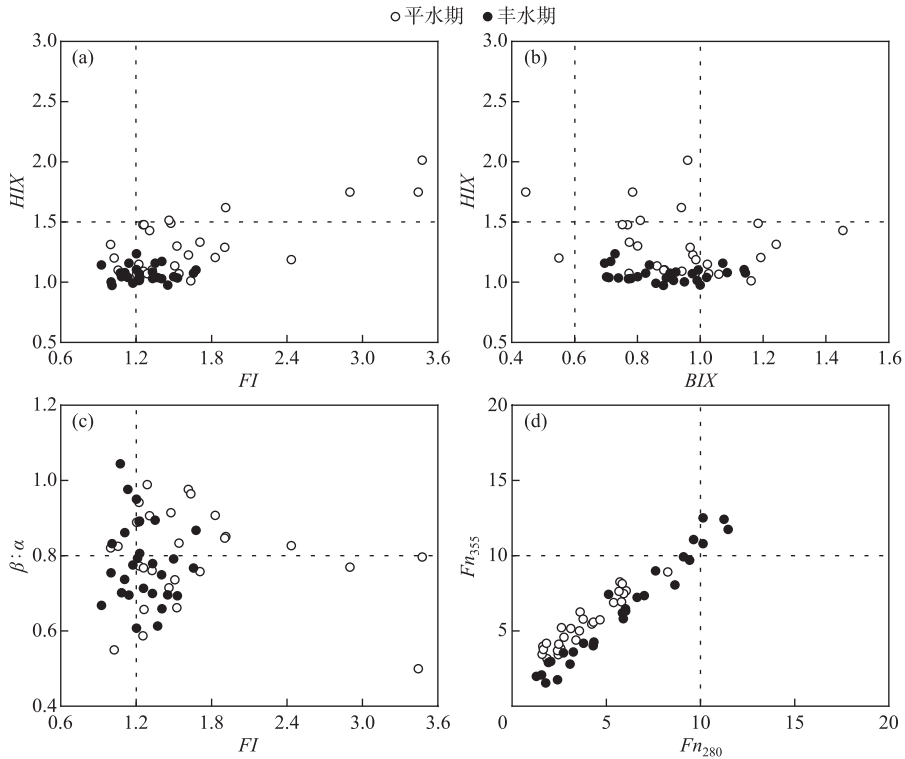


图5 平-丰水期门楼水库水体 CDOM 的 $FI-HIX$ (a)、 $BIX-HIX$ (b)、 $FI-\beta:\alpha$ (c) 和 $F_{n_{280}}-F_{n_{355}}$ (d) 分布

Fig.5 Distribution of CDOM $FI-HIX$ (a), $BIX-HIX$ (b), $FI-\beta:\alpha$ (c) and $F_{n_{280}}-F_{n_{355}}$ (d) of water bodies in Menlou Reservoir in normal and wet seasons

所得结论一致。平水期 $F_{n_{355}}$ 均值为 5.51 ± 0.33 , 丰水期 $F_{n_{355}}$ 均值为 6.36 ± 0.69 , 丰水期均值略高于平水期, 表明丰水期类腐殖质浓度水平相比平水期略有升高。

综上所述, 荧光参数 FI 、 HIX 和 BIX 均表明门楼水库平、丰水期 CDOM 受内源和外源输入共同影响, 以内源为主, 其具有较强的自生源特性。丰水期 FI 相比于平水期有明显降低, 丰水期类腐殖质浓度和类蛋白质浓度都高于平水期, 与荧光强度结果一致。 HIX 、 BIX 和 $\beta:\alpha$ 在两个水期未表现出差异性, 表明门楼水库水体腐殖化程度、自生源贡献比例以及生物活性与水期无显著影响关系。

2.2 紫外-可见吸收光谱特征

研究选 254 和 355 nm 处的吸收系数 a_{254} 和 a_{355} 来表示 CDOM 的相对浓度^[9], 吸收系数与 CDOM 相对浓度呈正比, 同时选用 $E2/E3$ 、 $E3/E4$ 、 $SUVA_{260}$ 、 $SUVA_{280}$ 等紫外光谱参数反映 CDOM 相关特征。

a_{254} 可用于判断湖库的富营养化程度(图 6a、6b), 平水期 a_{254} 和 a_{355} 分别为 (8.76 ± 0.04) 和 $(0.67 \pm 0.02) m^{-1}$; 丰水期 a_{254} 和 a_{355} 分别为 (7.69 ± 0.04) 和 $(0.59 \pm 0.02) m^{-1}$ 。两个水期 a_{254} 均处于 $4 \sim 10 m^{-1}$ 之间, 表明该水库处于中营养状态^[44]。平水期 a_{254} 和 a_{355} 均显著高于丰水期 ($P \leq 0.05$), 表明平水期 CDOM 相对浓度高于丰水期, 水库富营养化程度在丰水期也略有下降。这是由于丰水期降水远高于平水期, 大量 CDOM 较低的降水直接或间接汇入水库, 导致蓄水量迅速上升的同时 CDOM 相对浓度被稀释降低, 因此 a_{254} 和 a_{355} 均有明显降低。

$E2/E3$ 是 250 nm 和 365 nm 处的紫外吸光度之比, 可以反映 CDOM 相对分子质量大小, 其值越高, CDOM 相对分子质量越小^[45]。如图 6c 所示, 平水期 $E2/E3$ 均值为 17.57 ± 0.51 , 丰水期 $E2/E3$ 均值为 $20.26 \pm$

1.28。结合前人研究^[9,46],门楼水库 E2/E3 是其他水库 E2/E3 的两倍以上,表明门楼水库 CDOM 与其他水库相比具有相对分子质量小的特点。丰水期 E2/E3 值略高于平水期,表明水库丰水期暴雨径流输入更小分子的 CDOM,导致丰水期 CDOM 相对分子质量降低。E3/E4 是 300 和 400 nm 处的紫外吸光度之比,一般而言,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^[46]。如图 6d 所示,平水期 E3/E4 均值为 21.78±2.36,丰水期 E3/E4 均值为 13.30±1.08。对比我国北方其他水源水库,门楼水库 E3/E4 处于高水平状态,表明该水库水体中腐殖质中富里酸所占比例高于其他类型水库。丰水期 E3/E4 明显低于平水期,说明丰水期水库中汇入的 CDOM 中富里酸浓度较低,导致水体腐殖质中富里酸相对浓度相比平水期有明显下降。

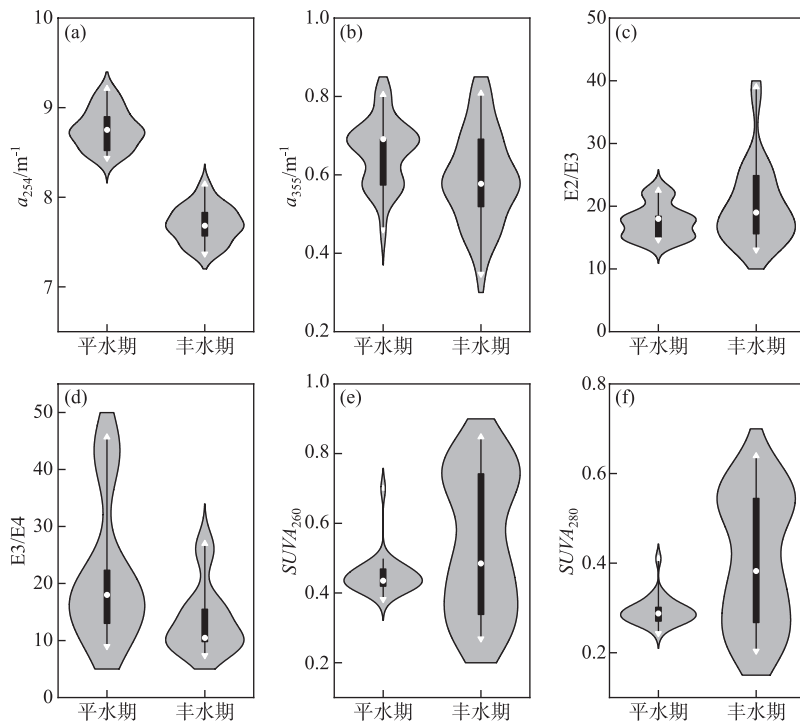


图 6 平—丰水期门楼水库水体 CDOM 的 a_{254} (a)、 a_{355} (b)、E2/E3 (c)、E3/E4 (d)、 $SUVA_{260}$ (e) 和 $SUVA_{280}$ (f)

Fig.6 a_{254} (a), a_{355} (b), E2/E3 (c), E3/E4 (d), $SUVA_{260}$ (e) and $SUVA_{280}$ (f) of the CDOM of water bodies in Menlou Reservoir in normal and wet seasons

$SUVA_{260}$ 为 a_{260} 和 DOC 浓度的比值,用来衡量 CDOM 疏水性组分比例,其值越大,疏水性组分比例越高^[47],其参与污染物迁移转化的活性可能就越高^[48]; $SUVA_{280}$ 为 a_{280} 和 DOC 浓度的比值,用来衡量 CDOM 芳香性强弱,其值越大,CDOM 芳香性越强^[49]。如图 6e、f 所示,平水期 $SUVA_{260}$ 均值为 0.39 ± 0.10 ,丰水期 $SUVA_{260}$ 均值为 0.55 ± 0.20 ;平水期 $SUVA_{280}$ 均值为 0.30 ± 0.07 ,丰水期 $SUVA_{280}$ 均值为 0.41 ± 0.14 。无论是 $SUVA_{260}$ 还是 $SUVA_{280}$,丰水期都显著高于平水期 ($P \leq 0.05$),表明 CDOM 疏水性有机组分所占比例和芳香性化合物含量在丰水期均大于平水期。 $SUVA_{260}$ 和 $SUVA_{280}$ 在两个水期均呈现显著正相关关系 ($P \leq 0.01$),这是因为 CDOM 芳香性结构主要存在于疏水性成分之中,与高洁等^[50]对三峡库区土壤中 CDOM 研究所得结论一致。

综上所述,门楼水库水体在两个水期都处于中营养状态,水体腐殖质以富里酸为主。与其他类型水源水库相比,门楼水库水体 CDOM 具有水腐殖质中富里酸含量更高、相对分子量更小的特点。由于大量降水在丰水期汇入水库,降水中 CDOM 浓度较低,相对分子量也很低,导致水库 CDOM 浓度被稀释,CDOM 相对

分子量也被拉低,导致丰水期 CDOM 相对浓度及相对分子量显著低于平水期。相比于平水期,相对低浓度的富里酸随径流汇入水库可能是导致丰水期腐殖质中富里酸相对含量降低的原因之一。 $SUVA_{260}$ 和 $SUVA_{280}$ 在丰水期都有显著升高,表明丰水期 CDOM 疏水性组分比例和 CDOM 芳香化程度都高于平水期,参与污染物迁移转化的活性可能也高于平水期。

2.3 水体理化性质、荧光组分及光谱参数的相关关系

CDOM 的组成和结构参数的相关性变化可以解释内外源输入机制与变化^[51],为了进一步研究门楼水库不同水期表层水体样品的 CDOM 特征,本研究对丰水期和平水期共 54 个表层水体样本进行了 Pearson 相关性分析,探讨了门楼水库水质理化性质、CDOM 荧光组分和光谱参数的关系(图 7)。结果表明,C1 组分与 C2 组分呈显著正相关($P \leq 0.01$),说明水库 CDOM 的两种组分有着相同的来源; F_n_{280} 、 F_n_{355} 同样与 C1、C2 呈显著正相关,与其上文分别描述的特征意义一致; $SUVA_{260}$ 与 $SUVA_{280}$ 呈显著正相关($P \leq 0.01$),说明 CDOM 疏水性和芳香性显著相关,其成分具有同质性变化,与前文所得结论一致; $SUVA_{260}$ 和 $SUVA_{280}$ 都是由 DOC 浓度标准化的吸光系数,因此与 DOC 呈显著负相关($P \leq 0.01$),说明紫外—可见光谱参数在一定程度上可以用来估算 DOC 的浓度;Chl.*a* 浓度作为表征浮游植物生物量的指标,与 DOC、 a_{254} 呈显著正相关($P \leq 0.01$),表明浮游植物的内源生产是门楼水库有机碳的重要来源。因此,将来可以通过应用水体的 CDOM 特征参数和理化指标对水体 CDOM 组分进行多元线性回归拟合^[46],建立 CDOM 特征参数与常规水质参数的数学模型,以此评估引黄水源水库不同时期水体 CDOM 的荧光组分及荧光特征,从而为引黄水源水库管理人员提供有机污染物评价的参考。

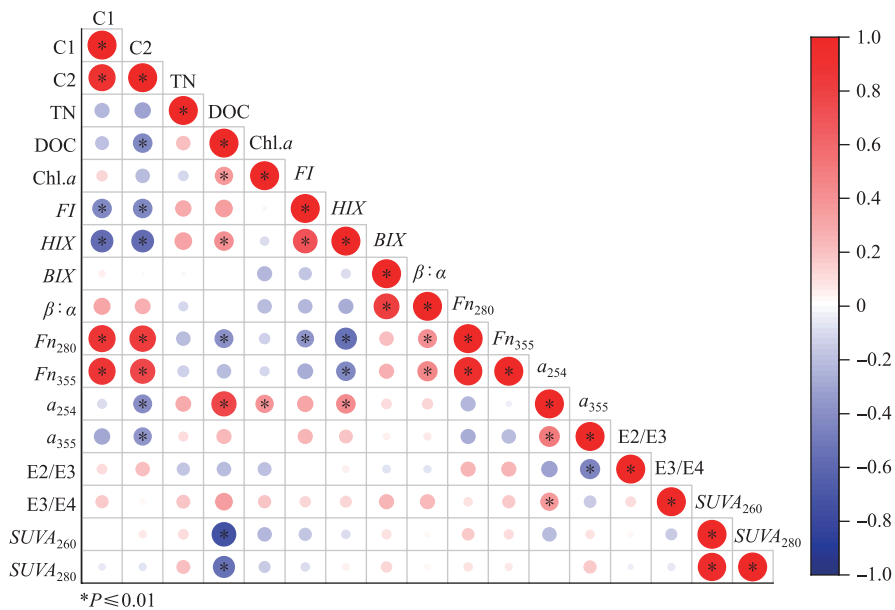


图 7 平—丰水期门楼水库水体 CDOM 荧光组分、特征参数和水质参数的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of fluorescence components, characteristic parameters and water quality parameters of CDOM of water bodies in Menlou Reservoir in normal and wet seasons

3 结论

1)通过对 CDOM 的 PARAFAC 组分鉴定,解析出两种 CDOM 组分,分别是类腐殖质组分 C1 和类蛋白组分 C2。平、丰水期 CDOM 组分荧光强度及所占比例分析结果表明,整体来看,丰水期 CDOM 荧光强度显著高于平水期;平、丰水期 CDOM 组分荧光强度所占比例在 1~17 号样点并无明显差异,而 18~27 号样点受人类活动及水期影响较大,在平、丰水期呈现显著差异。

2) 紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱特征参数显示, 门楼水库水体处于中营养状态; 水体 CDOM 具有双重来源, 以自生源为主, 具有腐殖化程度较弱, 相对分子量小的特点。丰水期 CDOM 疏水性组分比例和芳香化程度都高于平水期, 参与污染物迁移转化的活性可能也高于平水期; 丰水期 CDOM 相对浓度低于平水期, 富营养化程度相较于平水期也有降低。

3) 对门楼引黄水源水库水质理化性质、荧光组分及光谱参数的相关性分析, 有助于建立光谱指数、水质污染情况和有机物组成的相关联系, 利于工作人员对不同时期引黄水源水库有机污染物进行评估。

4 参考文献

- [1] Driscoll CT, Lehtinen MD, Sullivan TJ. Modeling the acid-base chemistry of organic solutes in Adirondack, New York, lakes. *Water Resources Research*, 1994, **30**(2): 297-306. DOI: 10.1029/93wr02888.
- [2] Jiang T, Wang DY, Wei SQ *et al.* Influences of the alternation of wet-dry periods on the variability of chromophoric dissolved organic matter in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area, China. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 249-259. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.262.
- [3] Zhou SL, Zhang YR, Huang TL *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. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5451-5463. DOI: 10.13227/j.hjxx.201804058. [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. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5451-5463.]
- [4] Derrien M, Brogi SR, Gonçalves-Araujo R. Characterization of aquatic organic matter: Assessment, perspectives and research priorities. *Water Research*, 2019, **163**: 114908. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114908.
- [5] Feng LK, Wang RG, Jia LX *et al.* Can biochar application improve nitrogen removal in constructed wetlands for treating anaerobically-digested swine wastewater? *Chemical Engineering Journal*, 2020, **379**: 122273. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122273.
- [6] Hu B, Wang PF, Qian J *et al.* Characteristics, sources, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in large and shallow Hongze Lake, China. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, **43**(6): 1165-1172. DOI: 10.1016/j.jglr.2017.09.004.
- [7] Guo WD, Huang JP, Hong HS *et al.* Resolving excitation emission matrix spectroscopy of estuarine CDOM with parallel factor analysis and its application in organic pollution monitoring. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1419-1427. DOI: 10.13227/j.hjxx.2010.06.019. [郭卫东, 黄建平, 洪华生等. 河口区溶解性有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1419-1427.]
- [8] Feng KX, Li YF, Jiang X *et al.* Distribution and source analysis of chromophoric dissolved organic matter in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(2): 373-382. [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. *环境化学*, 2016, **35**(2): 373-382.]
- [9] Wang B, Huang TL, Li N *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediment and overlying water of water source reservoir. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3): 1309-1317. [王斌, 黄廷林, 李楠等. 水源水库沉积物及其上覆水 DOM 光谱特征. *中国环境科学*, 2022, **42**(3): 1309-1317.]
- [10] Huang JL, Su J, Sun YY *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in surface sediments of Baishui River. *Environmental Pollution & Control*, 2020, **42**(6): 775-779, 787. [黄俊霖, 苏婧, 孙源媛等. 白水江表层沉积物溶解性有机质荧光特性研究. *环境污染与防治*, 2020, **42**(6): 775-779, 787.]
- [11] Wang ZH, Zou L, Chen HT *et al.* Distribution and transformation of CDOM in the upper waters of western Pacific Ocean in winter. *Haiyang Xuebao*, 2018, **40**(10): 180-189. [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. *海洋学报*, 2018, **40**(10): 180-189.]
- [12] Bai Y, Su RG, Yao QZ *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Bohai Sea and the Yellow Sea using excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC). *Estuaries and Coasts*, 2017, **40**(5): 1325-1345. DOI: 10.1007/s12237-017-0221-6.
- [13] Yao ZX, Sun SH, Li AZ *et al.* Study on quality characteristics of artificial supplementary surface water and surrounding groundwater in Yufu River of Jinan. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(9): 2908-2918. [姚振兴, 孙韶华, 李昂臻等. 济南玉符河人工补源地地表水和周边地下水的品质特征. *环境化学*, 2022, **41**(9): 2908-2918.]
- [14] Zhou YQ, Jeppesen E, Zhang YL *et al.* Chromophoric dissolved organic matter of black waters in a highly eutrophic Chinese lake: Freshly produced from algal scums? *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **299**: 222-230. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.06.024.
- [15] Zhou YQ, Zhang YL, Jeppesen E *et al.* Inflow rate-driven changes in the composition and dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a large drinking water lake. *Water Research*, 2016, **100**: 211-221. DOI: 10.1016/j.watres.2016.05.021.
- [16] Huang TL, Fang KK, Zhang CH *et al.* Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter from Zhoucun Reservoir in summer based on fluorescence spectroscopy and PARAFAC. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3394-3401. DOI: 10.13227/j.hjxx.

- 2016.09.018. [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. 环境科学, 2016, **37**(9): 3394-3401.]
- [17] Zhou L, Zhou YQ, Zhang YL *et al.* Characterizing sources and composition of chromophoric dissolved organic matter in a key drinking water reservoir Lake Tianmu. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3709-3718. DOI: 10.13227/j.hjcx.2020112280. [周蕾, 周永强, 张运林等. 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. 环境科学, 2021, **42**(8): 3709-3718.]
- [18] Zhou SL, Sun Y, Yuan SC *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of chromophoric dissolved organic matter in sediment interstitial water from Gangnan Reservoir. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2635-2645. DOI: 10.13227/j.hjcx.201911274. [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. 环境科学, 2020, **41**(6): 2635-2645.]
- [19] Guo XJ, Song JG, Han YM. Water environmental capacity of a reservoir in Yantai. *Environmental Science & Technology*, 2006, **10**: 43-45, 117. [郭献军, 宋建国, 韩玉梅. 烟台门楼水库水环境容量研究. 环境科学与技术, 2006, **10**: 43-45, 117.]
- [20] Zepp RG, Sheldon WM, Moran MA. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: Correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1/2/3/4): 15-36. DOI: 10.1016/j.marchem.2004.02.006.
- [21] Lawaetz AJ, Stedmon CA. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940. DOI: 10.1366/000370209788964548.
- [22] Wang H, Wang YH, Zhuang WE *et al.* Effects of fish culture on particulate organic matter in a reservoir-type river as revealed by absorption spectroscopy and fluorescence EEM-PARAFAC. *Chemosphere*, 2020, **239**: 124734. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124734.
- [23] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains I. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53. DOI: 10.4319/lo.1981.26.1.0043.
- [24] Keith DJ, Yoder JA, Freeman SA. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett Bay, Rhode island: Implications for phytoplankton in coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **55**(5): 705-717. DOI: 10.1006/ecss.2001.0922.
- [25] Zhang YL, Yin Y, Feng LQ *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5110-5122. DOI: 10.1016/j.watres.2011.07.014.
- [26] Stedmon CA, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **6**(11): 572-579. DOI: 10.4319/lom.2008.6.572b.
- [27] Coble PG. Marine optical biogeochemistry: The chemistry of ocean color. *Chemical Reviews*, 2007, **107**(2): 402-418. DOI: 10.1021/cr050350+.
- [28] Zhou SL, Zhang YR, Huang TL *et al.* Spectral characteristics and sources of rainstorms dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir during flood season. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 493-506. DOI: 10.18307/2019.0218. [周石磊, 张艺冉, 黄廷林等. 周村水库汛期暴雨中溶解有机物(DOM)的光谱特征及来源解析. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 493-506.]
- [29] Liu RX, Lead JR, Zhang H. Combining cross flow ultrafiltration and diffusion gradients in thin-films approaches to determine trace metal speciation in freshwaters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **109**: 14-26. DOI: 10.1016/j.gea.2013.01.030.
- [30] Yang X, Wu ZH, Ye Y *et al.* Parallel factor analysis of fluorescence excitation emission matrix spectroscopy of DOM in waters of agricultural watershed of Dianbu River. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, **42**(3): 978-983. [杨欣, 吴支行, 叶寅等. 店埠河农业小流域水体溶解性有机质三维荧光光谱的平行因子分析. 光谱学与光谱分析, 2022, **42**(3): 978-983.]
- [31] Ni MF, Zhou H, Ma YM *et al.* Dissolved organic matter component and source characteristics of the metropolitan lakes and reservoirs in a typical Karst region. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3552-3561. DOI: 10.13227/j.hjcx.202110159. [倪茂飞, 周慧, 马永梅等. 典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析. 环境科学, 2022, **43**(7): 3552-3561.]
- [32] Liu YY, Qin JH, Liu C *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rivers of western Sichuan Plateau based on EEM-PARAFAC analysis. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 720-728. DOI: 10.13227/j.hjcx.201708208. [刘堰扬, 秦纪洪, 刘琛等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征. 环境科学, 2018, **39**(2): 720-728.]
- [33] Hood E, Gooseff MN, Johnson SL. Changes in the character of stream water dissolved organic carbon during flushing in three small watersheds, Oregon. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(G1): G01007. DOI: 10.1029/2005jg000082.
- [34] Wheeler KI, Levina DF, Hudson JE. Tracking senescence-induced patterns in leaf litter leachate using parallel factor analysis (PARAFAC) modeling and self-organizing maps. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, **122**(9): 2233-2250. DOI: 10.1002/2016jg003677.
- [35] Stedmon CA, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697. DOI: 10.4319/lo.2005.50.2.0686.
- [36] Li X, Ma WX, Huang TL *et al.* Spectroscopic fingerprinting of dissolved organic matter in a constructed wetland-reservoir ecosystem for

- source water improvement—a case study in Yanlong Project, eastern China. *Science of the Total Environment*, 2021, **770**: 144791. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144791.
- [37] Cory RM, McKnight DM. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149. DOI: 10.1021/es0506962.
- [38] Lavonen EE, Kothawala DN, Tranvik IJ *et al.* Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production. *Water Research*, 2015, **85**: 286-294. DOI: 10.1016/j.watres.2015.08.024.
- [39] Zhang YL, Zhang EL, Yin Y *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659. DOI: 10.4319/lo.2010.55.6.2645.
- [40] Ohno T, Fernandez IJ, Hiradate S *et al.* Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties. *Geoderma*, 2007, **140**(1/2): 176-187. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.04.004.
- [41] Birdwell JE, Engel AS. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-vis absorbance and fluorescence spectroscopy. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(3): 270-280. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2009.11.002.
- [42] Zhou SL, Zhang YR, Huang TL *et al.* Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter with different relative molecular weight from rainwater from summer and autumn in the Zhoucun Reservoir based on UV-vis and EEMs. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 172-184. DOI: 10.13227/j.hjxx.201805215. [周石磊, 张艺冉, 黄廷林等. 基于 UV-vis 及 EEMs 解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量 DOM 的光谱特征及来源. 环境科学, 2019, **40**(1): 172-184.]
- [43] Zhou SL, Sun Y, Zhang YR *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. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 213-223. DOI: 10.13227/j.hjxx.201906007. [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. 环境科学, 2020, **41**(1): 213-223.]
- [44] Zhang YL, Zhou YQ, Shi K *et al.* Optical properties and composition changes in chromophoric dissolved organic matter along trophic gradients: Implications for monitoring and assessing lake eutrophication. *Water Research*, 2018, **131**: 255-263. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.051.
- [45] Niu C, Zhang YL, Zhu GW *et al.* Comparison of optical properties of DOM and CDOM in Lake Tianmuhu Catchment. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 998-1007. [牛城, 张运林, 朱广伟等. 天目湖流域 DOM 和 CDOM 光学特性的对比. 环境科学研究, 2014, **27**(9): 998-1007.]
- [46] Zhou SL, Sun Y, Zhang YR *et al.* Impact of seasonal variations on distribution and spectral characteristics of dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(10): 3492-3502. DOI: 10.13671/j.hjxxb.2019.0277. [周石磊, 孙悦, 张艺冉等. 周村水库四季变化过程中水体溶解性有机物的分布与光谱特征. 环境科学学报, 2019, **39**(10): 3492-3502.]
- [47] Wang QL, Jiang T, Zhao Z *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in waters of typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir areas. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2082-2092. DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.011. [王齐磊, 江韬, 赵铮等. 三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征. 环境科学, 2016, **37**(6): 2082-2092.]
- [48] Li SD, Jiang QL, Li Y *et al.* Spectroscopic characteristics and sources of dissolved organic matter from soils around Dianchi Lake, Kunming. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(5): 1448-1454. [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. 光谱学与光谱分析, 2017, **37**(5): 1448-1454.]
- [49] Liang J, Jiang T, Lu S *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) releases from soils of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas: UV-vis spectrum. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2496-2505. DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.011. [梁俊, 江韬, 卢松等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱. 环境科学, 2016, **37**(7): 2496-2505.]
- [50] Gao J, Jiang T, Li LL *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. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 151-162. DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.020. [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. 环境科学, 2015, **36**(1): 151-162.]
- [51] Fan SY, Qin JH, Liu YY *et al.* Seasonal variations of DOM spectral characteristics in the surface water of the upstream Minjiang River. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4530-4538. DOI: 10.13227/j.hjxx.201802001. [范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨等. 岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化. 环境科学, 2018, **39**(10): 4530-4538.]