

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.015

# 紫外活化过硫酸盐技术用于污水厂二级出水深度处理

雷 晨, 许 路, 张琼华, 金鹏康

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 城镇污水处理厂二级出水可作为再生水水源,其中所含有有机物一直是备受关注的重点指标。利用紫外活化过硫酸盐技术(UV/PS)处理二级出水中的溶解性有机物,对比了单独UV、单独PS、UV/PS以及UV/TiO<sub>2</sub>等4种反应体系的降解效果,并考察了PS投加量对UV/PS工艺处理效果的影响,同时分析了UV/PS工艺处理前后二级出水中有机物荧光特性和相对分子质量的变化,最后采用电子顺磁共振波谱(EPR)技术对反应过程中产生的活性氧化物质进行了分析。研究表明:PS浓度为5 mmol/L时,UV/PS工艺对二级出水的处理效果最好,其色度、UV<sub>254</sub>、UV<sub>280</sub>及DOC去除率分别高达100%、89%、91%和96%;反应过程中二级出水中的荧光物质和大分子有机物均被有效降解;硫酸根自由基和羟基自由基的共同作用具有良好的氧化有机物的效果。

**关键词:** 高级氧化; 二级出水; 紫外; 过硫酸盐

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0086-08

## Advanced Treatment of Secondary Effluent from a Wastewater Treatment Plant by Ultraviolet Activated Persulfate

LEI Chen, XU Lu, ZHANG Qiong-hua, JIN Peng-kang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Secondary effluent from wastewater treatment plants (WWTPs) can be used as the source of reclaimed water, and organic substance has always been an important indicator of concern. Ultraviolet activated persulfate process (UV/PS) was utilized to degrade dissolved organic matters (DOC) in the secondary effluent from a wastewater treatment plant. The treatment efficiencies of UV, PS, UV/PS and UV/TiO<sub>2</sub> were compared. Besides, the effect of PS dosage on treatment performance of UV/PS was investigated. Moreover, fluorescence characteristics and relative molecular mass of the dissolved organic matter in the secondary effluent before and after UV/PS treatment were analyzed. Finally, the active oxidizing substances generated during the reaction were analyzed through EPR technology. UV/PS process exhibited the best performance on the degradation of secondary effluent when the PS concentration was 5 mmol/L, and the removal efficiencies of chromaticity, UV<sub>254</sub>, UV<sub>280</sub> and DOC were as high as 100%, 89%, 91% and 96%, respectively. Fluorescent substances and macromolecular organic substances in the secondary effluent were effectively degraded during the treatment process. The combination of sulfate radical and hydroxyl radical had a good performance of oxidizing organic

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508447); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701)  
通信作者: 张琼华 E-mail: qionghuazhang@126.com

substances.

**Key words:** advanced oxidation process; secondary effluent; ultraviolet; persulfate

城镇污水处理厂二级出水可作为再生水水源,经深度处理后用于工业冷却、市政灌溉等以缓解城镇用水压力<sup>[1]</sup>。城镇生活污水中 93% 的有机物均能通过常规生物处理技术去除<sup>[2]</sup>,但二沉池出水中仍存在部分结构复杂的有机物,如天然有机物、溶解性微生物产物、合成有机物等<sup>[3]</sup>,传统水处理工艺对其去除效果较差,同时存在工艺复杂、占地面积大、能耗高等问题,因此需引进更为有效的处理工艺将其去除<sup>[4]</sup>。

基于硫酸根自由基( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ,  $E^0 = 2.6 \text{ V}$ )的高级氧化工艺因其反应条件温和、前体物质稳定及氧化性强的优点而受到人们的关注<sup>[5]</sup>。过硫酸盐(Persulfate, PS)被激活后会生成硫酸根自由基,通过夺氢反应、自由基加成以及电子转移 3 种方式氧化降解有机物,从而起到去除污染物净化水体的作用<sup>[6]</sup>。常见的活化方法包括加热、紫外辐射以及过渡金属离子催化等,其中可用于激活 PS 的过渡金属包括  $\text{Fe}(\text{II})$ 、 $\text{Fe}(\text{III})$ 、 $\text{Ag}(\text{I})$ 、 $\text{Cu}(\text{I})$ 、 $\text{Ce}(\text{III})$ 、 $\text{Co}(\text{II})$ 、 $\text{Mn}(\text{II})$  等,但自由基产量较低,同时金属离子的引入会加重污染<sup>[7]</sup>;通过加热活化 PS 时,能量消耗过大,难以在实际中应用;而紫外光催化所需能量低,体积小,紫外光照消毒也已在部分污水处理厂中投入实际应用。因此,笔者选择效率高、耗能低、无污染的紫外辐射活化 PS 降解二级出水中残留的难降解有机污染物。

目前利用 UV/PS 工艺深度处理二级出水的研究较为少见,仅有王大扬等<sup>[8]</sup>探讨了过硫酸盐经能量激发(加热、紫外照射)和过渡金属催化( $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Co}^{2+}$ )后对二级出水 DOC 的影响,并未深入研究。因此,笔者利用 UV/PS 工艺对西安市某城市污水处理厂二级出水进行深度处理,研究该工艺对二级出水各项指标的处理效果,探讨该工艺对二级出水荧光特性及相对分子质量的影响,最后确定了体系中自由基的存在和种类。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验水样

实验用二级出水取自西安市某污水处理厂  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺的二沉池出水口,该污水处理厂进水主要为城市生活污水。采集水样利用聚乙烯桶盛装带回

实验室,经  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜过滤后保存于  $4^\circ\text{C}$  冰箱,过滤后的水质如表 1 所示。

表 1 原水水质

Tab. 1 Raw water quality

项目	色度/ 倍	$\text{UV}_{254}/$ $\text{cm}^{-1}$	$\text{UV}_{280}/$ $\text{cm}^{-1}$	DOC/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
数值	0.055	0.182	0.145	8.18	34.15

### 1.2 实验装置

本实验采用自制静态小试装置进行,由 1 500 mL 圆柱形反应器、磁力搅拌器、45 W 内置浸没式紫外光源(UVC 在 254 nm 处强度为  $135 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ )及外部循环水冷却器组成。反应器外壁包裹一层锡箔纸以防止光源能量散失;整个反应器置于磁力搅拌器上;反应器外侧为冷凝水通道,反应过程中温度保持恒定;反应器上部留有取样口;内置紫外灯管插在反应器中心轴处。

### 1.3 实验步骤

首先取 1 200 mL 实验原水倒入反应器中,然后将一定量的过硫酸钾( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ )或商用二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )加入其中,室温下搅拌 5 min 使  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  或  $\text{TiO}_2$  溶解混合均匀后,打开紫外光源,开始光催化反应。反应过程中间隔相同时段自取样口取样,测量色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$ 、DOC、三维荧光和相对分子质量等水质指标。

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$ 的测定

色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$  由 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计分别在 350、254、280 nm 处测定吸光度值得到<sup>[9]</sup>。

#### 1.4.2 DOC 的测定

DOC 采用日本岛津生产的 TOC-VCPH 分析仪测定,测定前向水样中加入浓硫酸酸化,混合均匀后通入氮气进行氮吹处理,去除水中无机碳以保证测定值的准确性。

#### 1.4.3 三维荧光光谱(EEM)

三维荧光光谱采用日本 JASCO 公司生产的 FP6500 型荧光分光光度计进行分析,激发波长范围为 220~400 nm,发射波长范围为 280~500 nm。激发和发射扫描间隔分别为 5 nm 和 1 nm,扫描速度

为 1 000 nm/min。测定前使用空白溶液校准,排除水的拉曼散射峰影响。

#### 1.4.4 相对分子质量

相对分子质量由岛津公司生产的 LC - 2010AHF 型高效液相色谱测定。采用紫外检测器,检测波长为 254 nm,色谱柱为 Zenix SEC - 100 凝胶色谱柱,流动相为 150 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液,流速为 1 mL/min。样品需提前过 0.22  $\mu\text{m}$  的滤头后检测。

#### 1.4.5 电子顺磁共振波谱分析(EPR)

BMPO(5 - tert - Butoxycarbonyl - 5 - methyl - 1 - pyrroline - N - oxide) 以及 DMPO(5, 5 - dimethyl - 1 - pyrroline - N - oxide) 为不同的自由基捕获剂,均可被自由基自旋捕获生成不同产物,进而被电子顺磁共振波谱仪检测得到不同形状的峰,根据峰的形状可以确定体系中的自由基种类。

## 2 结果与讨论

### 2.1 UV/PS 体系对二级出水的深度处理效果

首先以色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$  及 DOC 为考察指标,考察了单独 UV、单独 PS(3 mmol/L)、UV/PS(3 mmol/L)及 UV/ $\text{TiO}_2$ (1 g/L)4 种体系对二级出水的深度处理效果,结果见图 1(体系温度为 15  $^{\circ}\text{C}$ )。由图 1 可知,当只向实验原水加入 PS 时直至反应终点各指标均没有明显变化;当采用 UV 处理二级出水时其色度、 $\text{UV}_{254}$  和  $\text{UV}_{280}$  均有一定程度的降低,降解率约为 20%,而 DOC 含量则没有明显变化;相反,UV/PS 体系对于二级出水的处理效果非常明显,经过 60 min 的反应,其对色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$  和 DOC 的去除率分别达到 100%、89%、91% 和 96%,远高于单独 UV 或单独加入 PS 的体系对二级出水的处理效率。这应该是因为经 UV 激活后,PS 在溶液中生成了  $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ,而  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  会触发自由基转换反应生成  $\cdot\text{OH}$ <sup>[10-12]</sup>,这两种自由基均具有极强的氧化性,可与水中的有机污染物发生氧化反应而将其去除,因此 UV/PS 体系对二级出水的处理效率远高于单独 UV 或单独加入 PS 的反应体系。另外对比了较为常见的 UV/ $\text{TiO}_2$  工艺对二级出水的处理效果,结果表明该体系对二级出水的色度、 $\text{UV}_{254}$  及  $\text{UV}_{280}$  的去除效率比单独 UV 及单独 PS 体系更高,60 min 时对这些指标的去除率均在 50% 左右,但与 UV/PS 体系相比则略低。由图 1(d)可得,UV/ $\text{TiO}_2$  工艺对二级出水中 DOC 的去除率基本为 0,矿化能力极低,完

全不能与 UV/PS 体系对 DOC 的降解率相比。由上述可得,这 4 种体系中 UV/PS 体系对二级出水的降解效率最高,处理效果最优。

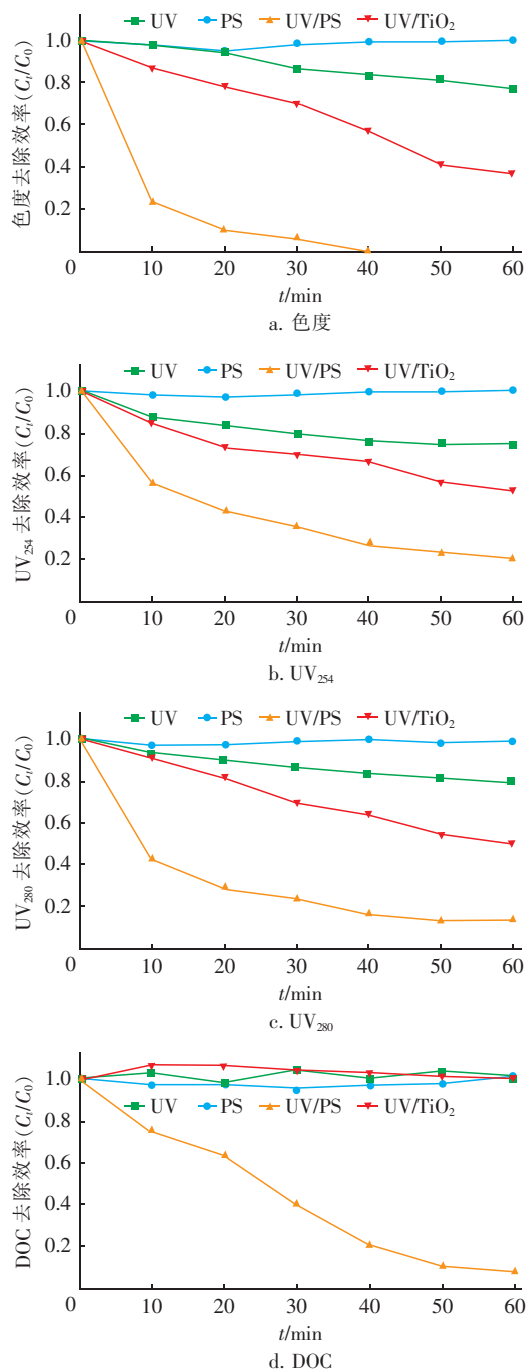


图1 不同体系对色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$ 、DOC 的去除效率对比

Fig. 1 Comparison of degradation efficiency of chromaticity,  $\text{UV}_{254}$ ,  $\text{UV}_{280}$  and DOC by different systems

### 2.2 PS 浓度对二级出水深度处理效果的影响

UV/PS 体系对二级出水的深度处理效果受 PS 浓度的影响较大,因此,确定了该体系的降解效能后

研究了在不同 PS 浓度下(0、1、3、5 mmol/L)各指标的去除效果,结果见图 2(体系温度为 15 ℃)。

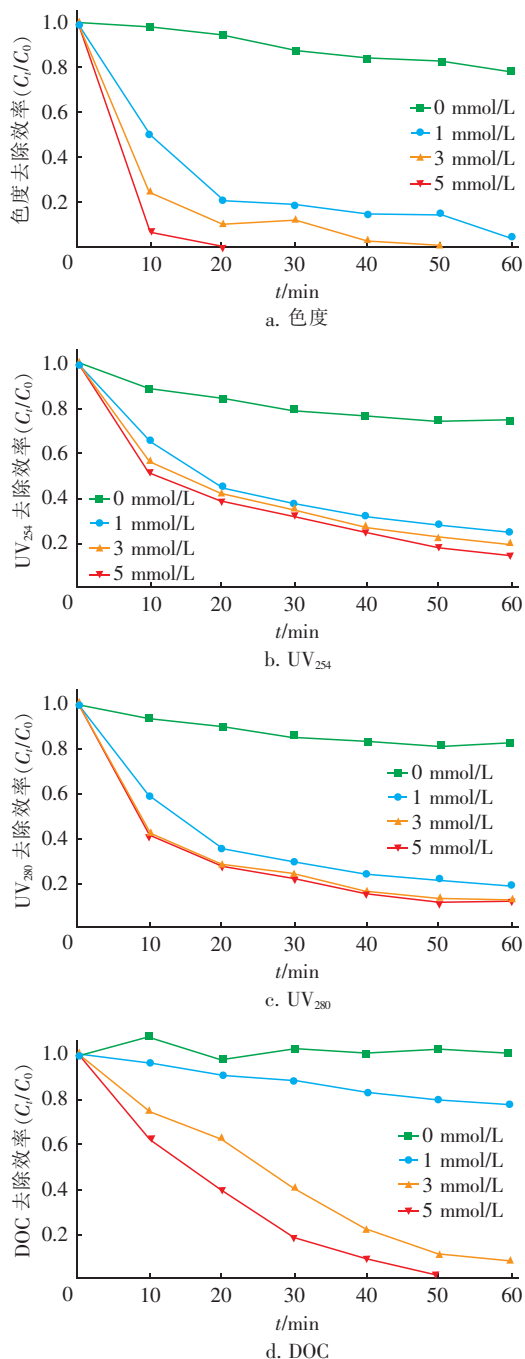


图2 UV/PS 体系中 PS 浓度对色度、 $UV_{254}$ 、 $UV_{280}$ 、DOC 的影响

Fig. 2 Effect of PS concentration in UV/PS system on chromaticity,  $UV_{254}$ ,  $UV_{280}$  and DOC

由图 2 可见,随着 PS 投加量的增加,各指标的降解效率均有所提高。由图 2(a)与 2(d)可看出,当 PS 浓度由 1 mmol/L 增加至为 5 mmol/L 时,色度

的降解速度大大增加,去除率达到 100% 的时间由 60 min 减小至 20 min,DOC 的去除率则由 20% 增加至 100%。这应该是因为随着 PS 投加量的增加,UV/PS 体系中经 UV 激活产生的硫酸根自由基和羟基自由基含量增加,氧化能力提高,有机污染物被完全氧化为二氧化碳和水,所以体系内的色度和 DOC 大大降低。

$UV_{254}$  代表水中芳香族有机物以及含共轭双键结构的有机物,特别是腐殖质类物质的含量,而  $UV_{280}$  代表水中的蛋白质类物质<sup>[13-14]</sup>。由图 2(b)与(c)可看出,随着 PS 浓度的增加,与 DOC 的大幅度降低不同, $UV_{254}$  和  $UV_{280}$  的去除率在 PS 浓度为 1 mmol/L 时已达到 80% 左右,但随着 PS 浓度的继续增加  $UV_{254}$  和  $UV_{280}$  的去除率基本不变。这一现象似乎与图 2(d)的结果相矛盾,因为当 PS 浓度增加至 3 和 5 mmol/L 时,DOC 的去除率接近 100%,意味着水中的有机物基本完全被矿化,因此  $UV_{254}$  和  $UV_{280}$  的去除率也应接近 100%。造成上述结果的主要原因可能是由于高浓度的 PS 溶液自身对于波长为 254 和 280 nm 的光有吸收,进而导致  $UV_{254}$  和  $UV_{280}$  的表现去除率远低于 100%。

可见,当 PS 浓度为 5 mmol/L 时 UV/PS 体系对二级出水的处理效果最好,但考虑到水体对硫酸盐的接受程度,需将反应后水体中的硫酸盐含量控制在一定范围内,因此后续实验 UV/PS 体系内 PS 浓度均控制在 3 mmol/L<sup>[15]</sup>。

## 2.3 有机物特性分析

### 2.3.1 荧光性物质的去除

二级出水中荧光性物质包括类腐殖酸荧光团、类富里酸荧光团、类芳香族蛋白质荧光团和类溶解性微生物代谢产物荧光团<sup>[16]</sup>。采用三维荧光光谱技术对 UV/PS 工艺处理前后二级出水中荧光性物质的特性进行了研究,反应体系中 PS 浓度为 3 mmol/L,结果如图 3 所示(体系温度为 15 ℃)。

采用 Zhang 等<sup>[17]</sup>的方法将三维荧光光谱分为 A、B、C、D、E 这 5 个区域,如图 3 所示,原水中明显的特征荧光峰有 A、B、D、E 这 4 个,特征荧光峰中心位置分别在  $Ex/Em = 280\text{ nm}/355\text{ nm}$ (A)、 $Ex/Em = 265\text{ nm}/420\text{ nm}$ (B)、 $Ex/Em = 235\text{ nm}/370\text{ nm}$ (D)、 $Ex/Em = 245\text{ nm}/435\text{ nm}$ (E),根据已有研究可知这几处荧光峰分别为类溶解性微生物代谢产物荧光峰(A)、类腐殖酸荧光峰(B)、类芳香族蛋白质荧光峰



(D)和类富里酸荧光峰(E)<sup>[16-17]</sup>。经UV/PS工艺处理后各荧光峰强度均迅速降低,反应开始10 min后大部分荧光性物质已被去除,30 min后EEM图谱中荧光峰E处荧光强度降低至60以下,反应60 min后原水中荧光物质被完全去除。这应该是因为PS在UV辐射下生成的硫酸根自由基与羟基自由基直接与水体中难降解有机物发生反应,有机物中的荧光基团结构被破坏,使EEM图谱中荧光峰强度逐渐降低,同时由于自由基氧化能力较强,体系内未生成新的荧光中间产物,所以EEM图谱中各荧光峰的位置均未发生移动。可知UV/PS工艺对二级出水中的荧光性物质(如类腐殖酸、类富里酸、类芳香族蛋白质和类溶解性微生物代谢产物)均具有良好的降解效果。

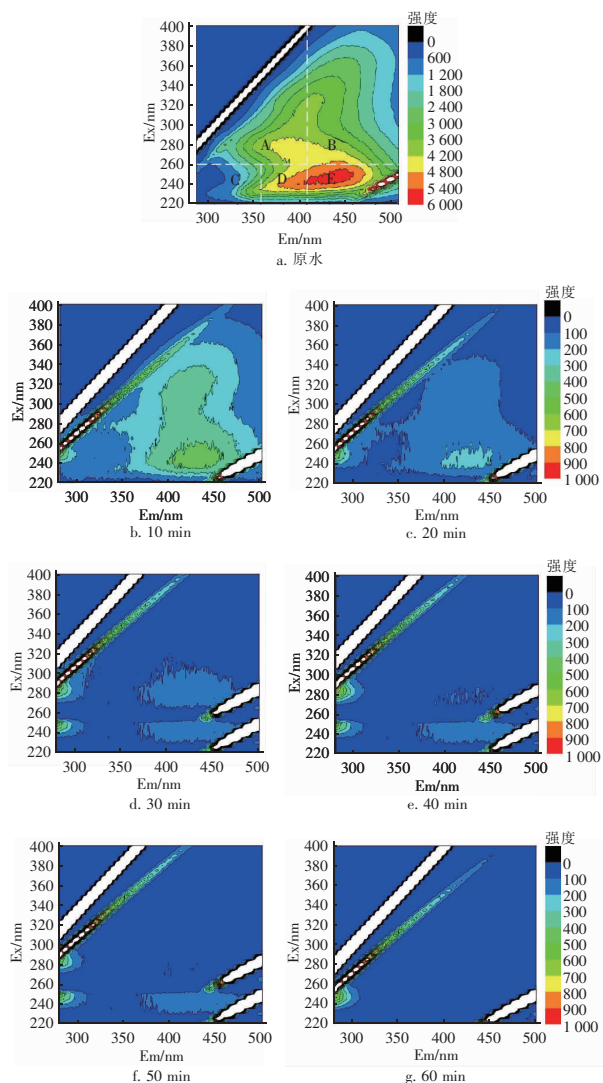


图3 UV/PS体系中二级出水的EEM图谱

Fig. 3 EEM spectra of secondary effluent in UV/PS system

### 2.3.2 对分子质量的影响

利用HPLC对UV/PS体系反应过程中二级出水中难降解有机物以及荧光物质的分子质量进行研究<sup>[18-21]</sup>。水中有有机物按分子质量由大到小的顺序通过色谱柱,因此保留时间越长该物质分子质量越小,即可得到不同分子质量有机物在反应过程中的变化情况,同时由于HPLC峰面积与总分子质量呈线性关系,通过对比反应过程中峰的变化即可得知二级出水内总分子质量的变化,探究UV/PS工艺对二级出水中有机物分子质量的影响,结果如图4所示。图4(a)为使用紫外检测器得到的分子质量分布图,检测波长为254 nm,所测物质为二级出水中的芳香族有机物以及含共轭双键结构有机物;图4(b)为使用荧光检测器得到的分子质量分布图,检测波长为EEM图谱内最高峰E的波长 $E_x/E_m = 245 \text{ nm}/435 \text{ nm}$ ,所测物质为二级出水中的荧光类物质如类富里酸物质。

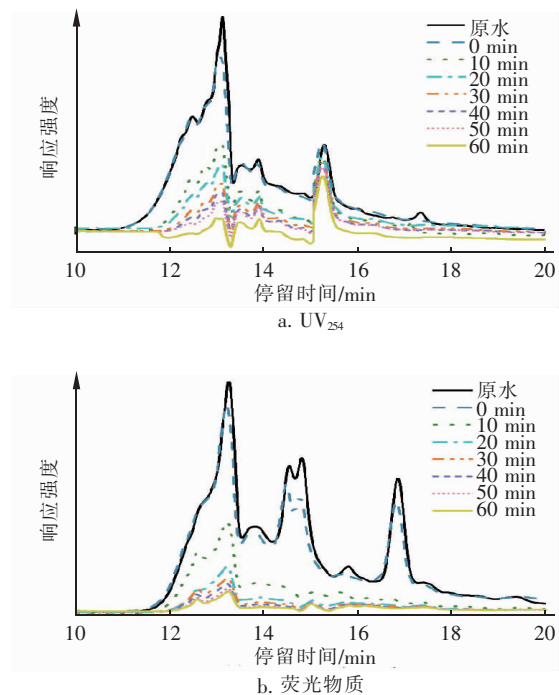


图4 UV/PS体系内二级出水中有机物、荧光物质的相对分子质量分布

Fig. 4 MWD of organics and fluorescence substances of secondary effluent in UV/PS system

由图4(a)可知,原水中主要包含大部分大分子有机物及少量小分子有机物,紫外吸收峰出峰时间主要分布在13 min及15 min处,随着催化反应的进行,13 min处紫外吸收峰强度逐渐降低,反应进行

60 min 后该峰基本消失,这应该是因为这些大分子有机物已被体系中自由基完全氧化为小分子有机物或者被碳化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,而 15 min 处的紫外峰变化较小,说明 UV/PS 体系对这种小分子有机物的去除效率相对较低,这与  $\text{UV}_{254}$  在反应终点仍未完全降解相对应,该分子质量的测定结果也与 DOC 的去除结果相符。由图 4(b)可知,二级出水中荧光物质的分子质量随着催化反应的进行逐渐降低,反应 60 min 后荧光物质的分子质量基本为 0,这与 EEM 图谱所得结果相符。综上所述,反应 60 min 后二级出水中的荧光物质被完全降解,芳香族化合物及含共轭双键结构的有机物中的大分子物质被降解为小分子物质及二氧化碳与水,可知 UV/PS 体系对二级出水中大部分有机污染物均具有良好的去除效果。

#### 2.4 反应过程中自由基的产生及种类

为了进一步验证 UV/PS 体系内起到氧化作用的活性氧物质,利用 BMPO、DMPO 分别作为硫酸根自由基及羟基自由基的捕获剂进行 EPR 实验,结果如图 5 所示。

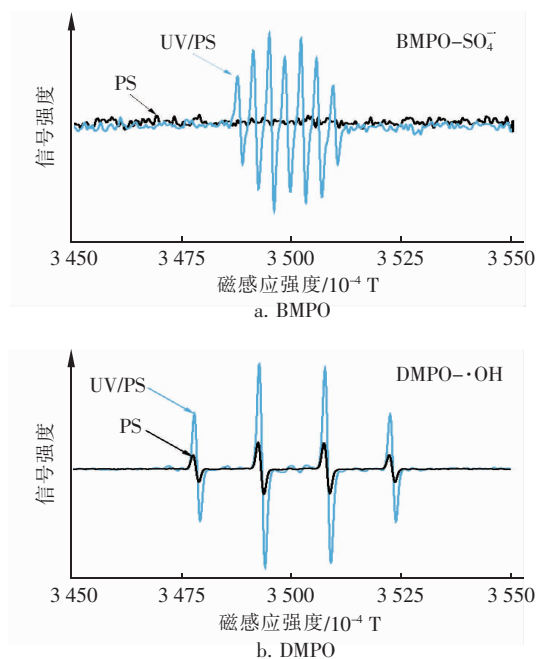


图 5 PS 及 UV/PS 体系与 BMPO、DMPO 的 EPR 图谱

Fig. 5 EPR spectra in PS and UV/PS system with BMPO and DMPO

利用捕获剂 BMPO 检测体系内的硫酸根自由基,从图 5(a)可以看出,在单独 PS 体系中没有明显自旋信号产生,而加入 UV 后体系内产生了典型的  $\text{BMPO} - \text{SO}_4^{\cdot -}$  信号峰<sup>[22]</sup>,由此可知在 UV 辐射下

PS 被激活后产生了硫酸根自由基,而硫酸根自由基可以与水反应生成羟基自由基,因此进一步利用羟基自由基捕获剂 DMPO 检测体系内羟基自由基的存在。

由图 5(b)可以看出,在 UV/PS 体系中检测到了典型的 DMPO 与羟基自由基加成物所形成的 1:2:2:1 的信号峰<sup>[23-24]</sup>。虽然在单独 PS 体系中也检测到了 1:2:2:1 的信号峰,但该信号主要是 PS 与 DMPO 在强磁场下产生的类似于 DMPO 与羟基自由基加成物的四重峰而并非真正的自由基信号峰,而且其信号强度远远小于 UV/PS 体系的强度,说明 UV/PS 体系中除了硫酸根自由基外还存在羟基自由基。这两种自由基在 UV/PS 体系内共同存在,共同氧化降解二级出水中的各种有机污染物。

#### 3 结论

① 单独 UV 及单独 PS 对二级出水中的溶解性有机物的去除效果十分有限,但在 UV/PS 联用后,二级出水中的色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$ 、DOC 都得到了效果显著的去除。另外比较 UV/PS 及 UV/ $\text{TiO}_2$  对二级出水的处理效果可知,UV/PS 体系效果更好。

② UV/PS 体系中 PS 浓度对二级出水的深度处理效果影响较大,随 PS 浓度的升高,对色度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{UV}_{280}$ 、DOC 的去除率也逐渐增大。

③ UV/PS 体系可破坏有机物中荧光基团使二级出水中荧光物质逐渐降解;分子质量分析结果显示,二级出水中大分子有机物被氧化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,小部分被降解为小分子有机物,其中荧光物质被完全去除。

④ EPR 结果显示,反应过程中 UV/PS 体系内产生了硫酸根自由基和羟基自由基两种强氧化性自由基。

#### 参考文献:

- [1] Petala M, Tsiridis V, Samaras P, *et al.* Wastewater reclamation by advanced treatment of secondary effluents [J]. Desalination, 2006, 195(1/3): 109-118.
- [2] Dignac M F, Ginestet P, Rybacki D, *et al.* Fate of wastewater organic pollution during activated sludge treatment: Nature of residual organic matter [J]. Water Res, 2000, 34(17): 4185-4194.
- [3] Wang X, Wang J, Li K, *et al.* Molecular characterization of effluent organic matter in secondary effluent and reclaimed water: Comparison to natural organic matter in

- source water[J]. J Environ Sci, 2018, 63(1): 140 – 146.
- [4] Michael-Kordatou I, Michael C, Duan X, *et al.* Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications[J]. Water Res, 2015, 77: 213 – 248.
- [5] Ismail L, Ferronato C, Fine L, *et al.* Elimination of sulfaclozine from water with  $\text{SO}_4^{\cdot -}$  radicals: Evaluation of different persulfate activation methods[J]. Appl Catal B: Environ, 2017, 201: 573 – 581.
- [6] Hazime R, Nguyen Q H, Ferronato C, *et al.* Comparative study of imazalil degradation in three systems: UV/TiO<sub>2</sub>, UV/K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> and UV/TiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>[J]. Appl Catal B: Environ, 2014, 144: 286 – 291.
- [7] Anipsitakis G P, Dionysiou D D. Radical generation by the interaction of transition metals with common oxidants[J]. Environ Sci Technol, 2004, 38(13): 3705 – 3712.
- [8] 王大扬, 王明铭, 张学真, 等. 硫酸根自由基降解二级出水中有机物的研究[J]. 环境工程, 2017, 35(4): 20 – 25.
- Wang Dayang, Wang Mingming, Zhang Xuezheng, *et al.* Study on sulfate radical degrading organic matter in secondary effluents[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(4): 20 – 25 (in Chinese).
- [9] 王滨, 刘金凤. 分光光度法测定水中色度[J]. 中国卫生检验杂志, 1996(2): 118 – 119.
- Wang Bin, Liu Jinfeng. Spectrophotometric determination of chromaticity in water[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 1996(2): 118 – 119 (in Chinese).
- [10] Kolthoff I M, Miller K I. The chemistry of persulfate. II. the reaction of persulfate with mercaptans solubilized in solutions of saturated fatty acid soaps I[J]. J Am Chem Soc, 1951, 73(11): 5118 – 5122.
- [11] House D A. Kinetics and mechanism of oxidation by peroxydisulfate[J]. Chem Rev, 1962, 62(3): 185 – 203.
- [12] Liang C J, Bruell C J, Marley M C, *et al.* Thermally activated persulfate oxidation of trichloroethylene (TCE) and 1,1,1-trichloroethane (TCA) in aqueous systems and soil slurries[J]. Soil Sediment Contam: Intern J, 2003, 12(2): 207 – 228.
- [13] Sadrnourmohamadi M, Gorczyca B. Effects of ozone as a stand-alone and coagulation-aid treatment on the reduction of trihalomethanes precursors from high DOC and hardness water[J]. Water Res, 2015, 73(7): 171 – 180.
- [14] Papageorgiou A, Stylianou S K, Kaffes P, *et al.* Effects of ozonation pretreatment on natural organic matter and wastewater derived organic matter—Possible implications on the formation of ozonation by-products[J]. Chemosphere, 2017, 170: 33 – 40.
- [15] Izadifard M, Achari G, Langford C H. Degradation of sulfolane using activated persulfate with UV and UV – ozone[J]. Water Res, 2017, 125: 325 – 331.
- [16] 薛爽, 梁雷, 赵庆良, 等. 二级处理出水中溶解性有机物的荧光特性[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 177 – 182.
- Xue Shuang, Liang Lei, Zhao Qingliang, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in secondary treated effluents[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(7): 177 – 182 (in Chinese).
- [17] Zhang T, Lu J, Ma J, *et al.* Fluorescence spectroscopic characterization of DOM fractions isolated from a filtered river water after ozonation and catalytic ozonation[J]. Chemosphere, 2008, 71(5): 911 – 921.
- [18] 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 等. 污水厂二级出水中难凝聚有机物的臭氧化特性[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 844 – 851.
- Hou Rui, Jin Xin, Jin Pengkang, *et al.* Ozonation characteristics of low coagulability organic matter from the secondary effluent of WWTPs[J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 844 – 851 (in Chinese).
- [19] 刘成, 黄廷林, 赵建伟. 混凝、粉末活性炭吸附对不同分子量有机物的去除[J]. 净水技术, 2006, 25(1): 31 – 33.
- Liu Cheng, Huang Tinglin, Zhao Jianwei. Removal effect of organic matters of different MW during the process of coagulation and adsorption of powdered activated carbon (PAC)[J]. Water Purification Technology, 2006, 25(1): 31 – 33 (in Chinese).
- [20] 笱秀丽. 活性炭及联用工艺去除自来水中有机物的效果[J]. 中国给水排水, 2008, 24(5): 48 – 51, 56.
- Gou Xiuli. Organic removal from tap water by activated carbon and combined process[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(5): 48 – 51, 56 (in Chinese).
- [21] 邵青, 王颖, 李晶, 等. 紫外/臭氧工艺在水处理中的技术原理及研究进展[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 16 – 23.

(下转第106页)