

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 11. 006

电子束辐照深度处理对DBPs前体物的削减与调控

张永, 刘欣, 杨卫华, 朱瑞洁, 薛彦

(中国石化集团胜利石油管理局有限公司供水分公司, 山东 东营 257000)

摘要: 为探究不同电子束辐照强度下消毒副产物(DBPs)前体物的分解转化以及DBPs生成情况,以东营H水厂滤后水作为原水,开展电子束辐照实验,并采用液相色谱-有机碳检测-有机氮检测(LC-OCD-OND)和三维荧光光谱检测(3D-EEM)等方法对DBPs前体物的转化情况进行分析。LC-OCD-OND分析表明,电子束辐照可同时去除含氮有机化合物和含碳有机化合物,在5 kGy辐照强度下对亲水性有机碳(CDOC)和疏水性有机碳(HOC)的去除率分别为35.96%和5.26%,总有机碳(TOC)降低了11.15%,对生物大分子组分的去除率达到69.12%。3D-EEM分析表明,电子束辐照可有效去除芳香族蛋白类、腐殖酸类和富里酸类DBPs前体物,从而抑制三卤甲烷(THMs)类DBPs的生成,辐照后THMs的抑制率可以达到93.96%,出水DBPs水平远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值。

关键词: 电子束辐照; 滤后水; 天然有机物; 消毒副产物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0044-06

Effect of Electron Beam Irradiation on Reduction and Regulation of DBPs Precursors

ZHANG Yong, LIU Xin, YANG Weihua, ZHU Ruijie, XUE Yan

(Water Supply Branch of Sinopec Shengli Petroleum Administration Co. Ltd., Dongying 257000, China)

Abstract: To investigate the decomposition and transformation of disinfection by-products (DBPs) precursors and the generation of DBPs under different electron beam irradiation intensities, this study took the filtered water of H water supply plant in Dongying as the raw water, conducted electron beam irradiation experiments and analyzed the transformation of DBPs precursors using chromatography with organic carbon as well as organic nitrogen detection (LC-OCD-OND) and three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy (3D-EEM). Results of LC-OCD-OND analysis showed that electron beam irradiation could remove both nitrogen-containing organic compounds and carbon-containing organic compounds. At 5 kGy irradiation intensity, the removal rate of hydrophilic organic carbon (CDOC) and hydrophobic organic carbon (HOC) were 35.96% and 5.26%, respectively; total organic carbon (TOC) was reduced by 11.15%; and the removal rate of biopolymer fractions reached 69.12%. 3D-EEM analysis indicated that electron beam irradiation could effectively remove the aromatic proteins, humic and fulvic acid DBPs precursors, thereby inhibiting the generation of trihalomethanes

基金项目: 中国石化集团胜利石油管理局有限公司科技攻关项目(GKG2404)

(THMs). After irradiation, THMs could be inhibited by up to 93.96%. The DBPs level in the effluent was far below limits specified in the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022).

Keywords: electron beam irradiation; filtered water; natural organic matter; disinfection by-products

随着城市化和工业化进程的加快,饮用水安全问题已成为社会的焦点议题。消毒副产物(DBPs)是在饮用水消毒过程中产生的非目标性化合物,绝大部分DBPs具有“三致”的特性,长期饮用会增加患癌风险^[1]。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)将三氯甲烷、二氯乙酸、三氯乙酸、一氯二溴甲烷、三溴甲烷和二氯一溴甲烷等六项DBPs从非常规指标调整到常规指标,这对饮用水水质提出了更高的要求。

研究表明,水厂的“混凝-沉淀-过滤”工艺仅能去除水中20%~30%的有机物,滤后水中仍存在大量天然有机物(NOM),在经氯消毒后易生成DBPs,存在极大的饮用水安全隐患^[2]。因此,为提升供水水质,保障水质安全,降低消毒过程中的DBPs浓度,臭氧-活性炭、UV-H₂O₂等深度处理工艺逐渐在水厂中得到应用,但也存在后置臭氧活性炭微生物泄漏、UV-H₂O₂工艺效率低、能耗大等问题。近年来,电子束辐照技术的应用潜力凸显^[3]。电子束辐照可直接作用于有机物,破坏其分子结构,从而达到降解的目的;或通过间接作用激发水分子,产生氧化性物种($\cdot\text{OH}$)和还原性物种(如 e_{aq}^- 和 $\cdot\text{H}$)^[4]。周伟^[5]对比了电子束辐照与UV-H₂O₂技术对吡啶美辛的降解效率,UV-H₂O₂工艺降解50 $\mu\text{mol/L}$ 的吡啶美辛需要20 min以上,而电子束辐照技术降解300 $\mu\text{mol/L}$ 的吡啶美辛仅需几十秒。目前已有研究将电子束辐照技术应用于水厂加氯消毒后,用来降解已生成的DBPs^[6]。但该方法存在明显的不足,由于DBPs的难降解特性,短时间的辐照无法保证其高效降解;同时分解产生的部分小分子化合物,在后续管网输送过程中仍有生成DBPs的风险。鉴于此,本研究提出了在加氯消毒前使用电子束辐照处理滤后水,设计不同强度的电子束辐照实验,结合液相色谱-有机碳检测-有机氮检测(LC-OCD-OND)和三维荧光光谱(3D-EEM)等分析手段,探究DBPs前体物的转化过程及DBPs生成情况,以期DBPs前体物的源头控制提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验方法

东营H水厂原水取自引黄水库,处理规模为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用“机械混合+折板絮凝+斜管沉淀+石英砂过滤+次氯酸钠消毒”处理工艺。本实验中,以水厂滤后水作为原水,将滤后水置于500 mL蓝盖玻璃瓶中,使用DL-DZ10/20-II电子直线加速器开展辐照实验。启动加速器后先空载运行1~2 min,确认设备运行正常后,通过传送带将蓝盖玻璃瓶缓慢送入辐照区域。辐照强度分别设置为3、5、7、9、11和13 kGy,每组样品辐照时间为5 s。为保证辐照均匀,采用自上而下的方式对样品瓶充分辐照,正反方向各辐照一次,且每组样品设置3个平行。辐照结束后,对出水水质进行分析测定。在测定DBPs生成量前添加30 mg/L的次氯酸钠溶液,充分振荡混合后静置1.5 h,经余氯检测后添加适量的硫代硫酸钠,然后测定溶液中的DBPs。

1.2 NOM分析方法

使用Multi N/C 3100型TOC分析仪测定滤后水以及辐照后出水中的总有机碳(TOC);使用LC-OCD-OND分析仪对NOM进行分子表征和有机成分鉴定。所有样品均使用0.45 μm 聚四氟乙烯膜过滤,然后采用非破坏性固定波长紫外检测仪(UVD,波长为254 nm)进行测定,并使用特征紫外吸光度(SUVA)表征腐殖质中芳香族化合物的浓度(即芳香度),最后使用有机碳检测器(OCD)和有机氮检测器(OND)进一步检测样品。检测过程中将溶解性有机碳(DOC)分为亲水性有机碳(CDOC)和疏水性有机碳(HOC);根据分子质量大小及化学性质将NOM分为生物大分子组分、腐殖质、腐殖质降解产物、低分子有机酸和低分子有机物等五部分。

1.3 3D-EEM分析方法

所有样品的3D-EEM光谱均在F-7000荧光光谱仪上测定,以氙灯为激发源。在3D-EEM分析前,稀释样品至DOC为5.00 mg/L。随后以5 nm为间隔扫描激发波长(200~400 nm),并以5 nm为间隔

扫描相应的发射光谱(250~500 nm)。根据激发-发射波长将3D-EEM谱图划分为5个区域:芳香族蛋白Ⅰ类(区域Ⅰ, $\lambda_{Em}<330\text{ nm}$ 、 $\lambda_{Ex}<250\text{ nm}$)和芳香族蛋白Ⅱ类(区域Ⅱ, $330\text{ nm}<\lambda_{Em}<380\text{ nm}$ 、 $\lambda_{Ex}<250\text{ nm}$),其中区域Ⅰ和区域Ⅱ统称为芳香族蛋白类;富里酸类(区域Ⅲ, $\lambda_{Ex}<250\text{ nm}$ 、 $\lambda_{Em}>380\text{ nm}$);微生物代谢产物类(区域Ⅳ, $\lambda_{Ex}>250\text{ nm}$ 、 $\lambda_{Em}<380\text{ nm}$);腐殖酸类(区域Ⅴ, $\lambda_{Ex}>250\text{ nm}$ 、 $\lambda_{Em}>380\text{ nm}$)。收集数据,使用Origin 2024软件绘制等高线图,所有等高线图均使用相同的荧光强度刻度范围和相同的高线数量绘制,并通过荧光区域积分计算各区域的相对占比。

1.4 DBPs分析方法

三卤甲烷(THMs)类DBPs的检测以含1,2-二溴丙烷的甲基叔丁基醚(MtBE)为萃取剂对水样进行液液萃取浓缩,卤乙酸(HAAs)类DBPs的检测以纯MtBE为萃取剂进行液液萃取浓缩;随后在硫酸酸化甲醇中进行衍生,并使用带电子捕获检测器的气相色谱仪(GC-ECD)进行定量。在检测前所有水样均使用0.45 μm 滤膜过滤。

2 结果与分析

2.1 辐照强度对滤后水中TOC转化的影响

TOC是DOC和颗粒性有机碳的统称,其可以与自然界中的溴以及水厂加氯消毒处理后的氯反应生成THMs、HAAs等DBPs。不同辐照强度下TOC的转化情况如图1(a)所示,滤后水的TOC浓度为8.52 mg/L,当电子束辐照强度为3 kGy时,TOC浓度基本不变;当电子束辐照强度提升至5 kGy时,TOC浓度降低至7.57 mg/L;继续提高辐照强度至7~13 kGy时,TOC浓度基本稳定在7.50 mg/L左右,这是由于在该范围的辐照强度下,高能电子束只能部分破坏化合物中的环状结构^[7],因此,随着电子束辐照强度的提升,对TOC的去除效果并未改善。

为深入了解DBPs前体物的组成及分解转化情况,进一步检测了滤后水以及不同电子束辐照强度下DOC的变化,结果如图1(b)所示。滤后水的DOC浓度为3.80 mg/L,其中CDOC浓度为3.42 mg/L, HOC浓度为0.38 mg/L。当电子束辐照强度提升至5 kGy后,DOC浓度降至2.55 mg/L, CDOC和HOC浓度分别降至2.19和0.36 mg/L, CDOC去除率为35.96%,而HOC去除率仅为5.26%。这是由于有

机物的去除主要通过电子束辐照激发水分子产生的 e_{aq}^- 和 $\cdot\text{OH}$ 等活性自由基的间接反应, $\cdot\text{OH}$ 通过亲电加成或氢抽取攻击有机物中的不饱和键引发开环反应, e_{aq}^- 通过脱卤反应和电子转移破坏共轭体系两种方式主导有机物还原^[8],而HOC主要为大分子有机物,如腐殖酸、富里酸等,需要多步氧化去除;CDOC主要为小分子有机物,如多糖、氨基酸等,其线性结构更易受自由基攻击,可直接矿化为 CO_2 和 H_2O ,因而表现为CDOC去除率显著高于HOC。与TOC的变化趋势基本相同,当辐照强度继续提升至9和13 kGy后,与5 kGy辐照强度相比,出水DOC浓度基本稳定。

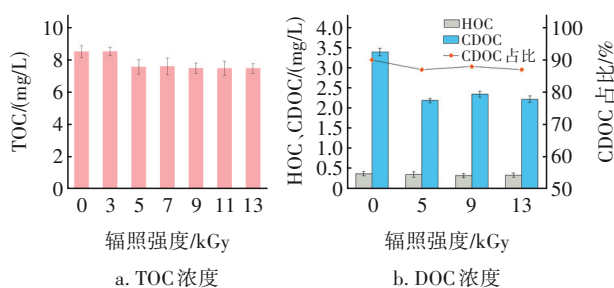


图1 不同辐照强度下TOC和DOC的转化情况

Fig.1 Transformation of TOC and DOC under different irradiation intensities

2.2 辐照强度对滤后水中NOM转化的影响

NOM为多相有机化合物的复杂混合物,主要成分为蛋白质聚合物、大分子腐殖质、核酸、碳水化合物和酚类化合物等,是DBPs的主要前体物^[9]。本实验中使用LC-OCD-OND分析仪对NOM进行全面解析,其中OCD检测可反映水中各种有机物所包含的碳总量变化情况,用来评估水中总有机物水平;UVD检测可反映水中具有紫外吸收特性的有机物含量变化;OND检测可反映水中有机氮化合物的含量变化。

不同辐照强度下滤后水中NOM的转化情况如表1所示。滤后水NOM的5种组分中,生物大分子组分的DOC浓度为0.68 mg/L,溶解性有机氮(DON)浓度为0.03 mg/L;腐殖质为NOM的主要组分,占比达到44.37%,其中DOC和DON浓度分别为1.50、0.08 mg/L, SUVA为1.38 L/(mg·m),研究表明,芳环类物质具有更多的卤代反应活性位点,更容易与氯反应生成DBPs^[10];腐殖质降解产物、低分子有机酸和低分子有机物浓度分别为0.65、<0.001、0.55 mg/L。

表 1 不同辐照强度下 NOM 中各组分变化情况

Tab.1 Changes in various components of NOM under different irradiation intensities

项目	生物大分子组分		腐殖质			腐殖质降解产物	低分子有机酸	低分子有机物
	DOC/ (mg/L)	DON/ (mg/L)	DOC/ (mg/L)	DON/ (mg/L)	SUVA/ [L/(mg·m)]	DOC/ (mg/L)	DOC/ (mg/L)	DOC/ (mg/L)
滤后水	0.68	0.03	1.50	0.08	1.38	0.65	<0.001	0.55
辐照强度=5 kGy	0.21	0.03	0.75	0.04	0.86	0.71	0.003	0.35
辐照强度=9 kGy	0.27	0.03	1.01	0.05	0.92	0.69	0.016	0.37
辐照强度=13 kGy	0.25	0.02	0.88	0.04	0.92	0.71	<0.001	0.39

由表 1 可知,滤后水在经过不同强度的电子束辐照后,水中 NOM 各组分浓度发生了明显变化。在 5 kGy 辐照强度下,生物大分子组分的 DOC 浓度降至 0.21 mg/L,去除率达到 69.12%;腐殖质的 DOC 浓度降至 0.75 mg/L、DON 浓度降至 0.04 mg/L,去除率均达到 50.00%,说明电子束辐照可以同步降解 NOM 中的含碳有机物和含氮有机物;SUVA 降至 0.86 L/(mg·m),说明电子束辐照可有效降解芳香族类有机化合物;此外,腐殖质降解产物浓度升至 0.71 mg/L,这是由于在电子束辐照作用下,腐殖质发生分解,但腐殖质总量呈下降趋势。当电子束辐照强度继续提升至 9 和 13 kGy 时,与电子束辐照强度为 5 kGy 时相比,低分子有机酸的 DOC 浓度从 0.003 mg/L 最终降至<0.001 mg/L,其余组分并未表

现出更高的去除效率。这是由于 5 kGy 电子束可以产生约 1.4 mmol/L 的·OH,不定向、无选择性地攻击有机物基团,使其发生断裂与开环,从而将大分子有机物分解为小分子有机物,甚至部分有机物被直接矿化为 CO₂ 和 H₂O^[11]。而当继续提高辐照强度时,由于辐照时间较短,产生的活性粒子数量有限,因此,在相同时间内有机物的反应效率与辐照强度为 5 kGy 时相比没有明显提升。

2.3 不同辐照强度下的荧光特性变化

不同辐照强度下滤后水的荧光特性见图 2。由图 2(a)可知,滤后水中有机物以富里酸类、微生物代谢产物类和腐殖酸类为主。结合图 2(f)中各区域的荧光体积积分分析,Ⅰ~Ⅴ 区域积分占比分别为 4.03%、11.25%、25.90%、16.02% 和 42.81%。

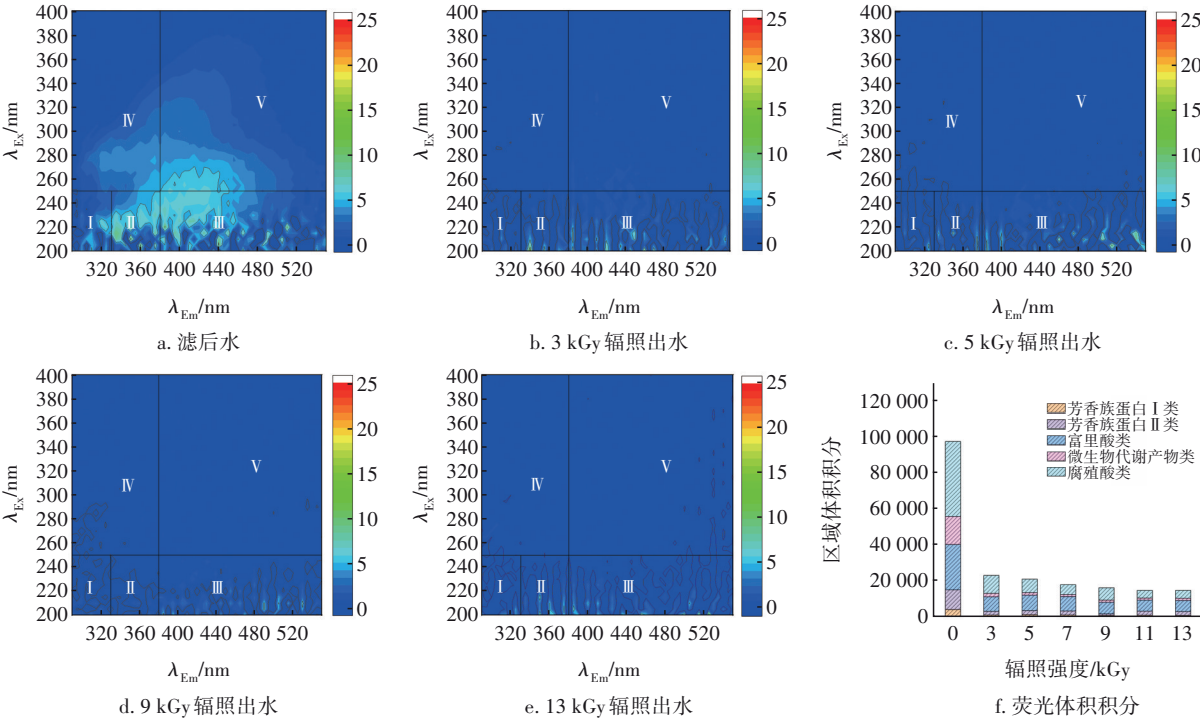


图 2 滤后水及不同辐照强度下水的 3D-EEM 和荧光体积积分
Fig.2 3D-EEM and fluorescence volume integration of filtered water and effluents under different irradiation intensities

如图2(b)~(e)所示,滤后水经不同电子束辐照强度处理后,出水各区域荧光强度显著降低,随着电子束辐照强度的提升,DOM的去除率逐渐提升。经9 kGy电子辐照后,出水中各有机物组分基本不再变化。结合图2(f)的各区域荧光体积分分析,电子束辐照对芳香族蛋白类物质具有较高的去除率,芳香族蛋白I类和II类的去除率分别为76.72%~83.45%和79.71%~81.86%。这是由于电子束辐照产生的 e_{aq}^- 和 $\cdot H$ 可以参与还原反应; $\cdot OH$ 与苯环发生加成反应生成的带有羟基的环己二烯基自由基中间体可以与氧气结合,形成过氧自由基,过氧自由基会继续发生一系列复杂的反应,例如经过分子内的重排、断裂等过程,从而有效破坏含C=C和C=O双键的芳香族化合物结构^[8]。电子束辐照对V区腐殖酸类的去除率高于III区富里酸类,去除率分别82.00%~89.86%、66.03%~78.33%。这是因为腐殖酸的芳香结构和较大分子质量使其更易与 $\cdot OH$ 发生反应,在与富里酸竞争 $\cdot OH$ 的过程中占据优势地位。IV区微生物代谢产物类的去除率始终维持在90%以上,这是因为微生物代谢产物含有较多的小分子化合物,通过电子束辐照更容易矿化去除。

2.4 DBPs生成情况分析

滤后水和不同电子束辐照出水消毒后DBPs生成情况如图3所示。

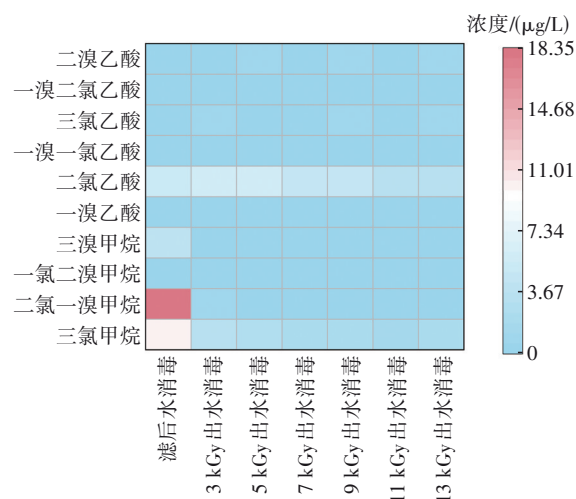


图3 DBPs生成量变化趋势热图

Fig.3 Heat map of DBPs generation trend

由图3可知,滤后水直接加氯消毒后,水中浓度最高的DBPs为THMs类,其中二氯一溴甲烷浓度最高,浓度为18.34 $\mu g/L$;其次为三氯甲烷和三溴甲

烷,浓度分别为10.02和4.06 $\mu g/L$ 。滤后水中检测到的HAAs类DBPs为二氯乙酸,浓度为5.00 $\mu g/L$,其余均未检测出。

随着电子束辐照强度的增加,三氯甲烷、二氯一溴甲烷和三溴甲烷的生成量均显著降低。当电子束辐照强度为5 kGy时,二氯一溴甲烷和三氯甲烷的生成量分别仅为0.20和2.18 $\mu g/L$,生成量的抑制率分别达到98.91%和78.24%,且未检测出三溴甲烷。当电子束辐照强度继续提升至13 kGy,THMs类DBPs生成量的抑制率可达93.96%。有研究表明,腐殖酸和富里酸等大分子有机物含有大量的芳香族结构、羧基、酚羟基等官能团,在消毒过程中易与消毒剂发生反应,是最主要的THM类DBPs前体物^[12]。结合对NOM的分析发现,采用电子束辐照处理滤后水可以有效降低腐殖质浓度,并且可以有效破坏腐殖质中的芳香环结构;同时3D-EEM分析发现,在电子束辐照作用下芳香族蛋白类、腐殖酸和富里酸的荧光强度明显降低,表明电子束辐照可以有效降低DBPs前体物浓度,进而抑制DBPs的生成。

电子束辐照对HAAs类DBPs生成量的抑制率低于THMs类。当电子束辐照强度为3、5 kGy时,二氯乙酸浓度并没有降低,反而升至5.73、5.66 $\mu g/L$ 。这是因为电子束辐照作用下水分解生成的 $\cdot OH$ 和 e_{aq}^- 有助于活化 CH_4 和 CO_2 ,生成 $\cdot CH_3$ 和 $\cdot CO_2^-$,并在温和的反应条件下生成HAAs类DBPs^[13]。当电子束辐照强度从7 kGy继续增加至13 kGy时,二氯乙酸浓度从4.46 $\mu g/L$ 降至3.59 $\mu g/L$,结合NOM分析,这是由于电子束辐照降低了低分子有机酸浓度,从而抑制了二氯乙酸的生成。

3 结论

① 电子束辐照可去除滤后水中的部分TOC,其中在5 kGy辐照强度下对CDOC的去除率为35.96%,对HOC的去除率为5.26%,对CDOC的去除效果显著优于HOC。

② 电子束辐照改变了作为DBPs前体物的NOM组分,5 kGy辐照强度对生物大分子组分的去除率达到69.12%,且同时可去除含氮有机化合物和含碳有机化合物,抑制DBPs的生成。

③ 电子束辐照可显著去除滤后水中的DOM。在不同辐照强度下,I区和II区芳香族蛋白类物质

的去除率分别为76.72%~83.45%和79.71%~81.86%,Ⅲ区富里酸类和V区腐殖酸类的去除率分别为66.03%~78.33%和82.00%~89.86%。

④ DBPs生成情况分析表明,电子束辐照可抑制THMs类DBPs的生成,在电子束辐照强度为13 kGy时,抑制率可达到93.96%。

参考文献:

- [1] 陶辉,陈怿扬,蒋福春,等. 纳滤对饮用水消毒副产物前体物的去除性能[J]. 中国给水排水, 2023, 39(17): 38-44.
- TAO H, CHEN Y Y, JIANG F C, et al. Rejection of disinfection by-products precursors by nanofiltration in drinking water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(17): 38-44 (in Chinese).
- [2] LIANG J, GAO P, LI B, et al. Characteristics of typical dissolved black carbons and their influence on the formation of disinfection by-products in chlor(am)ination [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2022, 16(12): 8-21.
- [3] CHEN X Y, WANG J L. Degradation of norfloxacin in aqueous solution by ionizing irradiation: kinetics, pathway and biological toxicity [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 395: 125092.
- [4] MA X J, ZHOU Y M, GU S Q, et al. Degradation of hexavalent chromium and methyl orange by the synergistic system of graphitic carbon nitride and electron beam irradiation [J]. Chemosphere, 2022, 287: 132228.
- [5] 周伟. 电子束辐照和UV/H₂O₂降解水体中呋喃美辛的处理特性及相关作用机理研究[D]. 上海: 上海大学, 2020.
- ZHOU W. Study on Degradation Characteristics and Mechanism of Indomethacin in Water by Electron Beam Irradiation and UV/H₂O₂ [D]. Shanghai: Shanghai University, 2020 (in Chinese).
- [6] 顾春晖,郑正,杨光俊,等. 辐照降解饮用水氯化消毒副产物的研究[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(2): 3-5, 8.
- GU C H, ZHENG Z, YANG G J, et al. Study on degradation of disinfection by-products of chlorination in drinking water by irradiation [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 28(2): 3-5, 8 (in Chinese).
- [7] 肖扬,罗敏,马玲玲,等. 电子束辐照降解水体中的金霉素[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 625-633.
- XIAO Y, LUO M, MA L L, et al. Degradation of chlorotetracycline by electron beam irradiation in aqueous solution [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 625-633 (in Chinese).
- [8] 沈云鹏,王建龙. 电子束辐照处理废水研究及进展[J]. 环境科学学报, 2023, 43(12): 35-49.
- SHEN Y P, WANG J L. Electron beam radiation technology for wastewater treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(12): 35-49 (in Chinese).
- [9] LI J, SONG Y, JIANG J, et al. Oxidative treatment of NOM by selective oxidants in drinking water treatment and its impact on DBP formation in postchlorination [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159908.
- [10] HAN J R, ZHANG X R, LI W X, et al. Low chlorine impurity might be beneficial in chlorine dioxide disinfection [J]. Water Research, 2021, 188: 116520.
- [11] 吴林峰. 电子束耦合工艺降解水中抗生素特性与机理研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2023.
- WU L F. Study on Characteristics and Mechanism of Antibiotics Degradation in Water by Electron Beam Coupling Process [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2023 (in Chinese).
- [12] 吴霖璟. 紫外/氯高级氧化工艺对苯系前体物生成消毒副产物的影响研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- WU L J. Study on the Effect of Ultraviolet/Chlorine Advanced Oxidation Process on the Generation of Disinfection by Products from Benzene Series Precursors [D]. Shenyang: Northeastern University, 2021 (in Chinese).
- [13] MU B S, ZHANG Y G, PENG M, et al. Radiocatalytic synthesis of acetic acid from CH₄ and CO₂ [J]. Angewandte Chemie, 2024. DOI:10.1002/ange.202407443.

作者简介:张永(1974—),男,山东东营人,硕士,高级工程师,主要从事水处理工艺研究与消毒技术研发工作。

E-mail:zhangyong683.slyt@sinopec.com

收稿日期:2025-03-25

修回日期:2025-06-01

(编辑:刘贵春)