

DOI:10.13205/j.hjgc.202403008

徐佳瑞,刘浩,栾维豪,等. 负载铁改性活性炭对城市污水厂二级出水中溶解性有机物的吸附性能[J]. 环境工程,2024,42(3): 67-72.

负载铁改性活性炭对城市污水厂二级出水中 溶解性有机物的吸附性能

徐佳瑞¹ 刘 浩² 栾维豪¹ 王 超¹ 刘长青¹ 杨延栋^{1*}

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛水务集团环境能源有限公司, 山东 青岛 266002)

摘 要:采用浸渍法对普通煤质活性炭(AC)进行负载铁改性,探究了负载铁改性活性炭(Fe-AC)对城市污水厂二级出水中溶解性有机物(DOM)的吸附性能。EDS、XRD 和 FTIR 等分析表明,铁成功以 Fe_2O_3 形式负载在活性炭上。经改性,活性炭比表面积增大 29.3%。Fe-AC 对二级出水中的 DOM 有良好的吸附性能,DOC 去除率为 50.0%~63.5%, UV_{254} 去除率为 71.3%~88.2%,均明显高于 AC。Fe-AC 对 DOM 的吸附可用修正的 Freundlich 等温线很好地描述。此外,Fe-AC 对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 也具有较好的吸附效果,去除率分别为 55.4%和 76.5%。三维荧光光谱和紫外-可见吸收光谱表明,二级出水中的 DOM 主要为微生物代谢产生的腐植酸类物质,该有机组分可被 Fe-AC 很好地吸附去除。综上,Fe-AC 吸附是一种有效的污水深度处理技术。

关键词:活性炭;铁改性;溶解性有机物;吸附;二级出水

ADSORPTION PERFORMANCE OF DISSOLVED ORGANIC MATTER BY IRON-MODIFIED ACTIVATED CARBON FROM SECONDARY EFFLUENT OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS

XU Jiarui¹, LIU Hao², LUAN Weihao¹, WANG Chao¹, LIU Changqing¹, YANG Yandong^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. Qingdao Water Group Environmental Energy Co., Ltd., Qingdao 266002, China)

Abstract: In this study, coal-based activated carbon (AC) was iron-modified using the immersion method. The effectiveness of iron-modified activated carbon (Fe-AC) in adsorbing dissolved organic matter (DOM) from the secondary effluent of wastewater treatment plants was investigated. EDS, XRD, and FTIR confirmed that iron was successfully loaded onto the activated carbon in the form of Fe_2O_3 . After modification, the surface area of activated carbon increased by 29.3%. The Fe-AC exhibited good capacity for adsorbing the DOM in secondary effluent, with DOC removal efficiencies of 50.0% to 63.5% and UV_{254} removal efficiencies of 71.3% to 88.2%, both significantly higher than AC. The adsorption of DOM by Fe-AC was well described by a modified Freundlich isotherm. In addition, Fe-AC presented good adsorption performance for NO_3^- and PO_4^{3-} , with removal efficiencies of 55.4% and 76.5%, respectively. The three-dimensional fluorescence spectrum and UV-visible absorption spectrum indicated that the DOM in secondary effluent is dominated by humic substances produced in microbial metabolism, and these organic components can be effectively adsorbed by Fe-AC. In conclusion, Fe-AC adsorption is an effective technology for advanced wastewater treatment.

Keywords: activated carbon; iron-modification; dissolved organic matter; adsorption; secondary effluent

收稿日期:2023-05-19

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2019BEE070);山东省高等学校科技计划项目(J18KA207)

第一作者:徐佳瑞(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向为城市污水深度处理技术。1014987947@qq.com

* 通信作者:杨延栋,男,讲师,主要研究方向为城市污水处理与资源化利用。yangyandong@qut.edu.cn

0 引言

近年来,基于水环境改善及再生水回用的需求,我国许多地方将城镇污水处理厂排放标准提升至 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》准Ⅳ标准。对于污水处理厂的提标改造,化学需氧量(COD)的进一步削减是重点和难点之一。城市污水经二级生化处理后,剩余 COD 多为难降解的溶解性有机物(DOM),难以通过传统混凝沉淀和过滤工艺去除^[1]。

活性炭吸附是一种较为有效的水中 DOM 去除技术,目前已广泛应用于饮用水处理。城市污水厂二级出水与饮用水源水中的 DOM 在来源和性质上存在差异^[2]。根据现有文献,活性炭吸附处理二级出水存在 DOM 去除率偏低(24.8%~54.0%)或活性炭投加量高(1~5 g/L)的技术瓶颈^[3-6]。为提高活性炭对二级出水中 DOM 的吸附效果,对活性炭进行适当的改性处理是潜在途径之一。在众多改性方法中,浸渍法负载铁改性具有操作简单、成本低和能耗小的技术优势。目前,负载铁改性活性炭已应用于水中重金属[Cr(VI)、Mn(II)等]、染料(亚甲基蓝、甲基橙等)、挥发性有机物 VOCs(丙酮、甲苯等)、无机阴离子(磷酸盐等)的去除^[7],但在城市污水深度处理领域仍鲜有应用报道,其对城市污水厂二级出水中 DOM 的去除性能也有待进一步研究。

本研究拟采用 FeCl₃溶液浸渍法制备负载铁改性活性炭,综合多种材料表征手段分析活性炭改性效果及机制。以城市污水厂实际二级出水为处理对象,测试改性活性炭对水中 DOM 的吸附性能,并与未改性活性炭进行对比。根据以上试验结果,评估负载铁改性活性炭处理城市污水厂二级出水的可行性。

1 材料与方法

1.1 活性炭的预处理及改性

试验用煤质活性炭购自绿之原活性炭有限公司,粒度为 30~60 目,碘值>900 mg/g,亚甲蓝值为 120~150 mg/g,填充密度为 450~550 g/L,pH 值为 5.0~7.0。使用前用蒸馏水浸泡清洗 3~4 次,随后在 105 ℃烘箱中烘干至恒重,存于密封袋中备用。此部分未经改性的活性炭用 AC 来表示。

根据前期试验结果,并参考张绍均等^[8]的研究,采用浸渍法对活性炭进行负载铁改性。称取 20 g 备好的活性炭,加入 200 mL 浓度为 0.2 mol/L 的 FeCl₃溶液中,室温下搅拌 24 h 使 Fe³⁺渗透到活性炭表面及孔中,随后通过抽滤分离活性炭,用蒸馏水洗涤 3~

4 次,烘箱中 105 ℃干燥,在马弗炉中 350 ℃煅烧 3 h,冷却后存放于广口瓶中密闭备用。负载铁改性活性炭用 Fe-AC 来表示。

1.2 检测与分析方法

活性炭表征:活性炭的表面形貌观察和 EDS 能谱分析通过扫描电子显微镜(Sigma300, CARL ZEISS)进行;表面晶体结构通过高分辨率 X 射线衍射仪(MiniFlex600, Rigaku)进行表征;BET 比表面积、总孔体积、孔径分布等参数采用全自动比表面及孔隙度分析仪(ASAP2460, Micromeritics Instrument Crop)测定;表面官能团采用傅里叶变换红外光谱仪(SPECTRUM 3, Perkin Elmer)。

水质分析:水质分析前水样采用 0.45 μm 滤膜过滤以去除悬浮固体。NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 等水质指标均采用相应国家标准方法测定^[9];溶解性有机碳(DOC)采用总有机碳分析仪(MultiNC2100, Analytik Jena AG)测定;UV₂₅₄及紫外-可见吸收光谱采用紫外可见分光光度计(UV-1900i, 日本岛津)获取;三维荧光光谱采用高灵敏一体式荧光光谱仪(FluoroMax+, Horiba Instruments Incorporated)测量。

1.3 活性炭吸附性能测试

二级出水取自青岛张村河水水质净化厂 Bardenpho 五段法+MBR 工艺出水,原水水质如下:ρ(DOC)=7.98 mg/L,UV₂₅₄=0.118 cm⁻¹,ρ(COD)=30.6 mg/L,ρ(NH₄⁺-N)=0.26 mg/L,ρ(NO₂⁻-N)=0.10 mg/L,ρ(NO₃⁻-N)=5.61 mg/L,ρ(PO₄³⁻-P)=0.34 mg/L。

量取 8 份 100 mL 二级出水置于 250 mL 锥形瓶中,分别称取 30,40,50,60,70,80,90,100 mg 改性活性炭于锥形瓶中,将锥形瓶放入 25 ℃恒温振荡箱中,150 r/min 转速下振荡 72 h,随后用滤纸过滤分离水样与活性炭,水样用 0.45 μm 滤膜过滤后测定 DOC 和 UV₂₅₄。

分别采用 Langmuir 和修正的 Freundlich 等温线对活性炭吸附 DOM 的过程进行拟合^[4]。其中 Langmuir 吸附等温式可表示为:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

其线性形式为:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (2)$$

式中:q_e为平衡吸附量,mg/g,其计算公式如式(3)所

示; C_e 为平衡浓度,mg/L; q_m 为饱和吸附量,mg/g; K_L 为 Langmuir 系数,L/mg。

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

(3)

式中: C_0 为起始浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; m 为活性炭投加量,g。

修正的 Freundlich 等温式可表示为:

$$q_e = K_F \left(\frac{C_e}{m} \right)^{\frac{1}{n}}$$

(4)

其线性形式为:

$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg \frac{C_e}{m}$$

(5)

式中: K_F 和 n 为 Freundlich 系数。

2 结果与讨论

2.1 改性活性炭的表征

采用多种分析方法对改性活性炭进行表征,结果如图 1 所示。EDS 能谱分析测得 Fe 元素在 Fe-AC 中的质量分数为 2.81%。XRD 图谱则显示 Fe-AC 在 2θ 为 22.19°、33.15°、40.83°、50.08°等处出现了 Fe₂O₃ 的特征衍射峰^[10]。由此可知,经浸渍和高温煅烧,Fe 元素成功以 Fe₂O₃ 的形式负载在活性炭上。FTIR 图谱显示与 AC 相比,Fe-AC 在波数 3400 cm⁻¹ 处的宽峰显著增强,该宽峰与羟基或羧基中的 O—H 键有关,表明改性后酸性含氧官能团增多,这将有助于极性有机分子的吸附。此外,Fe—AC 在波数 440 ~ 540 cm⁻¹ 处出现特征吸收峰,主要与 Fe₂O₃ 成分中的 Fe—O 键的伸缩振动有关^[11,12]。

除影响表面官能团外,负载铁改性还改善了活性炭的孔隙结构。由表 1 可知:改性后活性炭总孔体积增加 26.3%,微孔体积增加 150.6%,微孔占总孔的比例由 29.8%增至 59.0%,表明改性过程促进了活性炭中微孔的发育。在改性活性炭的高温煅烧过程中,铁氧化物晶体可作为热积累点,有助于周围炭的消融及挥发性组分的气化,从而促进了活性炭内部孔隙结构的发展^[12]。此外,铁氧化物在介孔中的附着积累也能促进介孔结构向微孔结构的转化。经改性,活性炭 BET 比表面积增大了 29.3%,微孔比表面积增加 152.6%,为 DOM 提供了更多的吸附活性位点,有助于提高吸附性能。

2.2 Fe-AC 对二级出水中 DOM 的吸附性能

AC 和 Fe-AC 对二级出水 DOM 的吸附性能如图 2 所示。可知:当投加量为 0.3~1.0 g/L 时,Fe-AC 对

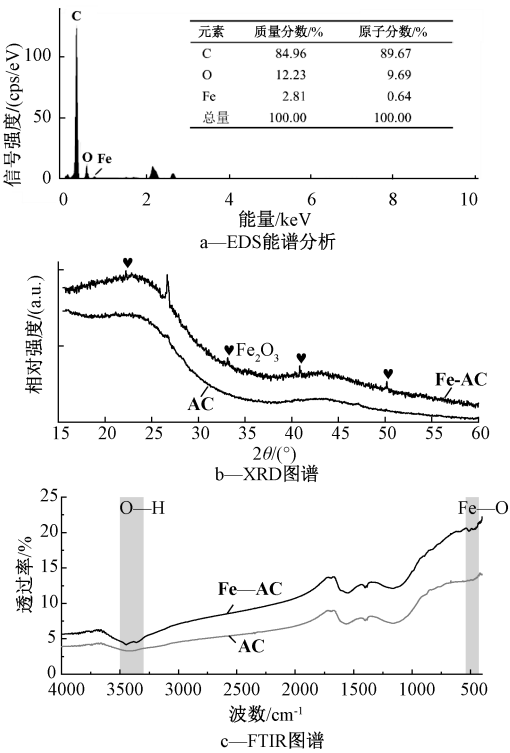


图 1 AC 和 Fe—AC 的材料表征
Figure 1 Material characterization of AC and Fe—AC

表 1 AC 和 Fe-AC 的孔结构参数
Table 1 The pore structural parameters of AC and Fe-AC

吸附剂	BET 比表面积/ (m ² /g)	微孔比表面积/ (m ² /g)	总孔体积/ (cm ³ /g)	微孔体积/ (cm ³ /g)
AC	1184.751	410.183	0.578	0.172
Fe-AC	1531.892	1036.232	0.730	0.431

DOC 和 UV₂₅₄ 去除率分别为 50.0% ~ 63.5% 和 71.3% ~ 88.2%, 相同投加量下两者均高于 AC (39.0% ~ 59.9% 和 62.5% ~ 83.4%)。因此,负载铁改性可强化二级出水中 DOM 的吸附去除,降低出水 DOM 浓度,或在相同目标去除率下减少活性炭投加量。Fe-AC 良好的 DOM 吸附性能主要得益于:1) 负载铁改性过程促进了活性炭中微孔的发育,提高了活性炭微孔比表面积,为 DOM 提供了更多的吸附位点;2) 负载在活性炭表面的铁在水中电离生成带正电荷的铁离子,也可通过络合作用促进水中 DOM 的吸附^[11,13];3) 负载铁改性后,活性炭表面酸性含氧官能团增多,促进了极性亲水有机组分的吸附。

由图 2 可知:投加量越高,Fe-AC 对二级出水中的 DOM 去除效果越好。当 Fe-AC 投加量为 0.7 g/L 时,DOC 和 UV₂₅₄ 去除率分别达到 62.3% 和 86.8%。进一步提高 Fe-AC 投加量,DOC 和 UV₂₅₄ 去除率增加并不明显。综合去除效果和经济成本,确定 Fe-AC

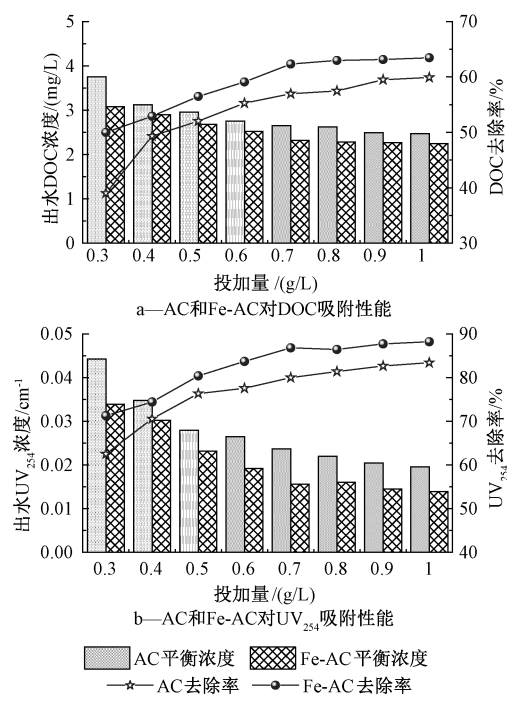


图2 不同投加量下 AC 和 Fe-AC 对 DOC 和 UV₂₅₄ 的吸附性能

Figure 2 DOC and UV₂₅₄ removal performance at different dosages of AC and Fe-AC

最佳投加量为 0.7 g/L。实际应用中也可根据原水 DOM 含量和处理要求适当调整 Fe-AC 的投加量。

以 DOC 和 UV₂₅₄ 为目标参数,分别采用 Langmuir 和修正的 Freundlich 等温线对 Fe-AC 吸附 DOM 的过程进行拟合。由图 3 可知:修正 Freundlich 方程的拟合效果优于 Langmuir 方程,两者的 R^2 分别达到 0.990 和 0.982,表明二级出水中 DOM 在 Fe-AC 上的吸附为多层吸附,且平衡浓度为剂量依赖型。上述吸附等温线方程可为实际应用中根据原水水质和目标去除率确定活性炭投加量提供依据。

除 DOM 外,Fe-AC 对二级出水中的溶解性氮磷营养盐也有良好的去除效果。二级出水中溶解性氮磷营养盐通常主要以 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的形式存在。如表 2 所示,当投加量为 0.7 g/L 时,Fe-AC 对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的去除率分别为 55.4% 和 76.5%,均显著高于 AC(9.8% 和 38.2%)。Fe-AC 对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的吸附主要与 Fe_2O_3 的水解电离产物有关,机理可能包括 $\text{Fe(III)}-\text{OH}$ 键的配体交换作用和 Fe^{3+} 离子的静电吸附作用^[14,15]。综上,Fe-AC 可同步去除二级出水中的 DOM 和氮磷营养盐,是一种有效的污水深度处理方法。

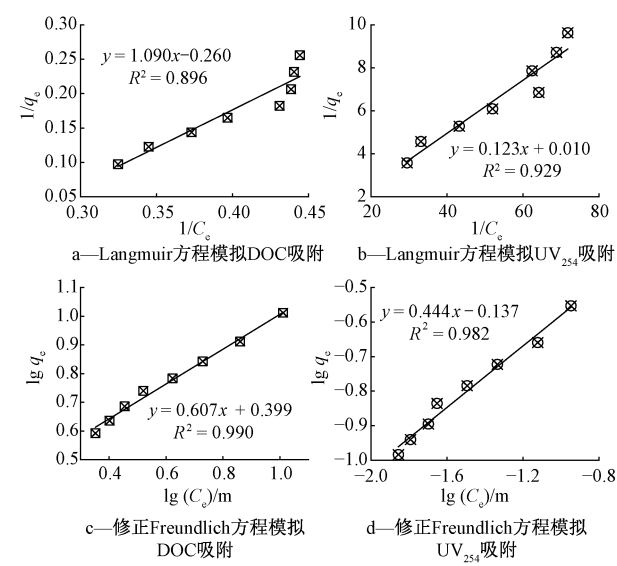


图3 Fe-AC 对 DOC 和 UV₂₅₄ 的吸附等温线

Figure 3 Adsorption isotherms of DOC and UV₂₅₄ on Fe-AC

表 2 AC 和 Fe-AC 对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的吸附性能
(投加量 0.7 g/L)

Table 2 Adsorption performance of nitrate and phosphate by AC and Fe-AC at a dosage of 0.5 g/L					
指标	吸附前	AC		Fe-AC	
	浓度/ (mg/L)	吸附后浓度/ (mg/L)	去除率/ %	吸附后浓度/ (mg/L)	去除率/ %
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	5.61	5.06	9.8	2.50	55.4
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.34	0.21	38.2	0.08	76.5

2.3 吸附前后 DOM 荧光光谱及紫外光谱特性的变化

二级出水在活性炭吸附前后 DOM 三维荧光光谱及荧光特征指数分别如图 4 和表 3 所示。在吸附前,二级出水的荧光光谱中存在 1 个明显的荧光峰,对应可见光类腐殖质 C 峰 [$E_x/E_m = (320 \sim 360) \text{ nm} / (420 \sim 480) \text{ nm}$]^[16],由此可知二级出水中的 DOM 以腐植酸类物质为主。活性炭吸附后,该峰荧光强度显著降低,表明活性炭对二级出水中的腐植酸类物质具有良好的吸附性能,且 Fe-AC 吸附效果优于 AC。此外,活性炭吸附后出现 2 个较弱的荧光峰,对应类酪氨酸 B 峰 [$E_x/E_m = (270 \sim 280) \text{ nm} / (300 \sim 310) \text{ nm}$] 和类色氨酸 T 峰 [$E_x/E_m = (270 \sim 280) \text{ nm} / (320 \sim 350) \text{ nm}$]^[16]。这 2 个类蛋白荧光峰的出现可能是由于活性炭对蛋白质类物质的吸附效果弱于对腐植酸的吸附效果,使得蛋白质类物质的相对含量增加。

荧光指数 FI 的激发波长为 370 nm 时,荧光发射光谱在 470,520 nm 处荧光强度的比值,可用来指示水中 DOM 的来源^[17]。当 $\text{FI} < 1.4$ 时,DOM 以陆源

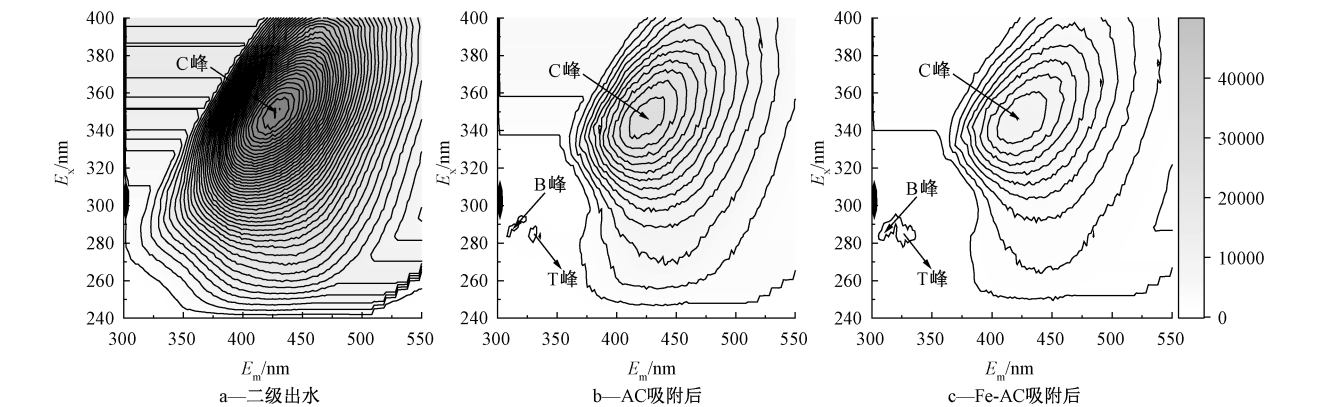


图 4 二级出水在活性炭吸附前后三维荧光光谱的变化

Figure 4 Fluorescence EEM of secondary effluent before and after activated carbon adsorption

表 3 二级出水在活性炭吸附前后三维荧光特征指数和紫外-可见光谱参数的变化

Table 3 Fluorescence characteristic and UV-visible spectral index of secondary effluent before and after activated carbon adsorption

水样	荧光特征指数			紫外-可见光谱参数	
	荧光指数 FI	腐殖化指数 HIX	自生源指数 BIX	SUVA ₂₆₀ /[L/(mg·m)]	SUVA ₂₈₀ /[L/(mg·m)]
吸附前	2.50	6.95	0.90	1.246	1.016
AC 吸附后	2.35	6.69	0.42	0.853	0.644
Fe-AC 吸附后	2.27	4.55	0.26	0.536	0.438

输入为主;当 FI>1.9 时,DOM 以自生源为主^[17]。本研究中二级出水 FI 高达 2.50,表明 DOM 主要来源于微生物的代谢或衰亡产物。经活性炭吸附后,FI 指数有所下降。腐殖化指数 HIX 的激发波长为 254 nm 时,发射波长在 435~480 nm 荧光强度积分值与 300~345 nm 荧光强度积分值之比,可表征水中 DOM 的腐殖化程度^[17]。本研究中二级出水 HIX 为 6.95,呈较强腐殖化特征(6<HIX<10)。经 AC 吸附后,HIX 下降至 6.69,腐殖化程度仍然较高。而经 Fe-AC 吸附后,HIX 显著降低至 4.55,呈现弱腐殖化特征(4<HIX<6),表明 Fe-AC 对二级出水中的腐殖质具有良好的去除效果。自生源指数 BIX 的激发波长为 310 nm 时,荧光发射光谱在 380,430 nm 处荧光强度的比值,可用来衡量 DOM 内生贡献比例^[17]。二级出水 BIX 为 0.90,表明存在较多的新生的内源 DOM。经活性炭吸附后,BIX 显著下降,表明活性炭吸附对内生微生物源 DOM 具有良好的去除效果。

二级出水在活性炭吸附前后 DOM 紫外-可见吸收光谱及光谱特征参数分别如图 5 和表 3 所示。由图 5 所知:紫外-可见吸收光谱图没有明显的波峰波谷,这是由于二级出水中的 DOM 含有大量发色基团,成分复杂,导致各种吸收峰出现重叠。活性炭吸附对吸收光谱具有明显的削减作用,尤其在波长 230~

300 nm 处,表明活性炭对二级出水中的 DOM 具有良好的吸附效果,且 Fe-AC 吸附效果优于 AC。SUVA₂₆₀ 为紫外 260 nm 处的吸收系数 a_{260} 与 DOC 浓度的比值,SUVA₂₈₀ 在紫外 280 nm 处的吸收系数 a_{280} 与 DOC 浓度的比值,SUVA₂₆₀ 和 SUVA₂₈₀ 可分别表征 DOM 疏水组分的含量和芳香性的强弱^[17]。由表 3 可知:活性炭吸附后水样 SUVA₂₆₀ 和 SUVA₂₈₀ 均显著降低,表明活性炭易于去除水中疏水的芳香性有机物,如腐植酸等。

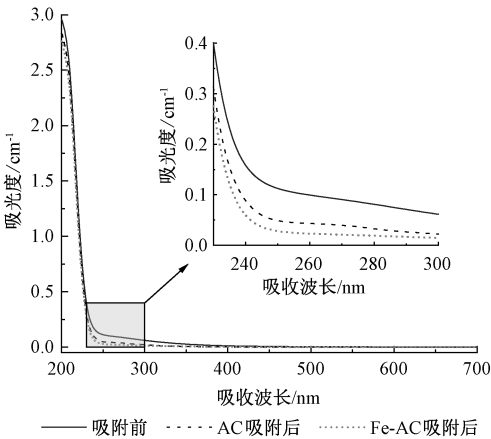


图 5 二级出水在活性炭吸附前后紫外-可见光谱的变化

Figure 5 UV-visible absorption spectrum of secondary effluent before and after activated carbon adsorption

2.4 Fe-AC 吸附在实际城市污水深度处理中的应用

根据以上研究,Fe-AC 吸附是一种可行的城市污水深度处理方法,可有效去除二级出水中的 DOM 和氮磷营养盐,使污水厂最终出水满足 GB 3838—2002 准Ⅳ标准。在实际应用中,Fe-AC 可以粉末活性炭形式投加于混凝沉淀或膜过滤深度处理设施中^[18],也可以颗粒活性炭滤池形式置于常规混凝沉淀设施后。Fe-AC 吸附深度处理技术具有工艺流程简单、同步去除碳氮磷、有机物去除率高、无须设置磁混凝沉淀除磷及反硝化滤池脱氮设施等技术优势,在城市污水深度处理领域具有一定的应用前景。

3 结 论

1) 采用浸渍法成功制备负载铁改性活性炭(Fe-AC),活性炭上铁的存在形式主要为 Fe_2O_3 ,经改性活性炭比表面积增加 29.3%。

2) Fe-AC 吸附可有效去除二级出水中的 DOM、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} ,最佳投加量(0.7 g/L)下 DOC、 UV_{254} 、 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 去除率分别达到 62.3%、86.8%、55.4% 和 76.5%,均高于未改性活性炭(AC)。

3) 三维荧光光谱和紫外-可见吸收光谱表明,二级出水中的 DOM 主要为微生物代谢产生的腐植酸类物质,Fe-AC 对该类物质具有良好的吸附性能。

参考文献

- [1] 单威,王燕,郑凯凯,等. 高工业废水占比城镇污水处理厂 COD 提标技术比选与分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 32-37, 24.
- [2] 杨文澜,潘丙才,张淑娟,等. 污水二级出水有机物(EfOM)的组成、性质及处理技术[J]. 水处理技术, 2013, 39(5): 1-6.
- [3] 刘通,孙贤波,刘勇弟. 活性炭吸附对生化出水中不同种类有机物的去除效果[J]. 环境化学, 2009, 28(3): 369-372.
- [4] 王保贵. 污水深度处理方法去除二级出水有机物(EfOM)的效能及其缓解超滤膜污染研究[D]. 北京:北京工业大学, 2013.
- [5] 王东红. 吸附剂强化混凝去除污水处理厂二级出水中污染物的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.

- [6] 关永年,刘洪波,黄剑虹,等. 污水处理厂二级出水粉末活性炭深度处理试验[J]. 净水技术, 2022, 41(4): 61-65.
- [7] SULTANA M, ROWNOK M H, SABRIN M, et al. A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022, 6: 100382.
- [8] 张绍均,陈毅贞,张文生,等. 三氯化铁改性活性炭对水中甲苯胺蓝的吸附[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(2): 168-172.
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [10] REN Z J, JIA B, ZHANG G M, et al. Study on adsorption of ammonia nitrogen by iron-loaded activated carbon from low temperature wastewater[J]. Chemosphere, 2021, 262: 127895.
- [11] ZHOU J H, MA F, GUO H J. Adsorption behavior of tetracycline from aqueous solution on ferroferric oxide nanoparticles assisted powdered activated carbon[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123290.
- [12] 李欣雅. 改性活性炭对石化污水处理厂反渗透浓水有机物吸附去除特性研究[D]. 北京:北京化工大学, 2022.
- [13] LOMPE K M, MENARD D, BARBEAU B. The influence of iron oxide nanoparticles upon the adsorption of organic matter on magnetic powdered activated carbon[J]. Water Research, 2017, 123: 30-39.
- [14] 陆燕勤,朱丽,何昭菊,等. 沸石负载氧化铁吸附剂吸附除磷研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4): 48-52.
- [15] 王诗慧,刘鹰,李双,等. 载铁活性炭对水中低浓度磷酸盐的吸附去除效果[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(2): 276-284.
- [16] 祝鹏,廖海清,华祖林,等. 平行因子分析法在太湖水体三维荧光峰比值分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 152-156.
- [17] 王斌,黄廷林,李楠,等. 水源水库沉积物及其上覆水 DOM 光谱特征[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1309-1317.
- [18] 张岚欣,董俊,刘鲁建,等. 湖北省某市政污水处理厂提标改造工程设计[J]. 环境工程, 2023, 41(增刊1): 171-173, 178.