

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.23.013

中小流域DOM来源的3D-EEMs-PARAFAC解析

冯轩成¹, 王宸奥², 许世豪¹, 钟惠舟³, 李芳³

(1. 泛城科技股份有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 江苏正方园建设集团有限公司, 江苏 常州 213000; 3. 中国电建集团城市规划设计研究院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 溶解性有机物(DOM)是较好的污染物溯源指标,可为流域水环境治理措施制定提供理论依据。为揭示中小流域水体的DOM特征及来源,采集源头型、近郊型、城镇型三类河流水体的38个样品,采用三维荧光光谱参数(FI、BIX、HIX、 $\beta:\alpha$)、三维荧光光谱-平行因子(3D-EEMs-PARAFAC)模型对DOM荧光特征进行分析。结果表明,FI、BIX、HIX、 $\beta:\alpha$ 的范围分别为1.29~3.51、0.75~2.34、0.03~0.56、0.72~2.08,DOM主要为自生源,生物源组分占比较高,腐殖化程度较低,微生物活性较高。PARAFAC解析出5种组分:类色氨酸(C1)、芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4)、胡敏酸(C3)、类酪氨酸(C5),其中C1、C2、C4、C5占总荧光强度的89.96%。源头型河流的DOM主要组分为芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(占比约54.03%);近郊型河流的DOM主要组分为类色氨酸、类酪氨酸(占比约70.78%);城镇型河流的DOM主要组分为芳香蛋白、可溶性微生物代谢产物、类酪氨酸(占比约79.78%)。根据DOM组分来源,可制定针对性的流域水环境治理措施。

关键词: 中小流域; 溶解性有机物; 三维荧光光谱; 平行因子分析; 荧光吸收峰

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0084-07

Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Small and Medium-sized Watersheds Based on 3D-EEMs-PARAFAC

FENG Xuan-cheng¹, WANG Chen-ao², XU Shi-hao¹, ZHONG Hui-zhou³, LI Fang³

(1. Ascity Technology Stock Co. Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Jiangsu Zheng Fang Yuan Construction Group Co. Ltd., Changzhou 213000, China; 3. Power China Urban Planning and Design Institute Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) serves as an effective indicator for pollutants source tracing, providing a theoretical basis for selecting water environment management measures in river basins. To investigate the characteristics and sources of DOM in small and medium-sized watersheds, thirty-eight tap water samples were collected from three types of rivers (headwater, peri-urban, and urban-type rivers). The fluorescence properties of DOM were analyzed using three-dimensional fluorescence spectroscopy parameters (FI, BIX, HIX, $\beta:\alpha$) and three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy coupled with parallel factor analysis model (3D-EEMs-PARAFAC). The results showed that the ranges of FI, BIX, HIX, and $\beta:\alpha$ were 1.29–3.51, 0.75–2.34, 0.03–0.56, and 0.72–2.08, respectively. DOM was primarily autochthonous (originating within the aquatic system), dominated by biogenic components, with low humification and high microbial activity. PARAFAC analysis identified five components, including tryptophan-like substance (C1), aromatic proteins and soluble microbial byproduct (C2 and C4), humic acid-like substance (C3), tyrosine-like substance (C5).

Components C1, C2, C4, and C5 collectively accounted for 89.96% of the total fluorescence intensity. The main components of DOM in the headwater rivers were aromatic proteins and soluble microbial byproduct, accounting for approximately 54.03%. The DOM components in peri-urban rivers was characterized by tryptophan-like and tyrosine-like substance (approximately 70.78%). The DOM components in urban-type rivers were primarily composed of aromatic proteins, soluble microbial byproduct, and tyrosine-like substances (approximately 79.78%). Based on the source analysis of DOM components, targeted water environment management strategies can be proposed.

Key words: small and medium-sized watersheds; dissolved organic matter; three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence; parallel factor analysis; fluorescence peak

随着生态文明建设的加强,中小流域水环境质量改善得到持续关注^[1-2]。城市化格局直接影响中小流域中污染物的来源和迁移方式,增加了水体自净阻力。流域水环境质量对污染物的响应,既表现为化学需氧量、氨氮、总氮、总磷等水质指标变化^[3],也表现为有机物的变化^[4]。溶解性有机物(DOM)是一类化学结构复杂的有机混合物,在天然水体中较为常见,约占水体中有机物总量的80%~90%^[5],其特征化学结构与气候和地理位置关系密切,是水质恶化的重要诱因之一^[6]。DOM可分成外源DOM和内源DOM两类,其中外源DOM是指从陆地系统输入到水环境的DOM,所含营养物质少;内源DOM是指水体中生物和植物活动产生的分泌物或者残体分解形成的DOM,含脂肪链和营养元素比较多。中小流域根据两岸不同土地类型,可分为城镇型河流、近郊型河流、源头型河流三类,不同区域类型河流中DOM的浓度、组分和化学结构会产生变化,造成区域性差异。通过分析DOM在化学结构层面的变化差异,能揭示不同区域类型水体DOM的组成和来源等信息,以综合研判污染物来源,从而制定有针对性的治理措施。

三维荧光光谱结合平行因子分析(3D-EEMs-PARAFAC)能够有效分析DOM的特征结构,在DOM来源识别中得到了广泛的应用。通过三维荧光光谱结合平行因子分析对城市化河流中的DOM进行研究,分析其特征组分,对追溯中小流域不同类型河流中污染物的来源具有一定的理论意义和实际价值。基于此,选取南方某中小流域作为研究对象,将其流域区域划分为城镇化河流、近郊型河流、源头型河流三类,并对三类河流水体中DOM的光学特征进行分析,以期为中小流域水环境污染来

源分析与修复措施制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2023年5月(夏季)在南方某中小流域进行采样,该河流共7条主要支流。根据卫星地图显示的河流两岸土地类型,将支流XH、ZH和干流GL划分为城镇型河流,支流BKHS、BMH、SWX、TKX和XQL划分为近郊型河流。河流源头位于支流XH上游,故将XH上游划分为源头型河流。按上游至下游的顺序,在干流布设5个采样点,每条支流各布设2个采样点,共布设19个采样点,采样点分布见图1。每个采样点采集2个样品,使用聚乙烯内衬的采样瓶采集表层水样2.5 L,并于4℃的保温箱中避光保存后带回实验室,使用0.45 μm滤膜(津隆)过滤后进行水质分析。

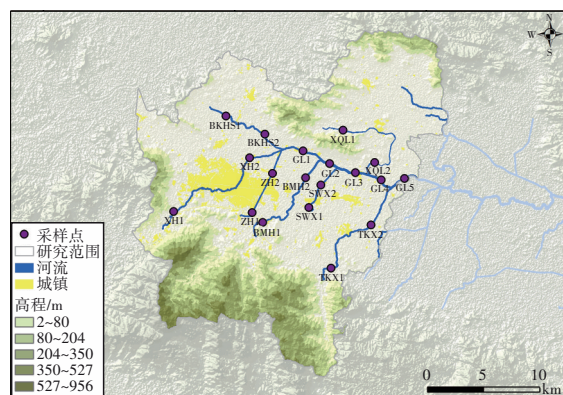


图1 采样点分布

Fig.1 Locations of sampling sites

1.2 分析方法

总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪(Liqui TOC,德国Elementar)测定,检测下限为0.05 mg/L。由于水样经0.45 μm滤膜过滤,因此TOC检测结果

实质为溶解性有机碳(DOC),DOC值即为DOM值。

水样稀释2倍后,使用日立F-7000荧光光谱仪测定DOM的荧光特性,测定使用1 cm四通石英比色皿。以超纯水为空白样对三维荧光光谱(3D-EEMs)进行校正,减少拉曼散射对荧光光谱的影响。三维荧光光谱的激发波长(λ_{Ex})和发射波长(λ_{Em})分别为220~600、230~650 nm,扫描间隔均为5 nm,激发和发射狭缝宽均为5 nm,扫描速度为12 000 nm/min,氙灯电压为700 V。

将经Delaunay三角内插值法校正的三维荧光数据导入MATLAB 2019b软件,使用内置DOMFluor工具箱对三维荧光数据进行平行因子(PARAFAC)分析,以解析水体中DOM的荧光组分,并采用半分法确定最终解析结果的可靠性。具体荧光光谱参数及描述如下:①FI,即激发波长为370 nm时,发射波长为470 nm与520 nm处荧光强度的比值。它是表征DOM来源的指示指标,当FI<1.4时DOM以陆生源为主,当FI>1.9时DOM以自生源为主^[7]。②BIX,即激发波长为310 nm时,发射波长为380 nm和430 nm处荧光强度的比值,它反映了内源物质对DOM的相对贡献度。当BIX为0.7~0.8时,DOM具有中度新近自生源特征;当BIX为0.8~1.0时,DOM具有较强的自生源特征;当BIX>1.0时,DOM由生物活动产生^[8]。③HIX,即激发波长为254 nm时,发射波长为435~480 nm荧光强度积分值除以300~345 nm与435~480 nm荧光强度积分值之和。它是表征DOM腐殖化程度的重要指标,HIX值越大则腐殖化程度越高^[9]。④ $\beta:\alpha$,即激发波长为310 nm时,发射波长为380 nm处荧光强度与420~435 nm区间最大荧光强度的比值,它可以表征新产生的DOM在整体DOM中的比例,用以评估水体生物活性。其中, β 表示新产生的DOM, α 表示降解程度较高的DOM。 $\beta:\alpha$ 越大,表示新生成的DOM比例越高^[9]。

1.3 数据处理

使用Origin 9.5软件进行数据的图形绘制。使用IBM SPSS Statistics 26软件进行皮尔逊(Pearson)相关分析和聚类分析。

2 结果与讨论

2.1 水体DOM表征分析

各采样点的DOM浓度在4.32~16.59 mg/L之间,平均值为(10.89±3.81) mg/L,与国内某城市化

河流的DOC浓度相近^[6]。河流源头的DOM浓度为5.39 mg/L。近郊型河流按DOM平均浓度排序为:TKX(11.55、16.59 mg/L)>BKHS(14.39、12.89 mg/L)>XQL(9.35、14.70 mg/L)>SWX(7.82、9.60 mg/L)>BMH(4.54、8.48 mg/L),对应的值为(14.07±3.57)、(13.64±1.06)、(12.02±3.78)、(8.71±1.26)、(6.51±2.79) mg/L,最高和最低增长率分别为57%和23%。城镇型河流XH的DOM平均浓度为(11.99±9.34) mg/L;ZH水体两个取样点的DOM浓度分别为4.32、10.39 mg/L,平均浓度为(7.35±4.29) mg/L,下游采样点的DOM浓度普遍比上游高,最高增长率达245%,最低增长率为141%,表明城镇污染源排入河流后,会引起下游DOM浓度升高^[10]。近郊型河流流经城镇区域较少,DOM增长幅度低于城镇型河流,即河流流经城镇区域越少,入河污染物也越少。此外,干流5个取样点的DOM浓度分别为12.42、12.05、11.67、11.30、10.92 mg/L。

为探明入河DOM的组分,利用PARAFAC分析3D-EEMs数据,得到5种主要组分,其中,C1的 $\lambda_{\text{Em}}/\lambda_{\text{Ex}}$ 为310~350 nm/270 nm,表示类色氨酸^[11];C2的 $\lambda_{\text{Em}}/\lambda_{\text{Ex}}$ 为355 nm/230 nm和335 nm/285 nm,表示芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物,代表来自微生物代谢的蛋白质化合物,如氨基酸、肽类和游离态或结合态蛋白质^[12];C3的 $\lambda_{\text{Em}}/\lambda_{\text{Ex}}$ 为435 nm/260 nm和410 nm/360 nm,表示类胡敏酸^[13];C4的 $\lambda_{\text{Em}}/\lambda_{\text{Ex}}$ 为325 nm/230 nm和325 nm/280 nm,表示芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物^[14];C5的 $\lambda_{\text{Em}}/\lambda_{\text{Ex}}$ 为300 nm/225 nm和300 nm/270 nm,表示类酪氨酸^[15]。

为明确水体中DOM的组成信息,选取C1~C5各组分最大荧光强度(F_{max})进行研究,各组分占比如图2所示。所有采样点的荧光组分按照平均占比从高到低排列为C1(27.44%)、C5(24.96%)、C4(19.33%)、C2(18.23%)、C3(10.04%),DOM组分主要为类色氨酸(C1)、类酪氨酸(C5)、芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4),占总荧光强度的89.96%。5种DOM荧光组分在流域中的空间分布存在差异。在干流GL1~GL5,DOM以芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4,61.98%)、类酪氨酸(C5,19.78%)为主,共占比81.76%。在支流BKHS,DOM以类色氨酸(C1,31.34%)、类酪氨酸(C5,29.58%)为主,共占比60.92%。在支流XH,DOM以芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和

C4, 61.45%)、类色氨酸(C1, 16.21%)为主,共占比77.66%。在支流ZH, DOM以芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4, 57.17%)、类酪氨酸(C5, 27.14%)为主,共占比84.31%。在支流BMH, DOM以类色氨酸(C1, 51.72%)、类酪氨酸(C5, 22.34%)为主,共占比74.06%。在支流SWX, DOM以类酪氨酸(C5, 42.24%)、类色氨酸(C1, 30.20%)为主,共占比72.44%。在支流XQL, DOM以类酪氨酸(C5, 26.92%)、类色氨酸(C1, 25.67%)、芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4, 35.98%)为主,共占比88.57%。在支流TKX, DOM以类色氨酸(C1, 30.29%)、类酪氨酸(C5, 27.93%)、芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4, 28.87%)为主,共占比87.09%。

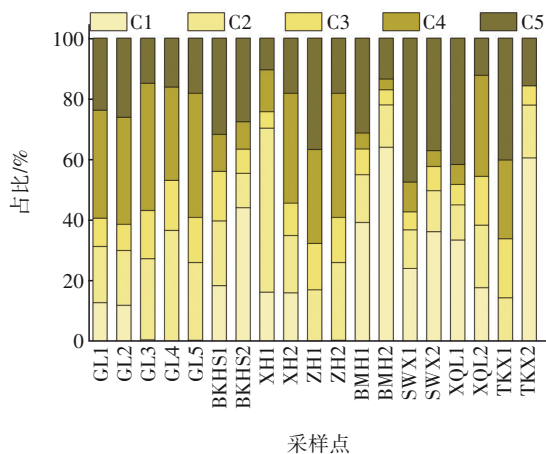


图2 DOM各组分荧光占比

Fig.2 Fluorescence proportion of DOM components

将5种DOM荧光组分按三种河流类型进行整合,河流源头的DOM组分以芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2)为主,占比为54.03%;近郊型河流BKHS、BMH、SWX、TKX和XQL的DOM组分以类色氨酸(C1)、类酪氨酸(C5)为主,共占比63.65%;城镇型河流XH、ZH的DOM组分以芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4, 59.31%)、类酪氨酸(C5, 20.85%)为主,共占比80.16%。

2.2 DOM来源解析

通过光谱分析确定DOM的生物活动、腐殖化程度、新产生DOM占比,结果见图3。FI被用于表征DOM组分来源,整个流域的FI范围为1.29~3.51,说明水体中的DOM既有自生源输入又有陆生源输入。支流ZH的FI变化范围为1.29~3.06,既有自生

源输入又有陆生源输入,陆生源可能是污水排入或腐殖质成分由细菌或真菌降解,或土壤中动植物残体腐烂分解形成,一般含有较多的芳香性结构。这也是城镇型河流的显著特点之一。除了支流ZH,干流和其余支流的FI值均大于2,说明以自生源为主。自生源可能是底泥或水体中微生物、水生细菌、藻类等生物活动产生,如沉水植物、藻类和微生物的分解及分泌物,自生源产生的DOM以类蛋白质居多^[16]。

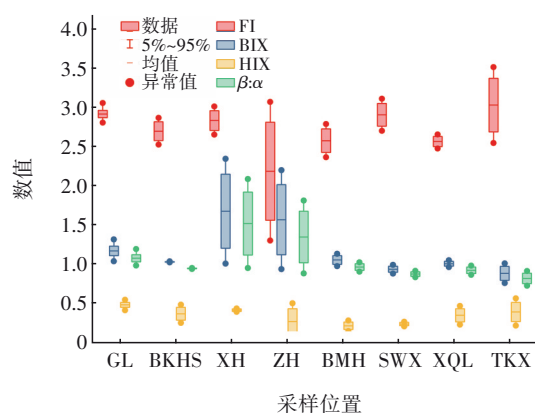


图3 水体DOM荧光参数

Fig.3 Fluorescence parameters of DOM in water

流经不同区域的河流中内源污染物均占主导,显示了底泥污染控制对流域治理的重要性。一方面,在城镇型河流区域,密集的污水厂尾水、工业废水及生活污水排放会引入大量具有内源特征的DOM^[17]。类蛋白质组分主要来自微生物代谢产物或未完全处理的污水,其荧光峰($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=225\sim275$ nm/320~380 nm)在PARAFAC分析中表现为内源特征;污水管网中的微生物降解过程会生成微生物代谢产物,这类物质虽具有陆源特征,但在城镇环境中常与内源过程耦合。另一方面,城镇型河流的硬化河道、低流速及富营养化状态等,会促使水体内部发生有机物转化,引起藻类代谢产物增加(如藻毒素、胞外聚合物),在3D-EEMs中呈现类色氨酸荧光峰($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=280$ nm/350 nm),通过PARAFAC可识别为C2类组分;陆源污染物入河造成水体缺氧,微生物对陆源有机物的分解会生成具有内源荧光特性的小分子代谢产物,也呈现出内源特征。

BIX是用于DOM溯源的一个指标,反映内源物质对DOM的贡献。BIX在0.75~2.34之间变化,平均值为1.16。这表明DOM具有内源物释放和生物活动所产生的双重特点。BIX空间分布差异较大,

干流水体的BIX范围为1.03~1.31,支流BKHS、XH的BIX范围分别为1.02~1.03、1.00~2.34,说明水体DOM生物源组分较多。支流ZH、BMH、XQL的BIX范围分别为0.93~2.19、0.97~1.13、0.96~1.04,说明具有较强自生源和生物源双重特征。支流SWX的BIX范围为0.87~0.98,说明具有较强的自生源特征。支流TKX的BIX范围为0.75~1.00,具有中度新近自生源和较强自生源特征。可能因城镇化格局,划分城镇发展结构,各DOM输入源的空间联系减弱,高营养物分布不均,促进内源有机质产生,所以DOM呈现出自生源和生物源的双重特征。

HIX是表征DOM腐殖化程度的重要指标,其变化范围为0.03~0.56,平均值为0.36。FI、BIX、HIX的分析结果与其他学者关于国内城市化河流的研究结果相似^[18-19],说明DOM腐殖化程度较低。已有研究证实,以自生源输入为主的DOM,腐殖化程度更低^[8]。 $\beta:\alpha$ 是以计算新生成DOM的占比来评价水体生物活性的重要指标,其变化范围为0.72~2.08,平均值为1.05。HIX和 $\beta:\alpha$ 分析结果表明,DOM的微生物降解程度较高,新生成的DOM较少。

2.3 DOM荧光组分及参数的相关性

采用SPSS软件对荧光光谱参数和荧光组分C1~C5的最大荧光强度进行Pearson相关性分析,结果如图4所示。

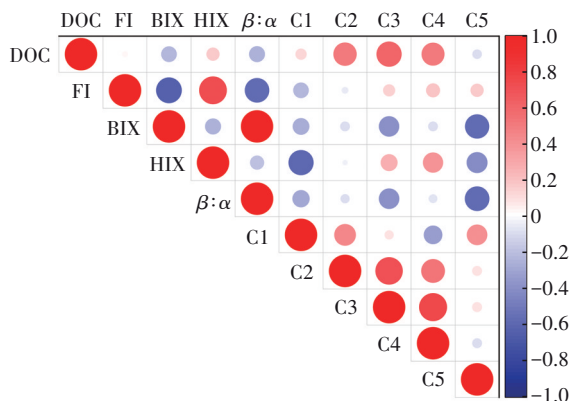


图4 DOM荧光组分及参数的相关性

Fig.4 Correlationship between components and fluorescence index of DOM

DOM与C2、C3、C4呈正相关关系($P<0.05$),说明水体中的DOM与芳香蛋白、可溶性微生物代谢产物以及胡敏酸相关。结合荧光光谱参数来看,自生源和陆生源的DOM均含有C2、C3、C4组分,但C2、C3、C4组分以自生源为主,可能由底泥或水体中微

生物活动和动植物降解产生,且降解程度较高,腐殖化程度较低。

C5组分与BIX呈现负相关关系($P<0.05$),说明底泥或水体中微生物、水生细菌、藻类等生物活动对C5组分产生影响。C1组分与HIX呈现负相关关系($P<0.05$),水体DOM的腐殖化程度较低,C1组分占比偏高,这与各荧光组分平均占比的分析结果一致。C5组分和 $\beta:\alpha$ 呈现负相关关系($P<0.05$),说明C5组分能被微生物利用。DOM的类蛋白质成分C1(类色氨酸)、C5(类酪氨酸)通常与污水输入和微生物活动有关^[6]。

FI与HIX呈现正相关关系($P<0.05$),而BIX与 $\beta:\alpha$ 也呈现正相关关系($P<0.05$),说明FI与HIX、BIX与 $\beta:\alpha$ 具有一致性变化。大部分区域水体DOM主要为自生源输入,局部区域水体DOM既有自生源输入又有陆生源输入。进一步证明自生源和陆生源DOM共同特征为腐殖化程度较低。FI与BIX、 $\beta:\alpha$ 均呈现负相关关系($P<0.05$),说明FI分别与BIX、 $\beta:\alpha$ 具有一致性变化。可见,以自生源为主的DOM生物降解程度较高,新生成的DOM较少。

因各采样点荧光组分分布存在空间差异,为揭示各采样点之间数据结构和相似性,以每个采样点的数据(DOM、组分最大荧光强度、光谱参数等)为一组,使用组间平均距离法进行聚类分析,得到各采样点的聚类结果如图5所示。

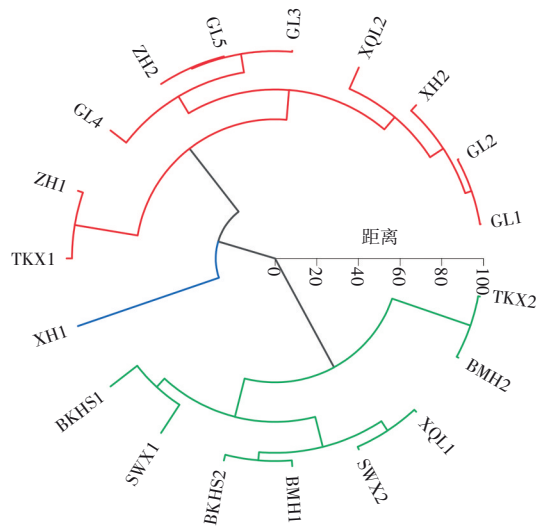


图5 聚类分析

Fig.5 Cluster analysis

每组之间平均距离越小,则组内数据的相似度越高。基于系统聚类法构建的最优分类体系显示,

在欧氏距离阈值约30处形成三类空间格局。采样点XH1位于河流源头区域,土地类型以自然特征为主,受城镇化影响微弱,DOM为自生源,以组分C2和C4即芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物为主(占比约54.03%);HIX均值为0.39,腐殖化程度较低。采样点TKX2、BMH2、XQL1、SWX2、BMH1、BKHS2、SWX1、BKHS1呈现明显的近郊型河流特征,与城镇中心保持一定距离,河流呈现一定程度的城镇化特征,土地类型兼具自然属性和城镇化特征。其DOM仍为自生源,以组分C1类色氨酸、C5类酪氨酸为主(占比约70.78%);HIX均值为0.25,腐殖化程度较第一类低。采样点TKX1、ZH1、ZH2、XH2、XQL2、GL1~GL5表现出明显的城镇型河流特征,集中分布于城镇化区域及河流干流,土地类型以城镇建设用地为主,河流的城镇化特征较显著。其DOM来源包括自生源和陆生源,以组分C2和C4即芳香蛋白和类可溶性微生物代谢产物、C5类酪氨酸为主(占比约79.78%);HIX均值为0.43,腐殖化程度较第一类、第二类高,但仍处于低水平。

聚类结果揭示了流域DOM组分的来源差异,以及随地理位置与土地类型的变化呈现明显梯度规律。源头型河流的DOM以自生源为主,腐殖化程度低,组分相对单一;近郊型河流的DOM受人为活动影响,类色氨酸、类酪氨酸(C1、C5)占比增加,但仍以自生源为主;城镇型河流的DOM受城镇化驱动,类色氨酸、类酪氨酸(C1、C5)占比降低,芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2、C4)占比增加,体现了自然与人为双重来源。因此,以减少DOM组分输入为出发点,除了减少污水直排入河之外,定期清理底泥也是必需措施。

3 结论

① 使用平行因子解析水体DOM主要荧光组分,得到5种组分,分别为类色氨酸(C1)、芳香蛋白和可溶性微生物代谢产物(C2和C4)、类胡敏酸(C3)、类酪氨酸(C5)。

② 荧光光谱参数FI、BIX、HIX、 $\beta:\alpha$ 的范围分别为1.29~3.51、0.75~2.34、0.03~0.56、0.72~2.08,DOM以自生源为主,腐殖化程度较低,微生物活性较高。

③ 根据聚类分析结果,河流DOM的空间分布可分为三类,分别对应源头、近郊、城镇化区域及干

流,呈现了各区域河流中DOM的来源特点及空间梯度变化规律,这为中小流域水环境治理提供了理论支持。

参考文献:

- [1] LIU D, ZHANG G, LI H, *et al.* Projection pursuit evaluation model of a regional surface water environment based on an Ameliorative Moth-Flame Optimization algorithm [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105674.
- [2] HUANG L, CHEN X, YUAN Z, *et al.* Impact of landscape patterns on water quality in urbanized rivers at characteristic scale: a case of Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Management*, 2024, 74 (4): 715-728.
- [3] WESTON N B, HOLLIBAUGH J T, JOYE S B. Population growth away from the coastal zone: thirty years of land use change and nutrient export in the Altamaha River, GA [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(10): 3347-3356.
- [4] MENG F, HUANG G, YANG X, *et al.* Identifying the sources and fate of anthropogenically impacted dissolved organic matter (DOM) in urbanized rivers [J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 5027-5039.
- [5] CARICASOLE P, PROVENZANO M R, HATCHER P G, *et al.* Chemical characteristics of dissolved organic matter during composting of different organic wastes assessed by ^{13}C CPMAS NMR spectroscopy [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(21): 8232-8236.
- [6] 于会彬,高红杰,宋永会,等. 城镇化河流DOM组成结构及与水质相关性研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36 (2): 435-441.
YU Huibin, GAO Hongjie, SONG Yonghui, *et al.* Study on composition structure of DOM and its correlation with water quality in an urbanized river [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 435-441 (in Chinese).
- [7] DUAN P, WEI M, YAO L, *et al.* Relationship between non-point source pollution and fluorescence fingerprint of riverine dissolved organic matter is season dependent [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153617.
- [8] 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.
- [9] 宁成武,包妍,黄涛,等. 夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3743–3752.
- NING Chengwu, BAO Yan, HUANG Tao, *et al.* Sources and spatial variation of dissolved organic matter in summer water of inflow rivers along Chaohu Lake watershed [J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3743–3752(in Chinese).
- [10] GOLDMAN J H, ROUNDS S A, NEEDOBA J A. Applications of fluorescence spectroscopy for predicting percent wastewater in an urban stream [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(8): 4374–4381.
- [11] RYAN K A, PALACIOS L C, ENCINA F, *et al.* Assessing inputs of aquaculture-derived nutrients to streams using dissolved organic matter fluorescence[J]. Science of the Total Environment, 2022, 807: 150785.
- [12] KNOKE M, DITTMAR T, ZIELINSKI O, *et al.* Outwelling of reduced porewater drives the biogeochemistry of dissolved organic and trace metals in a major mangrove-fringed estuary in Amazonia [J]. Limnology and Oceanography, 2024, 69: 262–278.
- [13] WANG Y, HU H, ZHOU Y, *et al.* Evolving characteristics of dissolved organic matter in soil profiles during 56 years of revegetation in Mu Us Sandy Land [J]. Plant & Soil, 2024, 497(1/2): 567–584.
- [14] ZHOU X Z, JOHNSTON S E, BOGARD M J. Organic matter cycling in a model restored wetland receiving complex effluent [J]. Biogeochemistry, 2023, 162: 237–255.
- [15] HUANG X, FU X, ZHAO Z, *et al.* The telltale fluorescence fingerprints of sewer flows for interpreting the low influent concentration in wastewater treatment plant[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119517.
- [16] ZHANG Y, YIN Y, FENG L, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. Water Research, 2011, 45(16): 5110–5122.
- [17] 梁月清,刘会来,崔康平,等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析法的工业园区污水溶解性有机物溯源与归趋[J]. 环境工程学报, 2022, 16(4): 1238–1247.
- LIANG Yueqing, LIU Huilai, CUI Kangping, *et al.* Tracing and regression of dissolved organic matter in wastewater from the industrial park based on 3D-fluorescence spectrum-parallel factor analysis [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(4): 1238–1247(in Chinese).
- [18] 陈昭宇,李思悦. 三峡库区城镇化影响下河流DOM光谱特征季节变化[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 195–203.
- CHEN Zhaoyu, LI Siyue. Seasonal variation of DOM spectral characteristics of rivers with different urbanization levels in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 195–203(in Chinese).
- [19] 梁晓文,邵田田,王涛. 黄土高原高浑浊水体CDOM光学特性及影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1217–1226.
- LIANG Xiaowen, SHAO Tiantian, WANG Tao. CDOM optical characteristics and related environmental factors of high-turbidity waters on the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1217–1226(in Chinese).

作者简介:冯轩成(1990–),男,浙江杭州人,大学本科,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事建筑给排水设计和污水处理工艺设计工作。

E-mail:327155066@qq.com

收稿日期:2025-03-05

修回日期:2025-04-06

(编辑:李德强)