

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.013

# 零价铁活化高铁酸盐降解水中双酚AF

王群<sup>1</sup>, 梁柚恒<sup>1</sup>, 胡涛<sup>2</sup>, 曾晗<sup>3</sup>, 莫桑<sup>1</sup>, 付云霞<sup>4</sup>,  
莫永钊<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 2. 贵阳铝镁设计研究院有限公司 市政环保分院, 贵州 贵阳 550000; 3. 重庆电力高等专科学校 动力工程学院, 重庆 400053; 4. 四川省核工业辐射测试防护院 环保咨询所, 四川 成都 610000)

**摘要:** 为了应对内分泌干扰物对水生环境的危害问题,采用零价铁(ZVI)活化高铁酸盐[Fe(VI)]去除水中典型内分泌干扰物双酚AF(BPAF)。分别在纯水和实际水体中考察ZVI剂量、Fe(VI)初始浓度和初始pH对BPAF去除效果的影响。同时,通过三维荧光光谱技术表征实际水体中的有机物。结果表明,Fe(VI)/ZVI体系对纯水体中BPAF的去除率高达90.56%,不同反应参数下BPAF的降解遵循假一级动力学模型。实际水体中含有芳环结构的类蛋白质物质可能更易与Fe(VI)反应,但是体系对BPAF和溶解性有机物均有较好的去除效果,去除率分别为82.57%和60.2%。另外,Fe(VI)和ZVI二者存在协同效应,体系中可能产生以中间价态的铁[Fe(IV)/Fe(V)]为主的活性物质,加速氧化BPAF。

**关键词:** 零价铁; 高铁酸盐; 双酚AF; 中间价态铁; 有机物

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0079-07

## Zero-valent Iron Activated Ferrate for Degradation of Bisphenol AF in Water

WANG Qun<sup>1</sup>, LIANG You-heng<sup>1</sup>, HU Tao<sup>2</sup>, ZENG Han<sup>3</sup>, MO Sang<sup>1</sup>, FU Yun-xia<sup>4</sup>,  
MO Yong-qian<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geoscience and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. Municipal Environmental Protection Branch, Guiyang Aluminum Magnesium Design and Research Institute Co. Ltd., Guiyang 550000, China; 3. College of Power Engineering, Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, China; 4. Environmental Consultation Office, Sichuan Nuclear Industry Radiation Testing and Protection Institute, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** Zero-valent iron (ZVI) activated ferrate [Fe(VI)] was employed for the removal of bisphenol AF (BPAF), a typical endocrine disruptor, from water, so as to address the impact of endocrine disruptors on the aquatic environment. The study investigated the impact of ZVI dosage, initial Fe(VI) concentration, and initial pH on the removal efficiency of BPAF in both pure water and actual water systems. Concurrently, the organic matter present in the actual water body was characterized using three-

基金项目: 哈尔滨工业大学城市水资源与环境国家重点实验室开放项目(HC201812); 四川省科技厅项目(2019YFS0501、2018SZDZX0026)

通信作者: 王群 E-mail: lyhpomelo@163.com

dimensional fluorescence spectroscopy. The removal rate of BPAF in the pure water system by the Fe(VI)/ZVI system was as high as 90.56%. The degradation of BPAF followed the pseudo-first-order kinetic model under different reaction parameters. In actual water, protein-like substances containing aromatic ring structures were more likely to react with Fe(VI). However, the system effectively removed BPAF and dissolved organic matter, with removal rates of 82.57% and 60.2%, respectively. Furthermore, there existed a synergistic effect between Fe(VI) and ZVI, leading to the production of active substances primarily composed of intermediate valent iron [Fe(IV)/Fe(V)] in the system. These substances served to expedite the oxidation of BPAF.

**Key words:** zero-valent iron; ferrate; bisphenol AF; intermediate valent iron; organic matter

当前,废水排放量急剧上升,成分也更加复杂。其中,双酚类物质因产量高、用途广泛、具有潜在的毒性,越来越受到科研人员的关注。近年来,双酚AF(BPAF)被认为是一种新型的双酚类似物,可以作为含氟橡胶和聚酯加工等塑料工业中的原料<sup>[1]</sup>。然而,有研究表明BPAF对人体内分泌系统具有干扰作用<sup>[2]</sup>,其在我国太湖、辽河、浑河、杭州湾嘉兴段和西塘河中被广泛检出,在西塘河的最大浓度甚至达到了15 300 ng/L<sup>[3]</sup>。BPAF对环境和人类的生命安全已构成重大威胁,因此研发经济、有效的BPAF处理方法十分必要。

高铁酸盐[Fe(VI)]是一种新兴的绿色化学物质,具有较高的氧化能力,且Fe(VI)还原后的主要产物Fe(OH)<sub>3</sub>胶体又是一种优良的絮凝剂,可以吸附和絮凝水中的污染物,提高对有机物的降解效果<sup>[4]</sup>。然而,Fe(VI)会与水反应,导致其单独使用时利用效率并不高。

有研究表明,Fe(VI)可以通过催化剂活化进行单电子和双电子转移反应,生成氧化能力远远高于Fe(VI)的中间价态的活性铁物质,进一步提高对有机物的去除率<sup>[5-6]</sup>。零价铁(ZVI)是一种强还原性物质,失去一个或两个电子可生成Fe(II)和Fe(III),Fe(VI)能够得到ZVI失去的电子,生成较高活性的Fe(IV)和Fe(V)。鉴于此,笔者讨论了反应参数如ZVI剂量、Fe(VI)初始浓度和初始pH对Fe(VI)/ZVI体系氧化BPAF的影响,并分析动力学模型。通过自由基淬灭试验,并使用甲基苯基亚砷(PMSO)作为探针,探讨体系中生成的活性物质及其降解机理。将Fe(VI)/ZVI体系用于去除实际水体中的有机物,评估该体系应用于实际工程的可行性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 主要试剂与水样

试验试剂包括氢氧化钾、氢氧化钠、氯化钠、双酚AF、甲基苯基亚砷、苯甲砷(PMSO<sub>2</sub>)、ZVI、高锰酸钾、正己烷、无水乙醇、盐酸、硝酸钠、硫酸钠、碳酸钠、三氯化铁。采用湿式化学氧化法,通过次氯酸钾氧化三价铁来制备纯度在90%以上的K<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>晶体粉末。

试验所用超纯水取自Milli-Q水净化系统,电阻率≥18.24 MΩ·cm。实际水体取自西南交通大学犀湖,其pH为7.7,UV<sub>254</sub>为2.8 cm<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验方法

提前配制500 μmol/L的双酚AF(BPAF)母液。Fe(VI)溶液需用现配,即每次试验开始前通过紫外-可见分光光度计测定Fe(VI)溶液的吸光度,用比尔定律换算成相应的浓度。先将250 mL锥形瓶置于恒温水浴锅中预热10 min,控制反应温度为25℃。分别加入预定浓度的BPAF和Fe(VI)到锥形瓶中,随即快速加入ZVI。通过磁力搅拌,以400 r/min开始反应。在指定的取样时间移取4 mL样品,立即加入0.4 mL的硫代硫酸钠终止反应,通过0.22 μm的聚醚砜膜过滤。在反应开始前用0.1 mmol/L的HCl或NaOH溶液调节pH,由于在整个反应过程中pH的变化较小,故不加磷酸盐缓冲溶液。

### 1.3 分析项目及方法

使用Waters 2695高效液相色谱仪分析溶液中剩余的BPAF浓度、甲基苯基亚砷浓度和苯甲砷浓度。采用4.6 mm×150 mm C18色谱柱分析污染物浓度。测定BPAF的洗脱液由去离子水与甲醇的二元混合物组成,流速设置为1 mL/min,检测波长为

230 nm。PMSO和PMSO<sub>2</sub>的流动相由乙腈-乙酸(体积比为25:75)混合溶液组成,其流速为1 mL/min,检测波长分别为230、215 nm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同体系的降解效能

在BPAF初始浓度为3 μmol/L、Fe(VI)初始浓度为30 μmol/L、ZVI投加量为10 mg/L、初始pH为7、反应温度为25 °C的条件下,考察不同氧化体系对水中BPAF的去除效果,结果如图1所示。可知,单独使用ZVI对BPAF的去除作用微弱,去除率仅为3.5%,说明ZVI不会吸附BPAF。未活化的Fe(VI)在反应3 min后,对BPAF的去除效率可达到62.4%。当ZVI加入到溶液中后,BPAF的去除率提高到90.6%。造成以上现象的原因可能在于:ZVI可以作为催化剂有效活化Fe(VI),产生更多的高活性物种去除BPAF。

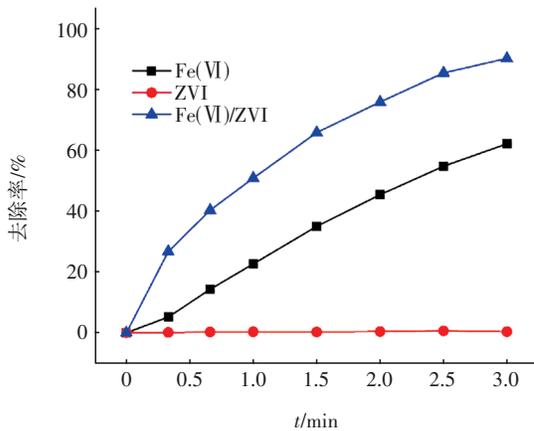


图1 不同反应体系对BPAF的去除效能

Fig.1 Removal efficiency of BPAF by different reaction systems

### 2.2 ZVI投加量的影响

在BPAF初始浓度为3 μmol/L、Fe(VI)初始浓度为30 μmol/L、初始pH为7、反应温度为25 °C的条件下,探讨ZVI的催化活性对有机物降解效果的影响,结果如图2所示。可知,随着ZVI投加量的增加,BPAF去除率从86.5%提高到90.0%以上,继续增加ZVI剂量至50 mg/L时,去除率反而下降。分析原因,ZVI的加入促进了Fe(VI)产生Fe(IV)和Fe(V),Fe(IV)和Fe(V)的存在可以显著提高对目标有机物的去除效果。随着催化剂投加量的增加,ZVI表面用于活化Fe(VI)的活性位点数量增加,有利于产生更多的活性物质。但是过高剂量的ZVI会

消耗一部分中间价态铁和Fe(VI),从而影响对BPAF的去除效果。以上过程可能涉及的反应见式(1)~(7)<sup>[5-7]</sup>。

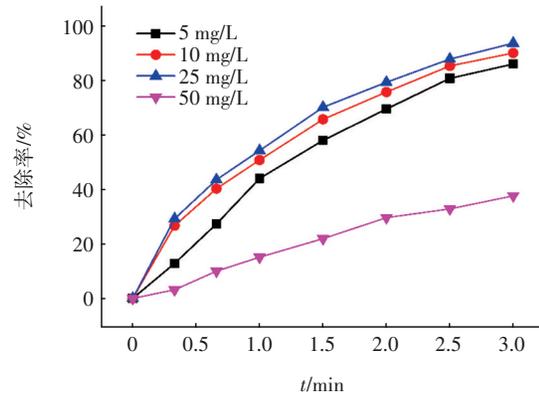
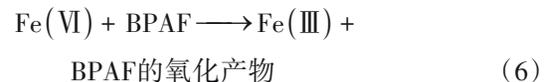
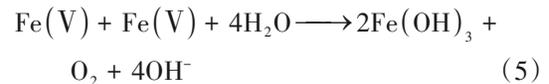
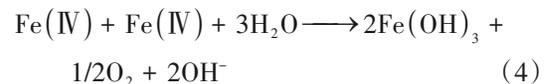
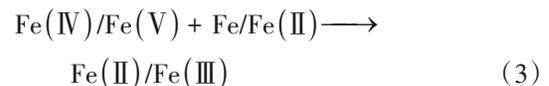


图2 ZVI投加量对BPAF去除效果的影响

Fig.2 Effect of ZVI dosage on BPAF removal



有研究表明,Fe(VI)与BPAF的反应属于二级反应<sup>[8]</sup>。而本试验中Fe(VI)浓度远高于BPAF浓度,可以认为在反应过程中Fe(VI)的浓度变化很小或基本保持不变,故推断出Fe(VI)与BPAF的反应属于假一级反应,动力学方程见式(8)。

$$\ln(C/C_0) = k_{\text{obs}}t \quad (8)$$

式中: $C$ 为任意时刻溶液中BPAF的浓度,μmol/L; $C_0$ 为BPAF的初始浓度,μmol/L; $k_{\text{obs}}$ 为表观速率常数, min<sup>-1</sup>;  $t$ 为反应时间, min。

通过分析不同ZVI投加量下BPAF的降解动力学(见图3)发现,  $\ln(C/C_0)$ 与反应时间呈良好的线性关系,符合假一级动力学模型。表观速率常数先从0.679 min<sup>-1</sup>增加到最大值0.895 min<sup>-1</sup>,再显著减小

到  $0.164 \text{ min}^{-1}$ , 进一步说明随着 ZVI 投加量的增加, BPAF 的去除率呈先升高后下降的趋势。

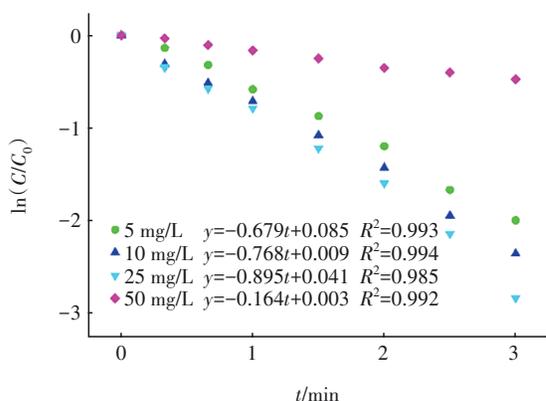


图 3 不同 ZVI 投加量下 BPAF 的降解动力学

Fig.3 Degradation kinetics of BPAF at different dosages of ZVI

### 2.3 Fe(VI)初始浓度的影响

在 ZVI 投加量为  $10 \text{ mg/L}$  的条件下, 控制 BPAF 初始浓度为  $3 \mu\text{mol/L}$ 、反应初始 pH 为 7、反应温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 考察 Fe(VI) 初始浓度对 BPAF 去除效果的影响, 结果如图 4 所示。可知, 随着 Fe(VI) 初始浓度的升高, 目标有机物去除率持续上升, 表观速率常数从  $0.279 \text{ min}^{-1}$  显著增加到  $1.399 \text{ min}^{-1}$ 。但当 Fe(VI) 浓度从  $30 \mu\text{mol/L}$  增加到  $60 \mu\text{mol/L}$  时, BPAF 在 3 min 内的去除率仅从 90.56% 提高至 98.51%。可能是由于 Fe(VI)/ZVI 体系产生的 Fe(IV)/Fe(V) 来源于 Fe(VI), 在适当的 Fe(VI) 浓度下, 会产生数量较多的中间价态的活性铁物质, Fe(IV)/Fe(V) 的稳定存在可以提高对目标有机物的去除效果。但当 Fe(VI) 浓度过高时, 会加速中间价态铁的自分解, 使 Fe(VI) 的利用效率下降。

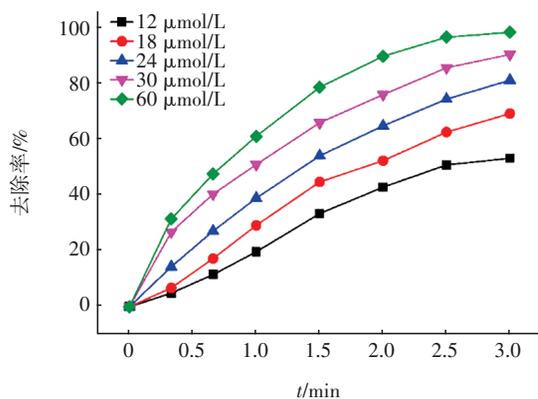


图 4 Fe(VI) 初始浓度对 BPAF 去除效果的影响

Fig.4 Effect of Fe(VI) initial concentration on BPAF removal

### 2.4 初始 pH 的影响

在 BPAF 初始浓度为  $3 \mu\text{mol/L}$ 、Fe(VI) 初始浓度为  $30 \mu\text{mol/L}$ 、ZVI 投加量为  $10 \text{ mg/L}$ 、反应温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  的条件下, 考察初始 pH 对 BPAF 去除效果的影响, 结果如图 5 所示。可知, 随着 pH 的增加, BPAF 去除率逐渐下降。

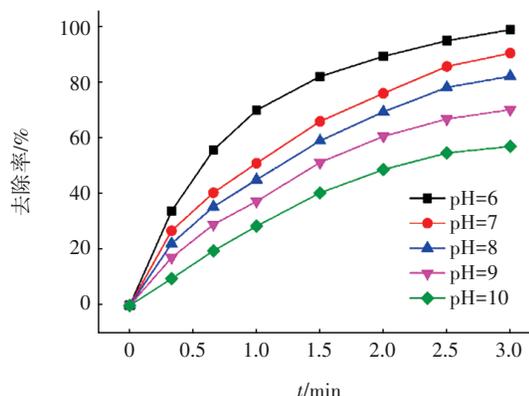
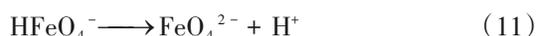
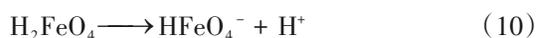
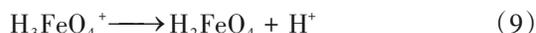


图 5 初始 pH 对 BPAF 去除效果的影响

Fig.5 Effect of initial pH on BPAF removal

随着溶液从酸性变为碱性, 表观速率常数不断减小, 从 pH 为 6 时的  $1.377 \text{ min}^{-1}$  逐渐减小到 pH 为 10 时的  $0.297 \text{ min}^{-1}$ 。分析原因: ① Fe(VI) 在不同 pH 条件下的存在形式不同。Wang 等人<sup>[9]</sup>认为, 当  $\text{pH} < 3.5$  时, Fe(VI) 在溶液中的主要存在形式是  $\text{H}_3\text{FeO}_4^+$  和  $\text{H}_2\text{FeO}_4$ , 见式(9)。当  $\text{pH}$  为  $3.5 \sim 7.3$  时, Fe(VI) 在溶液中的主要存在形式为  $\text{H}_2\text{FeO}_4$  和  $\text{HFeO}_4^-$ , 见式(10)。当  $\text{pH} > 7.3$  时, Fe(VI) 在溶液中的主要存在形式为  $\text{FeO}_4^{2-}$ , 见式(11)。通过密度泛函理论计算得出, 由于  $\text{HFeO}_4^-$  中氧配体上的自旋密度大于  $\text{FeO}_4^{2-}$ , 增加了质子化 Fe(VI) 的氧化能力, 使  $\text{HFeO}_4^-$  活性强于  $\text{FeO}_4^{2-}$ 。故在  $\text{pH} \leq 7.3$  的条件下, 更有利于 BPAF 的降解。② 催化剂与 Fe(VI) 之间的相互作用。在该 pH 范围内, Fe(VI) 以阴离子形式存在。ZVI 的零点电荷在  $\text{pH}$  为 7.1 左右<sup>[10]</sup>, 当溶液  $\text{pH} < 7.1$  时 ZVI 表面带正电荷, 当  $\text{pH} > 7.1$  时 ZVI 表面带负电荷。因此, pH 升高会抑制 Fe(VI) 阴离子从溶液中转移到 ZVI 表面, 降低 BPAF 的去除率。



### 2.5 可能的氧化物和降解机理

Fe(VI) 本身具有较强的氧化性, 可通过适当活

化生成多种活性物质来提高对有机物的去除效果。为明确 Fe(VI)/ZVI 体系降解 BPAF 的机理,在 BPAF 初始浓度为 3 μmol/L、Fe(VI) 初始浓度为 30 μmol/L、ZVI 投加量为 10 mg/L、初始 pH 为 7、反应温度为 25 °C 的条件下,通过自由基淬灭试验,探讨体系中的主要活性物质。由于叔丁醇(TBA)是典型的·OH 清除剂<sup>[11]</sup>,故采用 TBA 来鉴定体系中生成的·OH,讨论·OH 对氧化反应的贡献,结果如图 6 所示。可知,溶液中存在过量的叔丁醇(30 mmol/L),仅抑制约 35% 的 BPAF 降解,说明体系中生成的·OH 数量较少,还存在其他活性物质。

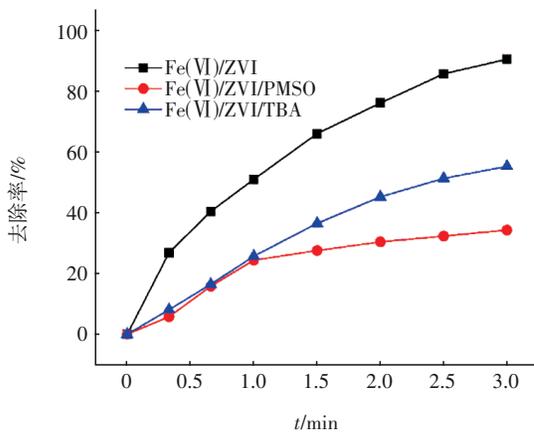
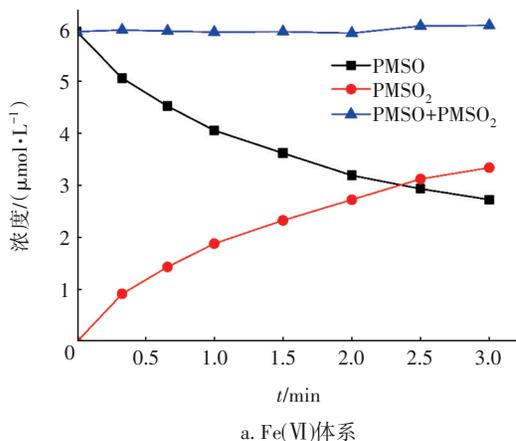


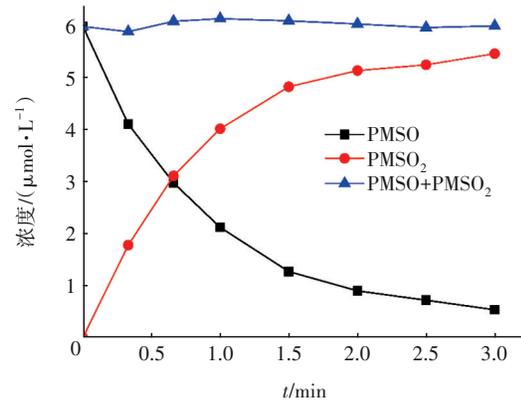
图 6 叔丁醇和 PMSO 对 BPAF 去除效果的影响

Fig.6 Effect of TBA and PMSO on BPAF removal

Shao 等人<sup>[12]</sup>认为,PMSO 会通过氧原子转移被高价态铁氧化成相应的 PMSO<sub>2</sub>。因此,为了进一步明确降解机理,向 Fe(VI)/ZVI 体系中投加少量的 PMSO(3 μmol/L),发现 BPAF 的降解被显著抑制。而试验结果表明,PMSO 对 Fe(VI) 分解影响较小,说明 BPAF 和 PMSO 可能共同竞争 Fe(IV)/Fe(V)。同时,分别在 Fe(VI) 和 Fe(VI)/ZVI 体系中研究 PMSO 的氧化情况和 PMSO<sub>2</sub> 的产生情况,结果见图 7。



a. Fe(VI)体系



b. Fe(VI)/ZVI体系

图 7 不同氧化体系对 PMSO 分解和 PMSO<sub>2</sub> 生成的影响

Fig.7 Effect of PMSO degradation and PMSO<sub>2</sub> production in various oxidation systems

由图 7 可知,在 Fe(VI)/ZVI 体系中 PMSO 的氧化速度显著快于单独 Fe(VI) 体系。以上结果进一步说明在 Fe(VI)/ZVI 体系中,对去除 BPAF 起主要作用的活性物质是 Fe(IV) 和 Fe(V)。

### 2.6 在实际水体中的去除效果

实际水体的三维荧光光谱见图 8。区域 I、II 表示具有芳环结构的类蛋白质,区域 III 表示类富里酸物质,区域 IV 表示微生物代谢产物,区域 V 表示类腐殖酸物质<sup>[13]</sup>。在 BPAF 初始浓度为 3 μmol/L、ZVI 投加量为 10 mg/L、Fe(VI) 初始浓度为 30 μmol/L、反应温度为 25 °C、初始 pH 为 7 的条件下,从图 8 可以发现反应后各区域有机物明显被去除,其中对芳环结构的类蛋白物质的去除尤其明显。

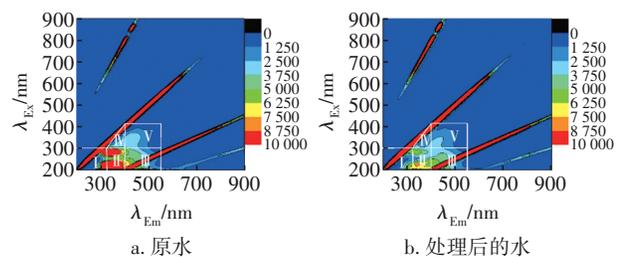
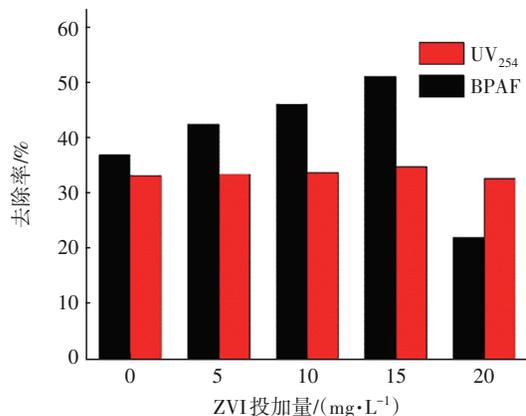


图 8 实际水体的三维荧光光谱

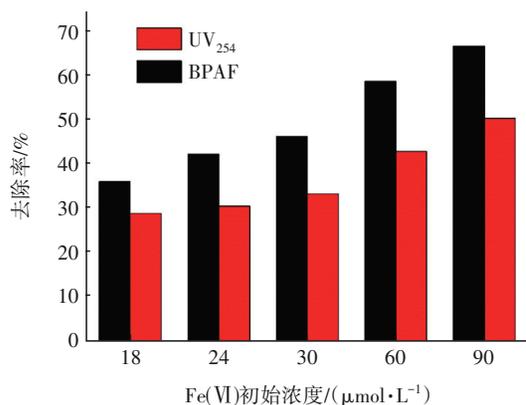
Fig.8 Three-dimensional fluorescence spectrum of actual water

Fe(VI)/ZVI 体系对实际水体中有机物的去除效果见图 9。由图 9(a)可知,实际水体中 BPAF 去除率随 ZVI 投加量的增加先上升后下降,当 ZVI 投加量为 15 mg/L 时,对 BPAF 的去除效果最佳,去除率为 51.04%。UV<sub>254</sub> 能反映水体中溶解性有机物的含量。本试验中,ZVI 投加量对于溶解性有机物的去

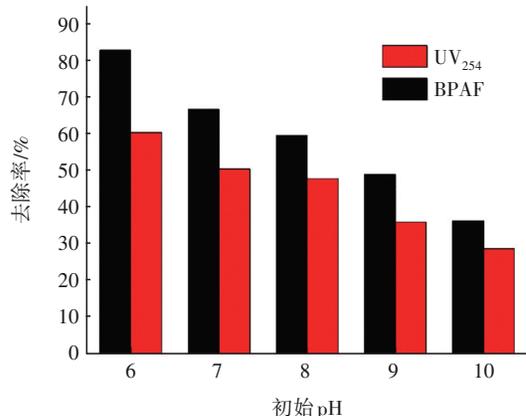
除效果影响较小。对比Fe(VI)/ZVI体系降解超纯水体系中的BPAF,实际水体中BPAF的去除率总体下降。结合之前对反应前后三维荧光光谱的分析,可以推断出实际水体中含有的芳环结构类蛋白质可能更易与Fe(VI)反应,这也解释了随着ZVI投加量的增加,UV<sub>254</sub>去除率变化不明显的原因。



a. 不同ZVI投加量下BPAF和UV<sub>254</sub>的去除率



b. 不同Fe(VI)浓度下BPAF和UV<sub>254</sub>的去除率



c. 不同初始pH下BPAF和UV<sub>254</sub>的去除率

图9 Fe(VI)/ZVI体系对实际水体中有机物的去除效果

Fig.9 Removal efficiency of organic matters in actual water by Fe(VI)/ZVI system

Fe(VI)作为Fe(IV)/Fe(V)的来源,不同初始浓

度的Fe(VI)会显著影响BPAF的去除效果,其结果如图9(b)所示。可知,BPAF去除率与Fe(VI)初始浓度呈正相关,去除率从36.04%提高至66.54%。当Fe(VI)初始浓度从18 μmol/L增加到30 μmol/L时,UV<sub>254</sub>去除率提升不明显。继续增加Fe(VI)初始浓度,水体中的溶解性有机物明显被氧化。这可能是由于氧化剂浓度较低时,实际水体中芳环结构的类蛋白质和BPAF共同竞争Fe(VI),体系中活性铁物质的总产率较低,导致BPAF的去除受到影响。而在氧化剂浓度较高时,溶液中存在较多的Fe(VI)、Fe(IV)和Fe(V)降解水中有机物。

从图9(c)可知,酸性条件比碱性条件更有利于BPAF和溶解性有机物的降解,去除率分别达到82.57%和60.2%。这可能是由于在碱性条件下ZVI和Fe(VI)的静电排斥作用及体系氧化能力减弱,共同抑制了BPAF和溶解性有机物的降解。

综上所述,将Fe(VI)/ZVI体系应用于水处理中,对溶解性天然有机物和BPAF均有较好的去除效果,去除率分别为82.57%和60.2%。ZVI是自然界普遍存在的金属,储量丰富且价格低廉,作为非均相催化剂,在溶液中易于回收利用。Fe(VI)是一种强氧化剂,不仅本身具备一定的氧化能力,而且生成的产物Fe(OH)<sub>3</sub>胶体具有一定的絮凝沉淀作用。二者的结合可以提高对有机物的降解能力,具有反应快、氧化效果好、无需额外的设备和能量输入、对环境无污染、只需要利用水厂原有的加药系统和反应池、成本主要考虑高铁酸盐的药剂费用等优势。因此,Fe(VI)/ZVI工艺具有较好的应用前景。

### 3 结论

① 适当的ZVI投加量和较高的Fe(VI)初始浓度可以促进Fe(VI)/ZVI体系降解BPAF,且在酸性条件下降解效果较好。不同反应参数下,BPAF的降解符合假一级动力学模型。在最佳试验条件下,体系对BPAF的去除率能达到90.56%。

② 在Fe(VI)/ZVI体系中,·OH对目标污染物降解的贡献较小,主要的降解机制可能是高价态铁物质的氧化作用。

③ 实际水体中含芳环结构的类蛋白质可能会与BPAF共同竞争Fe(VI),对BPAF的降解产生负面影响。但在本试验最佳条件下,Fe(VI)/ZVI体系仍然能有效降解实际水体中的BPAF和溶解性有机物,去除率分别达到82.57%和60.2%。

## 参考文献:

- [ 1 ] SKLEDAR D G, MASIC L P. Bisphenol A and its analogs: do their metabolites have endocrine activity? [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2016, 47: 182-199.
- [ 2 ] KITAMURA S, SUZUKI T, SANOH S, *et al.* Comparative study of the endocrine-disrupting activity of bisphenol A and 19 related compounds [J]. *Toxicological Sciences*, 2005, 84(2): 249-259.
- [ 3 ] WANG L, WANG Z, LIU J N, *et al.* Deriving the freshwater quality criteria of BPA, BPF and BPAF for protecting aquatic life [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 164: 713-721.
- [ 4 ] 吴建新. 高铁酸盐处理制药废水的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(15): 79-81,85.  
WU Jianxin. Study on pharmaceutical wastewater treatment by ferrate [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(15): 79-81,85(in Chinese).
- [ 5 ] FENG M B, JINADATHA C, MCDONALD T J, *et al.* Accelerated oxidation of organic contaminants by ferrate(VI): the overlooked role of reducing additives [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(19): 11319-11327.
- [ 6 ] ZHAO J F, WANG Q, FU Y S, *et al.* Kinetics and mechanism of diclofenac removal using ferrate(VI): roles of  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ , and  $Mn^{2+}$ [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(23): 22998-23008.
- [ 7 ] OH S Y, KANG S G, CHIU P C. Degradation of 2,4-dinitrotoluene by persulfate activated with zero-valent iron[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(16): 3464-3468.
- [ 8 ] YANG T, WANG L, LIU Y L, *et al.* Comparative study on ferrate oxidation of BPS and BPAF: kinetics, reaction mechanism, and the improvement on their biodegradability [J]. *Water Research*, 2019, 148: 115-125.
- [ 9 ] WANG H Y, WANG S J, JIANG J Q, *et al.* Removal of sulfadiazine by ferrate(VI) oxidation and montmorillonite adsorption: synergistic effect and degradation pathways [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(4):103225.
- [ 10 ] DONG H R, AHMAD K, ZENG G M, *et al.* Influence of fulvic acid on the colloidal stability and reactivity of nanoscale zero-valent iron[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 211: 363-369.
- [ 11 ] WANG Q, CAO Y, ZENG H, *et al.* Ultrasound-enhanced zero-valent copper activation of persulfate for the degradation of bisphenol AF [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 378:122143.
- [ 12 ] SHAO B B, DONG H Y, SUN B, *et al.* Role of ferrate(IV) and ferrate(V) in activating ferrate(VI) by calcium sulfite for enhanced oxidation of organic contaminants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(2): 894-902.
- [ 13 ] 张忠祥,宋浩然,张伟,等. 高铁酸钾预氧化强化混凝除藻效能及机理研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(15): 31-36.  
ZHANG Zhongxiang, SONG Haoran, ZHANG Wei, *et al.* Efficiency and mechanism of algae removal by potassium ferrate pre-oxidation enhanced coagulation [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(15): 31-36 (in Chinese).

作者简介:王群(1980- ),男,黑龙江克东人,博士,副教授,主要研究方向为水污染控制、污水资源化利用、饮用水深度处理等。

E-mail:lyhpomelo@163.com

收稿日期:2020-06-02

修回日期:2020-09-29

(编辑:任莹莹)