

水源与饮用水保障

朱芸, 曹梦茹, 谢宇煊, 等. 华东某湖泊原水中溶解性有机物及亚硝胺前体物的季节性变化[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 45-53.

Zhu Y, Cao M R, Xie Y X, et al. Seasonal variation of dissolved organic matters and nitrosamine precursors in raw water of a lake in East China[J].

Water Purification Technology, 2026, 45(8): 45-53.

华东某湖泊原水中溶解性有机物及亚硝胺前体物的季节性变化

朱芸^{1,2}, 曹梦茹^{1,2}, 谢宇煊³, 张肖锦², 汪隽³, 林朋飞², 陈超^{2,3,*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009; 2. 清华苏州环境创新研究院, 江苏苏州 215163; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要 【目的】湖泊水源水中溶解性有机物(DOM)成分复杂、季节变化大,能与氯反应生成消毒副产物(DBPs),对水处理工艺有显著影响。因此,开展有机物组分分析,了解其对DBPs的贡献具有重要意义。【方法】本文以华东某湖泊型水源地为研究对象,逐月采样其DOM的总量、分子质量分布、三维荧光光谱和亚硝胺生成潜能。【结果】该湖泊水源水中DOM中分子质量小于3 ku占比持续在90%以上。三维荧光结果表明,主要荧光组分为芳香蛋白类有机物和可溶性微生物代谢产物(SMPs)。使用该湖泊水的A水厂和B水厂原水中二甲基亚硝胺生成潜能(NDMAFP)分别为39.0~160.8 ng/L和41.6~175.4 ng/L。两水厂采用的“常规+臭氧-活性炭”深度处理工艺对NDMAFP有较好的去除效果;出厂水经游离氯消毒后二甲基亚硝胺(NDMA)质量浓度小于10 ng/L。【结论】水厂现有的深度处理工艺能有效应对原水水质波动,但需要加强对水源水中小分子质量DOM和亚硝胺前体物的检测,并做好水处理工艺优化。

关键词 原水; 溶解性有机物; 消毒副产物; 亚硝胺; 前体物

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)08-0045-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.005

Seasonal Variation of Dissolved Organic Matters and Nitrosamine Precursors in Raw Water of a Lake in East China

Zhu Yun^{1,2}, Cao Mengru^{1,2}, Xie Yuxuan³, Zhang Xiaojin², Wang Jun³, Lin Pengfei², Chen Chao^{2,3,*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Research Institute for Environmental Innovation <Suzhou>Tsinghua, Suzhou 215163, China;

3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract [Objective] Dissolved organic matter (DOM) in lake water sources features complex composition, significant seasonal variations, high reactivity to produce disinfection by-products (DBPs) with chlorine disinfectant, which have a significant impact on water treatment processes. Therefore, conducting organic component analysis to understand its contribution to DBPs is of great significance. [Methods] This paper takes a lake-type water source in East China as the research object. The total amount of DOM, molecular weight distribution, three-dimensional fluorescence spectrum, and nitrosamine formation potential of DOM on a monthly basis were sampled. [Results] The proportion of DOM with a molecular weight less than 3 ku in this lake water source remained above

[收稿日期] 2024-03-23

[基金项目] 国家自然科学基金(22376114, 22076091); 山东省重点研发计划(2020CXGC011406)

[作者简介] 朱芸(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新污染物检测和控制, E-mail: yun_zhu2021@163.com。

[通信作者] 陈超(1977—), 男, 副研究员, 研究方向为饮用水新污染物风险识别和控制、供水管网水质稳定性和监控技术和突发环境事件的应急处理和管理, E-mail: chen_water@tsinghua.edu.cn。

90%. The three-dimensional fluorescence result indicated that the main fluorescent components were aromatic protein organic compounds and soluble microbial products (SMPs). The N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation potential (NDMAFP) in the raw water of water treatment plants (WTPs) A and B from this lake fluctuated at 39.0–160.8 ng/L and 41.6–175.4 ng/L, respectively. The conventional plus ozone and activated carbon advanced treatment process adopted by the two WTPs had a good removal on NDMAFP. After free chlorination, the NDMA mass concentration in finished water was less than 10 ng/L. [**Conclusion**] The existing advanced treatment in the WTP can effectively cope with fluctuations in raw water quality. However, it is still necessary to strengthen the detection of small molecular weight organic compounds and nitrosamine precursors in the source water and optimize the water treatment process.

Keywords raw water; dissolved organic matter (DOM); disinfection by-products (DBPs); nitrosamines (NAs); precursor

溶解性有机物 (DOM) 是水源水中对水质安全影响最大的组分之一^[1]。自然水体中的 DOM 来源广泛, 主要为外源输入 (包括工业废水、生活废水、农业排水和大气沉降等) 和内源输入 (包括水生植物、微生物等生物的释放溶解和代谢产物等) 2 个部分^[2]。由于地理位置、气候、季节不同, 不同水体中的 DOM 分布特征有很大差异。蔡文良等^[3]发现长江重庆段水体中 DOM 具有明显陆源特征, 主要成分为类腐殖质 (62.56%) 和类蛋白质 (31.31%), 上游荧光强度大于下游。赵夏婷等^[4]研究发现, 黄河兰州段水体中有色 DOM 可能由芳香性结构的小分子组成, 荧光强度从上游至下游呈现出先下降后升高再下降的变化。冯伟莹等^[5]发现太湖各个湖区水中 DOM 主要以类色氨酸物质为主, 南部湖区水的荧光强度大于北部湖区。

湖泊是重要的饮用水源地。但富营养化现象频繁发生, 同时人为排入湖中的 DOM 含量和种类都明显增多, 这些都增加了水处理工艺难度^[6-7]。徐磊等^[8]发现天然 DOM 对混凝效果及絮体特性会产生一定的影响。胡孟柳等^[9]报道了 DOM 容易堵塞膜孔, 造成膜通量的快速下降。DOM 除了会影响水体的颜色和味道, 也因其结构和组成会与重金属发生络合反应, 从而影响其在水生环境中的迁移转化、降解和毒性等^[10-12]。

DOM 会与消毒剂发生反应生成多种对人体有害的消毒副产物 (DBPs)。新国标《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 大幅增加了三卤甲烷 (THMs)、卤乙酸 (HAAs) 的检测频率。同时, 亚硝胺 (NAs) 等新型含氮 DBPs 与 THMs、HAAs 相比具有更高的毒理学效应^[13-21], 已经被列入新国标附录和上海市、深圳市、苏州市等城市的地方水质标准, 质量浓度的标准限值为 100 ng/L。NAs 是由 NAs

前体物与氯胺等消毒剂反应生成的。水体中含氮 DOM 的增加往往会导致二甲基亚硝胺生成潜能 (NDMAFP) 也随之增加。Wang 等^[17]发现 NAs 前体物主要是亲水性 DOM 和小分子质量组分。Liao 等^[18]报道了氨氮、溶解性有机氮 (DON) 和二甲基亚硝胺 (NDMA) 的形成关系密切, 是 NDMA 的重要前体物。因此, 了解水源水中 NAs 前体物的情况十分重要。

由于检测受限或者成本问题, 国内很多水厂很难及时准确地检测出厂水中 DBPs 特别是 NAs 的浓度, 导致出厂水存在一定的水质风险。根据前人研究结果, NAs 前体物来源多样, 成分复杂; 不同亲疏水性组分和不同分子量的有机物组分对 NAs 前体物贡献不同, 对水处理工艺的去除效果也有不同程度的影响。因此, 开展 DOM 组分分析, 了解 NAs 前体物特性及其与 NAs 生成量关系, 有助于水厂控制 NAs 风险, 保障饮用水安全。

本文以华东某湖泊水源水为研究对象, 通过月度采样, 检测溶解性有机碳 (DOC)、水样在 254 nm 波长处的吸光度值 (UV_{254})、分子质量分布与三维荧光光谱特征, 分析水源水中 DOM 含量、组成特性; 同时检测水源水和出厂水中的 NAs 及其前体物变化, 以期水源保护和水厂工艺选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 水样采集

本文在华东地区某湖泊周边选取 2 个典型水厂, 分别为 A 水厂和 B 水厂, 其水源地分别为 A 水源地和 B 水源地。2022 年 8 月起, 每月固定时间到 2 个水厂设置的原水采样点, 进行水样采集, 共计 12 次。在每个点位采集体积为 5 L 水样。现场用便携式多参数水质分析仪 (美国 HACH-HQ40D) 检测 pH、溶解氧 (DO)、电导率、氧化还原电位 (ORP) 等

水质参数。采集结束后将样品在低温避光条件下快速运回实验室并于冰箱冷藏保存待测。

1.2 常规指标测定方法

所有水样测定前先经过孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜(47 mm MCE,德国密理博)过滤去除水中悬浮物。

DOC 采用岛津 TOC-V 总有机碳分析仪进行测定。UV₂₅₄ 通过使用紫外可见分光光度计(岛津 UV-2700)进行测定。SUVA₂₅₄ 是指水样中波长为 254 nm 的紫外光下,单位浓度有机物的吸光度, SUVA₂₅₄ 根据式(1)计算得到。

$$Z = (A/C_1) \times 100 \quad (1)$$

其中:Z——SUVA₂₅₄ 254 nm 单位浓度有机物吸光度, L/(mg·m);

C₁——DOC 质量浓度, mg/L;

A——254 nm 处的吸光度(UV₂₅₄), cm⁻¹。

氨氮:采用便携式氨氮仪(Hach Pocket Colorimeter FM II,美国哈希)测定(原理为水杨酸分光光度法);硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N):采用离子色谱仪(ICS-5000,美国戴安)测定;总溶解性氮(TDN):采用总氮分析仪(TNM-1,日本岛津)测定(原理为过硫酸钾氧化-紫外分光光度法);DON 通过差减法得到,计算如式(2)。

$$C_2 = C_3 - C_4 - C_5 - C_6 \quad (2)$$

其中:C₂——DON 质量浓度(以 N 计), mg/L;

C₃——TDN 质量浓度(以 N 计), mg/L;

C₄——氨氮质量浓度(以 N 计), mg/L;

C₅——NO₃⁻-N 质量浓度(以 N 计), mg/L;

C₆——NO₂⁻-N 质量浓度(以 N 计), mg/L。

DOM 分子质量分布采用凝胶色谱法(SEC-HPLC)进行测定,仪器为液相色谱(HPLC 1260,美国安捷伦),色谱柱为美国安捷伦液相色谱柱(PL Aquagel-OH 30 尺寸排阻色谱柱,300 mm×7.5 mm,8 μm),标准分子质量物质为聚苯乙烯磺酸钠标准溶液(PSS, Fluka, 德国默克),其分子质量为 210~32 000 u。

三维荧光光谱使用三维荧光光谱仪(Hitachi F-7000,日本日立)测定。扫描波长 E_x 为 200~400 nm,发射波长 E_m 为 250~550 nm;激发和发射光谱扫描步长均为 5 nm,电压设定为 600 V,扫描速

度为 1 200 nm/min。

1.3 NAs 生成潜能测试

NAs 生成潜能的测试参考 Mitch 等^[21]建立的方法,并根据实验室的前期工作^[22]进行了优化。一氯胺(4 000 mg/L)每次使用都是现用现配,配制完成后放入棕色试剂瓶中冷藏保存待用。准备 500 mL 的实际水样,进行氯胺消毒,加入适量一氯胺溶液使水样中总氯质量浓度达到 20 mg/L(以 Cl₂ 计),于室温下避光保存。7 d 后,加入 1 mL 浓度为 1 mol/L 的硫代硫酸钠(Na₂S₂O₃)(分析纯,阿拉丁)终止消毒,并检测其水样中总氯浓度是否为 0,确保硫代硫酸钠过量。

NAs 浓度使用固相萃取-液相色谱串联质谱法(SPE-UPLC-MS/MS)测定。样品的预处理及分析过程遵循 US EPA Method 521 方法:使用全自动固相萃取仪(Auto Trace 280,美国赛默飞世尔)对椰壳活性炭小柱(2 g,6 mL,上海安谱)进行活化,再对水样中 NAs 进行富集、浓缩和洗脱,洗脱液放入氮吹仪(上海新拓)中氮吹约 15 min,过 0.22 μm 滤头(0.22 μm ,德国密理博)后移入进样瓶冷藏保存待机分析。前处理后的样品使用国产超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱仪(杭州谱育)上机分析。色谱柱采用 Waters BEH C8(2.1 mm×100 mm,1.7 μm)。检测结果满足 US EPA Method 521 方法中的质控要求。

2 结果分析

2.1 基本水质情况

对 2022 年 8 月—2023 年 8 月华东某湖泊水源地水质变化特征进行分析,结果如图 1 所示。

由图 1 可知, A 原水和 B 原水 pH 值分别为 7.46~8.05 和 7.53~8.26,均值分别为 7.80 和 7.94,均呈现秋、冬季偏高,春季偏低的季节规律。水体 pH 发生变化的原因一般包括 2 个部分:外因是生活污水、工业废水和农业退水导致的污染;内因主要是藻类等水生植物通过光合作用消耗二氧化碳导致 pH 上升^[23]。该湖泊 8 月和 9 月原水 pH 较高是藻类生长所致,而冬季 pH 较高则可能是外来污染所致。

A 原水和 B 原水 DO 质量浓度分别为 4.63~11.75 mg/L 和 4.79~12.87 mg/L,均值分别为 8.13 mg/L 和 8.64 mg/L。DO 冬季最高,夏季最低,表明

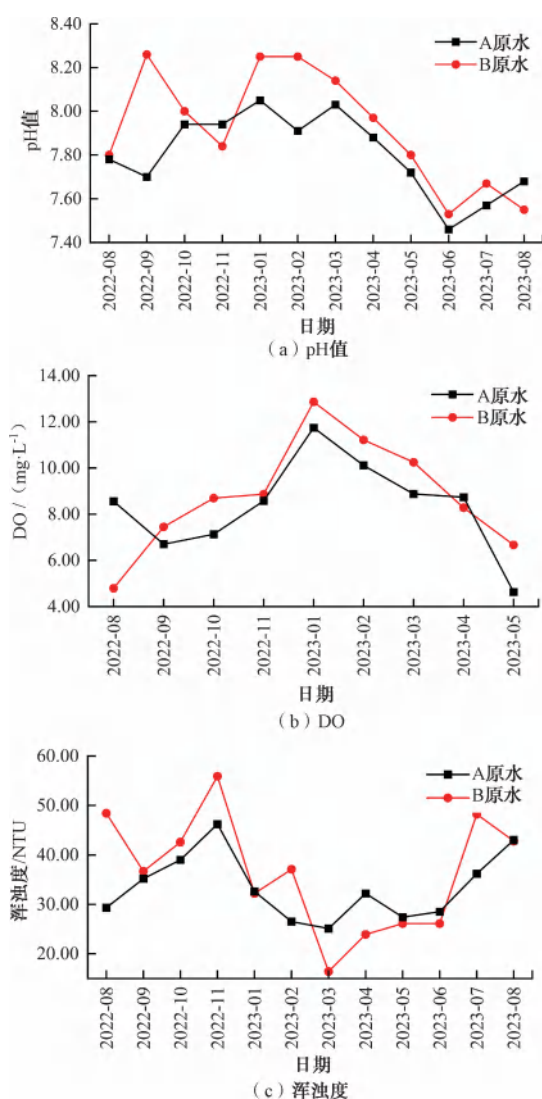


图1 华东某湖泊原水中 pH 值、DO 和浑浊度的季节性变化
Fig.1 Seasonal Variation of pH Value, DO and Turbidity in Raw Water of a Lake in East China

DO 随着温度的变化而变化,气温越低,DO 越高。夏季 DO 偏低主要是氧在水中的 DO 受温度影响很大,温度升高 DO 降低;且夏季水中 DOM 等耗氧物质浓度大,耗氧速率都高^[24]。此外,DO 浓度会由于植物的光合作用和水生生物的作用呈现一定的日变化规律^[25-26],夏季水草及藻类夜间的呼吸作用降低了水中 DO,白天的光合作用释放大量氧气也会造成 DO 大幅增加^[25]。

对华东某湖泊水源地进行原水月度采样,测试其 UV_{254} 、DOC、DON 等 DOM 指标,如图 2 所示。

由图 2 可知,A、B 原水 UV_{254} 分别为 $0.043 \sim 0.066 \text{ cm}^{-1}$ 和 $0.037 \sim 0.059 \text{ cm}^{-1}$,均值分别为

0.051 cm^{-1} 和 0.048 cm^{-1} 。2 处水源地 UV_{254} 均呈现夏秋季高、冬春季低季节性变化趋势。A 原水和 B 原水 $SUVA_{254}$ 数值分别为 $0.904 \sim 1.737 (\text{L}/\text{mg} \cdot \text{m})$ 和 $0.784 \sim 1.780 (\text{L}/\text{mg} \cdot \text{m})$,均值分别为 1.349 和 $1.348 (\text{L}/\text{mg} \cdot \text{m})$ 。

A、B 原水 DOC 质量浓度分别为 $2.76 \sim 4.87 \text{ mg/L}$ 和 $2.74 \sim 5.49 \text{ mg/L}$,均值分别为 3.87 mg/L 和 3.67 mg/L ,与前人报道基本一致。A 水源地 DOC 浓度的季节变化趋势为:冬季>秋季>夏季>春季,B 水源地 DOC 浓度月度变化较大,最高值出现在 2022 年 8 月,最低值出现在 2023 年 2 月,夏季 DOC 升高可能与水文气象因素波动有关^[27]。吕伟伟等^[28]报道了太湖北部湖区春、冬季节 DOC 质量浓度分别为 $2.76 \sim 5.94 \text{ mg/L}$ 和 $2.49 \sim 6.33 \text{ mg/L}$,均值分别为 $(4.03 \pm 0.20) \text{ mg/L}$ 和 $(4.43 \pm 0.24) \text{ mg/L}$ 。周业凯等^[29]报道了太湖 6 个饮用水水源地 DOC 质量浓度为 $3.95 \sim 6.31 \text{ mg/L}$ 。不同水源地的原水 DOC 浓度存在时空差异,湖泊型水源地高于江河水源地,原因可能是湖泊 DOM 浓度同时受到外源输入和藻华影响。

目前,饮用水和水环境国标中规定的含氮指标包括 TN、氨氮、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 4 个方面。TN 是衡量水质的重要指标之一,主要包括蛋白质、氨基酸等有机氮和无机氮化合物(氨氮、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$)。2022 年 8 月—2023 年 8 月,A、B 水源地的 TN 质量浓度分别为 $0.53 \sim 0.76 \text{ mg/L}$ 和 $0.32 \sim 1.68 \text{ mg/L}$,均值分别为 0.64 mg/L 和 0.88 mg/L 。A、B 原水氨氮质量浓度分别为 $0 \sim 0.14 \text{ mg/L}$ 和 $0 \sim 0.03 \text{ mg/L}$,均值分别为 0.03 mg/L 和 0.01 mg/L ; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度分别为 $0 \sim 0.61 \text{ mg/L}$ 和 $0 \sim 1.15 \text{ mg/L}$,均值分别为 0.28 mg/L 和 0.47 mg/L ;2 处水源地均未检出 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 。值得关注的是,该湖泊水源水中 DON 质量浓度高,分别为 $0 \sim 0.58 \text{ mg/L}$ 和 $0.08 \sim 0.94 \text{ mg/L}$,均值分别为 0.34 mg/L 和 0.29 mg/L ,会带来含氮 DBPs 风险。

2.2 分子质量分布特征

2 处水源地中 DOM 的分子质量分布如图 3 所示。

由图 3 可知,该水源水中 DOM 主要以小分子质量物质为主,高达 90% 的分子质量小于 3 ku ,且 5 次月度采样中无明显差异。原水 DOM 中分子质量为 $1 \sim 3 \text{ ku}$ 的 DOM 占比最高,约为 60%,其次是分子质

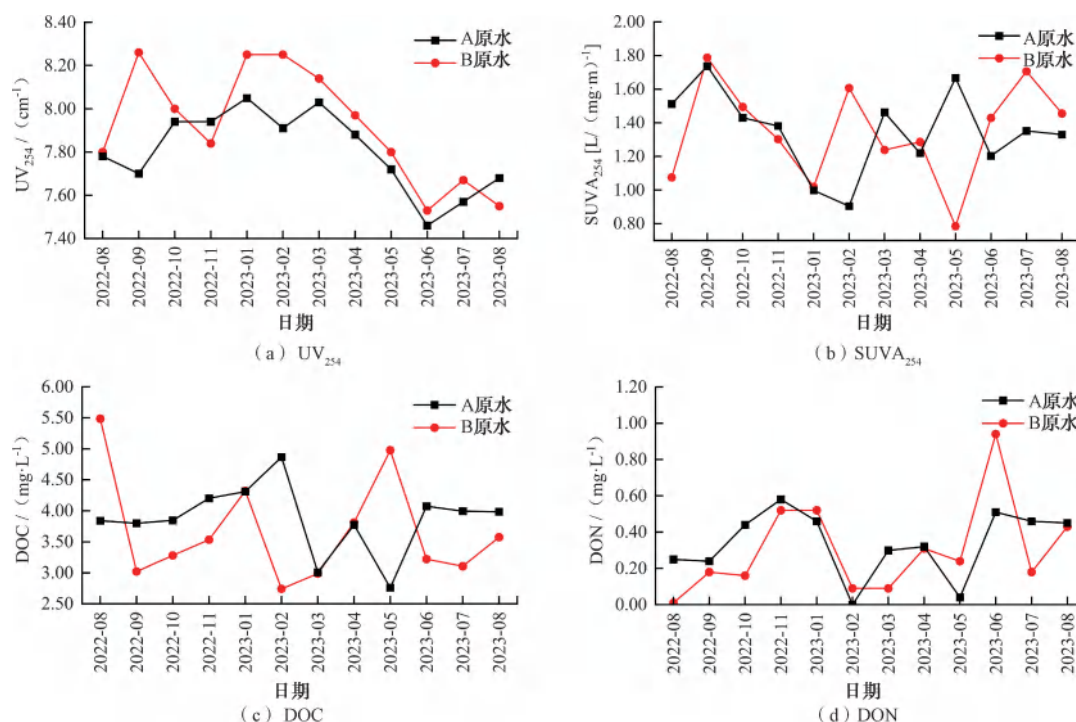


图2 华东某湖泊水原水有机综合指标季节性变化

Fig. 2 Seasonal Variation of Organic Composite Indices in a Lake Raw Water in East China

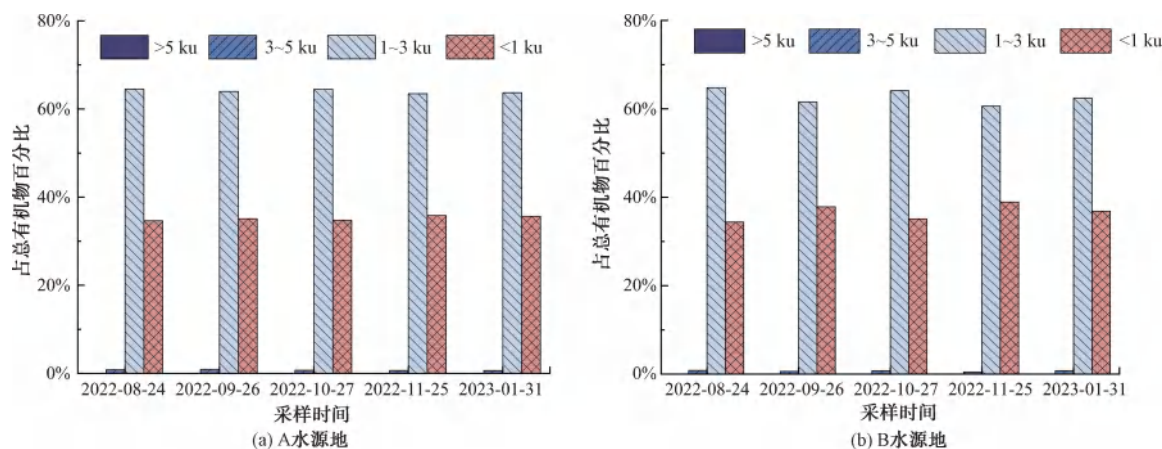


图3 华东某湖泊水原水 DOM 分子质量分布

Fig. 3 Molecular Weight Distribution of DOM in Raw Water Source of a Lake in East China

量小于 1 ku 的 DOM。其中 A 水源水中分子质量为 1~3 ku 的 DOM 占比均值为 64.03%, 分子质量小于 1 ku 的 DOM 占比均值为 35.41%; 分子质量 >3 ku 的占比均低于 1%; B 水源地分子质量分布情况跟 A 水源地相似, 分子质量为 1~3 ku 的 DOM 占比均值为 62.70%, 分子质量小于 1 ku 的 DOM 占比均值为 36.61%; 分子质量 >3 ku 的 DOM 占比也均低于 1%。

2 处水源地中 DOM 分子质量占比与前人报道

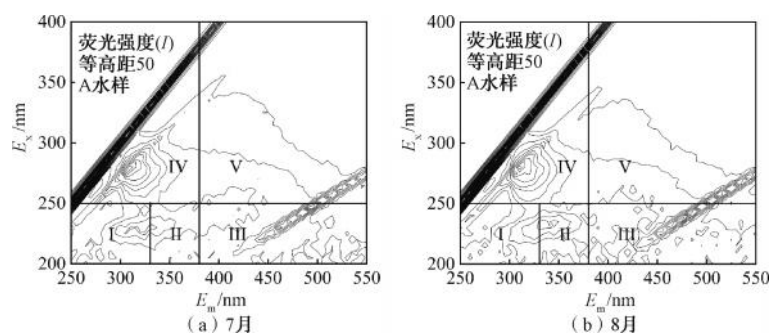
相似。王成坤等^[22]报道了松花江、阳澄湖、太湖等水源水中超过 90% 的 DOM 分子质量小于 3 ku, 其中约 50% 的分子质量小于 1 ku。廖晓斌等^[30]报道了华东某湖泊水体中 >3 ku 的大分子 DOM 占比仅为 0.3%~1.4%, 1~3 ku 部分占比为 44.5%~54%。了解 DOM 不同分子质量组分的特性至关重要。大分子 DOM 较容易被水厂的常规工艺所去除, 小分子 DOM 则反之。这 2 处水源地中小于 3 ku 的 DOM 占绝对优势, 给净水工艺带来了不利影响。

2.3 三维荧光光谱

荧光峰位置和强度是表征 DOM 的重要指标,三维荧光光谱对 DOC 较低的水样有更好的响应,且在 DOM 组分的鉴别方面能够提供更有用的信息^[31]。

如图 4 和图 5 所示,2 处原水 DOM 分别在区域 I、II、IV 具有较强的荧光峰,分别代表原水中存在的芳香蛋白类 DOM 和可溶性微生物代谢产物(SMPs)。这与周业凯等^[29]报道的太湖水源水的荧

光特性结果相似。廖晓斌等^[32]也报道了华东某湖泊水中 DOC 含量较高,荧光信号显示 DOM 以含芳香类的蛋白质和微生物代谢产物为主。当湖泊类水体呈现重度富营养化状态,藻类生长旺盛,会产生大量的藻源有机质(AOM),这些 AOM 以氨基酸和芳香蛋白组分为主^[33],表现为 I、II、IV 区的荧光信号特别强烈。本文中湖泊 2 处水源中也呈现 I、II、IV 区的较强荧光信号,说明该湖泊中 DOM 可能主要来源于藻类的生长和繁殖。



注: I 区—芳香族蛋白 I; II 区—芳香族蛋白 II; III 区—富里酸类物质; IV 区—微生物代谢产物类有机物; V 区—腐植酸类物质(图 5 同理)。

图 4 华东某湖泊 A 水源地三维荧光光谱图

Fig. 4 3D Fluorescence Spectra of Water Source A of a Lake in East China

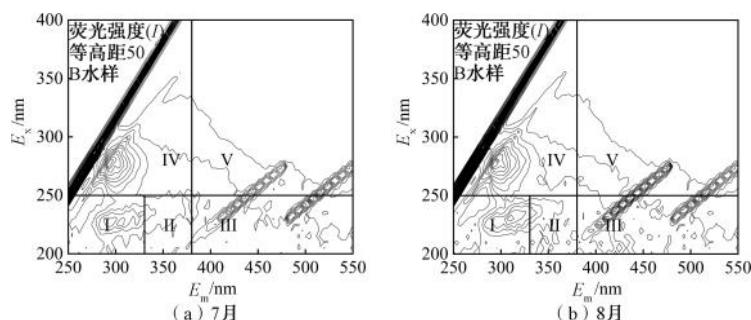


图 5 华东某湖泊 B 水源地三维荧光光谱图

Fig. 5 3D Fluorescence Spectra of Water Source B of a Lake in East China

2.4 NAs 前体物

采样期间 2 处水源水中均检出了较高浓度的 NAs 前体物,其中 NDMAFP 占总 NAs 生成潜能的绝大部分。如图 6 所示,A 厂原水中 NDMAFP 质量浓度为 39.0~160.8 ng/L,平均值为 131.0 ng/L;B 厂原水中 NDMAFP 质量浓度为 41.6~175.4 ng/L,平均值为 99.2 ng/L。2 处水源地不同月份 NAs 浓度也存在较大差异,7 月、8 月份是藻类暴发季节,水中 NDMAFP 浓度达到最高,随后 9 月份 NDMAFP 浓度明显下降。该结果显示 AOM 对 NAs 及其 NAs 前体物的贡献很大。

前人研究发现我国各地水源水中 NA 及其前体物浓度存在很大的时空差异。Bei 等^[13]报道了我国各地水源水中 NDMAFP 质量浓度围为:未检出(ND)~757 ng/L,均值为 66 ng/L,其中长三角区域浓度较高。Wang 等^[34]报道原水和出厂水中 NDMA、N-亚硝基二乙胺(NDEA)和 N-亚硝基二正丁胺(NDBA)含量较高,质量浓度分别为:ND~53.6、ND~68.5 ng/L 和 ND~48.2 ng/L。Lin 等^[35]研究发现,NDMAFP 主要来自藻细胞的胞外有机物(EOM)和胞内有机物(IOM),其中 EOM 表现出比 IOM 更高的 NDMA 生成潜能。Liu 等^[36]推测 AOM

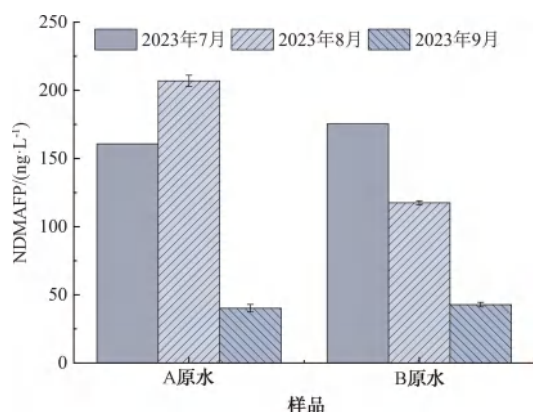
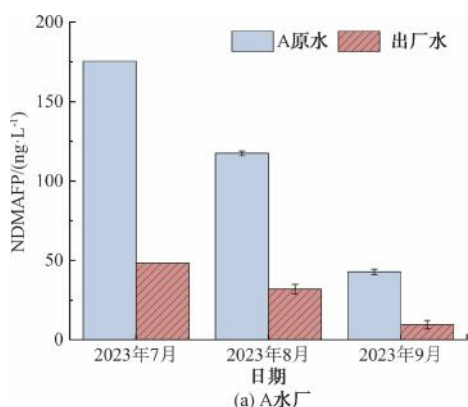


图6 华东某湖泊原水 NDMAFP 浓度月度变化
Fig. 6 Monthly Variation of NDMAFP Concentration in Raw Water of a Lake in East China



可能是 NAs 的主要前体物。在藻类暴发季节,水厂应更多地关注 AOM 对 NAs 的贡献。

研究测试了 2 个水厂进出水中 NAsFP 的变化,如图 7 所示。A 水厂的原水 NDMAFP 质量浓度为 39.0~160.8 ng/L,出厂水 NDMAFP 质量浓度为 9.5~48.4 ng/L,去除率为 72%~78%,显示出高效稳定的去除效果。B 水厂原水中 NDMAFP 质量浓度为 41.6~175.4 ng/L,出厂水 NDMAFP 质量浓度为 14.0~130.5 ng/L,去除率为 19%~65%,去除效果波动很大。好在 2 座水厂均采用游离氯消毒,出厂水中实际生成的 NDMA 质量浓度均低于 10 ng/L。

2 个水厂均采用常规工艺+臭氧-活性炭深度处理工艺。A 水厂的表现与文献中臭氧活性炭深度

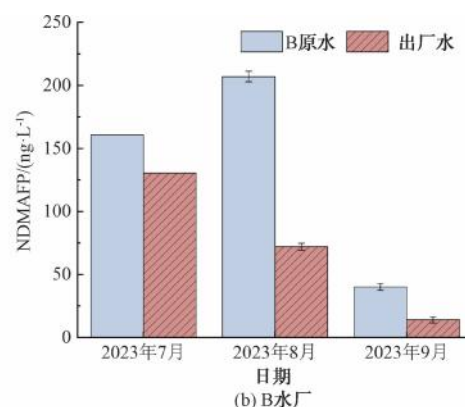


图7 水厂对 NDMA 前体物的去除

Fig. 7 NDMA Precursors Removal by the WTP

处理水厂能有效去除 NAs 的报道一致^[13,32]。B 水厂的 NAs 控制效果波动较大,可能与该水厂活性炭使用时间过长有关,建议及时换炭并优化工艺。

3 结论与建议

(1)华东某湖泊原水水质呈现一定的季节性规律:A、B 水源水的 UV_{254} 总体上呈现夏秋季较高,冬春季较低的特征;A 水源水 DOC 浓度的季节性变化趋势为冬季>秋季>夏季>春季,B 水源水 DOC 浓度月度变化较大,其中最高值出现在夏季 8 月,最低值出现在冬季 2 月。

(2)该湖泊水源水中 DOM 主要由分子质量小于 3 ku 的小分子组成,占比约为 90%。5 次月度采样中水样的分子质量分布无显著差异。

(3)三维荧光光谱分析表明,该原水中主要有有机荧光成分是芳香蛋白类 DOM 和 SMPs。

(4)该湖泊水源水中亚硝胺前体物含量高,A、B

水源水中 NDMAFP 质量浓度分别在 39.0~160.8 ng/L 和 41.6~175.4 ng/L,均值分别为 131.0 ng/L 和 99.2 ng/L,其中 AOM 是重要的 NAs 前体物。

(5)2 座水厂采用的常规+臭氧-活性炭深度处理工艺对 NDMAFP 有较好的去除效果;出厂水经游离氯消毒后 NDMA 质量浓度小于 10 ng/L。

(6)建议水厂加强对水源水中 AOM 和 NAs 前体物的检测,进一步优化水处理工艺,提高对这些污染物的去除。

参考文献

- [1] 张博,高建文,范绍锦,等. 南湖水系溶解性有机质来源及时空分布特征[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(6): 912-919.
Zhang B, Gao J W, Fan S J, et al. Origin and spatial-temporal distribution characteristics of dissolved organic matter in Nanhu Lake water system [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(6): 912-919.

- [2] 王钰, 易滢佳, 史俊, 等. 饮用水中天然有机物的分析与表征方法[J]. 净水技术, 2021, 40(1): 5-12, 36.
Wang Y, Yi Y J, Shi J, et al. Analysis and characterization methods for natural organic matters in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(1): 5-12, 36.
- [3] 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.
- [4] 赵夏婷, 李珊, 王兆伟, 等. 黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4105-4113.
Zhao X T, Li S, Wang Z W, et al. Composition, spatial distribution characteristics and source analysis of chromophoric dissolved organic matter in the Lanzhou reach of the Yellow River[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4105-4113.
- [5] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 475-482.
Feng W Y, Zhu Y R, Wu F C, et al. The fluorescent characteristics and sources of dissolved organic matter in water of Tai Lake, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 475-482.
- [6] 李娜, 黎佳茜, 李国文, 等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析[J]. 水生生物学报, 2018, 42(4): 854-864.
Li N, Li J X, Li G W, et al. The eutrophication and its regional heterogeneity in typical lakes of China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(4): 854-864.
- [7] 郭丽珊, 佟洪金, 刘国, 等. 湖库型水源地有机质污染特征研究——以川南地区 H 水库为例[J]. 四川环境, 2022, 41(4): 140-151.
Wu L S, Tong H J, Liu G, et al. Study on the characteristics of organic matter pollution in lake reservoir water source area—Taking H Reservoir in Southern Sichuan as an example[J]. Sichuan Environment, 2022, 41(4): 140-151.
- [8] 徐磊, 俞文正, 梁亮, 等. 天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4290-4294.
Xu L, Yu W Z, Liang L, et al. Effect of natural organic matter on coagulation efficiency and characterization of the flocs formed[J]. Environmental Science, 2013, 34(11): 4290-4294.
- [9] 胡孟柳, 林洁, 许光红, 等. 天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 169-176.
Hu M L, Lin J, Xu G H, et al. Effect of relative molecular mass distribution and hydrophilicity/hydrophobicity of NOM on membrane fouling in MF-combined process[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 169-176.
- [10] McIntyre A M, Guéguen C. Binding interactions of algal-derived dissolved organic matter with metal ions[J]. Chemosphere, 2013, 90(2): 620-626.
- [11] 李凯, 王晓东, 黄廷林. 湖库型水源天然有机物来源与特性及其对水处理工艺影响研究进展[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(4): 588-593.
Li K, Wang X D, Huang T L. Review on the origin, characteristics and treatability of natural organic matter in lakes and reservoirs[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, 50(4): 588-593.
- [12] 闫晓寒, 文威, 解莹, 等. 溶解性有机物特性及在国内的污染研究现状[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 169-178.
Yan X H, Wen W, Xie Y, et al. Study on the properties of dissolved organic matter and its pollution status in China: A review[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(6): 169-178.
- [13] Bei E, Shu Y Y, Li S X, et al. Occurrence of nitrosamines and their precursors in drinking water systems around mainland China[J]. Water Research, 2016, 98: 168-175. DOI: 10.1016/j.watres.2016.04.013.
- [14] Lee J H, Oh J E. A comprehensive survey on the occurrence and fate of nitrosamines in sewage treatment plants and water environment[J]. Science of the Total Environment, 2016, 556: 330-337. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.090.
- [15] Tyhali A, Forbes P B C. N-nitrosamines in surface and drinking waters: An African status report[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2023, 158: 116873. DOI: 10.1016/j.trac.2022.116873.
- [16] Nawrocki J, Andrzejewski P. Nitrosamines and water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(1/2): 1-18. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.005.
- [17] Wang C K, Zhang X J, Wang J, et al. Effects of organic fractions on the formation and control of N-nitrosamine precursors during conventional drinking water treatment processes[J]. Science of the Total Environment, 2013, 449: 295-301. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.080.
- [18] Liao X B, Zhao L, Shen L L, et al. Effect of pre-ozonation on N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation from four drinking-water sources during subsequent chloramination[J]. Water Supply, 2019, 19(6): 1816-1822.
- [19] Wang X X, Liu B M, Lu M F, et al. Characterization of algal organic matter as precursors for carbonaceous and nitrogenous disinfection byproducts formation: Comparison with natural organic matter[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 282: 111951. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111951.
- [20] Park K Y, Choi S Y, Ahn S K, et al. Disinfection by-product formation potential of algogenic organic matter from *Microcystis aeruginosa*: Effects of growth phases and powdered activated carbon adsorption[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 408: 124864. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124864.
- [21] Mitch W A, Gerecke A C, Sedlak D L. A N-Nitrosodimethylamine (NDMA) precursor analysis for chlorination of water

- and wastewater[J]. *Water Research*, 2003, 37(15): 3733–3741.
- [22] 王成坤. 饮用水中亚硝胺消毒副产物的分布、生成与控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- Wang C K. Distribution, formation and control of nitrosamine disinfection by-products in drinking water [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [23] 杨海毅. 水库 pH 值异常偏高成因分析及治理与保护探析[J]. *资源节约与环保*, 2022(4): 122–125.
- Yang H Y. Analysis of the causes of abnormally high pH value in reservoirs and exploration of management and protection measures [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2022(4): 122–125.
- [24] 韩婷婷, 黄嘉玲, 曹勇, 等. 太湖金墅港水源地取水口附近水域水质分析[J]. *江苏水利*, 2022(10): 45–48.
- Han T T, Huang J L, Cao Y, et al. Analysis of water quality near the water intake of Jinshu port water source in Taihu Lake [J]. *Jiangsu Water Resources*, 2022(10): 45–48.
- [25] 江钊泓, 毕然, 杜家豫, 等. 基于不同水厂水质调查的消毒副产物生成趋势及模型预测[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(2): 515–523.
- Jiang G H, Bi R, Du J Y, et al. Disinfection by-products formation and model prediction based on water quality surveys of different drinking water treatment plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(2): 515–523.
- [26] 苏芮, 徐慧敏, 王树人, 等. 东太湖养殖区、生态恢复区和对照区水质对比研究[J]. *化学与生物工程*, 2020, 37(6): 33–41.
- Su R, Xu H M, Wang S R, et al. Comparison and analysis on water quality of aquaculture, ecological restoration and control areas in east Taihu Lake [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2020, 37(6): 33–41.
- [27] 肖启涛, 廖远珊, 刘臻婧, 等. 藻型湖泊溶解有机碳特征及其对甲烷排放的影响[J]. *南京信息工程大学学报*, 2022, 14(1): 21–31.
- Xiao Q T, Liao Y S, Liu Z J, et al. Characteristics of dissolved organic carbon in algal-dominated lake and its influence on methane emission [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2022, 14(1): 21–31.
- [28] 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.
- [29] 周业凯, 陈卫, 陶辉, 等. 太湖水源水中溶解性有机物特性分析[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(5): 46–49.
- Zhou Y K, Chen W, Tao H, et al. Characteristics of dissolved organic matter in source water of Taihu Lake[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(5): 46–49.
- [30] 廖晓斌, 陈超, 汪隼, 等. 常规/臭氧生物活性炭去除有机物及亚硝胺前体物特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(4): 520–525.
- Liao X B, Chen C, Wang J, et al. Treatability of organics and nitrosamine precursors by the conventional/O₃-BAC process[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(4): 520–525.
- [31] 左延婷, 李爱民, 程士, 等. 蓝藻 AOM 特征与 DBPs 生成关系的研究进展[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 421–430.
- Zuo Y T, Li A M, Cheng S, et al. Research progress on relationship between algal organic matter characteristics and disinfection byproducts formation [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 421–430.
- [32] 廖晓斌. 某湖泊水中亚硝胺类消毒副产物前体物及其去除特性研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- Liao X B. Study on the by-product precursors and their removal characteristics of nitrosamines in the water of a lake [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [33] 王志健, 胡霞林, 尹大强. 藻源有机质表征及消毒副产物生成潜能研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(10): 2979–2991.
- Wang Z J, Hu X L, Yin D Q. Characterization and formation potential of disinfection by-products of algal organic matter: The critical review[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(10): 2979–2991.
- [34] Wang W F, Yu J W, An W, et al. Occurrence and profiling of multiple nitrosamines in source water and drinking water of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551: 489–495. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.175.
- [35] Lin Q F, Dong F L, Li C, et al. Disinfection byproduct formation from algal organic matters after ozonation or ozone combined with activated carbon treatment with subsequent chlorination[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 233–241. DOI: 10.1016/j.jes.2020.12.009.
- [36] Liu D C, Rao L, Shi X Y, et al. Comparison of the formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from algae organic matter by chlor(am)ination and UV irradiation[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 156078. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156078.