

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.004

## 紫外/亚硫酸钠还原体系对2,4-二溴酚的脱溴效能

张 晓<sup>1,2</sup>, 程 婷<sup>1</sup>, 陈 晨<sup>3</sup>, 王津南<sup>2,4</sup>, 陈 刚<sup>3</sup>, 叶晨昊<sup>3</sup>, 邓 琴<sup>3</sup>

(1. 江苏开放大学 环境生态学院, 江苏 南京 210036; 2. 南京大学盐城环保技术与工程  
研究院, 江苏 盐城 224005; 3. 江苏科技大学 环境与化学工程学院, 江苏 镇江 212100;  
4. 南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** 研究了  $UV/SO_3^{2-}$  还原体系在不同条件下对2,4-二溴酚(2,4-DBP)的脱溴效能, 分析了目标污染物的脱溴过程、降解机理及降解路径。结果表明,  $UV/SO_3^{2-}$  还原体系对2,4-DBP的降解效果高于单独UV体系; 亚硫酸钠浓度、pH值与反应温度均对目标物的降解有较大影响。随着亚硫酸钠浓度、初始pH值和反应温度的升高,  $UV/SO_3^{2-}$  体系对2,4-DBP的降解效果逐渐增强。准一级动力学方程可较好地描述不同亚硫酸钠浓度与反应温度条件下  $UV/SO_3^{2-}$  对污染物的降解过程。水合电子捕获剂会显著抑制2,4-DBP的脱溴反应;  $UV/SO_3^{2-}$  体系的2,4-DBP脱溴率与溴离子产率均高于单独UV体系; 2,4-DBP在水合电子作用下的降解中间产物为4-溴酚、苯酚与少量的4,4'-联苯二酚。

**关键词:** 卤代有机化合物;  $UV/SO_3^{2-}$  体系; 2,4-二溴酚; 水合电子

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0021-06

## Debromination Efficiency of 2,4-Dibromophenol by UV/Sodium Sulfite Reduction System

ZHANG Xiao<sup>1,2</sup>, CHENG Ting<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>3</sup>, WANG Jin-nan<sup>2,4</sup>, CHEN Gang<sup>3</sup>,  
YE Chen-hao<sup>3</sup>, DENG Qin<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China; 2. Nanjing University & Yancheng Academy Environmental Protection Technology and Engineering, Yancheng 224005, China; 3. School of Environmental and Chemical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 4. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The debromination efficiency of 2,4-dibromophenol (2,4-DBP) by  $UV/SO_3^{2-}$  system at different conditions was investigated, and the debromination process, degradation mechanism and degradation pathway of the target pollutants were analyzed. The 2,4-DBP degradation efficiency of  $UV/SO_3^{2-}$  reduction system was significantly higher than that of the individual UV system. Sodium sulfite concentration, pH value and reaction temperature had significant effects on the degradation of the target pollutants. With the increase of sodium sulfite concentration, initial pH value and reaction temperature,

基金项目: 2016 江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人培养对象项目; 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (17KJD610001、17KJD610002); 江苏开放大学校级科研平台资助项目; 江苏开放大学“十三五”规划科研课题 (17SSW-Z-Q-027); 江苏省环境工程重点实验室科研开放基金资助项目 (KF2015011)

通信作者: 陈晨 E-mail: chencjust@sina.com

the 2,4-DBP degradation efficiency of the  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  system increased gradually. The quasi-first-order kinetic equation could better describe the degradation process of pollutants in the  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  system with different sodium sulfite concentrations and reaction temperatures. The hydrated electron capture agent could effectively inhibit the debromination reaction of 2,4-DBP. The 2,4-DBP debromination efficiency and bromide ion yield of the  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  system were higher than those of the individual UV system. Under the action of hydration electrons, the intermediate products of 2,4-DBP were 4-bromophenol, phenol and a small amount of 4,4'-biphenyldichol.

**Key words:** halogenated organic compound;  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  system; 2,4-dibromophenol; hydrated electron

卤代有机化合物(HOCs)具有高毒性、难降解、高富集性、高环境残留的特点,并具有“三致”效应,其在工业生产原料、农药产品、防腐剂、涂料添加剂、化学反应溶剂等方面的广泛使用使得水体、土壤、大气中留存有大量该类污染物<sup>[1]</sup>。HOCs的常见处理技术有:生物法、吸附法、化学还原法、湿式氧化法、高级还原技术等<sup>[2-3]</sup>。

近年来,有研究者利用高级还原技术中的紫外光(UV)与亚硫酸盐( $\text{SO}_3^{2-}$ )联合体系实现了多种HOCs的还原降解<sup>[4-5]</sup>。 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 还原体系降解卤代有机化合物的主要原理是:将紫外光活化与亚硫酸盐等还原剂相结合,产生很强的还原性自由基水合电子( $\text{e}_{\text{aq}}^-$ )与氢原子,其中 $\text{e}_{\text{aq}}^-$ 的标准氧化还原电位低至 $-2.9\text{ V}$ ,其对卤代物具有很高的反应活性,通过水合电子进攻碳卤键,使污染物的毒性降低或结构简单化<sup>[6]</sup>。溴酚类物质是卤代有机化合物中常见的一类污染物,主要用于阻燃剂、涂料、农药中间体、防腐剂的生产过程等。近年来,有关 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 还原体系降解卤代有机物的报道大多集中在卤代脂肪烃,对带环的卤代物的降解特性研究相对不足。鉴于此,笔者以2,4-二溴酚(2,4-DBP)为目标污染物,探索 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 体系对2,4-DBP的还原脱溴特性及影响因素,在此基础上探明 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 还原体系对2,4-DBP的脱溴反应机理,以期为揭示 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 体系的还原脱卤特性提供依据。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验器材

实验相关的器材主要有ZXF-LCA光催化反应器,500 W紫外线高压汞灯,石英试管,D10-16氮气吹扫仪,PHS-25型pH计,PBr-1-01溴离子电极与217-01参比电极,安捷伦1260高效液相色谱仪,安捷伦气相色谱质谱联用仪(GC/MS)。

### 1.2 实验方法

向50 mL的石英比色管中分别加入一定浓度的亚硫酸钠与2,4-DBP储备液(2,4-DBP储备液提前配制好放入冰箱冷藏),混合后使用氮气吹扫仪吹脱2~5 min以去除溶液中的溶解氧,之后将其放入光催化反应装置中,反应一段时间后测定溶液中残余的目标污染物浓度以及溴离子浓度。同时,以不添加亚硫酸钠单独光照的体系进行对比实验。在研究不同因素对还原体系降解目标污染物的特性时,设定影响因素为亚硫酸钠浓度、pH值和反应温度,反应后测定体系残余的污染物浓度,并根据实验结果进行动力学拟合与参数计算。

### 1.3 分析项目与方法

2,4-DBP浓度采用安捷伦高效液相色谱仪测定,流动相为75%甲醇+25%纯水,流速为0.8 mL/min,检测波长为280 nm;溴离子浓度采用溴离子参比电极测定;pH值采用pH计测定;2,4-DBP降解中间产物采用GC/MS测定。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 体系对2,4-DBP的降解效能

以单独UV体系作为对比,考察 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 体系对2,4-DBP的还原脱溴效果,其中2,4-DBP的初始浓度为100 mg/L、亚硫酸钠浓度为5 mmol/L、反应温度为298 K、溶液初始pH值为7.0、反应时间为20 min。实验结果如图1所示。 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 还原体系对2,4-DBP的降解效果显著高于单独UV体系。当反应时间为2 min时,单独UV体系对2,4-DBP的降解率为10%,而 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 还原体系为37%;反应时间为3.5 min时,单独UV体系对2,4-DBP的降解率为35%,而 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 还原体系为60%;反应到5 min时,单独UV体系对2,4-DBP的降解率增至55%,而 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$ 还原体系对目标物的降解率

则高达90%,远远高于单独UV体系。由此表明,UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系大大促进了2,4-DBP的降解,这与Liu<sup>[4]</sup>等人的实验结果相似。

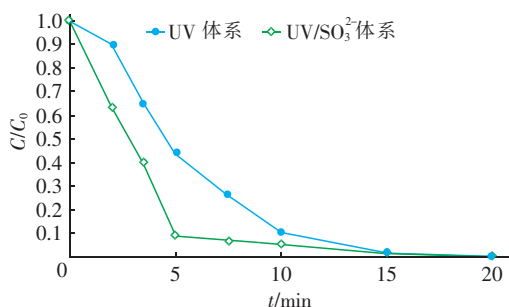


图1 UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系与UV体系对2,4-DBP的降解效果

Fig. 1 Degradation effect of 2,4-DBP in UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> system and UV system

## 2.2 不同亚硫酸钠浓度的影响

在亚硫酸钠浓度为0~20 mmol/L、初始pH值为7.0、反应温度为298 K的条件下,不同亚硫酸钠浓度对UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系降解2,4-DBP的影响如图2所示。可以看出,亚硫酸钠浓度的影响较显著,随着亚硫酸钠浓度的提高,UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对2,4-DBP的降解效果逐渐增强。当亚硫酸钠浓度在0~1 mmol/L范围(0、0.25、0.50、0.75、1 mmol/L)逐渐升高时,UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对目标物的降解效果提升明显,反应5 min后,对2,4-DBP的降解率分别为55%、60%、68%、77%、88%。而当亚硫酸钠浓度进一步提升至5~20 mmol/L(5、10、20 mmol/L)时,UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对2,4-DBP的降解效果提升不大,反应5 min后,对2,4-DBP的降解率分别为90%、91%、92%。

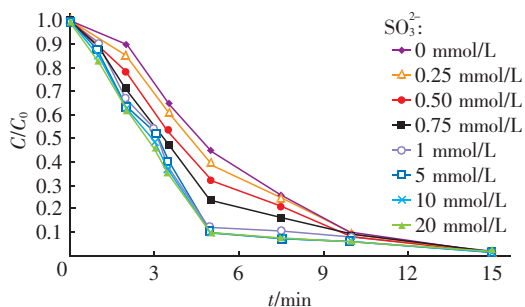


图2 不同亚硫酸钠浓度时UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系对2,4-DBP的降解效果

Fig. 2 Degradation effect of 2,4-DBP in UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> system at different Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> concentrations

利用准一级动力学方程对不同亚硫酸钠浓度时

UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系降解2,4-DBP的实验结果进行拟合,结果见图3。当SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>浓度分别为0、0.25、0.50、0.75、1、5、10、20 mmol/L时,反应速率常数 $k$ 值分别为0.255 7、0.258 3、0.298 3、0.337 6、0.339 6、0.363 5、0.398 4、0.406 2 min<sup>-1</sup>, $R^2$ 值分别为0.980 1、0.984 3、0.989 9、0.979 4、0.975 0、0.978 2、0.978 4、0.979 6, $R^2$ 值均大于0.97,相关性良好,表明准一级动力学方程可较好地拟合UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对目标物质的降解过程;另外,随着亚硫酸钠浓度的提高,其动力学速率常数不断增大,推测在UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系中高亚硫酸钠浓度产生了高水合电子浓度,从而作用于目标污染物还原脱溴,这与其他研究者<sup>[7]</sup>得到的结果类似。

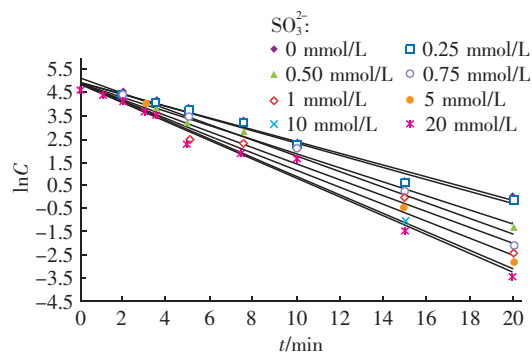


图3 不同亚硫酸钠浓度时准一级反应动力学拟合结果

Fig. 3 Fitting results of quasi-first-order reaction kinetic equation at different Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> concentrations

## 2.3 pH值的影响

在2,4-DBP初始浓度为100 mg/L、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>浓度为1 mmol/L、反应温度为298 K条件下,设定初始pH值分别为5.7、7.0、8.3、9.6,考察不同pH值对UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系降解2,4-DBP的影响,结果如图4所示。

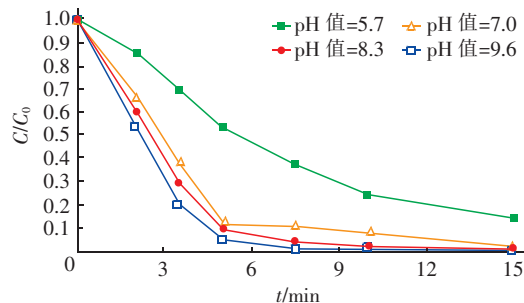


图4 pH值对UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系降解2,4-DBP的影响

Fig. 4 Effect of pH on degradation of 2,4-DBP in UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> reduction system

由图4可以看出,随着pH值的增加,UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对2,4-DBP的降解效果逐渐提高,偏酸性环境不利于2,4-DBP的降解,在偏碱性环境下2,4-DBP的降解效果较好。在初始pH值分别为5.7、7.0、8.3、9.6的条件下,反应7.5 min后,UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对2,4-DBP的降解率分别可以达到63%、90%、97%与99%。pH值对UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系降解2,4-DBP的影响明显,推测在较高pH值条件下,SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>产生水合电子的效率较高,从而促进了反应的进行<sup>[8]</sup>。

#### 2.4 反应温度的影响

在2,4-DBP初始浓度为100 mg/L、亚硫酸钠浓度为1 mmol/L、初始pH值为7.0的条件下,反应温度对UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系降解2,4-DBP的影响如图5所示。

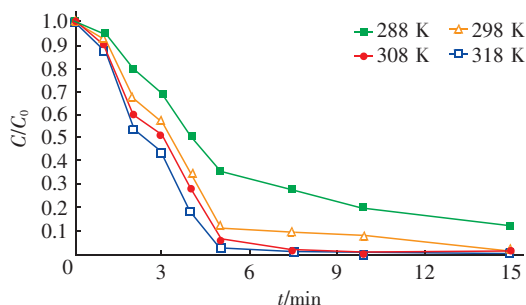


图5 反应温度对UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系降解2,4-DBP的影响

Fig. 5 Effect of reaction temperature on degradation of 2,4-DBP in UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> system

由图5可知,UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对2,4-DBP的降解效果随着反应温度的升高与提高,当反应温度分别为288、298、308与318 K时,反应10 min后,对2,4-DBP的降解率分别为80%、92%、99%与100%。有研究指出<sup>[9]</sup>,较高温度可使UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系产生更多有效的水合电子,从而有利于污染物的还原降解。

采用准一级动力学方程和Arrhenius方程研究2,4-DBP脱溴反应的表观活化能。图6为不同反应温度时UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对2,4-DBP降解过程的准一级动力学拟合结果。UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系在不同温度下对污染物的降解过程符合准一级动力学方程, $R^2$ 值均在0.94以上。图7为准一级动力学速率常数与反应温度的Arrhenius方程拟合结果,可以看出,两者的关系较好地符合Arrhenius方程, $R^2$ 值在0.99以上。此外,由图5可知,反应温度越高,升

高温对污染物去除率的影响就越小。因整个反应过程符合Arrhenius方程,根据Arrhenius方程的反应规则,表观活化能是一定的,当温度变化范围相同时,基础温度越高,反应速率的变化就越小。

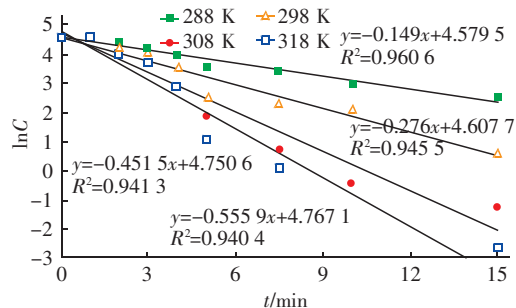


图6 不同反应温度时的准一级动力学拟合结果

Fig. 6 Fitting results of quasi-first-order reaction kinetic equation at different reaction temperatures

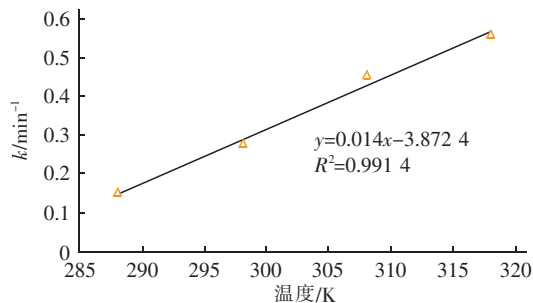


图7 准一级动力学速率常数与反应温度的关系

Fig. 7 Relationship between quasi-first-order kinetic rate constant and absolute temperature

#### 2.5 UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系的反应机理探讨

相关研究指出<sup>[8,10]</sup>,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>被视为典型的水合电子捕获剂。在本实验中,为了验证UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系中水合电子的作用效果,考察了水合电子捕获剂与DO对UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系降解2,4-DBP的影响,结果见图8,其中,2,4-DBP初始浓度为100 mg/L、初始pH值为7.0、亚硫酸钠浓度为10 mmol/L、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度为0.000 5 mmol/L。由图8可知,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与DO的添加可很大程度上抑制UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>还原体系对2,4-DBP的降解,其中DO对还原体系的抑制作用已被研究者证实<sup>[11]</sup>。不同体系对2,4-DBP降解效果的优劣顺序为:UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系>单独UV体系>UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>体系>UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+DO体系>UV/SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>体系,这表明电子捕获剂的添加明显减少了还原体系中的水合电子,从而抑制了2,4-DBP的降解。

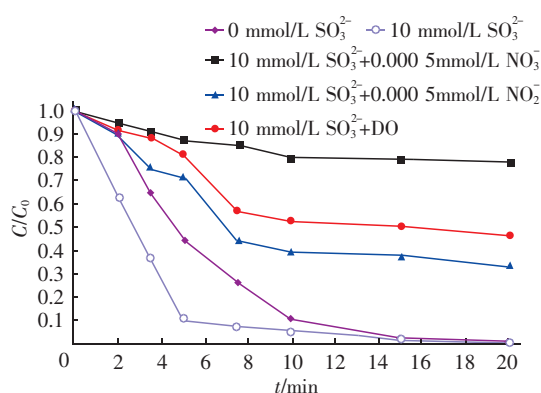


图8 电子捕获剂对2,4-DBP降解效果的影响

Fig. 8 Effect of electron capture agent on degradation of 2,4-DBP

为进一步探索  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  还原体系的作用过程,研究了  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系与单独 UV 体系中 2,4-DBP 的脱溴过程以及溴离子的生成过程,结果见图9。

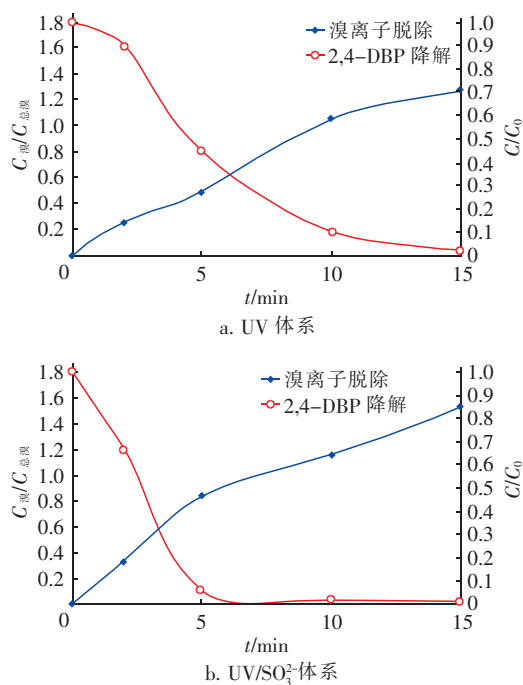


图9  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系和 UV 体系中 2,4-DBP 的脱溴降解过程

Fig. 9 Debromination process of 2,4-DBP in UV system and  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  system

$\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中 2,4-DBP 的脱溴速率明显高于单独 UV 体系。随着 2,4-DBP 脱溴反应的进行,两个体系中的溴离子浓度不断升高,且  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中溴离子的产率均高于单独 UV 体系。当反应时间为 2 min 时, $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系与单独 UV

体系对 2,4-DBP 的降解率分别为 33% 与 10%,溴离子的相对产率分别为 0.33 与 0.25;反应 5 min 时, $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系与单独 UV 体系对 2,4-DBP 的降解率分别为 94% 与 55%,溴离子相对产率分别为 0.84 与 0.48;反应 10 min 时, $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系与单独 UV 体系对 2,4-DBP 的降解率分别为 98% 与 90%,溴离子相对产率分别为 1.16 与 1.05;反应 15 min 时,两个体系中的 2,4-DBP 已经完全脱溴,溴离子相对产率分别为 1.52 与 1.27。这表明在反应过程中发生了多级脱溴反应,且  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中 2,4-DBP 的脱溴率高于单独 UV 体系。

## 2.6 降解路径探析

实验借助 GC/MS 对 2,4-DBP 降解的中间产物进行分析,研究  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中 2,4-DBP 的降解路径,结果见图 10。可知,2,4-DBP 降解的主要中间产物为 4-溴酚(4-BP)与苯酚,还有少量的 4,4'-联苯二酚。推测 2,4-DBP 脱溴过程如下: $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中的水合电子首先攻击 2,4-DBP 的邻位使其脱溴转化为 4-BP;然后水合电子进一步作用使得 4-BP 的对位脱溴转化为苯酚;中间产物中少量 4,4'-联苯二酚的产生表明水合电子继续攻击 C-H 键使得两个苯酚生成该物质。此外, $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中 2,4-DBP 与 4-BP 的脱溴反应过程是同时进行的,通过脱溴反应,2,4-DBP 逐级降解成为低毒性物质。

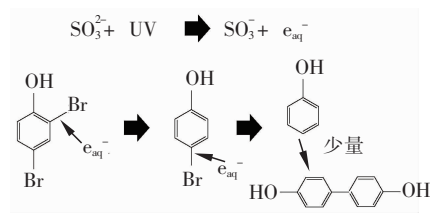
图10  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中 2,4-DBP 的降解路径分析

Fig. 10 Degradation pathway analysis of 2,4-DBP in  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  system

## 3 结论

①  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  还原体系对 2,4-DBP 的降解效果高于 UV 体系。 $\text{SO}_3^{2-}$  浓度对  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系降解 2,4-DBP 的影响较明显,降解效果随着  $\text{SO}_3^{2-}$  浓度的提高而逐渐增强;准一级动力学方程可较好地拟合  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系对 2,4-DBP 的降解过程。

② 随着初始 pH 值和反应温度的增加, $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系对 2,4-DBP 的还原降解效果逐渐提高;

不同反应温度时 2,4-DBP 的降解过程符合准一级动力学方程。

③ 水合电子捕获剂的添加会显著抑制  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系对 2,4-DBP 的脱溴过程,不利于目标污染物的还原降解。 $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中 2,4-DBP 的脱溴率与溴离子产率均高于单独 UV 体系。

④  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系中 2,4-DBP 降解的主要中间产物为 4-BP 与苯酚,还有少量的 4,4'-联苯二酚。在水合电子的作用下,2,4-DBP 经过多级脱溴反应转化成低毒性物质。

### 参考文献:

- [1] 张易旻,陈铮铮,陈昆柏,等. 氯代有机物污染土壤高级化学氧化修复技术研究进展[J]. 环境化学,2019,38(3):480-493.  
Zhang Yimin, Chen Zhengzheng, Chen Kunbo, *et al.* Remediation of chlorohydrocarbon contaminated soil by advanced oxidation technologies: A review [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38 (3): 480 - 493 (in Chinese).
- [2] 郭钦,庞素艳,姜成春,等.  $\text{KMnO}_4$  氧化降解 2,4-二氯酚的产物及机理推测[J]. 中国给水排水,2018,34(21):53-58.  
Guo Qin, Pang Suyan, Jiang Chengchun, *et al.* Degradation of 2, 4-dichlorophenol by potassium permanganate: Oxidation products and tentative mechanisms[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (21): 53 - 58 (in Chinese).
- [3] 项奇,谢晟瑜,张佳丽,等. 氯酚类废水处理机理研究进展[J]. 工业水处理,2017,37(11):5-10.  
Xiang Qi, Xie Shengyu, Zhang Jiali, *et al.* Research progress in the chlorophenols wastewater treatment mechanism [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37 (11): 5 - 10 (in Chinese).
- [4] Liu X, Yoon S, Batchelor B, *et al.* Degradation of vinyl chloride (VC) by the sulfite/UV advanced reduction process (ARP): Effects of process variables and a kinetic model [J]. Sci Total Environ, 2013, 454/455: 578 - 583.
- [5] 宋洲,何海洋,董学林,等.  $\text{UV}/\text{SO}_3^{2-}$  体系还原降解全氟辛烷磺酸及其影响因素[J]. 环境化学,2018,37(4):720-730.  
Song Zhou, He Haiyang, Dong Xuelin, *et al.* Reductive degradation of perfluorooctanesulfonate in UV/sulfite system and related influencing factors [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37 (4): 720 - 730 (in Chinese).
- [6] 杨世迎,张宜涛,郑迪. 高级还原技术:一种水处理新技术[J]. 化学进展,2016,28(6):934-941.  
Yang Shiyang, Zhang Yitao, Zheng Di. Advanced reduction processes: A novel technology for water treatment [J]. Progress in Chemistry, 2016, 28 (6): 934 - 941 (in Chinese).
- [7] Song Z, Tang H, Wang N, *et al.* Reductive defluorination of perfluorooctanoic acid by hydrated electrons in a sulfite-mediated UV photochemical system [J]. J Hazard Mater, 2013, 262: 332 - 338.
- [8] Li X, Ma J, Liu G, *et al.* Efficient reductive dechlorination of monochloroacetic acid by sulfite/UV process [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46 (13): 7342 - 7349.
- [9] Herrmann H. On the photolysis of simple anions and neutral molecules as sources of  $\text{O}^-/\text{OH}$ ,  $\text{SO}_x^-$  and Cl in aqueous solution [J]. Phys Chem Chem Phys, 2007, 9 (30): 3935 - 3964.
- [10] Xie B, Li X, Huang X, *et al.* Enhanced debromination of 4-bromophenol by the UV/sulfite process: Efficiency and mechanism [J]. J Environ Sci, 2017, 54(4): 231 - 238.
- [11] Jones C G, Silverman J, Al-Sheikhly M, *et al.* Dechlorination of polychlorinated biphenyls in industrial transformer oil by radiolytic and photolytic methods [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37(24): 5773 - 5777.



作者简介:张晓(1973-),女,湖北通山人,博士,副教授,研究方向为化工废水污染控制技术。

E-mail: zhangxiao7376@sina.com

收稿日期:2019-12-16