

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.06.008

高级还原技术去除有机消毒副产物的研究进展

段钰汀^{1,2}, 于水利^{1,2}, 肖倩^{1,2}

(1. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 有机消毒副产物给饮用水安全带来严重威胁。高级还原技术(ARPs)对有机消毒副产物具有良好的去除效果及较宽的pH值适用范围,受到了广泛关注。综述了ARPs去除有机消毒副产物的效能,指出其机理为还原剂经活化后产生还原能力极强的还原性自由基,攻击有机消毒副产物的碳卤键或其他不饱和键,从而实现对DBPs的去除。同时分析了该技术的重要影响因素,包括pH值、还原剂浓度、光源强度、天然有机物、共存离子和溶解氧等对DBPs去除效果的影响,探讨了该技术的现存缺陷,展望了ARPs体系去除有机消毒副产物的发展趋势,以期促进ARPs的应用。

关键词: 饮用水; 高级还原; 还原性自由基; 消毒副产物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)06-0038-06

Research Progress on Advanced Reduction Processes for Degradation of Organic Disinfection By-products

DUAN Yu-ting^{1,2}, YU Shui-li^{1,2}, XIAO Qian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: Organic disinfection by-products pose a serious threat to drinking water safety. Advanced reduction processes (ARPs) based on reducing free radicals have received widespread attention in China and abroad because of their highly efficient degradation of organic disinfection by-products and more stable performance over a wide pH range. This review describes the effectiveness of ARPs for the degradation of organic disinfection by-products. It is pointed out that the mechanism is that the reducing agent generates reductive free radicals with strong reducing ability after activation, and the reductive free radicals attack the carbon halide bonds or other unsaturated bonds of the organic disinfection by-products, thereby removing the organic disinfection by-products. The critical factors were further discussed, including solution pH, reductant concentrations, light intensity, the presence of natural organic matter and coexisting ions, as well as dissolved oxygen. Finally, the existing problems of the technology and the probable development trend of degradation of organic disinfection by-products by ARPs was summarized in order to promote the development of ARPs.

Key words: drinking water; advanced reduction; reducing free radicals; disinfection by-products

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978484)

通信作者: 于水利 E-mail: ysl@tongji.edu.cn

目前,饮用水中已经检出了700多种消毒副产物(DBPs),其中有机消毒副产物具有致畸、致癌及致突变(“三致”)作用,给饮用水安全带来严重威胁,受到了广泛关注。有机消毒副产物几乎都含有造成“三致”作用的碳卤键(C—X键,X为F、Cl和Br)或者不饱和键,目前其处理方法主要包括生物法、吸附技术、化学氧化技术、化学还原技术。生物法对有机消毒副产物去除速度比较缓慢,半衰期较长;吸附技术仅仅转移并浓缩了有机消毒副产物;尽管常见的基于强氧化性自由基(如 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$)的高级氧化体系能有效去除大多数有机DBPs,但就其使C—X键断裂,进而降低有机消毒副产物毒性而言,氧化自由基 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的反应活性低于水合电子(e_{aq}^-),并且前者易于生成其他产物,如溴酸盐和氯酸盐等;传统的化学还原法还原能力有限,处理后水质毒性亦并非一定会降低。

高级还原(ARPs)是以一定的方式活化还原剂产生还原性自由基,高效还原目标污染物的一种新工艺^[1]。自2013年Vellanki等^[2]提出并对其应用以来,ARPs技术受到越来越多的关注,成为具有很好应用前景的新型水处理技术。ARPs体系不仅可以有效地去除无机污染物,如高氯酸盐^[3]、溴酸盐^[4]、Cr(VI)^[5]等,而且还可以将有机消毒副产物,如卤代化合物、含不饱和键和酮等有机物还原为无毒或毒性较弱的、化学结构简单的化合物。

目前,有关高级还原技术在水处理中的应用介绍,大多以无机物(如溴酸根^[4]、硝酸根^[6])为还原对象,并着重分析UV/ SO_3^{2-} 体系在去除无机污染物方面的应用^[7-8],而有关高级还原技术去除有机消毒副产物的介绍较少。为此,对目前国内外有关ARPs体系去除有机消毒副产物的效能、机理、影响因素及应用前景等进行重点分析总结,为实现有机消毒副产物的有效控制和保证饮用水安全提供技术支撑。

1 ARPs体系概述

目前,用于处理有机消毒副产物的高级还原体系主要有:紫外/亚硫酸盐(UV/ SO_3^{2-})体系、紫外/碘化物(UV/I⁻)体系及紫外/过硫酸盐/甲酸(UV/ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ /HCOOH)体系。

1.1 UV/ SO_3^{2-} 高级还原体系

UV/ SO_3^{2-} 体系中,在紫外线的照射下, SO_3^{2-} 经过

活化之后产生还原性极强的 e_{aq}^- 和 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ [如式(1)所示]。值得注意的是, e_{aq}^- 与氢离子反应生成氢自由基($\text{H}\cdot$)^[9]。



1.2 UV/I⁻高级还原体系

传统高级还原体系多以亚硫酸盐为还原剂,然而亚硫酸盐吸光能力有限,通过改变还原剂的种类,可有效增强高级还原体系中还原性自由基的产率。近年来,碘化学在去除有机消毒副产物方面受到广泛关注。研究发现,I⁻能有效吸收紫外光,并具有较高的 e_{aq}^- 产率,且不受溶液pH值的影响。在UV/I⁻体系中,主要的还原性自由基是 e_{aq}^- 和I \cdot 。水中的碘离子首先被激发形成中间态物质I $\cdot\text{H}_2\text{O}^*$ 和(I \cdot , e_{aq}^-),最后解离产生 e_{aq}^- 和I \cdot 。具体反应如下:



UV/I⁻高级还原体系在工程应用中还应考虑到生成物(包括碘化物、碘和碘酸盐)的潜在负面影响,需采用吸附和离子交换等后处理方法去除或回收碘化产物,减少碘物种潜在的二次环境风险。

1.3 UV/ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ /HCOOH高级还原体系

UV/ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ /HCOOH高级还原体系产生的还原性自由基是 $\text{CO}_2^{\cdot-}$ 。水中过硫酸盐在紫外光照射下产生氧化性的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$, $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 可与HCOOH进一步反应产生 $\text{CO}_2^{\cdot-}$,具体反应如下:



2 ARPs去除有机消毒副产物的效能及机理

2.1 三卤甲烷和卤乙烷的去除

高级还原体系对三卤甲烷和卤乙烷均有良好的去除效果。卤化程度影响其去除速率,卤化程度越高,去除速率越快,氯代三卤甲烷去除速率依次为 $\text{CCl}_4 > \text{CHCl}_3 > \text{CH}_2\text{Cl}_2$ ^[10],这可能是因为有机氯化物中碳原子的电子云密度随着氯原子数目的增加而下降。对于该类有机消毒副产物, e_{aq}^- 可直接还原其C—X键^[10]。

2.2 卤乙酸的去

高级还原体系对卤乙酸(HAAs)具有显著的还原与脱卤作用,HAAs的去除速率也随着卤代原子数量的增多而加快^[11]。 e_{aq}^- 可以实现7种HAAs(3种

氯乙酸、3种溴乙酸和1种碘乙酸)的完全脱卤^[12]。除 e_{aq}^- 还原其C—X键外,光敏性较强的溴代和碘代卤乙酸还有显著的紫外直接光解作用^[13]。

2.3 酚类的去除

酚类在 UV/SO_3^{2-} 高级还原体系中逐级脱溴为低毒性物质^[14-15]。对于酚类有机消毒副产物,起主要作用的自由基种类尚存在争议。张晓等^[14]认为主要是 e_{aq}^- 的还原作用;而Yazdanbakhsh等^[15]认为,是 $SO_3^{\cdot-}$ 导致C—Cl键的断裂;另外,酚类在高级还原体系中的去除也有明显的紫外直接光解作用。

2.4 卤乙酰胺的去除

与传统的化学还原方式相比,高级还原体系去除卤乙酰胺的效率大幅提升^[16]。丁春生等^[16]利用10 g/L的Fe/Cu双金属去除50 $\mu g/L$ 的2-溴乙酰胺,反应3 h后的去除率达到84%。 UV/SO_3^{2-} 高级还原

体系中,5 min内三氯乙酰胺的去除率可达50%以上^[17]。伏芝萱等^[17]认为,三氯乙酰胺的去除主要受 $SO_3^{\cdot-}$ 的影响,该自由基从背面攻击三氯乙酰胺,形成不稳定的反应中间体,然后生成 Cl^- ,实现脱卤。然而该研究尚未对产物做进一步鉴定。

2.5 NDMA的去除

高级还原体系不仅可有效提升去除NDMA的速率,还可降低其还原产物的毒性^[18]。N—NO键及N=O在 e_{aq}^- 作用下的断裂是NDMA去除的主要途径^[19]。在紫外光照射下,NDMA由基态快速转变为光激发态,NDMA的光激发态及其中间产物可被 e_{aq}^- 还原^[20]。此外,由于NDMA较强的光敏性,紫外直接光解作用十分显著。

ARPs体系对部分有机消毒副产物的去除效果如表1所示。

表1 ARPs体系对部分有机消毒副产物的去除效果

Tab.1 Removal effect of ARPs system on some organic disinfection by-products

还原体系	污染物	操作条件	去除率/%
UV/SO_3^{2-}	四氯化碳(CCl_4) ^[10]	UV(14 W,254 nm),光强1.24 mW/cm ² , CCl_4 为15 mg/L, SO_3^{2-} 为2.0 mmol/L,pH值为9.0	95.5(30 min)
	一氯乙酸(MCAA) ^[11]	UV(10 W,254 nm),MCAA为50 $\mu mol/L$, SO_3^{2-} 为2.0 mmol/L,pH值为9.2	100(10 min)
	三氯乙酰胺(TCAcAm) ^[17]	UV(254 nm),光强450 $\mu W/cm^2$,TCAcAm为200 $\mu g/L$, SO_3^{2-} 为1.0 mmol/L,pH值为9.0	51.4(5 min)
UV/I^-	NDMA ^[20]	UV(254 nm,15 W),NDMA为0.135 mmol/L, I^- 为3.0 mmol/L,pH值为9.5	88(2 min)
$UV/SO_3^{2-}/I^-$	一氯乙酸(MCAA) ^[12]	UV(253.7 nm,10 W),MCAA为50 $\mu mol/L$, SO_3^{2-} 为1.0 mmol/L, I^- 为0.1 mmol/L,pH值为9.2	>90(4 min)

目前,处理有机消毒副产物最常用的ARPs体系为 UV/SO_3^{2-} 和 UV/I^- 体系,因为这两个体系组成简单,操作方便,投药量少,能产生大量还原性自由基,对有机消毒副产物处理效果好;而基于二氧化碳自由基的高级还原体系($UV/S_2O_8^{2-}/HCOOH$)需要加入有机物甲酸,体系复杂,提高了有机消毒副产物的处理成本,限制了其应用。除此之外,还有人将现有ARPs体系与光催化相结合,即在现有ARPs体系中投加光催化剂(如 $BiOI$ 、 TiO_2),以进一步提升ARPs体系还原性自由基产率。但是由于光催化剂制备成本高、投加量大、寿命短等原因,大大限制了其发展与应用。

总之,高级还原体系还原去除有机消毒副产物,是利用还原性自由基 e_{aq}^- 及 $SO_3^{\cdot-}$ 等使其C—X键或者不饱和键断裂,成为无毒或毒性较弱、化学结构简单的化合物,起主要作用的自由基种类与有机

消毒副产物的类别有关;对于光敏性较强的有机消毒副产物而言,直接光解作用具有显著的处理效果。ARPs体系去除有机消毒副产物的机理如图1所示。

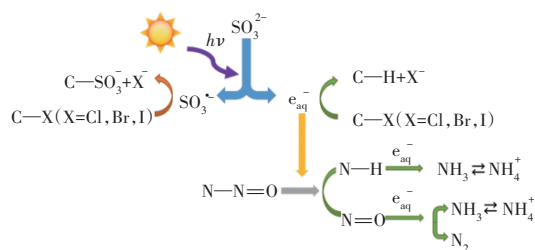


图1 ARPs体系去除有机消毒副产物的机理

Fig.1 Mechanism of the ARPs system to remove organic disinfection by-products

3 ARPs体系的影响因素

ARPs体系主要影响因素包括:pH值、还原剂浓度、光源强度、天然有机物、共存离子和溶解氧。

3.1 pH值

在高级还原体系中,一般情况下pH值升高,还原性自由基尤其是 e_{aq}^- 产率会增加,有利于有机消毒副产物的去除。以1,2-二氯甲烷为例,在UV/ SO_3^{2-} 体系中,在低pH值条件下,去除率可以忽略不计;在高pH值条件下,去除速度很快。

在UV/ SO_3^{2-} 和UV/I $^-$ 体系中,可以通过控制pH值调控 $H\cdot$ ($E=-2.3$ V)和 e_{aq}^- ($E=-2.9$ V)之间的相互转化,具体反应方程式如下:



在UV/ SO_3^{2-} 体系中,pH值控制S(IV)的存在形态(H_2SO_3 、 SO_3^{2-} 及 HSO_3^-)^[21]。在pH值大于pKa(7.2)时, SO_3^{2-} 占主导地位,它能吸收紫外光产生的亚硫酸根自由基($SO_3^{\cdot-}$)和水合电子(e_{aq}^-);在低pH值条件下,亚硫酸氢根(HSO_3^-)和 H_2SO_3 的占比增加,并且亚硫酸氢根(HSO_3^-)吸收较少的光,也不会生成活性物质^[17]。由于pH值决定了S(IV)物种的分布,而S(IV)物种的分布是影响还原性自由基产率的主要因素,故pH值对ARPs体系还原去除有机消毒副产物的效果有较大影响。

3.2 还原剂用量

初始还原剂浓度是影响有机消毒副产物去除效率和处理成本的重要因素。根据朗伯-比尔定律,还原剂浓度的增大促进了紫外线的吸收,从而增加自由基的生成速率。一般来说,增加还原剂用量会改善有机消毒副产物的去除效果。在UV/ SO_3^{2-} 体系中,当亚硫酸盐投加浓度较低时,亚硫酸盐会被DO快速氧化去除,影响有机消毒副产物的去除效果。然而,针对易被光解的有机消毒副产物,直接光解是其主要的去除机制,还原剂浓度的增加可能会降低反应速率,这是因为还原剂会吸收一些本来可以被污染物吸收的光^[22]。因此,工艺的主要去除机制是与自由基反应,还原剂浓度的增加会提高有机消毒副产物的去除效能,这是因为还原剂会吸收更多的光,从而产生高浓度的自由基^[23-24]。

3.3 光源强度

一般来说,在一定范围内增加紫外光强度可以提高对有机消毒副产物的去除效果,去除速率与紫外光强度呈线性关系^[1],因为较高的紫外光强度可以提高还原剂的自由基产率,从而促进有机消毒副产物的去除。在光强为2 000 $\mu W/cm^2$ 时,1,2-二氯

乙烷在60 min内被完全去除;当光强提升至8 000 $\mu W/cm^2$ 时,同样浓度的1,2-二氯乙烷仅用15 min就可被完全去除。然而,能耗成本会随着光强增加而增大,因此适当控制紫外光强度亦非常必要^[25]。

3.4 天然有机物

以腐殖酸(HA)为代表的天然有机物(NOM)对高级还原体系的还原效果影响很大。一方面,HA作为光敏剂,在紫外光照射下能产生少量 e_{aq}^- ,但其生成效率低于高级还原体系;另一方面,HA通过与 e_{aq}^- 反应,产生氧化性物质($H\cdot$ 、 1O_2 和 H_2O_2),从而间接氧化有机消毒副产物^[26],有利于其去除;同时,HA与还原剂竞争紫外光,使得还原剂产生的自由基减少,从而抑制有机消毒副产物的去除。在大多数情况下,尤其是在高HA浓度下,HA对高级还原体系有着不利影响^[10]。

3.5 背景离子

由于 e_{aq}^- 是一种非选择性还原剂,水中共存的电子淬灭剂(如 NO_3^- 、 HCO_3^- 和DO)会抑制该体系在实际水体中的去除效能^[9]。研究表明,高浓度的 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 对 CCl_4 的去除有明显的抑制作用^[27];当水溶液的溶解氧浓度较低时, CCl_4 的去除速度明显加快,10 min时的去除率达到95.8%,与未去除溶解氧相比,其去除率提升20%,而通入 O_2 后,去除过程受到严重抑制^[10]。

4 ARPs体系的缺陷

高级还原体系在去除有机消毒副产物研究方面已取得了重要进展,然而,到目前为止,其工程应用仍面临重要挑战。

① 高级还原技术去除有机消毒副产物的矿化程度较低,UV/ SO_3^{2-} 体系仅能将其降解为结构简单、分子质量较小的化合物,其矿化程度很低。

② 水中的电子淬灭剂和NOM影响有机消毒副产物的还原去除效果。由于 e_{aq}^- 是一种非选择性还原剂,水中共存的电子捕获剂(如 NO_3^- 、 HCO_3^- 、DO等)会导致实际水体的处理效能下降^[9]。水中的天然有机物与还原剂竞争紫外光,使得还原剂产生的自由基减少^[11],从而抑制有机消毒副产物的去除。例如,在超纯水中,一氯乙酸(MCAA)脱卤率达到99%,但在钱塘江水中脱卤率下降了20%^[18]。

③ 对降解机理方面的探究,如对污染物去除过程中中间产物的鉴定、不同自由基的贡献、自由

基在不同条件下的作用位置的研究等仍不够深入。

另外,高级还原工艺降解有机物的毒性评价非常有限,能源消耗及成本控制也是限制该体系实际应用的重要因素。

5 结论与展望

高级还原能够有效去除有机消毒副产物,还原性自由基在 ARPs 中起着至关重要的作用,其可通过攻击 C—X 键或者不饱和键实现对有机消毒副产物的去除,起主要作用的自由基种类与有机消毒副产物的类别有关;对于某些光敏性较强的有机消毒副产物而言,直接光解具有显著效果。

ARPs 体系对有机消毒副产物的去除效率受还原剂用量、光源强度、天然有机物、水中共存电子淬灭剂(如 NO_3^- 、 HCO_3^- 、DO)等多种因素的影响。一般而言,在碱性条件下,紫外光越强、初始还原剂浓度越高,水中共存的电子淬灭剂浓度越小,对有机消毒副产物的去除效果越好。

为了使高级还原体系具备更好的实用性,今后可进一步从以下几方面进行研究:

① 目前该体系多应用于实验室阶段,需进一步完善其理论基础,开展中试,考察大规模应用的效果,并对其进行更为全面的经济评价。另外,作为末端处理工艺,残余还原剂的处理处置也需要进一步研究。

② 降低高级还原体系产物的毒性,以及进一步提高高级还原体系的矿化效果,是今后研究的重要内容。

③ 在有氧条件下, $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 会与 DO 快速反应形成氧化性自由基 $\text{SO}_4^{\cdot-}$,从高级还原体系转化为高级氧化体系或氧化还原耦合过程,因此,在有氧和无氧的情况下,高级还原体系去除有机污染物的机理、途径等可能完全不同。然而,目前尚未有关于高级还原体系在有氧条件下降解有机消毒副产物路径和机理的探究。

④ 目前多采用紫外光来活化 SO_3^{2-} ,已有文献利用过渡金属离子来活化 SO_3^{2-} 产生 $\text{SO}_3^{\cdot-}$,迅速还原溴酸根。未来研究应尝试探索非紫外光照射下活化还原剂的手段,以进一步降低能耗。

参考文献:

[1] 王法路,于水利,蔡璐阳.高级还原对饮用水中卤代有机物的还原效能与机制[J].给水排水,2020,46

(增刊):174-181.

WANG Falu, YU Shuli, CAI Luyang. The efficiency and mechanism of advanced reduction process for degradation and dehalogenation of halogenated organics in drinking water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S): 174-181 (in Chinese).

[2] VELLANKI B P, BATCHELOR B, ABDEL-WAHAB A. Advanced reduction processes: a new class of treatment processes [J]. Environmental Engineering Science, 2013, 30(5): 264-271.

[3] VELLANKI B P, BATCHELOR B. Perchlorate reduction by the sulfite/ultraviolet light advanced reduction process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 262: 348-356.

[4] XIAO Q, YU S L, LI L, *et al.* An overview of advanced reduction processes for bromate removal from drinking water: reducing agents, activation methods, applications and mechanisms [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324(B): 230-240.

[5] XIE B H, SHAN C, XU Z, *et al.* One-step removal of Cr(VI) at alkaline pH by UV/sulfite process: reduction to Cr(III) and *in situ* Cr(III) precipitation [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 308: 791-797.

[6] 黄嘉奕,于水利.均相高级还原体系在废水处理中的研究进展[J].工业用水与废水,2020,51(1):1-5.
HUANG Jiayi, YU Shuli. Research progress of homogeneous advanced reduction system in wastewater treatment[J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(1): 1-5 (in Chinese).

[7] YANG L, HE L, XUE J, *et al.* UV/ SO_3^{2-} based advanced reduction processes of aqueous contaminants: current status and prospects [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 397: 125412.

[8] 刘胜兰,刘义青,付永胜. UV/ SO_3^{2-} 体系降解水中污染物的研究进展[J].环境科学与技术,2020,43(11):172-179.

LIU Shenglan, LIU Yiqing, FU Yongsheng. Research progress on the removal of pollutants from water by UV/sulfite system [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(11): 172-179 (in Chinese).

[9] CAO Y, QIU W, LI J, *et al.* Review on UV/sulfite process for water and wastewater treatments in the presence or absence of O_2 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142762.

[10] WANG Z, LIU W, CHEN H, *et al.* Photoreductive degradation of CCl_4 by UV- Na_2SO_3 : influence of various

- factors, mechanism and application[J]. *Environmental Technology*, 2019, 42(2):217-226.
- [11] 孙培德,朱孟驹,李旭春,等. 亚硫酸盐/紫外体系的还原脱卤效能[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4384-4391.
- SUN Peide, ZHU Mengju, LI Xuchun, *et al.* Dehalogenation efficiency of the sulfite/UV process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4384-4391 (in Chinese).
- [12] YU K, LI X C, CHEN L W, *et al.* Mechanism and efficiency of contaminant reduction by hydrated electron in the sulfite/iodide/UV process[J]. *Water Research*, 2018, 129: 357-364.
- [13] WANG L, LIU X. Fast degradation of monochloroacetic acid by Bioi-enhanced UV/S(IV) process: efficiency and mechanism[J]. *Catalysts*, 2019, 9(5):460.
- [14] 张晓,程婷,陈晨,等. 紫外/亚硫酸钠还原体系对2,4-二溴酚的脱溴效能[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(23): 21-26.
- ZHANG Xiao, CHENG Ting, CHEN Chen, *et al.* Debromination efficiency of 2,4-dibromophenol by UV/sodium sulfite reduction system[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(23): 21-26 (in Chinese).
- [15] YAZDANBAKHSI A, ESLAMI A, MOUSSAVI G, *et al.* Photo-assisted degradation of 2, 4, 6-trichlorophenol by an advanced reduction process based on sulfite anion radical: degradation, dechlorination and mineralization[J]. *Chemosphere*, 2018, 191: 156-165.
- [16] 丁春生,王苗新,陈嘉都,等. Fe/Cu催化还原降解饮用水中2-溴乙酰胺[J]. *浙江工业大学学报*, 2020, 48(5): 520-525.
- DING Chunsheng, WANG Miaoxin, CHEN Jiadu, *et al.* Fe/Cu catalytic reduction and degradation of 2-bromoacetamide in drinking water[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, 48(5): 520-525 (in Chinese).
- [17] 伏芝萱,郭迎庆,楚文海. 紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2271-2277.
- FU Zhixuan, GUO Yingqing, CHU Wenhui. Effectiveness of UV/sodium sulfite reductive degradation of trichloroacetamide[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2271-2277 (in Chinese).
- [18] SEID M G, CHO K, HONG S W. UV/sulfite chemistry to reduce N-nitrosodimethylamine formation in chlor(am)inated water[J]. *Water Research*, 2020, 185: 116243.
- [19] HAN Y, CHEN Z L, TONG L N, *et al.* Reduction of N-nitrosodimethylamine with zero-valent zinc[J]. *Water Research*, 2013, 47(1): 216-224.
- [20] SUN Z Y, ZHANG C J, ZHAO X Y, *et al.* Efficient photo reductive decomposition of N-nitrosodimethylamine by UV/iodide process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 329:185-192.
- [21] QIAO J L, FENG L Y, DONG H Y, *et al.* Overlooked role of sulfur-centered radicals during bromate reduction by sulfite[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(17): 10320-10328.
- [22] JUNG B, NICOLA R, BATCHELOR B, *et al.* Effect of low- and medium-pressure Hg UV irradiation on bromate removal in advanced reduction process[J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 663-672.
- [23] LI X C, MA J, LIU G F, *et al.* Efficient reductive dechlorination of monochloroacetic acid by sulfite/UV process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13):7342-7349.
- [24] XU C L, JING Y F, GUI F L, *et al.* Kinetics and efficiency of the hydrated electron-induced dehalogenation by the sulfite/UV process[J]. *Water Research*, 2014, 62:220-228.
- [25] YU X Y, CABOOTER D, DEWIL R. Efficiency and mechanism of diclofenac degradation by sulfite/UV advanced reduction processes (ARPs)[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 65-74.
- [26] GU Y R, LIU T Z, WANG H J, *et al.* Hydrated electron based decomposition of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in the VUV/sulfite system[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 541-548.
- [27] GU X G, LU S G, FU X R, *et al.* Carbon dioxide radical anion-based UV/S₂O₈²⁻/HCOOH reductive process for carbon tetrachloride degradation in aqueous solution[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 172: 211-216.

作者简介:段钰汀(1997-),女,山西晋城人,硕士研究生,研究方向为高级还原技术。

E-mail:duanyuting@tongji.edu.cn

收稿日期:2021-07-18

修回日期:2021-10-09

(编辑:丁彩娟)