

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 09. 006

# 预氯化协同紫外消毒对原水藻类生成DBPs的影响

黄慧婷<sup>1</sup>, 蔡佳男<sup>1</sup>, 孙文煜<sup>2</sup>, 闫通<sup>1</sup>

(1. 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100192; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 针对南水北调中线工程丹江口水库原水, 考察其优势藻种以及有机物和藻类胞内外有机物在预氯化、预氯化协同紫外消毒条件下的消毒副产物(DBPs)生成情况。结果表明, 次氯酸钠的强氧化作用对蓝藻的影响最为明显; 藻类的胞内有机物不是DBPs的主要前体物, DBPs的主要前体物为原水中的有机物和藻类胞外有机物; 氯投加剂量决定了DBPs的生成潜能; 协同的紫外消毒在有余氯存在的情况下会促进生成更多的DBPs。

**关键词:** 南水北调; 藻类; 预氯化; 紫外消毒; 消毒副产物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0040-07

## Effect of Pre-chlorination Combined with Ultraviolet Disinfection on Formation of Disinfection By-products Induced by Algae in Raw Water

HUANG Hui-ting<sup>1</sup>, CAI Jia-nan<sup>1</sup>, SUN Wen-yu<sup>2</sup>, YAN Tong<sup>1</sup>

(1. Beijing Waterworks Group Co. Ltd., Beijing 100192, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The formation of disinfection by-products (DBPs) from dominant algae species, organic matter, and algae in the raw water of the Danjiangkou Reservoir, located along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project, was systematically investigated under both pre-chlorination and ultraviolet disinfection conditions. The potent oxidizing properties of sodium hypochlorite exhibited the most significant impact on cyanobacteria. The intracellular organic matter of algae was not the primary precursor of DBPs. Instead, the main precursors of DBPs were the organic matter and the extracellular organic matter of algae in raw water. The formation potential of DBPs was assessed based on the chlorine dosage. The synergistic UV disinfection could lead to the formation of increased DBPs when excess chlorine was present.

**Key words:** South-to-North Water Diversion Project; algae; pre-chlorination; ultraviolet disinfection; disinfection by-products

南水北调中线工程作为世界上最大的调水工程,旨在缓解华北地区的水资源短缺问题。中线干渠水源来自多条河流,含有大量的营养物质如氮、磷

等,且水流速度较慢,容易形成静水区域,为藻类的生长繁殖创造了有利条件<sup>[1]</sup>。藻细胞在生长或死亡过程中释放到水体中的代谢产物,统称为藻类有机

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200904)

物(AOM)。通常藻类在生长代谢过程中向环境自主释放的有机质聚集在细胞外,被称为胞外有机物(EOM),主要包括色氨酸、酪氨酸、类蛋白质和类腐殖酸/富里酸组分;而藻细胞衰老自溶或藻细胞膜因外界氧化压力受损,由胞内释放到水体中的有机物,被称为胞内有机物(IOM),主要由类蛋白质组成,包括类色氨酸、类酪氨酸等<sup>[2]</sup>。藻类的大量存在,势必会增加水厂常规水处理过程的负担<sup>[3-5]</sup>。一般认为,藻细胞对常规水处理的影响主要体现在以下4个方面<sup>[6]</sup>:①混凝沉淀除浊效率降低;②滤料堵塞和板结,导致过滤周期缩短;③构筑物老化程度加剧;④产生消毒副产物(DBPs)。国内实际生产中常采用的除藻方式主要是预氧化技术,采用的氧化剂主要有NaClO、臭氧和高锰酸盐等<sup>[7]</sup>。锰离子长期存在于供水管网中并沉积会引发“黑水”现象,臭氧的投加成本相对较高,因此,预氯化是目前水厂普遍采用的控藻技术。

紫外线消毒技术以其高效、光谱性好、无消毒副产物等优势逐渐成为物理消毒技术的代表,受到业内人士的青睐。近年来,国内已有多个城市的大型地表水净水厂采用此种消毒技术,它通常加设在清水池进水前<sup>[8]</sup>。随着紫外消毒在水处理中的应用越来越广泛,预氯化又是目前水厂普遍采用的预处理方式,将预氯化协同紫外消毒应用于供水厂中势必会影响消毒副产物的生成,但目前的研究主要集中在主加氯阶段的不同消毒方式对消毒副产物的影响方面。因此,为了探究预氯化协同紫外消毒条件下藻类大量存在对消毒副产物生成的影响,笔者对南水北调原水中的优势藻种和有机物、藻类的胞内外有机物在预氯化及预氯化协同紫外消毒条件下的消毒副产物生成情况进行了试验研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与材料

试验用紫外反应器如图1所示,为1个圆柱形石英容器,其直径为11 cm、高度为23 cm;内置1个低压汞灯,其功率为10 W,发射波长为254 nm,平均紫外荧光率为2.5 mW/cm<sup>2</sup>。紫外剂量通过调整照射时间来设置,在本试验中设置3种紫外剂量,分别为40、80和160 mJ/cm<sup>2</sup>。

试验用藻种原液购自武汉水生所藻种库,包括:盘星藻(绿藻)、微囊藻(蓝藻)和舟形藻(硅藻),

藻密度 $\geq 1 \times 10^6$  个/mL。



图1 紫外反应器

Fig.1 UV reactor

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 原水中有有机物及AOM的获取

采集1 L原水,采用0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤,滤膜上的可见覆盖物被看作是藻类细胞,滤出液被看作是原水中有有机物及藻类胞外有机物溶液。其中,滤膜上的藻类细胞通过冻融法获得藻细胞内的有机物(IOM),即将滤膜用纯水多次清洗后,通过冷冻解冻循环来破坏藻类细胞。

#### 1.2.2 原水中优势藻种的确定

在南水北调中线工程丹江口水库作为原水的水厂中,于2023年5月—7月期间每月采集一次水厂进水,采用0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤,选择含有可见覆盖物的滤膜,通过高通量测序方法获得原水中藻的种类及占比情况。

#### 1.2.3 优势藻种形态观察及其生成DBPs的检测

将1 mL藻种原液溶于1 L超纯水中,配制成藻源水放入烧杯中,将烧杯置于磁力搅拌器上,向藻源水中加入5 mg/L的次氯酸钠溶液,并在其中放入转子模拟预氯化条件,待充分反应2 h后进行紫外消毒,紫外剂量分别为40和160 mJ/cm<sup>2</sup>,检测未经紫外消毒以及经紫外消毒后停留时间为0和24 h的消毒副产物生成情况,以此来反映不同优势藻种在预氯化及预氯化协同紫外消毒条件下EOM和IOM的综合DBPs生成潜势。同时,针对含有不同优势藻种的藻源水,取0.1 mL样品置于显微镜的藻类计数框中,于显微镜下计数100个视野,观察单独预氯化 and 预氯化协同紫外消毒(高剂量)条件下藻个体的形态变化。

#### 1.2.4 原水中有有机物和AOM生成DBPs的检测

将采集的原水平均分成3份,每份为1 L,采用0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜进行过滤。而后将含有胞内有机物的

水样配制成1 L的溶液置于烧杯中,滤出液1 L放置于另外的烧杯中,此过程重复3次以获取试验用的水样。将盛有试验用水的烧杯置于磁力搅拌器上,分别加入不同浓度(1、3和5 mg/L)的次氯酸钠溶液,并放入转子模拟预氯化条件,待充分反应2 h后进行紫外消毒,紫外剂量分别为40和80 mJ/cm<sup>2</sup>,经紫外消毒后分别在停留时间为0、24和72 h进行DBPs的检测,以此来反映实际水体中藻类在预氯化以及预氯化协同紫外消毒条件下IOM和EOM的DBPs生成潜势。

### 1.3 检测方法

#### 1.3.1 实际水体中藻类的采集及检测

在以南水北调中线工程丹江口水库水为原水的水厂中采集进水1 L,采用0.22 μm滤膜进行过滤,滤至膜上有可见覆盖物,收集滤膜至离心管中,将样品送往上海美吉生物医药科技有限公司进行23S rDNA基因高通量测序,以检测藻种类,引物为p23SrV\_f1(5'-GGACAGAAAGACCCTATGAA-3')和p23SrV\_r1(5'-TCAGCCTGTTATCCCTAGAG-3'),而后通过QIIME、mothur等软件对高通量测序数据进行分析。

#### 1.3.2 消毒副产物的样品前处理及检测方法

样品前处理:取20 mL水样于40 mL萃取瓶中,加入6 g无水硫酸钠,再加入2 mL甲基叔丁基醚(含200 μg/L内标物1,2-二溴丙烷),置于涡旋振荡器中,以2 500 r/min的转速振荡10 min,之后静置5 min左右,待有机层与水层分界明显时,将上层液体移取约1 mL于进样瓶中,检查瓶中无分层,最后进行仪器检测。

DBPs的检测方法:采用Agilent 7890A气相色谱仪和电子捕获检测器,结合DB-1701熔融石英毛细管柱(30 m×0.25 mm)进行DBPs分析。进样量为1 μL;进样器温度为200 ℃;检测器温度为300 ℃;柱温最初为35 ℃并保持15 min,然后以25 ℃/min的速率升至145 ℃并保持3 min,最后以35 ℃/min的速率升至240 ℃并保持5 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 优势藻种的确定

试验中检测到的南水北调原水中藻的种类以及占比情况如表1所示。可以看出,在原水已知分类的物种中,占比最高的是真核生物,在各个月份

中均高于20%;藻类在原水中的总占比为28.38%(5月)、18.63%(6月)和26.72%(7月),基本在20%左右,占比较高,其中,5月和7月占比较高的是蓝藻门,6月占比较高的是绿藻门,检测出的藻种类主要是蓝藻门、绿藻门和硅藻门,由此确定了本试验的优势藻种。

表1 原水中藻的种类及占比情况(门水平)

Tab.1 Types and proportions of algae in raw water (phylum level) %

项目	未分类	变形菌门	真核生物	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	其他
5月	37.78	6.96	24.49	21.68	1.73	4.97	2.39
6月	39.50		38.57	6.89	7.09	4.65	3.30
7月	36.78	10.71	21.09	22.90		3.82	4.70

### 2.2 预氯化对优势藻种形态及DBPs生成的影响

#### 2.2.1 优势藻种的形态变化

预氯化前后不同优势藻种的形态变化情况如图2所示。

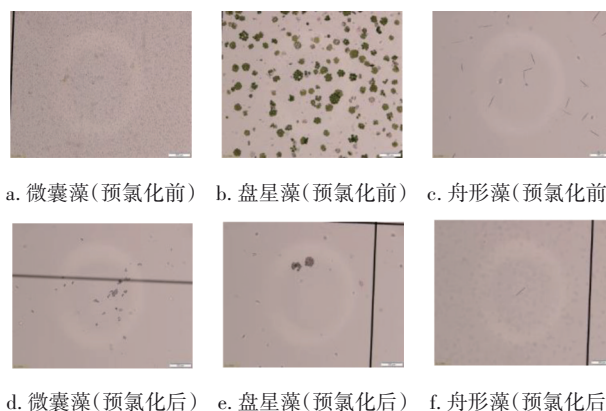


图2 预氯化前后优势藻种的形态变化

Fig.2 Change in morphology of dominant algal species before and after pre-chlorination

从图2可以看出,经预氯化后,蓝藻数量锐减,无完整的蓝藻个体存在,仅能看到一些蓝藻的碎片;而绿藻和硅藻数量虽然有明显的下降,但仍可观察到完整的绿藻和硅藻个体。蓝藻是原核生物,为最简单、最原始的单细胞生物,没有细胞核,易受到外部攻击;绿藻是真核生物,它的细胞壁由纤维素及其他多糖等多层结构组成,较为坚硬;硅藻的坚硬外壳不易被破坏。由此推测,次氯酸钠的强化作用对蓝藻的影响最为明显,可使蓝藻的细胞壁破裂,胞内有机物释放到水中。

### 2.2.2 优势藻种的DBPs生成情况

预氯化条件下优势藻种的DBPs生成情况如图3所示,三氯甲烷(TCM)是DBPs的主要贡献者,其次是二氯乙腈(DCAN)和二氯一溴甲烷(DCBM)。含有微囊藻的藻源水即时生成的DBPs总量达到20.00  $\mu\text{g/L}$ ,充分反应24 h后生成的DBPs总量达到23.23  $\mu\text{g/L}$ ;含有盘星藻的藻源水即时生成的DBPs总量为15.19  $\mu\text{g/L}$ ,充分反应24 h后生成的DBPs总量达到20.99  $\mu\text{g/L}$ ;含有舟形藻的藻源水即时生成的DBPs总量达到12.34  $\mu\text{g/L}$ ,充分反应24 h后生成的DBPs总量达到15.85  $\mu\text{g/L}$ ,不同优势藻种在相同预氯化条件下生成的DBPs量存在明显差异。反应24 h后,DCBM的生成量相比即时生成量有明显降低。而DCAN是含氮类消毒副产物(N-DBPs)的代表,其在即时反应中的生成量较少,但在反应24 h以后,DCAN生成量均有不同程度的增加,这是因为藻类有机物中含有大量的R-NH<sub>2</sub>官能团,与氯反应会生成DCAN,但推测该反应需要较长时间才能彻底完成。

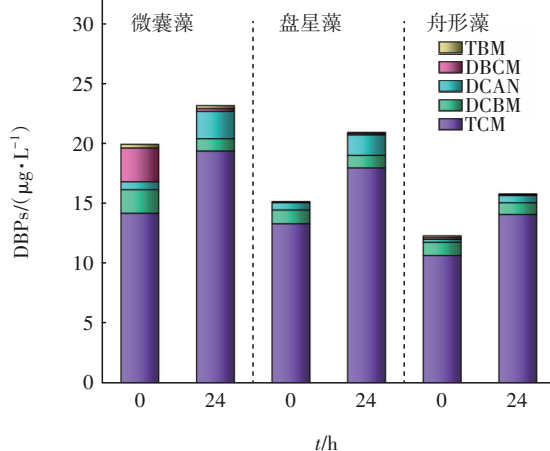


图3 预氯化条件下优势藻种的DBPs生成情况

Fig.3 DBPs formation of dominant algal species under pre-chlorination condition

## 2.3 预氯化协同紫外对藻形态和DBPs生成的影响

### 2.3.1 优势藻种的形态变化

预氯化协同紫外消毒条件下不同优势藻种的形态变化见图4。与单独预氯化条件下相比,在预氯化协同紫外消毒条件下,蓝藻的形态和数量均无明显变化,而绿藻和硅藻的形态发生了变化,绿藻出现了碎片状,硅藻发生了断裂,由此表明,后续的紫外消毒进一步将剩余绿藻和硅藻的完整个体破坏,将其胞内有机物释放到水中。



a. 微囊藻 b. 盘星藻 c. 舟形藻

图4 预氯化协同紫外消毒后优势藻种的形态变化

Fig.4 Change in morphology of dominant algal species after pre-chlorination with UV disinfection

### 2.3.2 优势藻种的DBPs生成情况

预氯化协同紫外消毒条件下优势藻种的DBPs生成情况如图5所示(1代表紫外剂量为40  $\text{mJ/cm}^2$ , 2代表紫外剂量为160  $\text{mJ/cm}^2$ )。随着紫外剂量的增加,即时生成的DBPs总量也有所增加,增幅在1~2  $\mu\text{g/L}$ 左右;在充分反应24 h后,不同紫外剂量下生成的DBPs总量基本相当,表明紫外剂量的高低对即时生成的DBPs总量有一定的影响,而EOM和IOM的综合DBPs生成潜能主要和参与反应的氯消毒剂量有关。

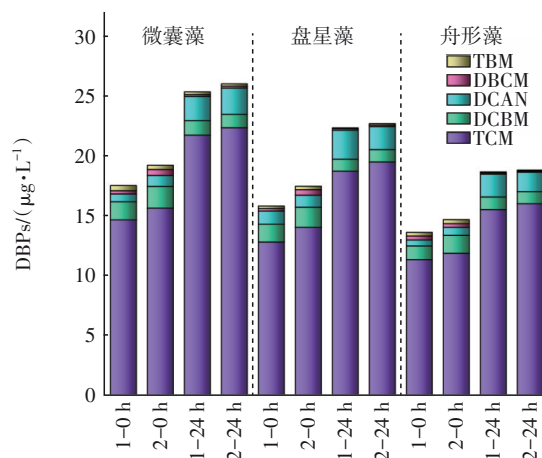


图5 预氯化协同紫外消毒条件下优势藻种的DBPs生成情况

Fig.5 DBPs formation of dominant algae species under pre-chlorination with UV disinfection

即时生成的DBPs中TCM所占比例最大,随着反应时间的延长,TCM的占比出现小幅度增长,它是DBPs的最大贡献者。其次做出贡献的是DCAN和DCBM,其中,DCBM占比在反应24 h后分别呈现不同程度的下降,而DCAN是N-DBPs的代表,在即时反应后所占比例较小,在反应24 h后占比均有不同程度的增大,据此推测该反应需要较长时间才能彻底完成。

## 2.4 预氯化对实际水体中藻类生成 DBPs 的影响

### 2.4.1 藻类 IOM 的 DBPs 生成情况

预氯化条件下原水中藻类 IOM 的 DBPs 生成情况如图 6 所示。

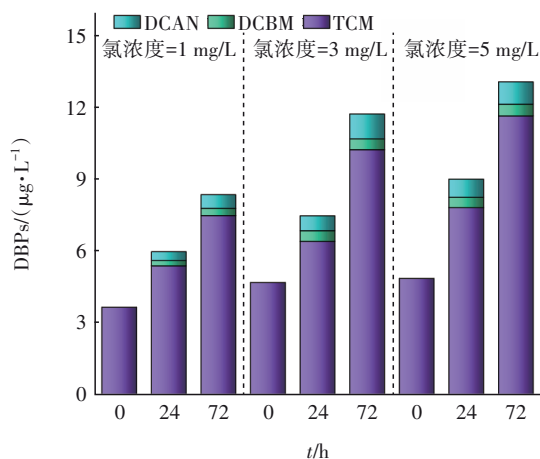


图6 预氯化条件下原水中藻类 IOM 的 DBPs 生成情况

Fig.6 DBPs formation of algae IOM in raw water under pre-chlorination condition

由图 6 可知,即时生成的 DBPs 仅有 TCM 一种物质,当氯投加浓度增加时,DBPs 生成量有所增加,但是种类没有发生变化。而当停留时间继续延长至 24 和 72 h 后,DBPs 生成量有所增加,种类亦增加,变为 TCM、DCBM 和 DCAN。当氯投加浓度为 1 mg/L 时,TCM 浓度从 0 h 的 3.66  $\mu\text{g/L}$  升高至 72 h 的 7.49  $\mu\text{g/L}$ ,增加了 1 倍多;当氯投加浓度为 3 和 5 mg/L 时,TCM 浓度分别从 0 h 的 4.69 和 4.86  $\mu\text{g/L}$  升至 72 h 的 10.24 和 11.65  $\mu\text{g/L}$ ,同样增加了 1 倍多。TCM 是 DBPs 的最大贡献者,其次是 DCAN,它的生成量较低,但变化趋势依旧是随着停留时间的延长而有一定的增长。

### 2.4.2 原水中有有机物及 EOM 的 DBPs 生成情况

预氯化条件下原水中有有机物及藻类 EOM 的 DBPs 生成情况如图 7 所示。可以看出,即时生成的 DBPs 种类包括 3 种含碳类消毒副产物(C-DBPs)和 1 种含氮类消毒副产物(N-DBPs),它们的贡献由高到低依次为 TCM、DCBM、DCAN 和 DBCM。DBPs 的生成量随着氯投加浓度的增加而升高。当氯投加浓度为 1 mg/L 时,即时生成的 DBPs 总量为 28.59  $\mu\text{g/L}$ ,随着停留时间的延长,24 和 72 h 后 DBPs 生成总量分别增加了 2.32 和 10.31  $\mu\text{g/L}$ ;当氯投加浓度增加到 5 mg/L 时,即时生成的 DBPs 总量为 39.84

$\mu\text{g/L}$ ,24 和 72 h 后 DBPs 生成总量分别增加了 37.71 和 77.51  $\mu\text{g/L}$ ,这表明 DBPs 的生成量随着氯投加量的增加而增加。

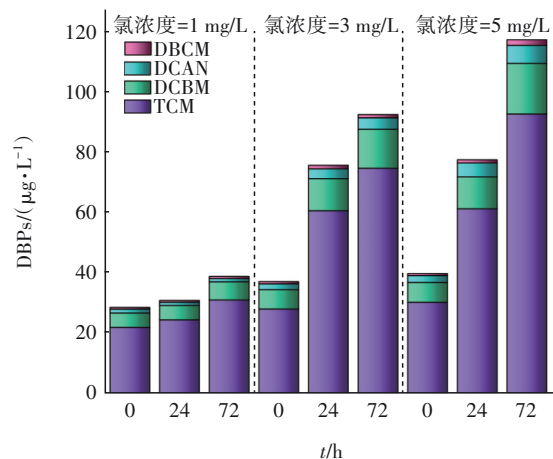


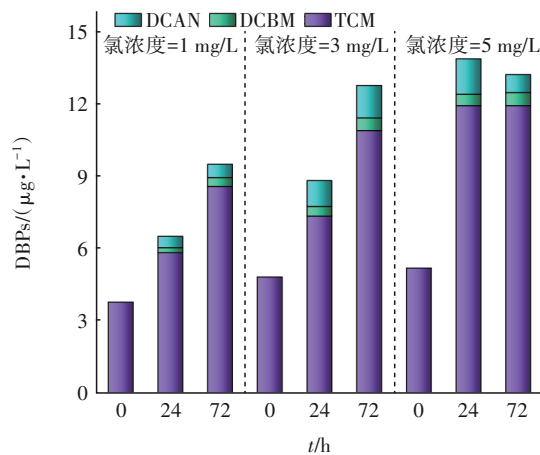
图7 预氯化条件下原水中有有机物及藻类 EOM 的 DBPs 生成情况

Fig.7 DBPs formation of organic matter and algae EOM in raw water under pre-chlorination condition

## 2.5 预氯化协同紫外对水中藻类生成 DBPs 的影响

### 2.5.1 藻类 IOM 的 DBPs 生成情况

在预氯化协同紫外消毒条件下藻类胞内有机物(IOM)的 DBPs 生成情况如图 8 所示。即时生成的 DBPs 仅为 TCM 一种物质;当氯投加浓度增加时,DBPs 生成总量有所增加,但种类没有发生变化;当紫外剂量增加时,DBPs 生成总量没有明显变化,种类也没有发生改变。而当反应时间延长至 24 和 72 h 后,DBPs 生成总量有所增加,而且种类也有所增加,变为 TCM、DCBM 和 DCAN,但 DBPs 生成总量均在 15  $\mu\text{g/L}$  以下。由此可见,藻类的胞内有机物不是 DBPs 生成的主要前体物。



a. 紫外剂量为 40  $\text{mJ}/\text{cm}^2$

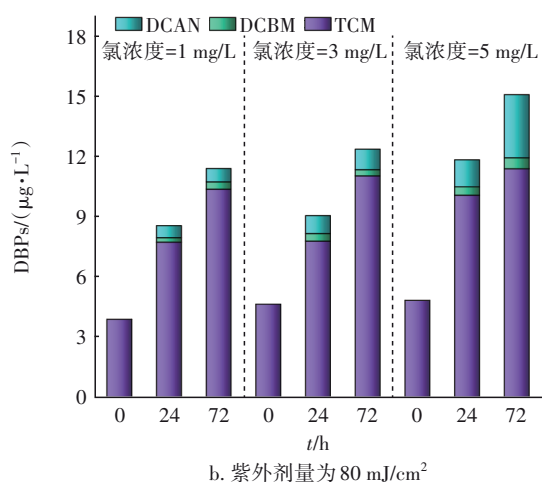
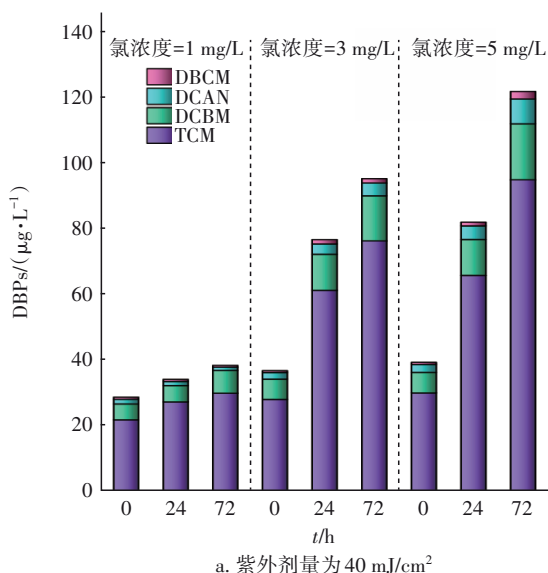


图8 预氯化协同紫外消毒条件下原水中藻类IOM的DBPs生成情况

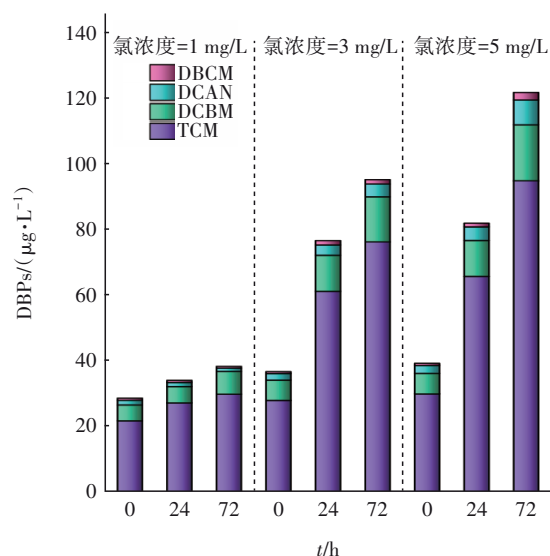
Fig.8 DBPs formation of algae IOM in raw water under pre-chlorination with UV disinfection condition

### 2.5.2 原水中有机物及EOM的DBPs生成情况

在预氯化协同紫外消毒条件下原水中有机物及藻类EOM的DBPs生成情况如图9所示。可以看出,当氯投加浓度为1 mg/L、紫外剂量分别为40和80 mJ/cm<sup>2</sup>时,即时生成的DBPs种类基本一致,DBPs生成总量在30 μg/L左右,随着反应时间延长至24和72 h,DBPs生成总量分别增加了9.65和11.81 μg/L。当氯投加浓度提高到5 mg/L、紫外剂量不同时,即时生成的DBPs种类一致,DBPs生成总量均在40 μg/L左右,随着反应时间延长至24和72 h,DBPs生成总量分别增加了82.53和88.75 μg/L。由此可见,氯的投加剂量直接决定了原水中有机物及藻类EOM的DBPs生成潜能。



a. 紫外剂量为40 mJ/cm<sup>2</sup>



b. 紫外剂量为80 mJ/cm<sup>2</sup>

图9 预氯化协同紫外消毒条件下原水中有机物及藻类EOM的DBPs生成情况

Fig.9 DBPs formation of organic matter and algae EOM in raw water under pre-chlorination with UV disinfection condition

从实际水体中藻类在预氯化协同紫外消毒条件下的DBPs生成情况来看,藻类的胞内有机物不是DBPs生成的主要前体物,DBPs的主要前体物是原水中有机物及藻类的胞外有机物。同时,将实际水体中藻类在预氯化化和预氯化协同紫外消毒条件下的DBPs生成情况结合来看,氯投加剂量直接决定了DBPs生成潜能,协同的紫外消毒方式对DBPs生成的影响体现在,当水体中有余氯存在时,其可促进氯与有机物更充分地反应,进而增加DBPs的生成量。

### 3 结论

① 次氯酸钠的强氧化作用对蓝藻的影响最为明显,可以使蓝藻的细胞壁破裂,胞内有机物释放到水中;后续的紫外消毒可使剩余的绿藻和硅藻完整个体受到破坏,进而导致两者的胞内有机物释放到水中。

② 藻类的胞内有机物不是消毒副产物的主要前体物,消毒副产物的主要前体物是原水中的有机物及藻类胞外有机物。

③ 氯的投加剂量直接决定了消毒副产物的生成潜能,协同的紫外消毒的作用体现在,当水体中有余氯存在时,可促进生成更多的消毒副产物。

因此,当以丹江口水库为水源时,采用预氯化

协同紫外消毒工艺的水厂需要严格控制预氯化阶段的次氯酸钠投加量,避免出现消毒副产物超标情况。

#### 参考文献:

- [1] 魏子卓,李娜,晏明全,等.南水北调中线清河溶解性有机物的光降解行为[J].环境工程学报,2023,17(11):3568-3576.  
WEI Zizhuo, LI Na, YAN Mingquan, *et al.* Photodegradation behavior of dissolved organic matter in Qinghe River of middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11): 3568-3576 (in Chinese).
- [2] 李珊珊,鲁金凤.藻类有机物光敏化效应及其降解水中新污染物的研究进展[J].环境化学,2023,42(9):2885-2892.  
LI Shanshan, LU Jinfeng. Photosensitization of algal organic matters (AOM) to degrade emerging contaminants: a review[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(9): 2885-2892 (in Chinese).
- [3] 曹琳,刘煌,许国静,等.壳聚糖-钪改性膨润土的制备及除藻除磷性能[J].环境工程学报,2021,15(8):2555-2562.  
CAO Lin, LIU Huang, XU Guojing, *et al.* Chitosan-lanthanum modified bentonite preparation and its removal performance of algae and phosphorus [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2555-2562 (in Chinese).
- [4] 邬长友.紫外/过硫酸盐预氧化强化混凝同步除藻和三氯酚[J].中国给水排水,2023,39(1):45-48.  
WU Changyou. UV/persulfate pre-oxidation enhanced coagulation for simultaneous removal of algae and trichlorophenol [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(1): 45-48 (in Chinese).
- [5] 宋学峰,吴越强,许成君,等.水平管沉淀池处理高藻水库水的应用研究[J].中国给水排水,2021,37(15):41-45,50.  
SONG Xuefeng, WU Yueqiang, XU Chengjun, *et al.* Application of horizontal tube sedimentation tank to treatment of reservoir water with high algae [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 41-45, 50 (in Chinese).
- [6] 史永浩,孙东洋,张怡然,等.预臭氧和预氯化在北方典型水质条件下的强化常规作用分析[J].给水排水,2021,47(8):8-14.  
SHI Yonghao, SUN Dongyang, ZHANG Yiran, *et al.* Application of pre-ozonation and pre-chlorination for performance enhancement under typical water quality conditions in North China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 8-14 (in Chinese).
- [7] 张静,张晓岚,温颖,等.南水北调工程丹江口水库原水预氧化对常规工艺和消毒副产物的影响[J].净水技术,2020,39(10):116-124.  
ZHANG Jing, ZHANG Xiaolan, WEN Ying, *et al.* Effect of raw water preoxidation on conventional water treatment process and DBPs for Danjiangkou Reservoir of South-North Water Diversion Project [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(10): 116-124 (in Chinese).
- [8] 孙文俊,吕东明.紫外线技术在我国城镇给排水处理中应用的挑战和趋势[J].净水技术,2023,42(3):1-6.  
SUN Wenjun, LÜ Dongming. Challenge and trend of UV technology application in urban water supply and drainage treatment at home [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 1-6 (in Chinese).

作者简介:黄慧婷(1984- ),女,北京人,硕士,高级工程师,研究方向为饮用水安全保障技术。

E-mail:angel8026@aliyun.com

收稿日期:2024-01-29

修回日期:2024-04-28

(编辑:刘贵春)