

大型城市人工湖——滴水湖水体有色可溶性有机物的来源和组成特征初步研究*

瞿烨玲^{1,2}, 闵春添³, 徐俊洁³, 王婷⁴, 张玮^{1,2**}, 徐后涛⁵, 王丽卿^{1,2}

(1: 上海海洋大学环境 DNA 技术与水生生态健康评估工程中心, 上海 201306)

(2: 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306)

(3: 上海城投兴港市政管理有限公司, 上海 201306)

(4: 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092)

(5: 上海水生科技股份有限公司, 上海 200090)

摘要: 水体溶解性有机物 (DOM) 是湖泊生态系统中碳循环的重要组成部分; 为了解城市化建设对湖泊 DOM 特征的影响, 本文以目前国内最大城市人工湖——上海滴水湖为例, 利用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术, 探讨了冬季到夏季 (1 月、3 月和 7 月) 过程中, 滴水湖及周围水系中有色可溶性有机物 (CDOM) 组成的时空变化特征, 初步探究了上海临港新城城市化建设对水体 CDOM 组成和来源的影响。结果表明: ①平行因子分析法 (PARAFAC) 解析 CDOM 三维荧光图谱发现, 滴水湖及相连河道水体主要有类酪氨酸 C1、类色氨酸 C2 和陆源类腐殖质 C3 三类 CDOM 物质, 其中类蛋白质组分 (C1 和 C2) 的荧光强度贡献占比降低, C3 的贡献占比升高; ②自生源指数 (BIX) 绝大多数位点都>1.0 或接近 1, 荧光指数 (FI) 均值在 1.4-1.9 之间, 说明从冬季到夏季过程中受到内源和外源输入的双重影响, 以生物活动产生 (微生物源) 为主, 且具有较强的自生源特征; 春、夏季受到降雨量/地表径流的外源输入影响, CDOM 相对浓度被稀释降低, 1 月 $a(254)$ 显著高于 3 月和 7 月 ($P<0.01$), 且 CDOM 分子量较小; ③滴水湖周围河道的用地类型以居民区和新建公园为主, 以及建设中的建筑工地, $0.8<BIX<1.0$ 或 $BIX>1$, 表明水体生物代谢活性较高, CDOM 受人为活动影响较大, 而 C3 荧光强度呈现河道至湖区逐渐降低, 表明陆源类腐殖质主要经河道进入滴水湖; ④荧光参数 BIX、FI 分别与类蛋白组分、水体氮浓度呈显著相关 ($P<0.05$), 可以作为滴水湖后续水质监测的潜在指标。本研究发现降雨量、径流输入、用地类型和快速城市化建设等因素共同影响着滴水湖水系的 CDOM 特征, 相关结果可为进一步了解城市化发展背景下, 城市水体溶解性有机物的组成特征和水环境的科学管理, 提供基础支撑。

关键词: 滴水湖; 有色可溶性有机物; 城市建设; 用地类型; 大型人工湖泊

A preliminary study on the source and composition characteristics of chromophoric dissolved organic matter in Dishui Lake, a large urban artificial lake*

Qu Yeling^{1,2}, Min Chuntian³, Xu Junjie³, Wang Ting⁴, Zhang Wei^{1,2**}, Xu Houtao⁵, Wang Liqing^{1,2}

(1: Engineering Research Center of Environmental DNA and Ecological Water Health Assessment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R. China)

(2: Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R. China)

(3: Shanghai Chengtou Xinggang Municipal Management Co., Ltd., Shanghai 201306, P.R. China)

* 2024-10-13 收稿; 2025-03-07 收修稿。

上海城投 (集团) 有限公司科技创新计划项目 (重点研发)、国家自然科学基金项目 (U23A20153) 和上海市科委科研项目 (19DZ1204504) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: weizhang@shou.edu.cn。

(4: Shanghai Aquatic Wildlife Conservation Research Center, Shanghai 200092, P.R. China)

(5: Shanghai Aquatic Science and Technology Co.,Ltd., Shanghai 200090, P.R. China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) in the water columns constitutes a vital component of the carbon cycle within lake ecosystems. To investigate the impact of urbanization on DOM characteristics of urban lakes, we took Dishui Lake, the largest urban artificial lake in China, as a case study. We examined the temporal and spatial variation characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Dishui Lake and its surrounding water system from winter to summer (January, March, and July) using ultraviolet-visible absorption spectroscopy and three-dimensional fluorescence spectroscopy. The influence of the urban construction, Lingang New City, Shanghai, on the composition and source of CDOM in water was preliminarily explored. The results are as follows: ①Tyrosine-like C1, tryptophan-like C2 and terrestrial humic-like C3 were identified through parallel factor analysis (PARAFAC). The contribution of protein-like (C1 and C2) components to fluorescence intensity decreased, while the contribution of C3 increased. ②Most values of the autogenetic index (*BIX*) is >1.0 or close to 1, and the fluorescence index (*FI*) ranged from 1.4 to 1.9, indicating that the characteristics of CDOM during the temperature rising (from winter to summer) is influenced by both endogenous and exogenous inputs, and biological activity (microbial source) is the main source and has strong autogenetic characteristics. Influenced by exogenous input from rainfall or surface runoff, the relative concentration of CDOM was diluted and decreased in the spring and summer seasons. In January, a (254) was significantly higher than that in March and July ($P<0.01$), and the molecular weight of CDOM was low. ③The land use types of river channels around the lake are primarily residential areas and newly built parks, and building site under construction with $0.8<BIX<1.0$ or $BIX>1$, high biological metabolic activity in the water body and significant impact of CDOM on human activities. The C3 fluorescence intensity gradually decreased from the river channels to the lake district, indicating that terrestrial humic-like substances mainly entered Dishui Lake through river channel. ④The fluorescence parameters BIX and FI were significantly correlated with protein-like components and nitrogen concentrations ($P<0.05$), can serve as potential indicators for future water quality monitoring of Dishui Lake. Our study suggests that rainfall, runoff input, land use type, and rapid urbanization collectively affect the CDOM characteristics of the lake, and the relevant results can provide a basis for further understanding the composition characteristics and water environment management of dissolved organic matter in urban water bodies under the background of urban development.

Keywords: Dishui Lake; CDOM; urban construction; land use type; large urban artificial lake

溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM) 是全球最大的碳库之一, 在天然水体的生物地球化学循环中起着至关重要的作用^[1]. DOM 作为含有碳、氮、磷和硫的复杂混合物, 能够为湖泊初级生产力提供重要的能量, 同时也可以通过吸附和络合等多种机制, 影响湖泊生态系统中污染物的迁移和转化过程^[2]. 有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 是 DOM 中能够强烈吸收光谱中紫外和可见光的部分, 在减弱紫外线对水生生态系统不利影响的同时, 还会改变水下光强的分布, 进而影响水生生物^[2]. 此外, 其组成成分和来源复杂, 主要由腐殖质、富里酸、氨基酸和碳水化合物等物质组成, 通过外源 (如地表径流、工业废水和生活污水等) 和内源 (如水体中动物、植物和微生物代谢活动等自然界产生) 两种途径进入水体^[3]. 有研究表明, 与 CDOM 相关的一些参数, 如荧光指数 (*FI*) 和自生源指数 (*BIX*), 可以用于表征水质情况^[4-5], 也可以作为追溯污染源的良好参数^[6]. 近年来, 国内外研究者运用三维荧光结合平行因子分析法 (EEMs-PARAFAC) 对 CDOM 的光学特性、来源组成和时空分布进行大量研究, 但主要关注对象集中在天然湖泊 (如高邮湖、东平湖^[7]和太湖^[8]等)、海洋^[9]以及河口^[10]等水域。

城市化作为全球社会和经济发展的趋势, 对促进社会、经济发展以及提高人们的生活质量和城市文明水平具有重要作用. 据相关报道估测, 我国城镇化率在 2050 年将达到 71.2%^[11]. 然而, 随着城市化的进程, 会增强该地区的土地开发利用, 同时这也会改变水体污染物的类型, 加剧污染程度^[12]. Charles 等^[13]通过对比加拿大魁北克省不同城市化地区河流的土地利用类型和地貌特征, 并分析了城市化对河流中碳、氮、磷通量的影响, 发现氮是所有元素中响应最强烈的, 并显著地受到土地利用的影响. 城市水体中的 DOM

作为一种重要的碳库,其组成和来源较易受到城市发展和人为活动的影响。Zhang 等^[14]通过对武汉市多个中心城区的河流进行分析发现,极端人为干扰和高植被覆盖度均可显著改变城市河流 DOM 的特征;Lyu 等^[15]研究了长春市城市水体和非城市水体,发现城市水体 DOM 具有高度的时空差异,城市化会导致水体 DOM 组成更趋向于类蛋白质组分占优。受人为活动的影响,外源性 DOM 在提供营养物质的同时,也会增加浮游植物降解释放的内源性 DOM 和微生物诱导的难降解 DOM 的产生^[2]。张怡恒等^[16]通过对比英国伯明翰市 3 条城市河流与非城市河流的 CDOM 来源与组成变化,发现城市湖泊 CDOM 受人类活动的影响,自生源类荧光成分富集,较非城市湖泊 CDOM 更具生物活性。此外,还有学者对韩国的琴湖江流域^[17]、美国佛罗里达州的阿拉菲亚河^[18]、中国宁波市的四明湖^[19]等不同城市水体 CDOM 特征进行了报道。尽管这些研究从营养盐和 DOM 组成变化等角度,比较了城市水体和非城市水体了差别,也分析城市化对河流和公园水体的影响,但对于大型城市人工湖,尤其是新城建设中人工湖水体 CDOM 响应特征的研究,仍相对有限。

城市人工湖作为城市生态系统的重要组成部分,具有防洪排涝、美化居住环境、提供市民休憩场所等多重生态服务功能。然而,与很多自然湖泊相比,其面积相对较小、水动力较弱、水环境容量有限,自净能力也有限,使得城市湖泊普遍面临水质恶化的问题,如容易水体富营养化、藻类水华频发以及水体黑臭等现象^[20-21]。滴水湖水系位于中国(上海)自由贸易试验区临港新片区(下称“临港新片区”)主城区,其中滴水湖水面积约 5.56 km²,是目前国内最大的城市人工湖,具有城市景观生态、防洪调水、旅游观光等综合功能^[15]。自 2019 年临港新片区成立开始,政府部门加大对主城区的开发力度,各类公共设施建筑、居民区、道路以及公园用地等快速增加,近半数的土地处于建设状态^[22-23];土地利用结构和类型的变化,也导致水体水质参数受到一定程度的干扰^[15]。本文对滴水湖及其周围水系中 CDOM 的时空分布特征和环境要素进行了调查,分析了滴水湖及其周围水系 CDOM 来源和组成特征,以期为进一步了解城市化发展背景下,城市水体溶解性有机物的组成特征和水环境的科学管理,提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样点布设

滴水湖于 2003 年开挖建成,毗邻东海,由“一湖、四连、七射”组成城市水网结构。本研究于 2024 年 1 月(冬季)、3 月(春季)、7 月(夏季),在滴水湖共设置了 17 个采样点采集表层水样,按照滴水湖水系特征及周边土地利用类型将采样点分为滴水湖湖区(st1-5)、入湖口(st6-12)和河道(st13-17)共 3 个区域(图 1b)。自 2019 年临港新片区成立开始,围绕滴水湖开展了大规模的新城建设,图 1c 展示滴水湖西部土地利用类型。研究期间(2023 年 12 月-2024 年 7 月)的月降雨量在 31.6-310.8 mm 之间,最高在 6 月,12 月最低(图 1d;数据来源于国家气象数据中心)。

1.2 样品采集及常规理化测定

用 5 L 采水器于水面以下 50 cm 和 150 cm 处采集混合水样 1 L。水样采集后立即带回实验室,当天取部分水样进行测定,参考张运林和张文浩等人^[24-25]的研究,主要测定了溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、氨氮(NH₃-N)、叶绿素 a(Chl.a)和高锰酸盐指数(COD_{Mn}),测定方法参考《水和废水监测分析方法》(第四版)^[26]。用 0.45 μm 微孔滤膜过滤水样,过滤后的水样在 4℃ 的条件下冷藏储存,用于测定 DOC 以及紫外-可见与三维荧光光谱分析。所有水样中溶解性有机碳(DOC)采用有机碳分析仪(岛津,TOC-L)测定,用 Milli-Q 超纯水作空白。

1.3 DOM 的测定与分析

利用紫外-可见吸收光谱采用 UV-2800 型紫外可见分光光度计进行测定,以 Milli-Q 水为空白,用 1 cm 石英比色皿进行吸光度测定。本研究采用波长 254 nm 处的吸收系数 a(254)作为水样中 DOM 的相对浓度。紫外-可见吸收光谱的相关参数 a(254)、E2/E3、E3/E4 的计算和含义如表 1 所示。

三维荧光光谱采用岛津 RF-6000 荧光分光光度计进行测定。利用 Milli-Q 超纯水作空白,激发波长(Ex)设置范围为 200—440 nm,数据间隔为 5 nm;发射波长(Em)为 250—600 nm,数据间隔为 5 nm,扫描速度为 2000 nm/min。把样本的三维荧光图谱扣除 Milli-Q 超纯水的空白三维荧光图谱来去除纯水散

射的影响，并将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^[31]。

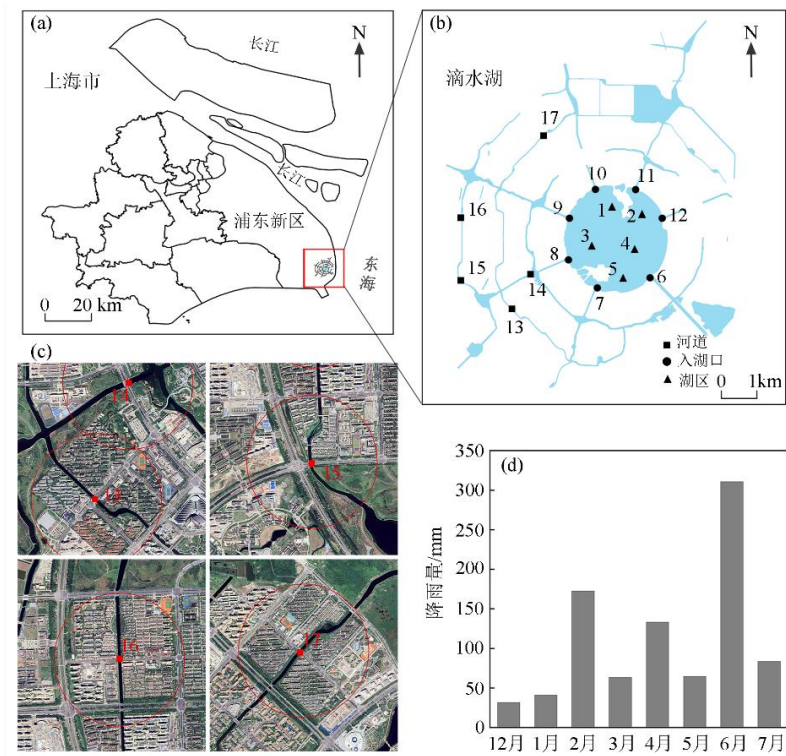


图 1 (a) 研究区位置, (b) 滴水湖及入湖河道的采样点位置, (c) 滴水湖周围河道地区用地类型图, (d) 浦东新区 2023 年 12 月-2024 年 7 月的月降雨量

Fig. 1 (a) Location of study area; (b) The location of sampling sites; (c) Land type map of the rivers connected to the Dishui Lake; (d) Monthly rainfall in Pudong New Area from December 2023 to July 2024

采用 Matlab R2017b 调用 DomFluor 工具箱进行 PARAFAC 分析, 将所有样品的荧光矩阵组合, 构成一个新的三维矩阵组进行平行因子处理, 得到可识别的荧光峰, 以及每个样本每个组分的荧光强度和发射、激发光负荷。通过残差分析和对半分析来确定结果的可靠性。本研究用平行因子分析结果中的最大荧光强度 ($F_{\max}$) 来表征 DOM 各组分的浓度和荧光组分强度^[8]。三维荧光光谱的相关参数荧光指数 (FI)、自生源指数 (BIX) 以及腐殖化指数 (HIX) 的计算和意义如表 1 所示。

1.4 统计分析与作图

通过 SPSS 25 软件进行数据统计分析, 包括平均值、标准差、单因素方差分析和 Spearman 相关性分析, $P < 0.01$ 为相关性极显著; $0.01 < P < 0.05$ 为相关性显著; $P > 0.05$ 为相关性不显著。通过 Origin 2021 和 R 软件进行图表绘制。采样点位置图、用地类型图和空间插值图均用 ArcMap 10.8 绘制。其中, 用地类型通过 ArcMap 载入滴水湖及周围水系影像图和河道采样点经纬度数据, 参考金春玲等^[37]人的研究, 将缓冲区线性单位设置为 500 m, 再对缓冲区内的用地类型进行划分, 分为居民区、水体、绿地和道路四种用地类型, 最后通过属性表中的几何计算求出相应面积。进一步参考 Hosen 等^[38]人的研究, 计算了不透水覆盖率 (包括居民区和城市道路用地类型面积的占比)。

2 结果

2.1 主要水质参数特征和用地类型

水环境调查结果发现, DTN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 1 月高于 3 月、7 月 ($P < 0.05$); DTP 浓度为 1 月 $>$ 7 月

>3月；Chl.a和COD_{Mn}浓度均表现为7月>3月>1月，7月显著高于1月（P<0.05）。如图2所示，从空间分布上看，1月不同区域DTN、COD_{Mn}、Chl.a的浓度表现为河道高，入湖口和湖区低；DTP和NH₃-N表现为湖区高，入湖口和河道低。3月DTN和DTP表现为河道高，入湖口和湖区低；NH₃-N为入湖口高，湖区和河道低；COD_{Mn}和Chl.a为湖区高，河道和入湖口低。7月DTP、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl.a、DTN为河道高，湖区和入湖口低。

表 1 CDOM 光学参数特征
Tab. 1 Variation characteristics of CDOM optical parameters

光谱参数	参数定义	参数相关描述
吸收系数 a_{λ}	$a(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda) / r$ $A(\lambda)$ 为吸光度； r 为光程路径 (m)	表征 CDOM 的相对浓度，值越大，CDOM 浓度越高 ^[27-28]
E2/E3	$a(250)$ 与 $a(365)$ 的比值	可以反映 CDOM 相对分子质量大小，与 CDOM 相对分子质量大小成反比 ^[29]
E3/E4	$a(300)$ 与 $a(400)$ 的比值	表征腐殖质的腐殖化程度，与腐殖质的腐殖化程度成反比。E3/E4<3.5 时，腐殖质以腐殖酸为主，腐殖化程度较高 ^[30]
荧光指数 (FI)	Ex=370 nm 时，Em 在 470 nm 与 520 nm 处荧光强度比值	作为物质来源的指示指标，>1.9 以内源为主，<1.4 时内源贡献相对较低，主要源于外源输入 ^[32-33]
自生源指数 (BIX)	Ex=310 nm 时，Em 在 380 nm 与 430 nm 处荧光强度比值	表征 CDOM 自生源相对贡献，BIX 越大，自生源特性越强，0.7<BIX<0.8 时，具中度新近自生源特征；0.8<BIX<1.0 时，具有较强的自生源特征；BIX>1.0 时，为生物活动产生 ^[34]
腐殖化指数 (HIX)	Ex=254 nm 时，Em 在 435-480 nm 与 300-345 nm 波段中的荧光强度比	表征 CDOM 腐殖化程度，能一定程度上反映 CDOM 输入源特征。<1.5 时，说明 CDOM 腐殖化程度较弱，表示 CDOM 以自生源为主 ^[35-36]

用地类型分析发现，在缓冲区线性单位 500 m 范围内，位点 6、7、11、12 和 14 号不同土地利用类型的面积占比均值表现为水体（28.81%）>居民区（25.01%）>绿地（20.44%）>农田（19.30%）>道路（6.44%），各位点的不透水覆盖率均小于 50%，均值为 31%；位点 8、9、10、13 和 15-17 号占比均值表现为居民区（57.14%）>水体（16.83%）>绿地（15.52%）>道路（10.51%），不透水覆盖率均大于 50%，均值为 68%（图 1c 和附图 1）。通过对比上述两个区域的水质参数，发现不透水覆盖率大于 50%的区域，其 DTN 显著高于覆盖率小于 50%的区域（P<0.05，附图 2）。

2.2 紫外可见吸收光谱特征

如表 2 和图 3 所示，2024 年 1 月 $a(254)$ 显著高于 3 月和 7 月（P<0.01）。从空间分布上看，1 月不同区域 CDOM 浓度表现为入湖口>湖区>河道，3 月表现为湖区>河道>入湖口，7 月表现为河道>入湖口>湖区，且河道显著高于湖区和入湖口（P<0.05）。DOC 浓度呈现高温季节高于低温季节的变化特征，空间上 7 月河道的 DOC 浓度高于湖区、入湖口。E2/E3 和 E3/E4 的值呈现 3 月和 7 月显著高于 1 月（P<0.01）。从空间分布上看，湖区 E2/E3 值均大于入湖口和河道；1 月三个区域的 E3/E4 的均值较为相近，3 月表现为湖区>入湖口>河道，7 月表现为河道>入湖口>湖区。

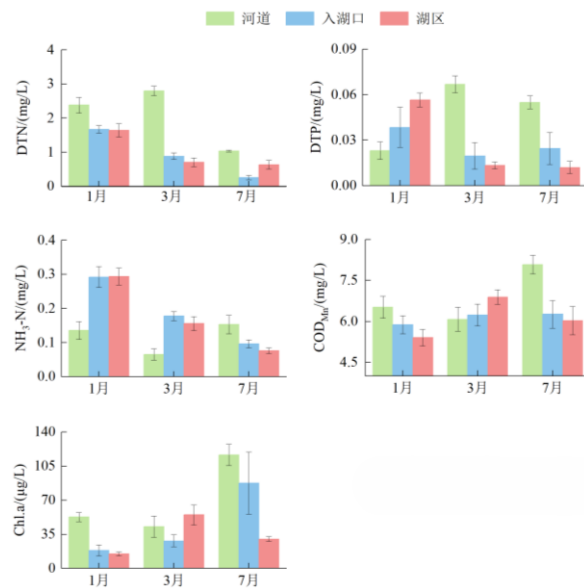


图 2 水质参数的空间变化

Fig. 2 Spatial variation of water quality parameters

表 2 不同月份条件下 CDOM 光学参数的均值

Tab. 2 Mean values of CDOM optical parameters in different months

月份	$a(254)/\text{m}^{-1}$	DOC/ (mg/L)	E2/E3	E3/E4
1 月	35.71 ± 1.79	5.99 ± 4.18	1.49 ± 0.34	1.27 ± 0.07
3 月	21.77 ± 2.54	10.54 ± 6.34	8.46 ± 1.02	7.81 ± 1.67
7 月	24.32 ± 4.44	11.94 ± 12.94	6.55 ± 0.55	5.01 ± 0.46

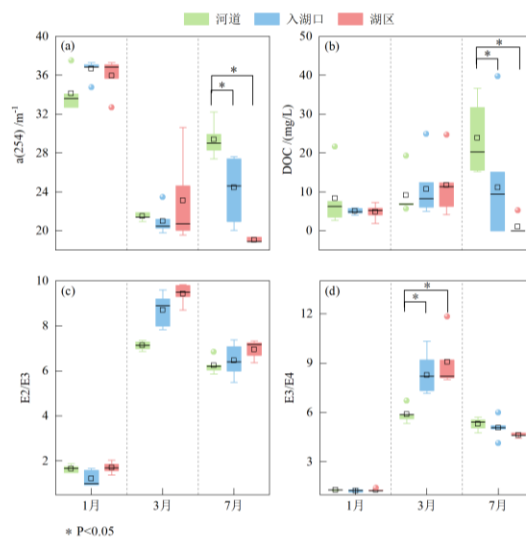


图 3 不同月份 CDOM 的 $a(254)$ (a)、DOC(b)、E2/E3(c)和 E3/E4(d)

Fig. 3 $a(254)$ (a), DOC(b), E2/E3(c), and E3/E4(d) of CDOM in different months

2.3 表层水 CDOM 的荧光组分特征分析

2.3.1 表层水 CDOM 的荧光组分分析 采用 PARAFAC 模型对滴水湖表层的水样分析得出 3 个荧光组分，其中包括一个类腐殖质组分（C3）和二一个类蛋白质组分（C1、C2）（图 4）。结合前人相关研究成果（表 3），综合分析得到：组分 C1（Ex/Em=<230,275/320）为类酪氨酸，可以表征内源 CDOM，其主要成分包括细菌分解过程中产生的酶和生物裂解释放的蛋白质^[40]，具有 1 个发射波长在 320 nm 处，有 2 个激发波长 225 nm 和 275 nm。组分 C2（Ex/Em=230/340）为类色氨酸，通常与藻源、生活废水排放有关，如来源于垃圾渗滤液和生活污水^[41]。C3（Ex/Em=250/425）为陆源类腐殖质，具有陆生植物或土壤有机物质光谱特征，普遍存在于受农业影响的河流、近岸水体和废水中^[7,42]。

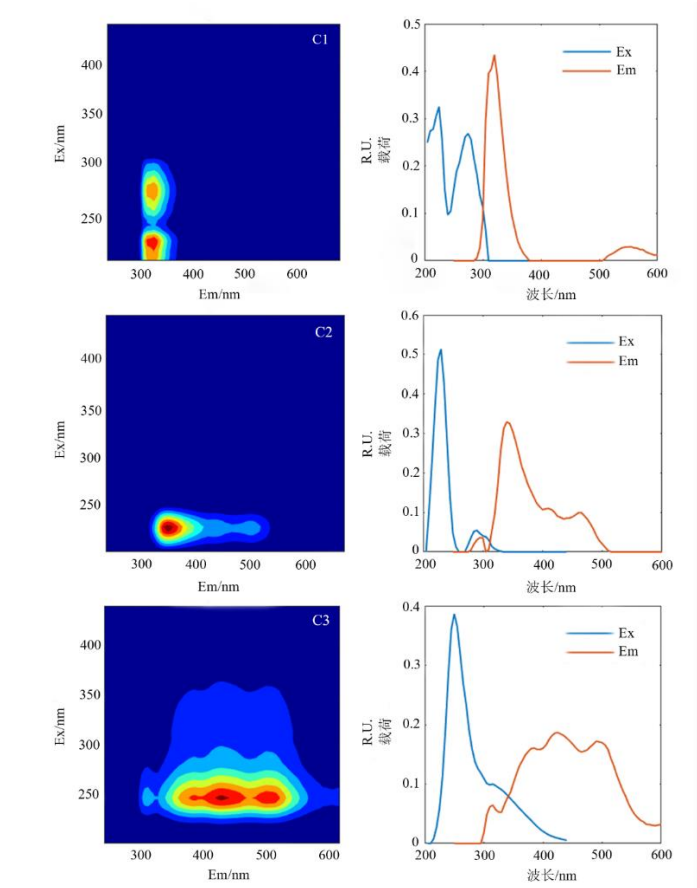


图 4 平行因子分析得到的 3 个组分及载荷

Fig. 4 Fluorescent spectra and loadings of the three PARAFAC model

表 3 CDOM 荧光组分特征

Tab. 3 Fluorescent component characteristics of CDOM

荧光组分	本研究 Ex/Em/nm	物质	文献中对应组分 Ex/Em/nm
C1	<230,275/320	类酪氨酸	225-230,270/305-310 ^[39]
C2	230/340	类色氨酸	225-230,275/340-350 ^[39-41]
C3	250/425	陆源类腐殖质	250/430 ^[42]

2.3.2 荧光组分时空分布特征 通过对比 3 个组分在从冬季至夏季过程中的荧光强度，发现组分 C1、C2 差异性显著（ $P<0.01$ ），C3 不存在显著性差异（ $P>0.05$ ）。如图 5 所示，滴水湖的 CDOM 结构以类蛋白质为主，随着时间的变化，C1 和 C2 的荧光强度表现为 1 月和 3 月高于 7 月；C3 的荧光强度表现为 7 月和 1

月高于 3 月，随时间的变化，贡献占比呈上升趋势。在空间上，如图 6 所示，C1 和 C2 在 1 月表现出河道至湖区方向递减趋势，高值出现在西南部的河道，而 3 月、7 月有递增趋势；C3 在不同月份均表现出河道至湖区方向递减趋势。

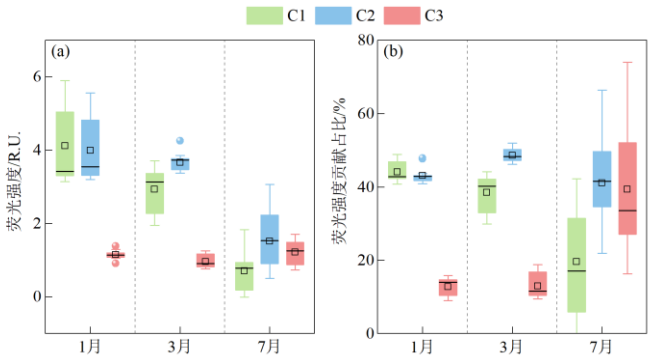


图 5 不同月份 CDOM 组分荧光强度(a)和荧光组分贡献比(b)

Fig. 5 Fluorescence intensity(a) and contribution ratio(b) of CDOM components in different months

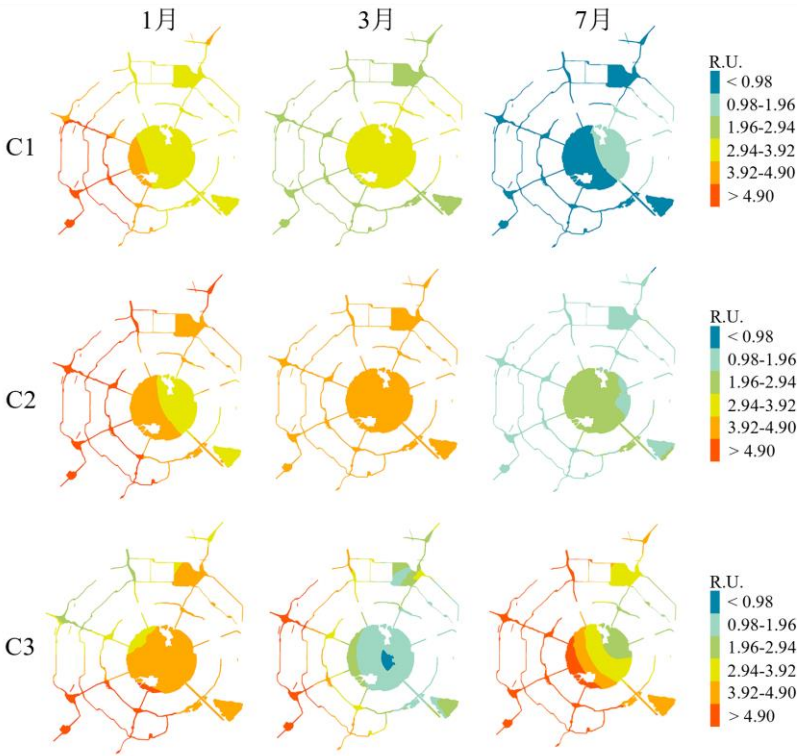


图 6 三种组分荧光强度时空分布

Fig. 6 Spatial and temporal distribution of fluorescence intensity of three components

2.4 表层水 CDOM 的荧光特征参数分析

为了进一步了解水样中 CDOM 的光谱特征，本文对 CDOM 的荧光特征参数进行了分析（图 7）。1 月 FI 范围在 1.68-1.76 之间，均值为 1.71；3 月范围在 1.63-1.69 之间，均值为 1.67；7 月范围在 1.71-1.89 之

间, 均值为 1.78。FI 均值都在 1.4-1.9 范围内, 且 7 月显著高于 1 月和 3 月 ($P<0.05$)。在空间分布上, 1 月河道显著高于湖区和入湖口 ($P<0.05$); 3 月、7 月在空间上没有显著性差异 ($P>0.05$)。

1 月 BIX 范围在 1.02-1.17 之间, 均值为 1.07; 3 月范围在 0.94-1.12 之间, 均值为 1.03; 7 月范围在 0.86-1.03 之间, 均值为 0.95。1 月和 3 月 BIX 均值都大于 1, 7 月均值在 0.8-1 范围内, 且 1、3 月显著高于 7 月 ($P<0.05$)。1 月河道均值为 1.14, 显著高于湖区和入湖口; 3 月湖区均值为 1.08, 显著高于河道和入湖口 ($P<0.05$); 7 月空间差异不显著 ($P>0.05$)。

1 月 HIX 范围在 0.29-0.56 之间, 均值为 0.45; 3 月在 0.43-0.83, 均值为 0.57; 7 月在 0.76-4.09, 均值为 1.79。1 月、3 月均值都小于 1.5, 而 7 月显著高于 1 月和 3 月 ($P<0.01$), 均值大于 1.5。1 月湖区和入湖口显著高于河道; 3 月和 7 月表现为河道显著高于入湖口和湖区 ($P<0.05$), 其中, 7 月河道均值达到 3.18。

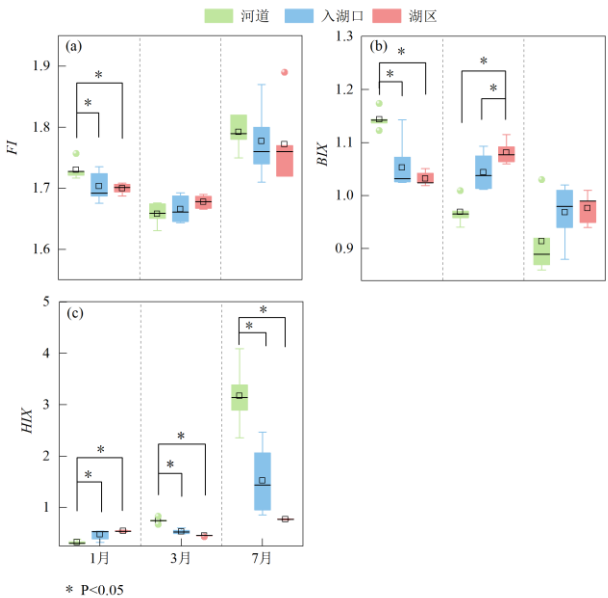


图 7 不同月份 CDOM 的 FI(a)、BIX(b)和 HIX(c)

Fig. 7 FI(a)、BIX(b) and HIX(c) of CDOM in different months

2.5 表层水 CDOM 光谱参数与环境因子相关性分析

将 3 次调查的水体样本, 分为河道 (图 8a) 和湖体 (入湖口、湖区, 图 8b) 进行 Spearman 相关性分析, 结果表明, 河道和湖区水体中的 FI 均与 DTN 呈极显著负相关 ($P<0.001$), C1、C2 均与 BIX 呈显著正相关 ($P<0.05$), C3 与 DOC 呈显著负相关 ($P<0.05$); 不同之处在于, 河道的 FI 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著正相关 ($P<0.01$), C3 与 Chl.a 呈显著正相关 ($P<0.05$), 而在湖区水体中未见显著关联。通过用地类型占比与 CDOM 荧光组分、特征参数和水质参数的相关性分析, 发现河道与入湖口的居民区面积占比与类蛋白组分 (C1+C2) 荧光强度、FI、DTN、Chl.a 均呈显著正相关 ($P<0.05$, 附表 1)。

3 讨论

3.1 滴水湖及周围水系 CDOM 的可能来源与组成特征

本研究在滴水湖水域共鉴定出 3 类 CDOM 组分 (图 4), 其中类色氨酸 C2 占比最高, 其次是类酪氨酸 C1 和陆源类腐殖质 C3。C1 和 C2 属于类蛋白组分, 通常被认为来自藻源或微生物降解产生。有研究表明, 由于城市化的原因, 在人为活动频繁的地区, 人类排放的生活污水也会促进类蛋白质 CDOM 组分的增加^[43-44], 而滴水湖周边正在开发建设, 人口逐年增加, 且存在大量的建筑工地, 上万名工人居住的“建

设者小镇”（临时生活区），其污水排放也可能是导致 C1 和 C2 占比较高的原因之一。本研究中，*BLIX* 指数绝大多数都>1.0 或接近 1，表明 CDOM 主要以生物活动产生且具有较强的自生源特征；*FI* 均值在 1.4-1.9 之间，说明 CDOM 荧光组分主要为微生物源^[34]，且具有内外双重来源；河道和湖体的 C1、C2 与 *Chl.a* 相关性均不显著，也说明内源 CDOM 荧光组分主要不是由浮游植物直接产生的。C3 一般被认为主要与外源输入有关，包括径流输入和农田污水的排放等。例如，Zhou 等^[43]对浙江省千岛湖的研究中发现，随着暴雨事件的增加，陆源类腐殖质的信号增强；Shi 等^[45]发现降雨和径流输入对江苏省天目湖 CDOM 的影响具有时滞效应。在本研究中，降雨量和径流输入对滴水湖 CDOM 组成结构有着显著影响。首先，降雨量的增加会稀释物质的浓度。降雨量与陆源类 CDOM 呈显著正相关 ($P<0.01$ ，附表 2)，其中 6 月降雨量达到 311 mm，且降水多发生在中下旬，在强降雨过后 7 月 C3 荧光强度贡献占比与 3 月相比呈显著上升，

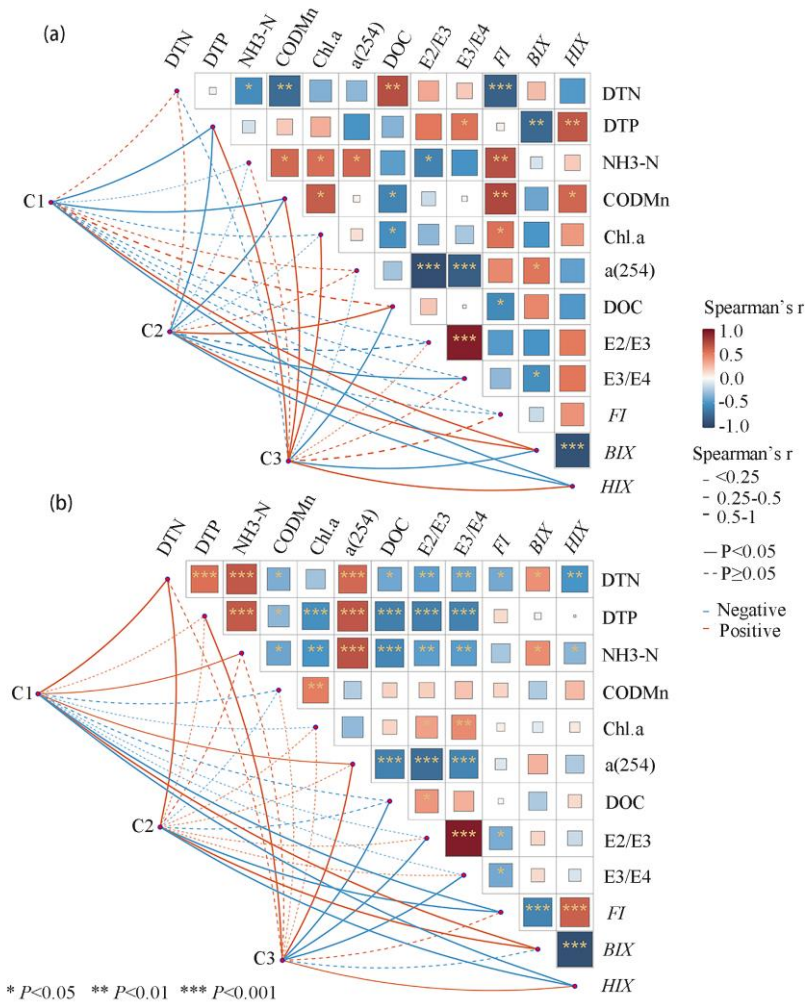


图 8 河道(a)和湖体(b)的 CDOM 荧光组分、特征参数和水质参数相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of CDOM fluorescence components, characteristic parameters and water quality parameters of the river (a) and lake body (b)

说明暴雨径流后荧光组分发生变化。*a*(254)表现为高温季节低于冬季，且与降雨量呈显著负相关 ($P<0.01$ ，附表 1)，可能是由于在降雨过程中大量 CDOM 较低的降水直接或间接汇入，导致河湖水量上升，CDOM 相对浓度被稀释降低^[46]。C3 组分的荧光强度贡献占比呈上升趋势，河道中 C3 与 COD_{Mn} 呈显著正相关；

此外, 7月 COD_{Mn} 显著高于1月, $\text{HIX} > 1.5$, 表明腐殖化程度有所增强。这些结果更进一步说明降雨量的增加导致蛋白质组分被稀释, 并通过地表径流冲刷作用, 使得大量陆地土壤表层腐殖质以及动植物残骸等陆源腐殖质有机物进入水体^[47]。其次, 地表径流带来外源物质的输入。1月降雨量较少, 但 C3 荧光强度较高, 且 E3/E4 值小于1.5, 这表明腐殖质主要以腐殖酸形式存在, 推测这可能是由于1月雨水径流中夹带了较多的落叶和土壤颗粒所致。滴水湖所在临港新片区原为滩涂地, 土壤为盐碱土。在新建的城市绿化带和公园时, 需要使用大量的畜禽有机肥进行土壤改良; 并且公园绿地冬季会产生大量树木草皮凋落物, 这些都可能是往水体中输入陆源类 DOM 的“源”^[48]。

人类活动显著影响着滴水湖水系 CDOM 的组成与结构。本文中, 河道的采样点的用地类型主要以居民区 (61.04%)、新建公园 (22.06%) 为主 (图1); 以往的研究表明, 土地利用已经成为影响滴水湖水系水环境中最主要的非点源污染类型, 且河道区域受污染较为严重^[49]。在本研究中, 滴水湖西部和南部区域的河道 BIX 值介于0.8到1.0之间, 或大于1, 这表明河道水体中的 CDOM 具有较强的自生源特性, 或为生物活动产生。此外, 即使在小范围内, 占主导地位的土地利用仍能显著影响城市河流 CDOM 特征。在城市化进程中, 不透水地表面积 (如城市道路和建筑物) 显著增加, 而绿地面积则相应减少^[14]。在本研究中, 不透水覆盖率大于50%区域, 其 DTN 显著高于其他区域 (附图2); 居民区的面积占比与类蛋白组分 ($\text{C1}+\text{C2}$) 荧光强度、 FI 、 DTN 、 Chl.a 均呈显著正相关 ($P < 0.05$, 附表1)。其原因可能为: 滴水湖及入湖河道作为人工开挖的城市人工水系, 具有流动性缓慢、水体自净能力较差特点, 其西部南部区域城市化进程较快, 部分居民区存在生活污水排入河道现象。因此, 随着居民区面积占比增加, 类蛋白组分的荧光强度也随之增加。由于冬季水力滞留时间较长, 该区域水体中的氮营养物积累显著, 进而促进了水体内源代谢活动的增强, 导致藻类生物量增加^[48-51]。

3.2 滴水湖及周围水系 CDOM 的差异分析

Chl.a 是表征水体浮游植物生物量的常用指标。在本研究中, 其浓度与河道中的 C3 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$, 图8a)。这主要是由于浮游植物在高温季节生长较快, 而此时降雨较多, 藻类生长常伴随着较高的陆源类腐殖质输入。与河道不同, 湖体中的 C3 与 Chl.a 相关性不显著, 进一步表明陆源性腐殖质主要通过河道进入滴水湖水系。张柳青等^[7]对高邮湖的丰水期和枯水期 CDOM 来源组成研究中也出现了该现象。本研究中1月河道的 HIX 显著低于湖体, 3月和7月河道的 HIX 值显著高于湖体。这可能与冬季河道水体更新缓慢, 内源累积较多有关^[52]。此外, C3 组分的荧光强度从河道至湖体方向递减, 也说明河道沿岸的土地容易受雨水冲刷, 可能带来外源输入的大分子有机物。而滴水湖湖体沿岸为绿地, 距离居民区有一定距离, 受人为直接性影响小于河道, 外源直接输入的大分子有机物较少, 故 E2/E3 的值大于河道, CDOM 分子量较小。3月和7月湖体的透明度 ($97 \text{ cm} \pm 26 \text{ cm}$) 显著高于河道 ($77 \text{ cm} \pm 15 \text{ cm}$) ($P < 0.05$), 且 C1 和 C2 的荧光强度高值出现在湖体。我们推测, 随着温度升高, 春夏季光照较充足, 促进水体中 CDOM 大分子陆源腐殖质降解成为小分子化合物, 进而促进微生物代谢生成类蛋白质类有机物^[16]。

与天然湖泊相比, 城市人工湖容易受外部来水的影响, 河流和湖泊的关系复杂。滴水湖受地表降水的冲刷, 导致河道中含氮磷污染物随径流量的增加而增加^[22]。而滴水湖为较封闭水体, 水体补给主要靠降水和周边径流, 水动力条件弱于引水河道^[53], 污染物汇入河道并最终流入湖区, 可能会造成湖区污染物富集, 因而可能在很大程度上受到流域内土地利用方式的影响^[54-55]。

3.3 CDOM 的环境指示分析

FI 作为重要的物质来源指示指标, 具有较强的环境指示意义。Tang 等^[56]发现城市周边河流中 CDOM 的 FI 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 之间存在显著相关性; Li 等^[5]发现 FI 与氮磷营养指标具有显著相关性, 可作为反映黄河水质的潜在指标。在本研究中, 河流和湖泊的 FI 与 DTN 呈显著相关 ($P < 0.05$), 尤其河流的 FI 与 DTN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均存在显著相关性 ($P < 0.01$)。因此, FI 可以用来反映滴水湖及周围水系的水质情况, 特别是与氮有关的污染情况。此外, 有研究表明, BIX 指数可以反映 CDOM 中类蛋白质物质含量, BIX 指数越大, 类蛋白组分的贡献越大^[52,57], 这与本研究结果相一致, 3个月份的 BIX 与 C1 、 C2 呈显著正相关 ($P < 0.05$, 图8)。因此, BIX 可作为综合反映滴水湖水系的生物活动和污染物积累的重要潜在指标。

4 结论

1) 从冬季到夏季间,滴水湖及周围水系 CDOM 以类色氨酸和类酪氨酸为主,其次为陆源类腐殖质。CDOM 组成受到外源输入与内源自生的双重影响,且以生物活动产生(即微生物源)为主,具较强的自生源特征。

2) 春、夏季受到降雨量或地表径流的外源输入影响,总体上类蛋白质的贡献占比呈现逐渐降低趋势,而陆源类腐殖质的贡献占比则相应升高,同时 CDOM 的分子量相对较小。

3) 滴水湖及周围水系 CDOM 受人为活动影响较明显。采样点河道附近是以居民区和新建公园为主的用地类型,陆源类腐殖质荧光强度呈现河道至湖区逐渐降低趋势,河道可能是陆源类腐殖质的主要贡献来源,且该区域生物代谢活性较高。此外,土地利用类型的面积占比在冬季显著影响 CDOM 的组成,致使有机物含量升高。

4) 荧光参数 *BIX*、*FI* 分别与类蛋白组分、水体氮浓度呈显著相关,表明对滴水湖及周围水系 CDOM 的研究能反映其水质状况,有利于对有机污染物进行监测和评估。

致谢:感谢上海海洋大学水产与生命学院水环境保护与生态修复团队的任晴、林悦、李欣雅、姜雨菲等同学,在野外采样与室内分析过程中给予的帮助。感谢 3 位匿名审稿人,对文章给予的宝贵意见。

5 参考文献

- [1] Ren HY, Wang GX, Ding WC *et al.* Response of dissolved organic matter (DOM) and microbial community to submerged macrophytes restoration in lakes: A review. *Environmental Research*, 2023, 231(Pt 2), 116185. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116185.
- [2] Wen ZD, Shang YX, Song KS *et al.* Composition of dissolved organic matter (DOM) in lakes responds to the trophic state and phytoplankton community succession. *Water Research*, 2022, 224: 119073. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119073.
- [3] Lai FF, Yang Q, Song KS *et al.* Remote sensing estimation of DOC concentration of reservoirs in Northeast China based on CDOM absorption. *J Lake Sci*, 2023, 35(1): 224-235. DOI: 10.18307/2023.0116. [赖锋发, 杨倩, 宋开山等. 基于 CDOM 吸收特性的东北地区水库 DOC 浓度遥感估算. 湖泊科学, 2023, 35(1): 224-235.]
- [4] Zhao Y, Song KS, Wen ZD *et al.* Evaluation of CDOM sources and their links with water quality in the lakes of Northeast China using fluorescence spectroscopy. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 80-91. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2017.04.027.
- [5] Li DB, Pan BZ, Li JH *et al.* Assessing the potential to use CDOM as an indicator of water quality for the sediment-laden Yellow river, China. *Environmental pollution*, 2021, 289: 117970. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117970.
- [6] Yin HL, Wang Y, Yang Y *et al.* Tryptophan-like fluorescence as a fingerprint of dry-weather misconnections into storm drainage system. *Environmental Sciences Europe*, 2020, 32: 1-14. DOI: 10.1186/s12302-020-00336-3.
- [7] Zhang LQ, Zhou YQ, Zhang YL *et al.* Sources and optical dynamics of chromophoric dissolved organic matter in Lake Gaoyou, Nansi, and Dongping. *J Lake Sci*, 2020, 32(2): 428-439. DOI: 10.18307/2020.0205. [张柳青, 周永强, 张运林等. 高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物来源组成特征. 湖泊科学, 2020, 32(2): 428-439.]
- [8] Chen HM, Yu XQ, Zhu JY *et al.* Optical indices of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) as potential indicators tracing the variability of chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD5) in Lake Taihu*. *J Lake Sci*, 2021, 33(5): 1376-1388. DOI:10.18307/2021.0507. [陈慧敏, 俞晓琴, 朱俊羽等. 太湖有色可溶性有机物(CDOM)对 COD 及 BOD5 的指示意义. 湖泊科学, 2021, 33(5):1376-1388.]
- [9] Yan LH, Chen XJ, Su RG *et al.* Resolving characteristic of CDOM by excitation-emission matrix spectroscopy combined with parallel factor analysis in the seawater of outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010. *Environmental Science*, 2013, 34 (01): 51-60. DOI: 10.13227/j.hjks.2013.01.019. [闫丽红, 陈学君, 苏荣国等. 2010 年秋季长江口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析. 环境科学, 2013, 34(01): 51-60.]
- [10] Zhang YL, van Dijk MA, Liu ML *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence. *Water Research*, 2009, 43(18): 4685-97. DOI: 10.1016/j.watres.2009.07.024.
- [11] 周娟. 扬州市主城区土地利用格局对河流水质的影响研究[学位论文]. 扬州大学, 2022.

- [12] 胡和兵. 城市化背景下流域土地利用变化及其对河流水质影响研究[学位论文]. 南京师范大学, 2013.
- [13] Tremblay CC, Botrel M, Lapierre JF *et al.* Relative influence of watershed and geomorphic features on nutrient and carbon fluxes in a pristine and moderately urbanized stream. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136411. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136411.
- [14] Zhang H, Liu ZF, Xu J *et al.* The driving mechanism of diverse land use types on dissolved organic matter characteristics of typical urban streams from Wuhan city. *Journal of environmental management*, 2024, 370: 122906. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122906.
- [15] Lyu LL, Liu G, Shang YX *et al.* Characterization of dissolved organic matter (DOM) in an urbanized watershed using spectroscopic analysis. *Chemosphere*, 2021, 277: 130210. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130210.
- [16] Zhang YX, Pang R, Ren YX *et al.* Photochemical and microbial alteration of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in aquatic ecosystems associated with different sources. *J Lake Sci*, 2022, 34(5): 1550-1561. DOI: 10.18307/2022.0511. [张怡暄, 庞锐, 任源鑫等. 不同来源有色溶解性有机物光化学/微生物降解过程. 湖泊科学, 2022, 34(5):1550-1561.]
- [17] Lee, M., Lee, Y.K., Derrien, M. *et al.* Evaluating the contributions of different organic matter sources to urban river water during a storm event via optical indices and molecular composition. *Water Research*, 2019, 165: 115006. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115006.
- [18] Lusk, Mary G. and Gupral S. Toor. Dissolved organic nitrogen in urban streams: Biodegradability and molecular composition studies. *Water Research*, 2016, 96: 225-35. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.060.
- [19] Li Y, Wei HJ, Wang K *et al.* Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis. *Environmental Science*, 2019, 40(04): 1751-1759. DOI: 10.13227/j.hjlx.201808118. [李昀, 魏鸿杰, 王侃等. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC). 环境科学, 2019, 40(04): 1751-1759.]
- [20] Wei M, Wang R, Wang Z *et al.* Analysis of the Structure of the Floating Plant Community in Urban Man-made Lakes and Environmental Factors. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(02): 92-101. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202203160078. [魏秘, 王瑞, 王竹等. 城市人工湖泊浮游植物群落结构及环境因子分析. 水生态学杂志, 2024, 45(02): 92-101.]
- [21] Wang SP, Guo YM, Wan Y *et al.* Comprehensive Management of Eutrophic Urban Lakes - A Case Study of North Taizi Lake in Wuhan. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(04): 91-96. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202004300118. [汪尚朋, 郭艳敏, 万骥等. 城市富营养化湖泊综合治理——以武汉北太子湖为例. 水生态学杂志, 2021, 42(04): 91-96.]
- [22] 范泽宇. 滴水湖及入湖河道水质时空变化及水质评价[学位论文]. 上海海洋大学, 2021.
- [23] 练雄. 上海滴水湖集水区土地利用动态及其对径流污染的影响[学位论文]. 华东师范大学, 2011.
- [24] Zhang YL, Qin BQ, Zhou YQ *et al.* Application feasibility of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption coefficient as the substitute for chemical oxygen demand concentration in lakes and reservoirs. *J Lake Sci*. 2020, 32(6): 1575-1584. DOI:10.18307/2020.0602. [张运林, 秦伯强, 周永强等. 有色可溶性有机物(CDOM)吸收作为湖库化学需氧量监测替代指标的探讨. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1575-1584.]
- [25] Zhang WH, Zhao DL, Wang XY *et al.* Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 4958-4969. DOI: 10.13227/j.hjlx.202004165. [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.]
- [26] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [27] Bricaud, A., Morel, Prieur, L *et al.* Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26: 43-53. DOI: 10.4319/LO.1981.26.1.0043.
- [28] Vaičiūtė, D., Bresciani, M., Bartoli, M. *et al.* Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter in a hypertrophic freshwater lagoon. *Journal of Limnology*, 2015, 74: 572-583. DOI: 10.4081/JLIMNOL.2015.1176.
- [29] Cheng N, Zhang YL, Zhu GW *et al.* Comparison of optical properties of DOM and CDOM in Lake Tianmuhu catchment. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(09): 998-1007. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2014.09.08. [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(09): 998-1007.]
- [30] 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.hjlx.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.]

[31] 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.2008.6.572.

[32] Cory RM, Mcknight DM. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(21): 8142-9. DOI: 10.1021/es0506962.

[33] Lavonen EE, Tranvik LJ, Gonsior M *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.

[34] 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.

[35] 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(09): 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(09): 3394-3401.]

[36] Huguet A, Vacher L, Relexans S *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry*, 2008, 40(6): 706-719. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2009.03.002.

[37] Jin CL, Gao SJ, Ye BB *et al.* Nitrogen and phosphorus pollution characteristics of surface runoff and the impacts of land use on runoff water quality in rainy season in the western Erhai Lake basin. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 1(11): 1891-1899. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.03.25. [金春玲, 高思佳, 叶碧碧等. 洱海西部雨季地表径流氮磷污染特征及受土地利用类型的影响. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1891-1899.]

[38] Hosen JD, McDonough OT, Febria CM *et al.* Dissolved organic matter quality and bioavailability changes across an urbanization gradient in headwater streams. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(14): 7817-7824. DOI: 10.1021/es501422z.

[39] 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.

[40] Huang CC, Li YM, Wang Q *et al.* Components optical property of CDOM in Lake Taihu based on three-dimensional excitation emission matrix fluorescence. *J Lake Sci*, 2010, 22(3):375-382. DOI: 10.18307/2010.0309. [黄昌春, 李云梅, 王桥等. 基于三维荧光和平行因子分析法的太湖水体 CDOM 组分光学特征. 湖泊科学, 2010, 22(3):375-382.]

[41] Cheng QL, Zheng BH, Wang SR *et al.* Three-dimensional fluorescence spectra of colored dissolved organic matter (CDOM) in Dianchi Lake. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(03): 698-703. [程庆霖, 郑丙辉, 王圣瑞等. 滇池水体有色溶解性有机质 (CDOM) 三维荧光光谱特征. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(03): 698-703.]

[42] Osburn CL, Handsel LT, Mikan MP *et al.* Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary. *Environmental science and technology*, 2012, 46(16): 8628-8636. DOI: 10.1021/es3007723.

[43] 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.

[44] Zhou YQ, Zhou L, Zhang YL *et al.* Autochthonous dissolved organic matter potentially fuels methane ebullition from experimental lakes. *Water Research*, 2019, 166: 115048. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115048.

[45] Shi Y, Zhang LQ, Li YP *et al.* Influence of land use and rainfall on the optical properties of dissolved organic matter in a key drinking water reservoir in China. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134301. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134301.

[46] Yang YR, Shi JC, Yi QT *et al.* Variation analysis of source and composition of CDOM in a source water reservoir of Yellow River diversion project during normal and wet seasons. *J Lake Sci*, 2023, 35(5):1635-1646. DOI: 10.18307/2023.0524. [杨永锐, 史建超, 易齐涛等. 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. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1635-1646.]

[47] Hou SY, Hu DX, Ma L *et al.* Characteristics and source apportionment of dissolved organic matter in rainwater runoff from typical urban functional areas. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(06): 1292-1302. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.03.06. [侯思远, 胡德秀, 马龙等. 典型城市功能区雨水径流溶解性有机质特征及污染源解析. 环境科学研究, 2024, 37(06): 1292-1302.]

- [48] Zhang LQ, Xu YJ, Li SY. Riverine dissolved organic matter (DOM) as affected by urbanization gradient. *Environmental Research*, 2022, 212(C), 113457. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113457.
- [49] Zhang C, Lü YP, Mo ZL *et al.* A systematic solution to water quality control in Dishui Lake dominated by total phosphorus control. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(09): 46-49+54. DOI: 10.13789/j.cnki.wwel1964.2019.09.009. [张辰, 吕永鹏, 莫祖澜等. 以总磷控制为主导的滴水湖水质保障系统方案探讨. 给水排水, 2019, 55(09): 46-49+54.]
- [50] Jaffe R, Mcknight DM, Maie N *et al.* Spatial and temporal variations in DOM composition in ecosystems: The important of long term monitoring of optical properties. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(G4). DOI: 10.1029/2008JG000683.
- [51] Liu Q, Jiang Y, Xu H *et al.* Impact of Land Use on the DOM Composition in Different Seasons in a Subtropical River Flowing through the Region Undergoing Rapid Urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 212: 1224-1231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.030.
- [52] Zhou SL, Chen ZY, Zhang TN *et al.* Temporal and spatial evolution characteristics of DOM spectra in sediment interstitial water in typical zones of Baiyangdian Lake. *Environmental Science*, 2021, 42(08): 3730-3742. DOI: 10.13227/j.hjlx.202011063. [周石磊, 陈召莹, 张甜娜等. 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. 环境科学, 2021, 42(08): 3730-3742.]
- [53] Xiao MM, Rao RC, Chen YQ *et al.* Distribution characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Dishui Lake and Its Diversion Channels. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(5): 672-678. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0738. [肖茗明, 饶若宸, 陈以芹等. 滴水湖及其引水河道沉积物中重金属分布特征及风险评价. 生态与农村环境学报, 2020, 36(05): 672-678.]
- [54] Shi Y, Zhang LQ, Li YP *et al.* Influence of land use and rainfall on the optical properties of dissolved organic matter in a key drinking water reservoir in China. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134301. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134301.
- [55] 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.atres.2011.07.014.
- [56] Tang JF, Li XH, Cao CL *et al.* Compositional variety of dissolved organic matter and its correlation with water quality in peri-urban and urban river watersheds. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 459-469. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2019.05.025.
- [57] Chen ZY, Li SY. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the Three Gorges Reservoir area under the background of urbanization. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5309-5317. DOI: 10.13227/j.hjlx.201904196. [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. 环境科学, 2019, 40(12): 5309-5317.]