

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.008

基于光谱法解析污水厂DOM转化与DBPs生成特征

汪鹏^{1,2}, 郭洁³, 陆旦³, 沈虹³, 沈志豪³, 王凯丽³,
张童², 唐玉霖², 马晓雁¹

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 同济大学 环境科学与工程
学院, 上海 200092; 3. 昆山市污水处理有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘要: 通过检测污水处理厂进、出水以及各处理单元出水的理化指标,结合三维荧光光谱和紫外光谱特征,对污水处理厂中溶解性有机物(DOM)的迁移转化进行解析。结果表明,应用荧光区域积分法与平行因子分析法识别出污水中的2个特征荧光组分为类色氨酸(C1,275 nm/330 nm)和类富里酸(C2,290 nm/420 nm),在污水厂全流程处理工艺中,C1下降了85%、C2下降了50%;荧光组分与常规水质指标COD、BOD₅、TOC以及UV₂₅₄等均呈极显著正相关。加氯消毒后DOM的荧光特征峰出现蓝移,在出水中检测到的消毒副产物(DBPs)主要为三氯甲烷、二氯乙酸和三氯乙酸,浓度分别为16.3、19.0和23.8 μg/L,应受到关注。

关键词: 污水处理厂; 溶解性有机物; 荧光区域积分法; 平行因子分析; 消毒副产物
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0053-07

Dissolved Organic Matter Conversion and Disinfection By-products Formation Characteristics in Wastewater Treatment Plant Based on Spectral Analysis

WANG Peng^{1,2}, GUO Jie³, LU Dan³, SHEN Hong³, SHEN Zhi-hao³,
WANG Kai-li³, ZHANG Tong², TANG Yu-lin², MA Xiao-yan¹

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092,
China; 3. Kunshan Sewage Treatment Co. Ltd., Kunshan 215300, China)

Abstract: The physical and chemical indexes of the influent and effluent of a wastewater treatment plant (WWTP) and effluent of each treatment unit were detected, and the conversion of dissolved organic matter (DOM) in the WWTP was analyzed based on the three-dimensional fluorescence and ultraviolet spectral characteristics of the wastewater. Two characteristic fluorescent groups in wastewater were identified by fluorescence regional integration method and parallel factor analysis, which could be divided into tryptophan-like component C1 (275 nm/330 nm) and fulvic acid-like component C2 (290 nm/420 nm). In the whole treatment process of WWTP, C1 decreased by 85% and C2 decreased by 50%. The fluorescence components were positively correlated with water quality indexes such as COD, BOD₅, TOC and UV₂₅₄. After chlorination, the fluorescence characteristic peak of DOM was blue-shifted. The disinfection by-products (DBPs) detected in the effluent were mainly trichloromethane, dichloroacetic acid and trichloroacetic acid with concentrations of 16.3 μg/L, 19.0 μg/L and 23.8 μg/L, respectively, which

should be concerned.

Key words: wastewater treatment plant; dissolved organic matter; fluorescence regional integration; parallel factor analysis; disinfection by-products

近些年,随着我国城市经济的快速发展,城市污水总量逐年增加,污水处理厂硬件设施水平也得到了很好的提高,但管理与运营模式仍较为粗放。如何快速解析污水厂主要污染物的迁移转化特征与去除规律,减少水质波动对污水厂工艺稳定运行的干扰,同时评估污水厂各单元处理能力,对污水厂的运营及排放水质的监管至关重要。

城市污水处理厂的进水主要是生活污水,生活污水中含有大量的污染物,其中占比较大的是溶解性有机物(DOM),其本质是一系列可以通过0.45 μm 滤膜的混合有机物质^[1]。已有的研究中通常采用COD、BOD₅等综合指标表征有机物总量,不具备深入探究DOM种类的能力^[2]。污水中常见的DOM种类繁多,主要是由成分复杂的类腐殖质和具有芳香结构的类蛋白质等组成。类腐殖质、类蛋白质等均含有荧光基团,可通过荧光检测技术来探究DOM的变化情况^[3]。同时,水中大部分有机物在紫外可见波段范围(100~800 nm)具有吸收特性,可通过紫外光谱法分析被测物质在紫外条件下的吸收或反射情况,如在254 nm特征波长下的紫外吸光度能较好地反映水中有机物浓度。笔者结合理化指标及三维荧光光谱(EEMs)技术分析污水厂中DOM的变化,并在此基础上采用光谱数据处理技术建立理化指标与光谱之间的相关关系。

DOM在传统氯消毒过程中会生成消毒副产物(DBPs),易引起致癌、致畸、致突变等危害,近年来污水中常见消毒副产物如三卤甲烷(THMs)受到了较多关注^[4]。随着新冠疫情暴发,污水厂的消毒受到更广泛的关注,各种DBPs的生成还缺乏深入研究。因此,表征和解析污水处理过程中DOM变化的同时,研究DBPs的生成特征具有重要意义。

笔者基于某污水厂全流程常规控制指标的实测数据,分析各处理单元水质参数的变化情况;采用荧光光谱技术对污水处理过程中的DOM种类进行分析,进而采用荧光区域积分法与平行因子分析法(PARAFAC)更准确地评判DOM浓度的变化,建立有机污染指标与平行因子分析法得出的光谱数

据的相关关系;同时分析了加氯消毒后典型DBPs的生成特征。

1 材料与方法

1.1 样品采集

以某城市污水处理厂为研究对象,该厂采用A²O/三级污水处理工艺,具有同步脱氮除磷的作用。进水来自污水厂周边居民区生活污水。污水厂内共设有10个处理阶段,工艺流程以及采样点位置如图1所示,在转盘过滤器前后两次投加次氯酸钠进行消毒。取样点W1~W10分别代表进水泵房出水、曝气沉砂池出水、厌氧池出水、缺氧池出水、好氧池出水、二沉池出水、絮凝池出水、斜管沉淀池出水、转盘过滤器出水以及污水厂出水。采集水样时,对于含有杂质或污泥的水样需静置后取上清液进入下一预处理阶段,离心过滤后储存在聚四氟乙酸瓶中作为备检水样;用于消毒检测的水样取样后立刻投加过量的硫代硫酸钠淬灭余氯。水样冷藏保存并尽快进行检测分析。

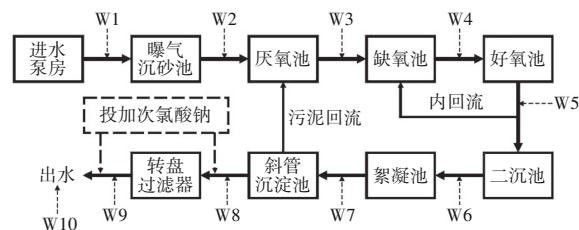


图1 污水厂工艺流程及取样点分布

Fig.1 Treatment process and sampling points of wastewater treatment plant

1.2 样品检测及数据分析

COD:重铬酸盐法;BOD₅:稀释与接种法;氨氮:气相分子吸收光谱法;总氮:碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;硝酸盐氮:紫外分光光度法;亚硝酸盐氮:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;总磷:钼酸铵分光光度法;总有机碳(TOC):燃烧氧化-非分散红外吸收法。溶解性有机氮(DON)为TN与NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N浓度之差。

水样的EEMs采用F-7000荧光分光光度计测定,将激发波长(λ_{ex})和发射波长(λ_{em})狭缝宽度设

为 5 nm,激发波长和发射波长的扫描范围分别设定为 240~450、220~550 nm,扫描速率为 12 000 nm/min,扫描间隔设为 5 nm。光谱扫描前先测定各样品在 254 nm 处的吸光度,对于吸光度过大的水样采用超纯水稀释直至其吸光度低于 0.1。空白对照需扣除超纯水的荧光数据,瑞利散射峰和拉曼散射峰可通过 Delaunay 三角插值法去除,平行因子分析模型在 Matlab 2020b 中进行处理。在本研究中,平行因子分析共抽取了 30 个 EEMs 矩阵进行运算,每个矩阵包括 67 个发射波长和 43 个激发波长。数据被分为 6 个随机数据集,3 个用于建模,另外 3 个用于验证,最终得到 2 个组分模型,对半检验及残差分析结果一致表明模型可以通过验证。荧光物质的荧光强度由得到的每个荧光组分的最大得分值(F_{max})表示。紫外光谱信息采用 DR-6000 紫外可见分光光度计测定。

DBPs 采用 GC-2014 型气相色谱仪测定,配备 HP-5 毛细管色谱柱(30 m×0.25 μm×0.25 μm)。其

中,三氯甲烷(TCM)、二氯一溴甲烷(BDCM)、一氯二溴甲烷(DBCM)和三溴甲烷(TBM)组成的混合标准物,以及二氯乙酸(DCAA)、三氯乙酸(TCAA)、二氯乙腈(DCAN)、溴氯乙腈(BCAN)和三氯硝基甲烷(TCNM)均购自上海安谱实验科技有限公司。甲醇为 HPLC 级,叔丁基甲基醚为 GC 级,其他试剂均为分析纯或标准品。

采用 OriginPro 2017 软件进行图形的绘制;使用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,包括数据的最大值、最小值、均值和标准差,对不同取样点的 DOM 成分进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 污水处理中的常规指标变化

在污水处理厂中,不同单元出水的各理化指标平均值如表 1 所示。可知,氨氮、TN、TP 分别由进水的 33.79、35.43 和 2.74 mg/L 降至出水的 0.15、7.37 和 0.21 mg/L,对应的去除率分别为 99.6%、79.2% 和 92.3%,满足国家一级 A 排放标准。

表 1 污水处理流程中理化指标的变化

Tab.1 Change of physical and chemical indicators during wastewater treatment process

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /COD	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	DON/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
W1	180.67	74.00	0.41	33.79	35.43	5.03	2.74
W2	157.00	65.00	0.41	34.92	36.37	2.13	2.65
W3	73.50	32.50	0.44	18.45	19.67	0.51	7.60
W4	31.67	12.00	0.38	4.75	9.67	2.56	3.64
W5	22.67	7.35	0.32	0.41	7.68	0.78	1.86
W6	17.00	5.55	0.33	0.22	8.92	0.70	1.27
W7	16.67	6.35	0.38	0.17	9.94	1.31	0.45
W8	17.33	6.05	0.35	0.16	8.24	1.93	0.16
W9	14.33	6.00	0.42	0.14	7.13	1.11	0.15
W10	14.33	4.10	0.29	0.15	7.37	0.42	0.21

该污水处理厂的出水 COD 浓度为 14.33 mg/L,总去除率达到了 92.1%。其中 COD 降解主要发生在厌氧段,这是由于污水与回流污泥混合后,一部分易生物降解的大分子有机物在厌氧段兼性厌氧发酵菌的作用下,转化成易被聚磷菌吸收利用的小分子有机物。BOD₅浓度经生物段处理后保持在较低水平,在厌氧段易生物降解的大分子有机物被转化分解成小分子有机物,随后进入缺氧池供异养反硝化菌吸收利用,所以 BOD₅浓度在缺氧段后大幅度降低至 12.00 mg/L,整个工艺出水 BOD₅浓度为 4.10 mg/L,总去除率达到 94.5%。BOD₅/COD 值沿工艺流程呈下降趋势,进水 BOD₅/COD 值为 0.41,此

时大部分有机物较易生物降解,经过污水厂处理后出水 BOD₅/COD 值为 0.29,此时出水中的有机物大部分较难生物降解。

2.2 荧光区域积分法分析

对全流程水样荧光数据积分得到相应的荧光区域积分标准体积,如表 2 所示。采用 Chen 等^[5]提出的荧光区域积分法,将三维荧光光谱图划分为 5 个代表性区域,Ⅰ区:λ_{Ex}/λ_{Em}=200~250 nm/280~325 nm,Ⅱ区:λ_{Ex}/λ_{Em}=200~250 nm/325~375 nm,Ⅲ区:λ_{Ex}/λ_{Em}=200~250 nm/375~550 nm,Ⅳ区:λ_{Ex}/λ_{Em}=250~450 nm/280~375 nm,Ⅴ区:λ_{Ex}/λ_{Em}=250~450 nm/375~550 nm。其中,Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅳ区的荧光物质

与类蛋白质有关,Ⅲ区和Ⅴ区的荧光物质与类腐殖质相关。从表2可以看出,在进水中Ⅳ区的荧光强

度最高,其次是Ⅴ区,两者的荧光强度之和占总荧光强度的79%。

表2 不同水样的荧光区域积分标准体积

Tab.2 Normalized fluorescence region integral volume of different water samples

$10^6 \text{ a.u.} \cdot \text{nm}^2$

项目	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10
I	3.60	3.32	2.87	1.04	0.79	0.75	0.75	0.77	0.83	0.75
II	4.77	4.56	4.57	3.03	2.40	2.30	2.18	2.41	2.38	2.11
III	4.54	4.38	4.30	2.98	2.41	2.38	2.08	2.22	2.39	1.80
IV	29.10	27.13	20.60	8.69	7.90	7.84	7.53	7.73	8.32	6.94
V	19.22	18.81	16.42	11.89	11.16	11.25	9.37	9.41	10.69	7.82
$\Phi_{i,n}$	61.23	58.20	48.76	27.63	24.66	24.52	21.91	22.54	24.61	19.42

各区域荧光强度随工艺流程均呈下降趋势,如图2所示,5个荧光区域主要在厌氧段和缺氧段有明显的去除效果,这与常规理化指标的分析结果一致。在全流程工艺中,Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅳ区的荧光强度先达到稳定值,污水中的蛋白类物质是污水厂的主要去除对象。各分区的强度下降程度可反映不同种类有机物的去除率,Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅳ区、Ⅴ区以及总和 $\Phi_{i,n}$ 的有机物去除率分别为79.2%、55.8%、60.3%、76.2%、59.3%、68.2%。

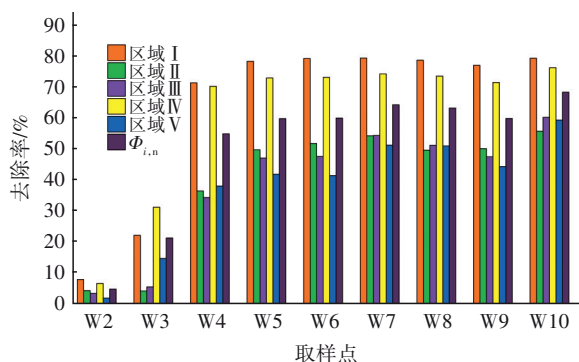


图2 各处理单元对不同荧光区域积分标准体积的去除率

Fig.2 Removal rates of normalized integral volume for different fluorescence regions by each treatment unit

2.3 荧光组分平行因子分析

为了进一步评估污水厂中有机物的沿程迁移转化情况,对全流程中的DOM进行了PARAFAC分析。污水厂全流程DOM通过荧光测试后,结合PARAFAC法的核心一致度评价,结果显示最优主成分数量为2。上述荧光矩阵可解析为两个组分,相应的激发和发射光谱如图3所示。主成分1(C1)的激发和发射波长位于275 nm/330 nm,主成分2(C2)的激发和发射波长位于290 nm/420 nm,主成分1和2分别对应类蛋白质中的类色氨酸和类腐殖

质中的类富里酸组分。

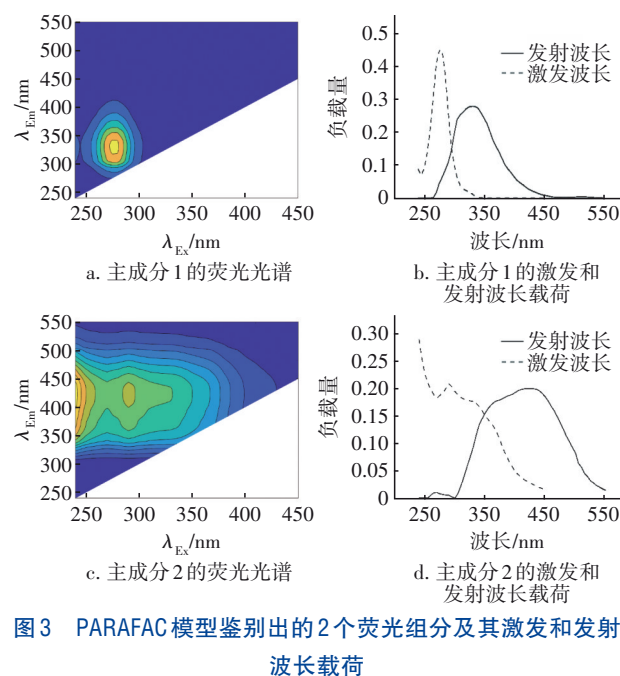


图3 PARAFAC模型鉴别出的2个荧光组分及其激发和发射波长载荷

Fig.3 Two fluorescence components identified by PARAFAC model and their excitation and emission wavelengths loading

通常情况下,总荧光强度可以用来表征DOM浓度。如图4所示,污水厂进水中C1组分含量较高,占总荧光强度的69%,即类色氨酸组分占比较大。进入到厌氧、缺氧和好氧三个反应阶段,C1组分的下降速度显著,在后续处理单元中下降速度有所减缓,即类色氨酸组分在生物处理单元的去除速度最为迅速,后续单元较为稳定。经过污水厂全流程处理后,C1和C2组分分别下降了85%和50%,其对应的正是类色氨酸类和类富里酸类荧光物质的去除率。类色氨酸类物质由进水中占比69%降至出水中占比40%,而类富里酸物质由进水中占比31%升

至出水中占比 60%,与荧光区域积分法得到的结果一致。

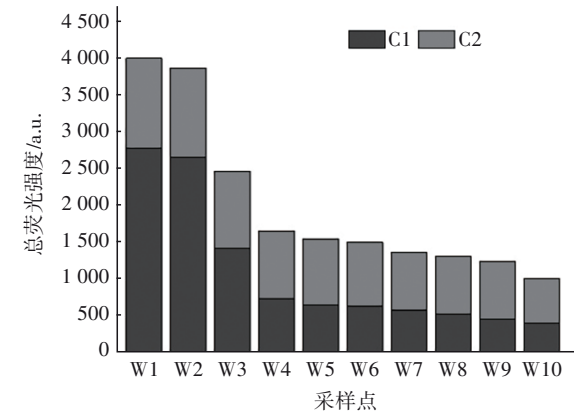


图4 污水厂 DOM 荧光组分的相对比例
Fig.4 Relative proportion of DOM fluorescent components in wastewater treatment plant

2.4 紫外光谱分析

为了进一步厘清污水厂中 DOM 的变化,应用紫外光谱对污水厂全流程水样进行了检测,结果如表 3 所示。UV₂₅₄是指水中有机物在 254 nm 紫外波长下的吸光度,污水厂出水中的主要有机污染物如木质素、丹宁、腐殖质以及各种含有芳香烃和双键或羟基的共轭体系等在波长为 254 nm 处都有明显的吸收^[6],UV₂₅₄是衡量水中有机物以及有机物芳香构造特征的重要指标。从表 3 可以看出,UV₂₅₄随处理流程呈降低的趋势,从进水的 0.33 cm⁻¹降至出水的 0.15 cm⁻¹;其中在厌氧池出水处有一个较大幅度的降低趋势,可能是因为含苯环结构的有机物在厌氧生物处理阶段被大量降解,而在后续处理阶段下降速度缓慢是由于此时水中所剩的有机物大多是难降解的含烃类的有机物。

表3 污水处理各流程的 UV₂₅₄、TOC 与 SUVA 值
Tab.3 UV₂₅₄, TOC and SUVA in each unit of wastewater treatment plant

项 目	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	TOC/(mg·L ⁻¹)	SUVA/(L·mg ⁻¹ ·m ⁻¹)
W1	0.33	28.35	1.16
W2	0.27	21.40	1.26
W3	0.18	13.05	1.38
W4	0.19	5.20	3.65
W5	0.18	4.85	3.71
W6	0.17	4.80	3.54
W7	0.17	4.45	3.82
W8	0.16	4.10	3.90
W9	0.16	4.00	4.00
W10	0.15	3.70	4.05

TOC 浓度在经过缺氧池工艺后基本达到稳定值,物理处理工艺和生化处理工艺可去除大部分 TOC,最终出水 TOC 为 3.70 mg/L,全流程工艺对 TOC 的去除率为 86.9%。比紫外吸收值(SUVA)为单位浓度 TOC 下的 UV₂₅₄ 值,其反映的是水体中芳香族化合物的含量,而芳香族化合物的含量及芳香度与有机物的反应性有关^[7],这对于污水处理工艺具有重要意义。从进水到出水 SUVA 值逐渐增大,尤其经过生物处理阶段后,SUVA 值从 1.27 L/(mg·m) 增大到 3.65 L/(mg·m),表明污水处理过程中芳香性有机碳或共轭不饱和双键比例呈上升趋势,水中的有机物逐渐趋于稳定。

2.5 光谱组分与理化指标的相关性

为进一步探究利用光谱分析法在表征有机物方面的效果,建立组分 C1 和 C2 与 BOD₅、COD、TOC 以及 DON 等常用指标之间的相关性。目前这些常用指标存在一定的缺点,如 BOD₅测定时间较长,且在浓度较高时误差较大,不利于生产实践;COD 的测定需额外添加化学试剂,存在二次污染水质的可能;TOC 反映的是水中有机物所含碳的总量,不能区分有机物的生物降解性;而 DON 的传统测试方法较复杂。类色氨酸和类富里酸组分与各指标之间的相关性如表 4 所示。类色氨酸组分与 COD、BOD₅ 和 TOC 的相关性较好,相关系数分别为 0.826、0.883 和 0.940,与 DON 的相关性一般,相关系数仅为 0.451;类富里酸组分与 COD、BOD₅、TOC、DON 的相关系数分别为 0.688、0.724、0.668、0.427。类色氨酸组分与各指标的相关性要高于类富里酸组分与各指标的相关性,因此类色氨酸组分可被用于指示 DOM 的浓度变化。

表4 污水中光谱组分与理化指标的相关性
Tab.4 Correlation between spectral components and physicochemical indexes in wastewater

项目	C1	C2	COD	BOD ₅	TOC	DON	UV ₂₅₄
C1	1	0.787**	0.826**	0.883**	0.940**	0.451*	0.954**
C2		1	0.688**	0.724**	0.668**	0.427	0.904**
COD			1	0.960**	0.888**	0.706**	0.969**
BOD ₅				1	0.894**	0.615**	0.967**
TOC					1	0.595**	0.917**
DON						1	0.830**
UV ₂₅₄							1

注：“*”表示在 0.05 水平上相关性显著;“**”表示在 0.01 水平上相关性显著。

2.6 污水厂内DBPs的生成特征

DOM浓度会影响DBPs的生成量,污水中的溶解性有机碳(DOC)成分复杂,包括碳水化合物、氨基酸类、烃和卤代烃、维生素类以及腐殖质类物质。氯消毒后部分碳链和官能团结构会被加成、氧化、取代与重构,生成大量含碳消毒副产物(C-DBPs),最常见的是三卤甲烷(THMs)与卤乙酸(HAAs)类。污水中的DON包含多种含氮有机化合物,其中已经确定其结构组成的有氨基酸、乙二胺四乙酸(EDTA)、低分子质量胺类,约占总有机氮的30%^[8]。污水中含氮有机物加氯后会生成含氮消毒副产物(N-DBPs),如卤代硝基甲烷(HNMs)、卤乙腈(HANs)、卤代乙酰胺(HAcAms)等^[9]。城市污水处理厂出水经过消毒后将会排入湖泊及河流中,因此通过对DOM的分析弄清污水厂出水中生成的典型C-DBPs、N-DBPs种类与浓度非常必要。

荧光光谱中荧光峰的微小变化表明在消毒过程中有机物的分子结构发生了变化。研究表明,随着氯化反应的进行,DOM的荧光峰位置会蓝移即向短波长转移,激发波长位置由330 nm移到315 nm,荧光峰的强度会逐渐降低,随着加氯量的增加,这种情况的变化会更大。如图5所示,经过氯化反应后C1与C2组分的荧光峰位置发生了蓝移,荧光强度也有所下降。荧光峰蓝移是 π 电子系统的变化如芳香环的减少引起的^[10],可能在氯化反应过程中大分子有机物被降解,芳香族蛋白质和溶解性微生物代谢产物等物质中所含的芳香环被氧化^[9]。经计算,污水厂加氯后转盘过滤器出水以及最终出水的荧光指数(FI)分别为2.16和2.13,当FI>1.9时,表明有机物主要来自内源影响^[11],由此可知,溶解性微生物代谢产物也是DBPs的主要前体物。

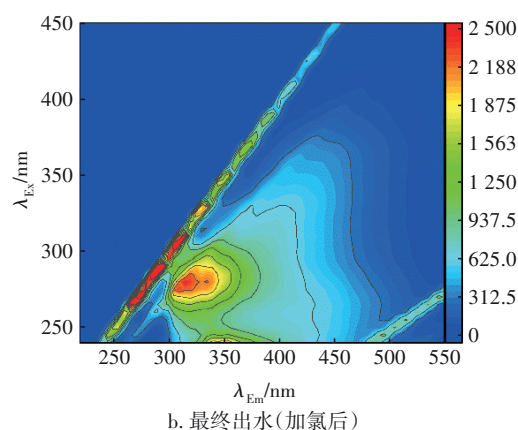
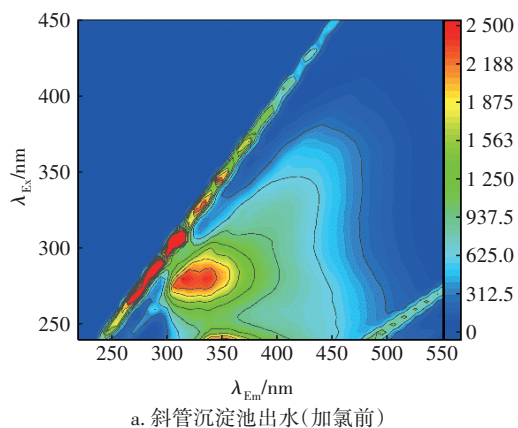


图5 氯消毒前后的三维荧光光谱

Fig.5 EEM of water samples before and after chlorine disinfection

污水处理厂加氯消毒后生成的主要DBPs如图6所示。C-DBPs主要有TCM、DCAA和TCAA等,在出水中的即时生成浓度分别为14.7、19.0和23.8 $\mu\text{g/L}$,其他浓度较低的C-DBPs有BDCM、DBCM、TBM等。N-DBPs主要有DCAN、BCAN和三氯乙酰胺(TCAcAm),其生成浓度分别为2.6、0.7和3.4 $\mu\text{g/L}$ 。此外,还发现了一种新型消毒副产物即三氯乙醛(CH),生成浓度为8.8 $\mu\text{g/L}$ 。

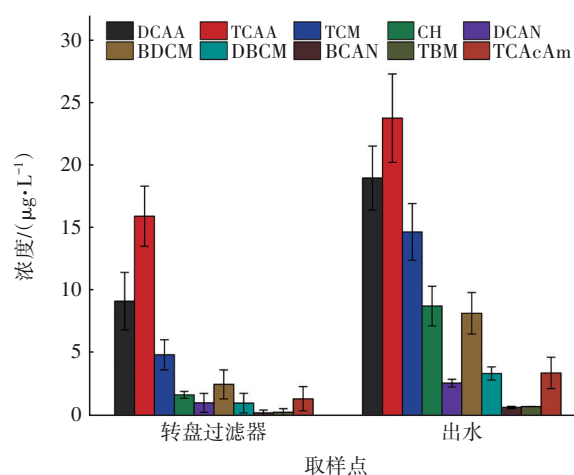


图6 污水厂中加氯后生成的主要消毒副产物

Fig.6 Main disinfection by-products generated after chlorination in wastewater treatment plant

3 结论

① 荧光区域积分法显示, I区、II区、III区、IV区、V区以及总和 $\Phi_{i,n}$ 的荧光有机物去除率分别为79.2%、55.8%、60.3%、76.2%、59.3%、68.2%。利用PARAFAC模型识别出该污水处理厂污水中的主要荧光组分为类色氨酸和类富里酸,前者由进水

占比69%降低到了出水占比40%,而后者则由进水占比31%升高到了出水占比60%,污水厂中的类色氨酸类物质变化明显。

② 污水中的荧光组分与COD、BOD₅、TOC、UV₂₅₄等常规指标均呈极显著正相关,且类色氨酸组分与各指标的相关性要高于类富里酸组分与各指标的相关性,类色氨酸组分可被用于指示DOM浓度的变化。

③ 污水厂加氯消毒后,DOM与消毒剂反应导致其荧光峰蓝移。污水厂出水中检测到的DBPs主要有三氯甲烷、二氯乙酸和三氯乙酸,即时浓度分别为16.3、19.0和23.8 μg/L,应受到关注。

参考文献:

- [1] FINDLAY S E G, SINSABAUGH R L. Aquatic Ecosystems: Interactivity of Dissolved Organic Matter [M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- [2] 周明罗, 陈海焱, 湛书, 等. 移动床生物膜技术处理校园污水过程中DOM的光谱特征 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(7): 2160-2165.
ZHOU Mingluo, CHEN Haiyan, CHEN Shu, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in moving bed bio-film reactor process for treating campus sewage [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(7): 2160-2165 (in Chinese).
- [3] CARSTEA E M, BRIDGEMAN J, BAKER A, *et al.* Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: a review [J]. Water Research, 2016, 95: 205-219.
- [4] 韩芸, 周学瑾, 彭党聪, 等. 污水厂出水DOM各组分的荧光特性及其THMFP [J]. 中国给水排水, 2011, 27(21): 19-22.
HAN Yun, ZHOU Xuejin, PENG Dangcong, *et al.* Fluorescence characteristic and THMFP of DOM fractions in secondary effluent [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(21): 19-22 (in Chinese).
- [5] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [6] 林星杰, 杨慧芬, 宋存义. UV₂₅₄在水质监测中应用的研究 [J]. 能源与环境, 2006(1): 22-24.
LIN Xingjie, YANG Huifen, SONG Cunyi. Study on the application of UV₂₅₄ in water quality monitoring [J]. Energy and Environment, 2006 (1): 22-24 (in Chinese).
- [7] 杨毅, 杨霞霞. 城市污水处理过程中DOM的三维荧光光谱及紫外谱图特性 [J]. 环境工程学报, 2015, 9 (12): 5672-5676.
YANG Yi, YANG Xiaxia. Characteristic of three dimensional fluorescence spectra and UV spectra of DOM during process of urban sewage treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9 (12): 5672-5676 (in Chinese).
- [8] PEHLIVANOGLU-MANTAS E, SEDLAK D L. Measurement of dissolved organic nitrogen forms in wastewater effluents: concentrations, size distribution and NDMA formation potential [J]. Water Research, 2008, 42(14): 3890-3898.
- [9] 刘冰, 于鑫, 余国忠, 等. 污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能 [J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3156-3163.
LIU Bing, YU Xin, YU Guozhong, *et al.* Chlorination characteristic and disinfection by-product formation potential of dissolved organic nitrogen compounds in municipal wastewater [J]. Environmental Science, 2013, 34(8): 3156-3163 (in Chinese).
- [10] COBLE P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 1996, 51 (4): 325-346.
- [11] JOHNSON M S, COUTO E G, ABDO M, *et al.* Fluorescence index as an indicator of dissolved organic carbon quality in hydrologic flowpaths of forested tropical watersheds [J]. Biogeochemistry, 2011, 105 (1/3): 149-157.

作者简介:汪鹏(1996-),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:wp9610@126.com

收稿日期:2020-12-31

修回日期:2021-03-29

(编辑:刘贵春)