

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.004

# 高铁酸钾氧化去除 DOM 的影响因素及荧光光谱特性

孙 婧, 赵阁阁, 张运波, 王洪波

(山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101)

**摘 要:** 为了研究高铁酸钾氧化作用对饮用水中溶解性有机物(DOM)的去除效果,以济南市雪山水厂原水为研究对象,考察反应时间、初始 pH 值和高铁酸钾投加量等因素对溶解性有机碳(DOC)和  $UV_{254}$  去除效果的影响,并采用三维荧光光谱(EEM)技术联合荧光区域积分(FRI)法,对水中 DOM 的荧光组分进行定性和定量分析。结果表明,当高铁酸钾投加量为 20 mg/L、初始 pH 值为 6、150 r/min 下搅拌 40 s、静置 30 min 时,对水中 DOM 的去除效果最佳,DOC 去除率达到 15.2%, $UV_{254}$  去除率达到 69.2%;荧光分析表明,高铁酸钾对腐殖质类物质的荧光强度有明显的削减作用,通过计算荧光指数(FI)和生物指数(BIX)得出,各处理水样中的 DOM 都具有较强的自生源特征。

**关键词:** 高铁酸钾氧化; 饮用水处理; 溶解性有机物; 三维荧光光谱

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)23-0021-07

## Influencing Factors and Fluorescence Spectrum Characteristics of DOM Removed by Potassium Ferrate Oxidation

SUN Jing, ZHAO Ge-ge, ZHANG Yun-bo, WANG Hong-bo

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan  
250101, China)

**Abstract:** To investigate the effect of potassium ferrate oxidation on removal of dissolved organic matter (DOM) in drinking water, the effects of reaction time, initial pH and potassium ferrate dosage on removal efficiency of dissolved organic carbon (DOC) and  $UV_{254}$  in raw water of Xueshan Waterworks in Jinan were explored, and fluorescence components of DOM in the water were analyzed qualitatively and quantitatively by three-dimensional fluorescence spectroscopy (EEM) combined with fluorescence region integral (FRI) method. When the dosage of potassium ferrate was 20 mg/L, the initial pH value was 6, stirring at 150 r/min for 40 s and static settling time for 30 min, the removal effect of DOM in water was the best, and the removal rates of DOC and  $UV_{254}$  reached 15.2% and 69.2% respectively. The fluorescence analysis showed that potassium ferrate significantly reduced the fluorescence intensity of humus. The calculation of fluorescence index (FI) and biological index (BIX) indicated that DOM in all treated water samples had strong autogenic characteristics.

**Key words:** potassium ferrate oxidation; drinking water treatment; dissolved organic matter; three-dimensional fluorescence spectroscopy

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878394); 山东省重点研发计划项目(2018GSF117003)  
通信作者: 王洪波 E-mail: wanghongbo@sdjzu.edu.cn

溶解性有机物(DOM)是一类结构复杂的天然碳基有机混合物,是全球水体中最大的有机碳库<sup>[1]</sup>,近年来由于DOM在全球碳循环中发挥着重要作用而受到越来越多的关注。DOM包括芳香结构的蛋白质、富里酸类、腐殖酸类及色氨酸类等有机物,主要来源于土壤有机质、细菌动植物尸体的腐解以及自身排泄物的溶解、废水有机物和有机肥等<sup>[2]</sup>。在早期研究中发现,水中DOM浓度会受天气的影响,尤其是在风暴和雨雪过程中DOM浓度会增加<sup>[3-4]</sup>。高浓度的DOM会对饮用水水质构成威胁,首先会影响水体的颜色和味道,其次在饮用水消毒工艺中,DOM作为消毒副产物的前驱物质,容易与消毒剂反应生成潜在致癌、致突变的消毒副产物<sup>[5]</sup>,在水环境中DOM还会与其他污染物发生不同反应,从而对污染物的迁移转化和溶解造成影响。目前国内外用于去除饮用水中DOM的方法包括混凝、吸附、离子交换、膜过滤和高级氧化等<sup>[6]</sup>,对DOM的表征方法有紫外-可见吸收光谱法和三维荧光光谱(EEM)法等,另外,荧光指数(FI)和生物源指数(BIX)可以为DOM的组成和性质提供有效的信息<sup>[7]</sup>。

高铁酸钾在整个pH值范围内都具有较强的氧化性,氧化速度快并且最终产物是无毒无害的氢氧化铁,因此被称为环境友好的水处理氧化剂<sup>[8]</sup>,加之操作工艺简单、成本低等优点,使得高铁酸钾在水处理中具有实际应用意义。为了进一步了解高铁酸钾对饮用水中DOM的去除能力,笔者以济南市雪山水厂原水为研究对象,采用高铁酸钾对原水进行氧化处理,探究反应时间、初始pH值和高铁酸钾投加量对UV<sub>254</sub>及溶解性有机碳(DOC)去除效果的影响,并通过测定荧光光谱分析水中DOM在高铁酸钾处理过程中的物质变化。

## 1 材料与方法

### 1.1 药品与仪器

高铁酸钾,置于棕色玻璃试剂瓶中4℃下干燥保存;无水亚硫酸钠用作终止剂,根据文献<sup>[9]</sup>中的反应式配制浓度;盐酸和氢氧化钠用来调节pH值。实验所用溶液均为纯水配制,所有玻璃器皿均经超声清洗和纯水清洗后使用。

UV-3200 紫外-可见分光光度计;TOC-L型TOC分析仪;F-7100 荧光分光光度计;MY3000-6六联定时搅拌仪;pHS-3E 雷磁pH计;KQ-250B

超声波清洗器;101-2AB 电热鼓风干燥箱;CP114 精密分析天平;Eppendorf100-1000 移液枪。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 实验方案

实验用水取自济南市雪山水厂原水,一般情况下该原水的DOC为2.215~2.359 mg/L,UV<sub>254</sub>为0.030~0.039 cm<sup>-1</sup>,pH值为8.13~8.49,浊度为1.11~1.96 NTU。分别以反应时间、初始pH值、高铁酸钾投加量为控制条件,通过实验找出高铁酸钾去除水中溶解性有机物的最佳反应条件。实验在六联定时搅拌仪上进行,原水先经滤膜过滤去除颗粒物,分别在6个500 mL烧杯中加入水样300 mL,调节pH值至6左右,投加一定量的高铁酸钾以150 r/min的转速搅拌1 min,加亚硫酸钠终止反应,静置沉淀30 min,取30 mL上清液经0.45 μm滤膜过滤后,测定UV<sub>254</sub>、DOC浓度并进行EEM分析。

### 1.2.2 分析项目与方法

UV<sub>254</sub>采用紫外-可见分光光度计测定;DOC采用TOC分析仪测定;EEM采用荧光分光光度计测定,发射波长(Em)范围为250~550 nm,激发波长(Ex)范围为200~400 nm,发射和激发狭缝宽度为5 nm,扫描速度设为12 000 nm/min,电压为700 V。EEM采用Origin软件进行分析处理,将每次测得的数据扣除空白水样的数值,以消除拉曼散射对光谱产生的干扰影响;将瑞利散射上方荧光数据置零,以消除瑞利散射对光谱造成的影响。实验过程中每次都会对纯水进行测定,一方面为检验仪器的精准性,另一方面为后续数据处理作参照依据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应时间的影响

控制高铁酸钾投加量为10 mg/L,调节水样pH值为6左右,在150 r/min转速下分别反应10、20、30、40、50、60 s后取样检测DOC浓度和UV<sub>254</sub>,考察反应时间对水中DOM去除效果的影响,结果见图1。由图1(a)可以看出,高铁酸钾对DOC的去除率并不高,可能的原因是高铁酸钾的投加量不足,Song等人<sup>[10]</sup>的研究也表明高铁酸盐对DOC的去除效果较差,一般在酸性条件和较高的高铁酸盐剂量下才能有效破坏有机物分子。反应10 s后仅可以去除3.3%的DOC,40 s后DOC去除率达到最高,也仅为11.7%,而且随着反应时间的继续增加,DOC去除率有所下降。UV<sub>254</sub>与有机物耗氧量具有良好的线

性关系,可作为有机物的替代指标。由图 1(b)可以看出,反应 10 s 后  $UV_{254}$  去除率就已经达到 43.8%,40 s 后去除率能够达到 48.6%,之后  $UV_{254}$  去除率趋于稳定。整体来看,对  $UV_{254}$  的去除效果要明显高于 DOC,这与 Song 等人<sup>[10]</sup>的研究结果一致,高铁酸盐氧化可使 DOM 发生结构转化,而难以使 DOM 完全矿化,对吸光度的影响较显著,能够有效降低  $UV_{254}$  和比紫外吸光度(SUVA)值。

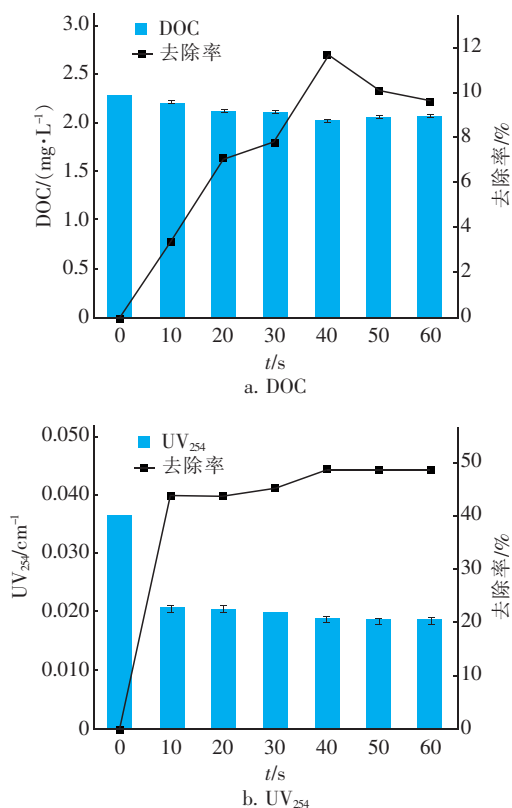


图 1 反应时间对 DOC 和  $UV_{254}$  去除效果的影响

Fig.1 Effect of reaction time on DOC and  $UV_{254}$  removal

## 2.2 初始pH 值的影响

控制高铁酸钾投加量为 10 mg/L,调节水样 pH 值分别为 4、5、6、7、8 左右,在 150 r/min 转速下反应 40 s 后取样检测 DOC 浓度和  $UV_{254}$ ,考察初始 pH 值对水中 DOM 去除效果的影响,结果如图 2 所示。可以看出,无论是 DOC 还是  $UV_{254}$ ,其去除率都是酸性条件下高于碱性条件下。当 pH 值为 4 时 DOC 去除率为 21.9%,随着 pH 值的增大 DOC 去除率逐渐降低,至 pH 值为 6 时 DOC 去除率降至 11.2%,当 pH 值为 8 时即对原水直接进行处理,DOC 去除率仅为 3%,几乎没有去除效果;同样地, $UV_{254}$  去除率在 pH 值为 4 时最高,达到了 63.5%,而当 pH 值升至 8 时

去除率降至 33.7%,下降了近 30%,分析原因可能是,高铁酸钾在酸性条件下的氧化性比碱性条件下要强,短时间内对有机物的去除效果要优于碱性条件下。Zhang 等人<sup>[11]</sup>研究表明,高铁酸盐通常在较低 pH 值下更活跃,会优先破坏芳香结构;丁春生等人<sup>[12]</sup>的研究也发现,高铁酸钾在碱性条件下因氧化还原电位低且稳定,所以不利于氧化分解,如果要进行氧化反应可能需要更多的时间来完成。由此可知,pH 值对高铁酸钾氧化 DOM 的能力影响较大。

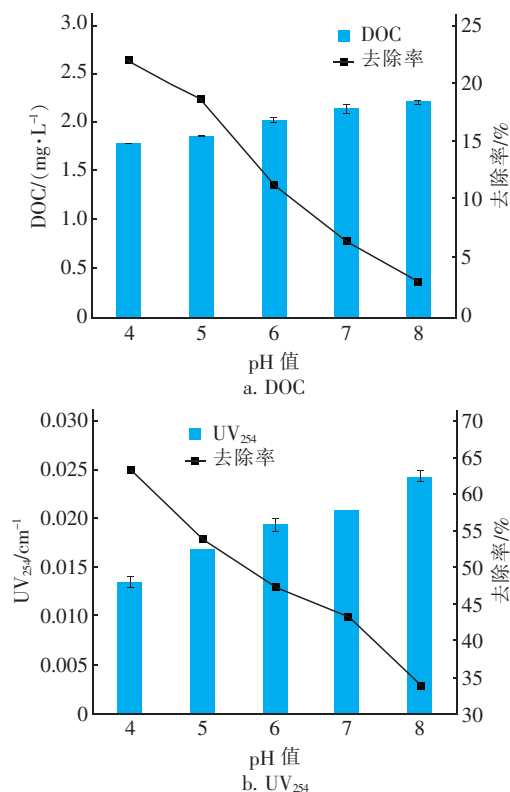


图 2 pH 值对 DOC 和  $UV_{254}$  去除效果的影响

Fig.2 Effect of pH on DOC and  $UV_{254}$  removal

## 2.3 高铁酸钾投加量的影响

控制高铁酸钾投加量分别为 0、5、10、15、20、25 mg/L,调节水样 pH 值为 6 左右,在 150 r/min 转速下反应 40 s 后取样检测 DOC 浓度和  $UV_{254}$ ,考察高铁酸钾投加量对水中 DOM 去除效果的影响,结果见图 3。可以看出,在其他条件一定的情况下,当高铁酸钾投加量从 5 mg/L 增加到 25 mg/L 时,DOC 去除率从 3.5% 增加到 16.3%, $UV_{254}$  去除率从 24.5% 增加到 69.2%,高铁酸钾投量的增加对水中 DOM 的降解具有明显的促进作用,根据高铁酸钾对其他有机污染物的降解机理推测,高铁酸钾浓度越高,其与 DOM 的碰撞几率就越大,对 DOM 的氧化

就更充分更彻底,所以就越有利于 DOM 的降解去除<sup>[13]</sup>。Song 等人<sup>[10]</sup>研究发现,高铁酸盐本身的自分解会消耗一部分高铁酸盐,如果应用到实际工程中,高铁酸盐的投加量要远大于实验中使用的剂量,但高剂量高铁酸钾也会带来负面影响,例如增加运行成本、产生大量铁泥等<sup>[11]</sup>,因此在实际应用中需从各方面综合考虑后再确定高铁酸钾的最佳剂量。

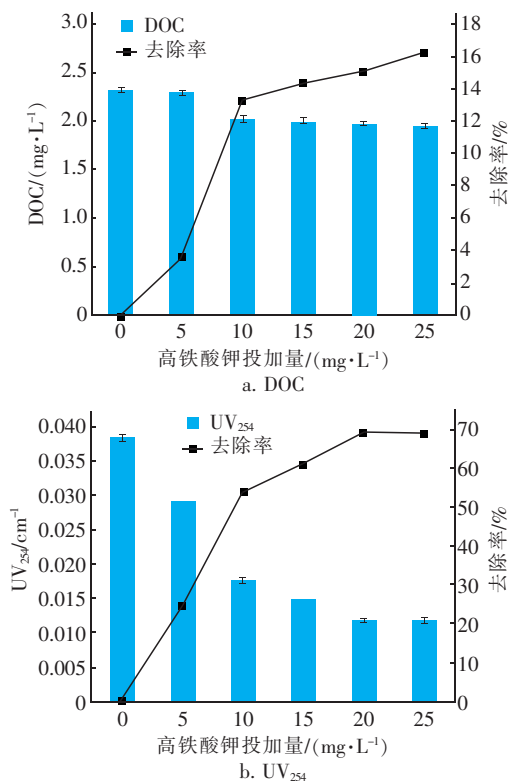


图 3 高铁酸钾投加量对 DOC 和 UV<sub>254</sub> 去除效果的影响

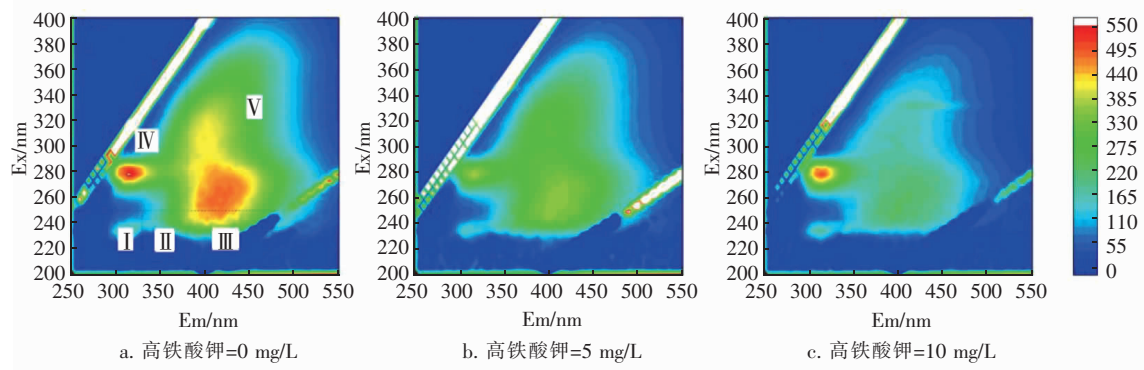
Fig. 3 Effect of potassium ferrate dosage on DOC and UV<sub>254</sub> removal

## 2.4 三维荧光光谱分析

### 2.4.1 DOM 的荧光特性分析

Chen 等人<sup>[14]</sup>根据常见检测峰的激发波长和发射波长将三维荧光光谱划分为五个区域,其中,区域

I 和区域 II 均为芳香结构蛋白质,如酪氨酸等,区域 I 的 Ex/Em 范围为 200 ~ 250 nm/280 ~ 330 nm,区域 II 的 Ex/Em 范围为 200 ~ 250 nm/330 ~ 380 nm;区域 III 为类富里酸物质,Ex/Em 范围为 200 ~ 250 nm/380 ~ 500 nm;区域 IV 为溶解性微生物代谢产物,Ex/Em 范围为 250 ~ 450 nm/280 ~ 380 nm;区域 V 为类腐殖酸物质,Ex/Em 范围为 250 ~ 450 nm/380 ~ 500 nm。控制高铁酸钾投加量分别为 0、5、10、15、20、25 mg/L,在水样初始 pH 值为 6 左右、150 r/min 转速下反应 40 s,DOM 降解过程中荧光光谱的变化如图 4 所示。可以看出,原水中的 DOM 以溶解性微生物代谢产物和类腐殖酸物质为主,其次是类富里酸物质,除此之外还有少部分蛋白质;当高铁酸钾投加量为 5 mg/L 时,所有区域的荧光强度经历了一个快速衰减的过程;当高铁酸钾投加量增至 10 mg/L 时,区域 IV 溶解性微生物代谢产物的荧光强度有所增加;之后随着高铁酸钾投加量的继续增加,所有区域的荧光强度又经历了一个慢速衰减的过程,直到高铁酸钾投加量增至 25 mg/L 时,蛋白质、类富里酸及类腐殖酸物质的荧光强度均已基本消失,但溶解性微生物代谢产物的荧光强度与原水相比仅削减了一部分,说明在相同条件下,增加高铁酸钾投加量并不是对所有有机物荧光强度的削减都能起到促进作用。Yang 等人<sup>[15]</sup>研究发现,高铁酸盐更倾向于攻击有机污染物中的富电子部分,会选择性氧化烯烃、胺、苯胺及苯酚等官能团,这些官能团在 DOM 中大量存在。例如,烯烃存在于类腐殖酸物质中,胺和苯胺存在于氨基酸、芳香胺、富里酸和腐殖酸中<sup>[16]</sup>,说明高铁酸盐对类腐殖酸有机物的去除效果更佳,而在高铁酸钾对 DOM 荧光特性影响的实验中,与类富里酸和类腐殖酸物质相关的荧光光谱区域都显著减少,也表明这两个组分的荧光团很容易被高铁酸盐分解。





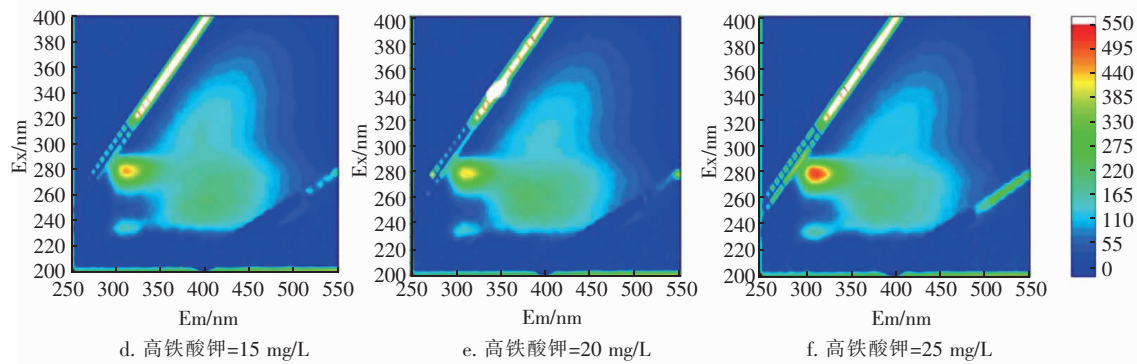


图 4 高铁酸钾投加量对 DOM 荧光特性的影响

Fig. 4 Effect of potassium ferrate dosage on fluorescence characteristics of DOM

2.4.2 DOM 荧光组分定量分析

为定量分析高铁酸钾投加量对 DOM 组成的影响,采用荧光区域积分(FRI)法对 EEM 进行定量分析,计算方法见式(1)和式(2)<sup>[14]</sup>,结果见表 1。

$$\Phi_{i,n} = MF_i \int_{Ex} \int_{Em} I(\lambda_{Ex} \lambda_{Em}) d\lambda_{Ex} d\lambda_{Em} \quad (1)$$

$$P_{i,n} = \frac{\Phi_{i,n}}{\Phi_{t,n}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Phi_{i,n}$ 是荧光区域的积分值,反映了具有相同化学特性的有机物的荧光强度总和; $MF_i$ 是每个荧光区域的修正系数; $I(\lambda_{Ex} \lambda_{Em})$ 是在激发波长-发射波长下有机物的荧光强度; $P_{i,n}$ 是某荧光区域的积分体积占整个荧光区域积分体积的百分比; $\Phi_{t,n} = \sum_{i=1}^V \Phi_{i,n}$ 。

表 1 不同高铁酸钾投加量下 DOM 荧光组分定量分析结果

Tab. 1 Quantitative analysis results of DOM fluorescent components under different dosages of potassium ferrate

分区	积分面积/nm <sup>2</sup>	MF <sub>i</sub>	高铁酸钾 = 0 mg/L		高铁酸钾 = 5 mg/L		高铁酸钾 = 10 mg/L		高铁酸钾 = 15 mg/L		高铁酸钾 = 20 mg/L		高铁酸钾 = 25 mg/L	
			$\Phi_{i,n}$	$P_{i,n}/\%$	$\Phi_{i,n}$	$P_{i,n}/\%$	$\Phi_{i,n}$	$P_{i,n}/\%$	$\Phi_{i,n}$	$P_{i,n}/\%$	$\Phi_{i,n}$	$P_{i,n}/\%$	$\Phi_{i,n}$	$P_{i,n}/\%$
I	2 009.0	20.43	1.03 × 10 <sup>6</sup>	4.67	1.86 × 10 <sup>6</sup>	9.51	1.70 × 10 <sup>6</sup>	11.53	1.44 × 10 <sup>6</sup>	11.15	1.41 × 10 <sup>6</sup>	10.96	1.87 × 10 <sup>6</sup>	14.00
II	5 417.4	16.34	2.21 × 10 <sup>6</sup>	10.06	3.22 × 10 <sup>6</sup>	16.40	2.17 × 10 <sup>6</sup>	14.70	1.83 × 10 <sup>6</sup>	14.10	1.97 × 10 <sup>6</sup>	15.29	2.04 × 10 <sup>6</sup>	15.26
III	21 996.7	4.81	2.64 × 10 <sup>6</sup>	12.03	2.01 × 10 <sup>6</sup>	10.23	1.27 × 10 <sup>6</sup>	8.65	1.16 × 10 <sup>6</sup>	8.95	1.08 × 10 <sup>6</sup>	8.36	9.74 × 10 <sup>5</sup>	7.29
IV	38 241.8	8.76	8.37 × 10 <sup>6</sup>	38.08	7.00 × 10 <sup>6</sup>	35.70	6.10 × 10 <sup>6</sup>	41.39	5.38 × 10 <sup>6</sup>	41.52	5.57 × 10 <sup>6</sup>	43.23	5.85 × 10 <sup>6</sup>	43.74
V	175 808.5	1.76	7.73 × 10 <sup>6</sup>	35.17	5.52 × 10 <sup>6</sup>	28.15	3.50 × 10 <sup>6</sup>	23.74	3.15 × 10 <sup>6</sup>	24.28	2.86 × 10 <sup>6</sup>	22.16	2.64 × 10 <sup>6</sup>	19.71
合计	243 473.5		2.20 × 10 <sup>7</sup>	100	1.96 × 10 <sup>7</sup>	100	1.47 × 10 <sup>7</sup>	100	1.30 × 10 <sup>7</sup>	100	1.29 × 10 <sup>7</sup>	100	1.34 × 10 <sup>7</sup>	100

由表 1 可知,原水中区域Ⅳ的积分所占比例最大,为 38.08%,其次是区域Ⅴ、区域Ⅲ、区域Ⅱ、区域Ⅰ。加入高铁酸钾后可以不同程度地降低总荧光区域积分,其中,当高铁酸钾投加量为 20 mg/L 时降幅最大,相比原水降低了 41.4%,另外,区域Ⅴ的积分由原水的 7.73 × 10<sup>6</sup> 降到 2.86 × 10<sup>6</sup>,荧光区域积分所占百分比也由原水的 35.17% 降到 22.16%,区域Ⅲ的积分及其所占百分比也有所降低,说明高铁酸钾的投加对类腐殖酸及类富里酸物质的氧化分解能力比其他有机物要强。

2.4.3 DOM 的荧光光谱参数分析

FI 用于表征占总有机物比例的微生物有机物来源,可以用来区分 DOM 中腐殖质的来源<sup>[17]</sup>,其定义为 370 nm 激发波长下 450 nm 发射强度与 500 nm

发射强度之比<sup>[14]</sup>。当 FI > 1.9 时,是微生物衍生的特征;当 FI < 1.4 时,是陆地衍生的特征,此参数由 McKnight 等人<sup>[18]</sup>引入。因此,可以通过 FI 的变化推测水中类腐殖质组分的成分变化情况,以此反映 DOM 经高铁酸钾氧化后的降解规律。BIX 表征微生物有机物和外源有机物的比例,可以衡量自生有机物的贡献<sup>[19]</sup>。当 BIX 值为 0.6 ~ 0.8 时,DOM 的自生成分较少,主要由陆源输入;当 BIX 值为 0.8 ~ 1.0 时,表现出中等的自生特征;当 BIX 值 > 1.0 时,该特征较强,表示水样中生物/微生物来源的 DOM 较多<sup>[20]</sup>,有研究表明 BIX 值与 DOM 降解程度呈正相关<sup>[21]</sup>。

在本实验中,不同高铁酸钾投加量下 DOM 的 FI 和 BIX 值见图 5。

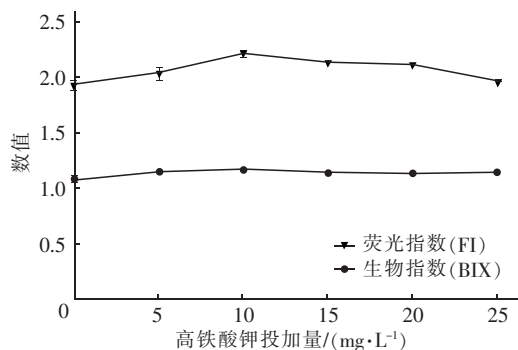


图5 不同高铁酸钾投加量下 DOM 的荧光参数

Fig. 5 Fluorescence parameters of DOM under different dosages of potassium ferrate

由图5可知,无论原水还是经高铁酸钾处理后的出水,FI值大都接近或高于1.9,说明在进水和处理后的出水中,DOM中的腐殖质类物质均主要来源于微生物输入。但是,经高铁酸钾处理后FI值增加,表明陆源类腐殖质被优先氧化,并且其有转为偏向生物源类腐殖质的趋势,对照图4的荧光强度变化情况,正好与区域V削减较多的现象相对应,区域V常被认为是陆源类腐殖质物质<sup>[22]</sup>;也有可能与水中微生物及植物的代谢分解有关,在代谢过程中可能生成一些自生微生物源类腐殖质,这也与图4在高铁酸钾处理过程中区域IV增多的现象相对应。此外,在本研究中BIX值都大于1,这表明水中DOM具有更强的自生特性,对应于微生物代谢的来源,这些与FI值的表征结果一致。并且经高铁酸钾处理后的水样BIX值较原水都有所提高,说明高铁酸钾对水中DOM有一定的降解效果。

### 3 结论

高铁酸钾通过氧化作用对水中DOM的处理效果有效且迅速,根据DOC和UV<sub>254</sub>指标的变化可以看出,对UV<sub>254</sub>的去除率较DOC要高。当高铁酸钾投加量为20 mg/L、初始pH值调节至6左右、在150 r/min下搅拌40 s、静置30 min时,对水中DOM的去除效果最佳,DOC去除率为15.2%,UV<sub>254</sub>去除率为69.2%;从荧光光谱定性和定量分析得出,高铁酸钾对类腐殖酸、类富里酸有机物的荧光强度均有明显的削减,当高铁酸钾投加量为20 mg/L时,总荧光区域度积分相比原水降低了41.4%;FI和BIX值分析结果表明,原水和处理出水中的DOM均主要由生物源组成且具有较强的自生特性,高铁酸钾会优先氧化陆源类腐殖质。如果将高铁酸钾运用到实

际水处理中,还需注意高铁酸钾用量和pH取值,因为根据实验得出这两个因素对高铁酸钾氧化处理DOM的影响较大。

### 参考文献:

- [1] SHI Y, ZHANG L, LI Y, et al. Influence of land use and rainfall on the optical properties of dissolved organic matter in a key drinking water reservoir in China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 699: 134301.
- [2] DERRIEN M, YANG L, HUR J. Lipid biomarkers and spectroscopic indices for identifying organic matter sources in aquatic environments: a review [J]. Water Research, 2017, 112: 58–71.
- [3] RAYMOND P A, SAIERS J E. Event controlled DOC export from forested watersheds [J]. Biogeochemistry, 2010, 100: 197–209.
- [4] GUARCH-RIBOT A, BUTTURINI A. Hydrological conditions regulate dissolved organic matter quality in an intermittent headwater stream. From drought to storm analysis [J]. Science of the Total Environment, 2016, 571: 1358–1369.
- [5] ZIEGELGRUBER K L, ZENG T, ARNOLD W A, et al. Sources and composition of sediment pore-water dissolved organic matter in prairie pothole lakes [J]. Limnology and Oceanography, 2013, 58 (3): 1136–1146.
- [6] HUSSAIN S, AWAD J, SARKAR B, et al. Coagulation of dissolved organic matter in surface water by novel titanium (III) chloride: mechanistic surface chemical and spectroscopic characterization [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 213: 213–223.
- [7] RODRÍGUEZ-VIDAL F J, GARCÍA-VALVERDE M, ORTEGA-AZABACHE B, et al. Characterization of urban and industrial wastewaters using excitation-emission matrix (EEM) fluorescence: searching for specific fingerprints [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110396.
- [8] ZHOU S, SHAO Y, GAO N, et al. Removal of *Microcystis aeruginosa* by potassium ferrate (VI): impacts on cells integrity, intracellular organic matter release and disinfection by-products formation [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 251: 304–309.
- [9] LIM M, KIM M J. Removal of natural organic matter from river water using potassium ferrate (VI) [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, 200: 181–189.
- [10] SONG Y, DENG Y, JUNG C. Mitigation and degradation

- of natural organic matters (NOMs) during ferrate (VI) application for drinking water treatment [J]. *Chemosphere*, 2016, 146: 145 – 153.
- [11] ZHANG H, ZHENG L, LI Z, *et al.* One-step ferrate (VI) treatment as a core process for alternative drinking water treatment [J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125134.
- [12] 丁春生, 周丽君, 肖毛虎, 等. 高铁酸钾去除二氯乙腈的试验研究 [J]. *工业水处理*, 2019, 39(12): 82 – 85. DING Chunsheng, ZHOU Lijun, XIAO Maohu, *et al.* Experimental study on removal of dichloroacetonitrile by potassium ferrate [J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(12): 82 – 85 (in Chinese).
- [13] 张静, 李亚男, 王乐心, 等. 高铁酸钾氧化降解间甲酚的动力学分析 [J]. *工业水处理*, 2020, 40(3): 73 – 77. ZHANG Jing, LI Yanan, WANG Lexin, *et al.* Kinetic analysis of oxidative degradation of *m*-cresol by potassium ferrate [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(3): 73 – 77 (in Chinese).
- [14] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24): 5701 – 5710.
- [15] YANG B, YING G, ZHAO J, *et al.* Removal of selected endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) during ferrate (VI) treatment of secondary wastewater effluents [J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2194 – 2204.
- [16] LEENHEER J A, CROUE J P. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(1): 18A – 26A.
- [17] 刘健, 程丽华, 王明月, 等. 不同水源的再生水中溶解性有机物的特性 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(21): 92 – 96.
- LIU Jian, CHENG Lihua, WANG Mingyue, *et al.* Characteristic of dissolved organic matter of reclaimed water from different sources [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(21): 92 – 96 (in Chinese).
- [18] MCKNIGHT D M, BOYER E W, WESTERHOFF P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(1): 38 – 48.
- [19] ZHANG H, CUI K, GUO Z, *et al.* Spatiotemporal variations of spectral characteristics of dissolved organic matter in river flowing into a key drinking water source in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 700: 134360.
- [20] BIRDWELL J E, ENGEL A S. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-vis absorbance and fluorescence spectroscopy [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(3): 270 – 280.
- [21] PARLANTI E, WORZ K, GEOFFROY L, *et al.* Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(12): 1765 – 1781.
- [22] 李淑娟, 葛利云, 邓欢欢. 复合垂直流人工湿地净化过程中 DOM 的三维荧光光谱分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(4): 946 – 950. LI Shujuan, GE Liyun, DENG Huanhuan. Excitation-emission matrix fluorescence spectra characteristics of DOM in integrated vertical flow constructed wetland for treating eutrophic water [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(4): 946 – 950 (in Chinese).

作者简介: 孙婧 (1995 – ), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为水处理技术。

E-mail: 991143422@qq.com

收稿日期: 2020 – 07 – 22

修回日期: 2020 – 10 – 15

(编辑: 刘贵春)