



# 粉末活性炭对焦化反渗透浓水的吸附选择性研究

刘紫岩, 马宏瑞, 朱超, 耿跃, 郝永永  
(陕西科技大学环境科学与工程学院, 陕西西安 710021)

**[摘要]** 以活性炭为主的吸附材料在面对工业尾水时对不同种类有机污染物的吸附存在一定的差异并难以彻底去除。实验通过粉末活性炭(PAC)对焦化反渗透浓水(ROC)的吸附过程进行解析, 结果表明, PAC的吸附选择性主要基于两个方面的因素: 一方面, 十四烷、角鲨烯等部分长链有机物的分子直径大于PAC的最佳吸附孔径(0.5~1 nm), 因此难以得到有效去除; 另一方面, 有机物对PAC表面大量含氧官能团的相互竞争以及PAC表面含氮官能团的缺少, 使得苯酚类有机物与PAC之间的相互作用降低。从PAC对ROC的吸附过程来看, 吸附启动阶段PAC主要依靠孔道通过物理作用吸附芳香类有机物, 而在吸附中期则依靠表面官能团与有机物的相互作用吸附烷烃、烯烃等非芳香族有机物, 整体吸附过程更符合拟二级动力学和Freundlich等温模型。

**[关键词]** 粉末活性炭; 反渗透浓水; 孔径结构; 吸附选择性

**[中图分类号]** X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)05-0069-08

## Adsorption selectivity of powdered activated carbon for coking reverse osmosis concentrated water

LIU Ziyang, MA Hongrui, ZHU Chao, GENG Yue, HAO Yongyong

(School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The adsorption efficiency of different organic pollutants by activated carbon based adsorbent materials varies in the face of industrial tailwater and seldomly reach a completely removal. The adsorption process of powdered activated carbon(PAC) on coked reverse osmosis concentrated water(ROC) was analyzed in this study. The results showed that the adsorption selectivity of PAC was mainly based on two factors. On one hand, the molecular size of some long-chain organics such as tetradecane and squalene is larger than the optimal adsorption pore size of PAC (0.5–1 nm), leading to an ineffective removal. On the other hand, the mutual competition of organics for a large number of oxygen-containing functional groups on the PAC surface and the lack of nitrogen-containing functional groups on the PAC surface reduce the interaction between phenol-based organic matter and PAC. From the adsorption process of PAC on ROC, PAC mainly relied on the pore size to adsorb aromatic organics through physical interaction in the initiation stage, while in the middle stage the interaction between surface functional groups and organics dominated the adsorption of non-aromatic organics such as alkanes olefins. The overall adsorption process is more consistent with the proposed secondary kinetics and Freundlich isothermal model.

**Key words:** powder activated carbon; reverse osmosis concentrated water; pore structure; adsorption selectivity

煤化工行业废水处理形成的反渗透浓水(ROC), 一直是制约该行业废水零排放的难点之一<sup>[1]</sup>。而高级氧化法在处理ROC上又有诸多缺陷。电化学氧化一方面对小分子有机物难以做到有效的去除; 另一方面在面对高盐废水时容易产生大量氯代副产物<sup>[2-3]</sup>,

而臭氧和Fenton氧化技术一直以来对低浓度难降解有机废水的处理效果并不显著<sup>[4-5]</sup>, 相比之下吸附技术由于可以快速富集和捕捉有机污染物, 因此在处理低浓度难降解有机废水时更具优势。

粉末活性炭(PAC)由于具有较大的比表面积、

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(22076113)

复杂的孔径结构和丰富的官能团,与常规市售活性炭相比在针对性去除目标污染物上更具潜力<sup>[6]</sup>。且近年来随着活性炭吸附技术的不断探究,在对苯酚、双酚 A 等单一物质的吸附上,已可以通过不同手段多次再生活性炭循环吸附利用<sup>[7]</sup>。这使得活性炭吸附技术在工程应用中再一次被广泛关注。

在处理工业尾水时,由于以活性炭为主的吸附材料去除污染物的针对性较强<sup>[8]</sup>,因此对不同种类有机物的吸附存在差异,使得实际应用中过量投加活性炭后无法彻底去除有机物。因此通过分析 PAC 吸附 ROC 的过程,本研究探究 PAC 表面孔隙和官能团与 ROC 中有机物的关系,深度了解吸附技术在处理类似 ROC 这类工业尾水时出现选择性吸附的原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 吸附实验

实验所用 PAC 以石油焦为原料,添加活化剂在 800 °C 下制备而成,所用水样为陕西省榆林市某能源化工有限公司生化出水经反渗透处理后所得到的浓缩水。

确定 PAC 吸附时间及 PAC 投加量对 ROC 中难降解有机物吸附效果的影响:在 25 °C 下向 500 mL 反渗透浓水中投加 0.6 g/L 的 PAC 进行不同时间的吸附,确定最佳吸附时间。采用最佳的吸附时间,在 25 °C 下投加不同量的 PAC,分批进行实验确定 PAC 的最佳投加量。经测量 ROC 中的总有机碳(TOC)为 243.1 mg/L。

称取一定量的 PAC,置于焦化 ROC 中,根据最佳吸附时间,在密封、恒温条件下匀速搅拌。测定吸附前后溶液中的 TOC,计算平衡吸附量和  $t$  时刻的吸附量,采用拟一级动力学和拟二级动力学吸附方程研究 PAC 吸附机制。之后通过 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程探究 PAC 和 ROC 中有机物之间相互作用的关系。

### 1.2 吸附剂表征方法

采用 TOC 分析仪(Liqui TOC II 型,德国元素公司)及紫外可见分光光度计(UV-vis)(Cary5000 型,美国安捷伦公司)表征 ROC 中有机物的变化情况,PAC 表面官能团采用傅立叶变换红外(FT-IR)光谱

仪(VECTOR-22 型,德国布鲁克公司)进行测定,光谱扫描范围为 4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ ;样品采用溴化钾压片法制得。孔径分布及其大小采用 BET-物理吸附仪-比表面积分析仪测定(ASAP 2460 sn:506 型,美国麦克默瑞提克公司)。PAC 的形态在场发射扫描电子显微镜(FEI Q45+EDAX Octane Prime 型,美国 FEI 和 EDAX 公司)中进行分析。PAC 表面通过铂金进行表面涂层作为检测 SEM 制备的样品。

### 1.3 GC-MS 测定参数

对 ROC 中难降解有机物进行分析,测试仪器采用气质联用色谱仪(7890A-5975C 型,美国安捷伦科技有限公司)。

测试条件:色谱柱为 HP-5MS;色谱柱起始温度 40 °C(保持 2 min),以 2 °C/min 的速度升至 130 °C(保持 6 min),以 20 °C/min 的速度升至 270 °C(保持 5 min);气化室温度为 250 °C;传输线温度为 280 °C;载气为 He;载气流量为 1.0 mL/min;不分流进样。质谱条件:EI 源,电子能量为 70 eV,离子源温度为 230 °C,四极杆温度为 150 °C,扫描模式为 Scan,扫描质量范围为 5~500 u。

## 2 结果和讨论

### 2.1 吸附条件的影响分析

PAC 吸附时间、PAC 投加量对反渗透浓水中 TOC 吸附效果的影响如图 1 所示。

由图 1(a)可知,随着吸附时间的增加,PAC 对有机物的吸附量逐渐增加,在 15 min 时基本达到吸附饱和。在吸附的前 3 min,由于 PAC 存在大量可提供吸附能力的比表面积和孔径,所以此时 PAC 的吸附量迅速上升,水中 TOC 下降 129.8 mg/L,占总去除量的 76.7%。之后 TOC 去除量增加缓慢,直至 15 min 后 PAC 吸附饱和;由图 1(b)可知,随着 PAC 投加量的不断增加,ROC 中难降解有机物浓度不断减少,当 PAC 投加量达到 1.2 g/L 时,TOC 去除量达到最大值,之后 ROC 中的 TOC 不再随着 PAC 投加量的增加而减少,此时 ROC 中 TOC 被去除的量为 194.9 mg/L,剩余有机物占 ROC 总 TOC 的 19.8%,表明 PAC 对 ROC 中有机物的吸附具有一定的选择性。

PAC 吸附 ROC 过程中不同时间下样品的紫外吸收光谱如图 2 所示。

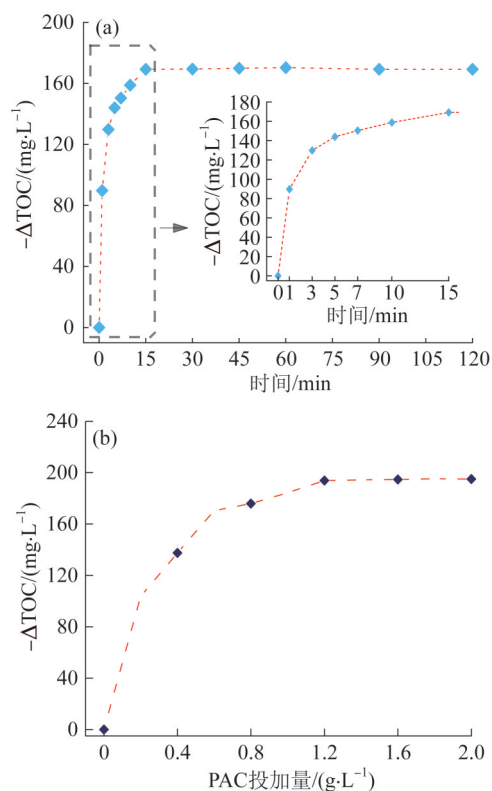


图1 吸附时间和PAC投加量对ROC中TOC吸附效果的影响

Fig. 1 The effect of PAC adsorption time and adsorption amount on the TOC content of reverse osmosis concentrate

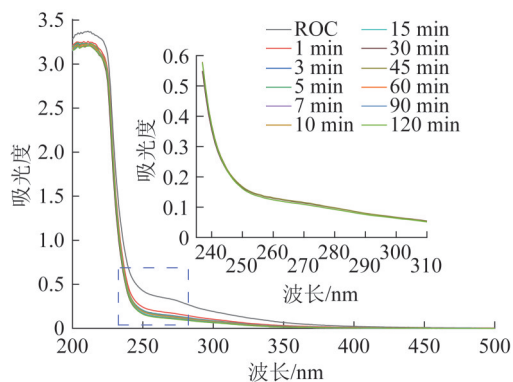


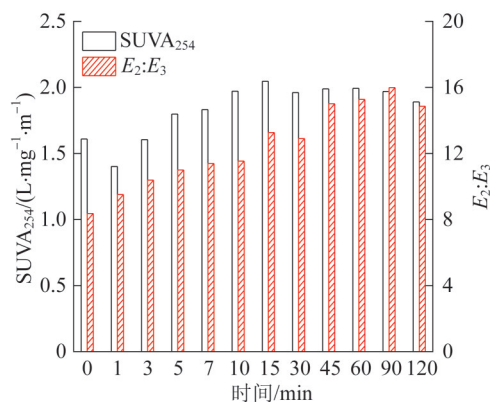
图2 PAC吸附ROC过程中不同时间下样品的紫外吸收光谱

Fig. 2 UV absorption spectra of samples at different times during ROC adsorption by PAC

由图2可知,由于ROC中含有大量芳香族化合物,因此在200~225 nm区域的 $E_2$ 吸收带中大量的峰重叠并相互掩盖形成一个范围较大的宽峰。此外,在对应于酚类芳香族化合物的B吸收带270 nm处也观察到宽峰,并随着吸附时间的增加,峰高逐渐降低,表明酚类芳香族化合物被大量去除<sup>[9]</sup>。

紫外特征值 $SUVA_{254}$ (芳香化程度正相关)和 $UV_{254}/UV_{365}$ 比值( $E_2:E_3$ ,与相对分子质量负相关)结

果如图3所示<sup>[10-11]</sup>。

图3 PAC吸附过程中的 $SUVA_{254}$ 和 $UV_{254}/UV_{365}$ Fig. 3  $SUVA_{254}$  and  $UV_{254}/UV_{365}$  in the PAC adsorption process

由图3可知,PAC对ROC中相对分子质量较大的有机物去除效果较好,在吸附过程中,ROC中芳香化程度呈先下降后上升的趋势,证明吸附前期PAC依靠孔道结构优先吸附ROC中的芳香族化合物,随着吸附过程中PAC孔道的减少,吸附后期则依靠表面官能团优先去除非芳香族化合物(烷烃、烯烃类)。

## 2.2 吸附动力学分析

通过拟一级动力学和拟二级动力学拟合实验结果,探究PAC对ROC吸附量和吸附时间之间的关系,分析吸附速度和动态平衡,了解PAC的吸附过程和吸附机理。PAC吸附过程拟一级、拟二级动力学拟合结果如图4所示。

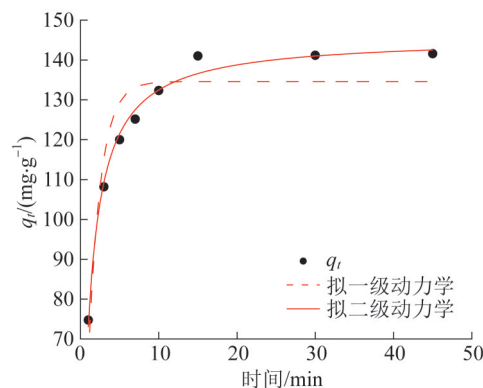


图4 PAC吸附过程拟一级/拟二级动力学拟合结果

Fig. 4 Pseudo-first-order/pseudo-second-order kinetics fitting results of PAC adsorption process

由图4可知,吸附前期拟一级动力学和拟二级动力学的趋势基本一致,随着吸附过程继续进行,拟一级动力学拟合曲线逐渐与实验结果偏离,这是由

于吸附初期 PAC 主要依靠自身的孔隙结构进行吸附,此时 PAC 物理吸附作用大于化学吸附作用。随着吸附过程的推进,大量具有吸附能力的有效孔道开始逐渐减少,PAC 化学吸附的作用逐渐突显,并决定了 PAC 对有机物的最大吸附量。

拟一级动力学和拟二级动力学对实验数据的拟合如表 1 所示。

表 1 吸附动力学参数

Table 1 Adsorption kinetic parameters

拟合模型	$q_{e,exp}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k/\text{min}^{-1}$	$R^2$
拟一级动力学	138.54	$0.648\ 5\pm0.104\ 2$	0.855 8
拟二级动力学	144.28	$0.006\ 9\pm0.000\ 5$	0.989 5

由表 1 可知,拟二级动力学方程更适合描述 PAC 对 ROC 的吸附过程,其相关系数( $R^2=0.989\ 5$ )也大于拟一级动力学相关系数( $R^2=0.855\ 8$ ),同时拟二级动力学的拟合平衡吸附量(144.28 mg/g)和实验平衡吸附量(141.58 mg/g)也更为接近,整体来看,PAC 对 ROC 的吸附以化学吸附为主。

### 2.3 吸附平衡研究

通过 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线来探究吸附剂和吸附质之间相互作用的关系,其中 Langmuir 模型所表示的是单层吸附过程,其理想模型是吸附剂表面吸附位点均匀分布,且亲和力相同只吸附一个分子<sup>[12]</sup>;Freundlich 等温模型则描述的是一

个分子可与多个邻近吸附位点相结合,吸附位点非均匀分布的情况。实验在温度分别为 298.15、318.15、338.15 K 的条件下进行 PAC 对 ROC 的吸附研究,拟合结果如图 5 所示。

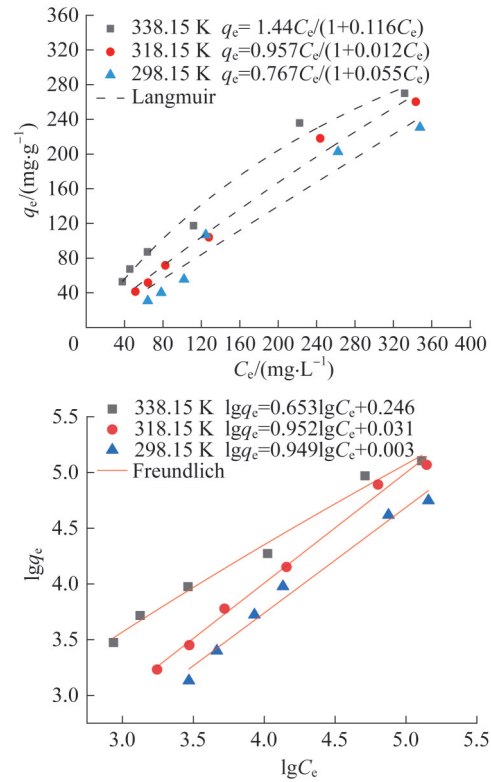


图 5 PAC 的 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附实验

Fig. 5 Langmuir and Freundlich isotherm adsorption experiments of PAC

Langmuir 和 Freundlich 等温线参数如表 2 所示。

表 2 Langmuir 和 Freundlich 等温线参数

Table 2 Langmuir and Freundlich isotherm parameters

$T/\text{K}$	Langmuir 模型			Freundlich 模型			
	回归方程	$K_L$	$R^2$	回归方程	$K_F$	$R^2$	$n$
298.15	$q_e=1.44C_e/(1+0.116C_e)$	0.097	0.984	$\lg q_e=0.653 \lg C_e+0.246$	1.76	0.985	1.53
318.15	$q_e=0.957C_e/(1+0.012C_e)$	0.009	0.989	$\lg q_e=0.952 \lg C_e+0.031$	1.07	0.992	1.05
338.15	$q_e=0.767C_e/(1+0.055C_e)$	0.002	0.855	$\lg q_e=0.949 \lg C_e+0.003$	1.01	0.978	1.05

由图 5、表 2 可知, Freundlich 的拟合系数  $R^2$  高于 Langmuir, 这表明 PAC 对 ROC 中有机物的吸附为多分子层吸附,  $n$  值均大于 1, 表明随着溶液浓度的增加, 等温线的斜率逐渐减小, 即吸附类型为优惠吸附<sup>[13]</sup>。这有利于 PAC 对 ROC 中复杂有机物吸附的稳定性。

### 2.4 PAC 孔径变化分析

通过 BET 比表面积和 SEM 对吸附前后的 PAC

进行表征分析, 其 BET 比表面积测定结果如图 6 所示。

由图 6 可知, PAC 的孔径主要的分布范围在 0~5 nm, 其中在孔径小于 2 nm 处, PAC 的孔容积均最大, 说明在微孔范围内, PAC 孔分布多且最为集中。而在介孔(2~50 nm)范围内, PAC 孔径则主要分布在 4 nm 附近, 在此之后孔径分布迅速下降, 分布曲线



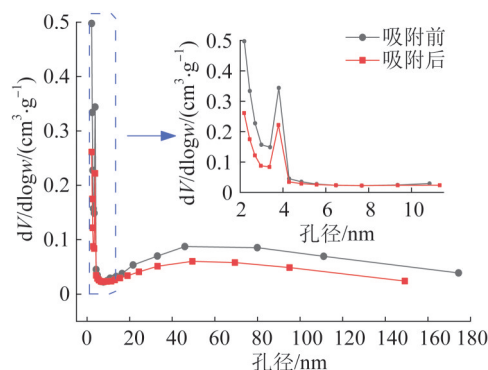


图6 PAC吸附前后孔径分布

Fig. 6 Pore size distribution before and after PAC adsorption

逐渐平缓,在10~180 nm处分布曲线无明显波动,说明PAC上大孔孔径的分布少且较为均匀。

大量研究表明,孔径分布和孔容能较为直观地反应材料的吸附性能<sup>[14]</sup>,诸多对碳材料的改性实验也将孔径分布和孔容的提升作为吸附性能提高的重要指标之一<sup>[15]</sup>。从吸附后PAC的孔径分布情况来看,PAC主要依靠微孔进行吸附,对于介孔和大孔的利用较少。值得注意的是,PAC吸附后仍具有大量的微孔和介孔,这表明PAC在对ROC进行饱和吸附之后,自身的孔道没有被全部利用,进一步证明PAC对复杂有机物的吸附具有一定的选择性。

由于PAC的孔道主要集中在微孔,因此对PAC微孔范围内的孔容进行进一步分析,主要反映了微孔范围内相应孔径对孔容的贡献情况,如图7所示。

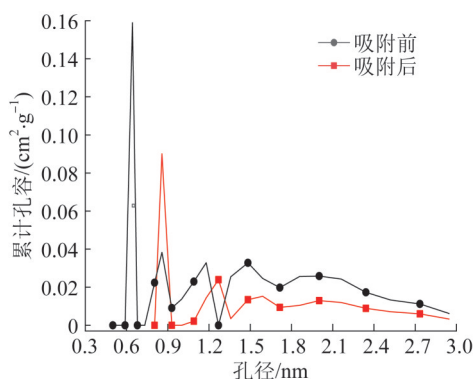


图7 PAC吸附前后累计孔容

Fig. 7 Cumulative pore volume before and after PAC adsorption

由图7可知,PAC主要依靠孔径为0.5~1 nm的微孔进行吸附,其中吸附前PAC微孔的孔容主要由0.6 nm左右的孔径来提供,其余大小的孔径提供的孔容较少;而在吸附之后,孔容则主要是由0.9 nm左右的孔径所提供,且对孔容的贡献相比吸附前有所提

升,而0.5~0.7 nm孔径范围内则检测不到提供孔容的孔径,说明0.5~0.7 nm范围内的孔径已经吸附饱和,不再提供孔容。

PAC吸附前后表面形态的变化如图8所示。

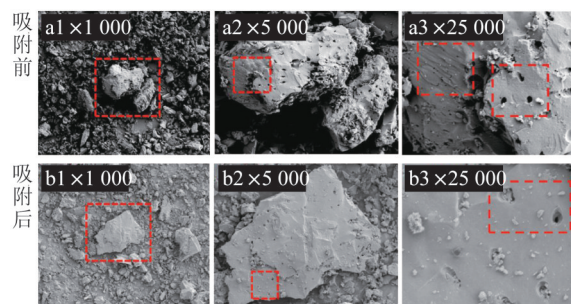


图8 PAC吸附前后表面形态

Fig. 8 Surface morphology before and after adsorption of PAC

由图8可知,PAC吸附前表面孔隙发达,不同孔径的孔隙分布情况明显,表面有褶皱,而吸附后的PAC由于其表面富集了大量有机物,因此形态表面变得较为光滑。PAC吸附后,0.4~0.7 nm范围内的孔径在吸附后消失,同时也可观察到部分孔隙由于对有机物的吸附使自身孔径逐渐变小,从而提高了更小孔径的分布量,造成吸附后0.9 nm左右孔径所提供的孔容增加。

## 2.5 有机物组分变化分析

通过GC-MS对吸附前后ROC中的有机物组分进行检测分析,结果如表3、表4所示。

由表3、表4可知,吸附前ROC中含有不同种类的有机物97种,其中主要的有机物共15种,占吸附前全部有机物的72.77%,而吸附之后ROC中有机物只剩余26种,其中2,4-二叔丁基苯酚和氰乙酰胺占吸附后全部有机物总量的94.79%。可以看出PAC无法有效地对2,4-二叔丁基苯酚等苯酚类有机物进行吸附,且吸附后氰乙酰胺质量分数上升,由于氰乙酰胺类化合物拥有较多的反应位点,可以作为合成不同杂环及其衍生物的原料<sup>[16-17]</sup>,因此氰乙酰胺质量分数的上升可能是由ROC中大量的咪唑、吡啶类物质在吸附过程中开环分解所形成的<sup>[18]</sup>。

由于ROC中有机物成分复杂,含有大量吡啶、咪唑、呋喃及芳香烃类结构特点明显的有机物,且有机物结构可以在一定程度上反映自身的化学性质<sup>[19]</sup>,将ROC中的有机物按含氮杂环、含氧杂环、芳香烃进行分类,其中苯酚类物质自身的占比大,且在

表3 吸附前 ROC 中有机物组分(质量分数>1.2%)

Table 3 Organic matter components in ROC before adsorption

序号	名称	相对分子质量	CAS 编号	质量分数/%
1	<i>N,N</i> -二甲基-1,3-苯并噁唑-2-胺	162.18	13858-89-4	1.24
2	(4 <i>R</i> ,5 <i>S</i> )-4-羟基-5-( <i>R</i> )-1-碘乙基-5-甲基二氢呋喃-2-酮	270.06	81357-35-9	1.27
3	3-羟基- <i>N,N</i> -二乙基苯胺	165.23	91-68-9	1.27
4	邻苯二甲酸二正丁酯	278.34	84-74-2	1.5
5	<i>N</i> -亚糠基异戊胺	165.23	52074-26-7	1.54
6	<i>N</i> -(反式巴豆基)吡咯烷-2-酮-	153.17	190734-66-8	1.92
7	4-羟基-3-叔丁基-苯甲醚	180.24	121-00-6	2.16
8	2,4,6-三甲基吡啶	121.18	108-75-8	2.5
9	3,3-二甲基-2-丁胺	101.19	3850-30-4	3.14
10	(2 <i>R</i> ,4 <i>aR</i> ,8 <i>aR</i> )-十氢萘-2-醇	154.25	2529-06-8	3.14
11	(2 <i>S</i> )-2-氨基- <i>N</i> -乙基丙酰胺	116.16	71773-95-0	5.03
12	邻苯二甲酸二甲酯	194.18	131-11-3	6.62
13	环丁醇	72.11	2919-23-5	6.75
14	2-氨基咪唑-4-羧酸	127.10	860011-60-5	13.51
15	2,4-二叔丁基苯酚	206.32	96-76-4	20.63

表4 吸附后 ROC 中有机物组分(质量分数>0.5%)

Table 4 Organic matter components in ROC after adsorption

序号	名称	相对分子质量	CAS 编号	质量分数%
1	甲苯	92.14	108-88-3	0.51
2	均四甲苯	134.22	95-93-2	0.51
3	磷酸三丁酯	266.31	126-73-8	0.7
4	邻苯二甲酸二丁酯	278.34	84-74-2	0.76
5	2,4-二叔丁基苯酚	206.32	96-76-4	33.86
6	氰乙酰胺	84.07	107-91-5	60.93

污染物降解中属于重点关注对象,因此将苯酚类与芳香烃类分开分类,除此之外,烷烃和烯烃等长链未成环的有机物合并成一类。PAC 吸附前后的红外光谱和 ROC 中有机物的成分变化如图 9 所示。

由图 9 可知,PAC 在 3 720  $\text{cm}^{-1}$  处为氢键伸缩振动,主要是 O—H 等伸缩振动,表明活性炭表面有羧基官能团;由于羧基自身的双键结构和丰富的氧原子可以提高 PAC 表面给予或接受电子的相互作用

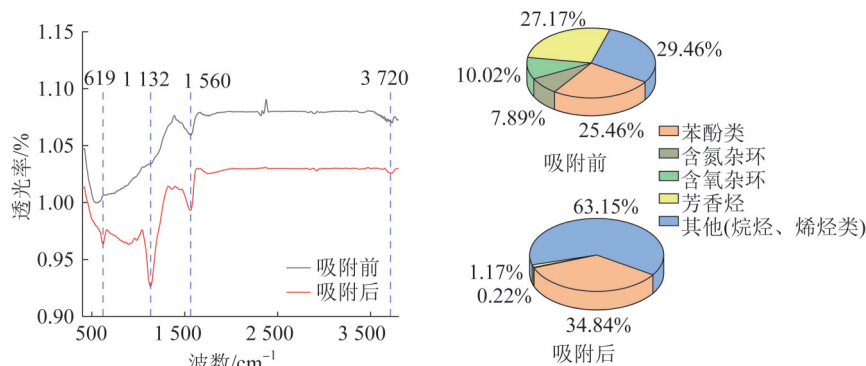


图9 PAC 吸附前后红外光谱和 ROC 中有机物成分变化

Fig. 9 Infrared spectra and changes of organic matter in ROC before and after PAC adsorption

力<sup>[20-21]</sup>,有助于提高对 ROC 中有机物的吸附能力;在 619  $\text{cm}^{-1}$  处 C—Cl 伸缩振动峰的增加是 PAC 表面吸附含盐物质所导致的;在 1 500~2 000  $\text{cm}^{-1}$  处主要

为双键峰,在 1 560  $\text{cm}^{-1}$  处可能为 C=N 或 N=N 伸缩振动峰;在 1 132  $\text{cm}^{-1}$  处为 C—O 伸缩振动峰,吸附后,C—O、C=N 或 N=N 峰有所增加,而氢键伸

缩振动峰没有明显变化。因此 PAC 中 C—O 键和 C=N 或 N=N 键的增加主要来自含氮杂环和含氧杂环等有机物。一方面,这可能是由于 PAC 表面不同含氧官能团(羧基、酰基、羟基)分别与苯酚类有机物相互作用,竞争的结果反而降低了 PAC 对苯酚类有机物的吸附效果<sup>[22]</sup>;另一方面,缺少含氮官能团也不利于 PAC 与苯酚类有机物之间的相互作用<sup>[23]</sup>。这使得 PAC 吸附之后,ROC 中苯酚类和烷烃及烯烃类有机物大量残留。

根据分子质量大小对 ROC 中有机物的分子直径进行估算<sup>[24]</sup>,结果如图 10 所示。

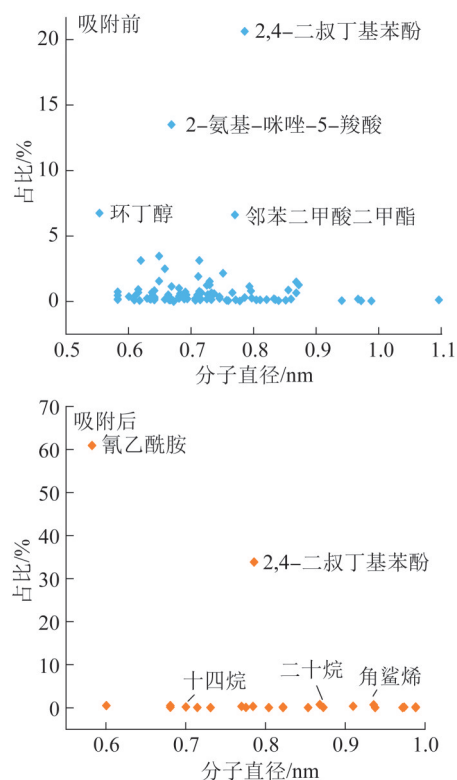


图 10 ROC 中有机物的分子直径

Fig. 10 Diameter of organic molecules in ROC

由图 10 可知,ROC 中有机物分子直径主要集中在 0.6~0.9 nm,这与 PAC 吸附前后的孔径变化相互对应。根据计算,吸附后 ROC 中残余有机物分子直径仍在 0.6~1 nm 之间,考虑到实际情况,除了氰乙酰胺和 2,4-二叔丁基苯酚、甲苯等因官能团作用无法吸附的有机物以外,大多残余都是角鲨烯、十四烷、二十烷这种长链结构的有机物,这些有机物的最佳吸附孔径远高于 0.5~1 nm,使 PAC 难以完全吸附。从整体来看,调整 PAC 的孔径结构,增加 1~2 nm 的

孔径并添加更多的含氮官能团有利于提高吸附效果。

### 3 结论

(1) PAC 对焦化 ROC 吸附的前期主要以物理吸附为主,凭借自身孔隙结构重点吸附大量芳香族类有机物;吸附后期主要为化学吸附,依靠自身官能团对非芳香族有机物进行吸附,整体来看 PAC 最大吸附量主要取决于 PAC 化学吸附对有机物的选择性。

(2) 通过对吸附数据进行拟合所得,吸附过程更符合拟二级动力学和 Freundlich 等温模型,为多分子层吸附,吸附类型为优惠吸附。从结构上来看, PAC 主要依靠微孔对 ROC 进行吸附,其中 0.5~1 nm 的微孔发挥了主要作用。

(3) PAC 对 ROC 中复杂有机物的吸附具选择性的原因在于:一方面,在含氧官能团的影响下 PAC 对苯酚类及烷烃、烯烃类的有机物吸附效果较差,而对杂环类有机物的去除效果较为明显;另一方面对 角鲨烯、十四烷、二十烷等分子大小高于 PAC 主要吸附孔径(0.5~1 nm)的长链有机物无法完全吸附。

### 参考文献

- [1] PARTAL R, BASTURK I, MURAT HOCAOGLU S, et al. Recovery of water and reusable salt solution from reverse osmosis brine in textile industry: A case study [J]. Water Resources and Industry, 2022, 27: 100174.
- [2] HAO Yongyong, MA Hongrui, PROIETTO F, et al. Electrochemical treatment of wastewater contaminated by organics and containing chlorides: Effect of operative parameters on the abatement of organics and the generation of chlorinated by-products [J]. Electrochimica Acta, 2022, 402: 139480.
- [3] FITCH A, BALDERAS-HERNANDEZ P, IBANEZ J G. Electrochemical technologies combined with physical, biological, and chemical processes for the treatment of pollutants and wastes: A review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3): 107810.
- [4] 段锋, 董卫果, 田陆峰, 等. 反渗透浓水中难降解有机物的去除技术研究进展 [J]. 工业水处理, 2017, 37(1): 22-26. DUAN Feng, DONG Weiguo, TIAN Lufeng, et al. Research progress in the removing technologies of non-degradable organic substances in reverse osmosis (RO) concentrate [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(1): 22-26.
- [5] BAVASSO I, MONTANARO D, PETRUCCI E. Ozone-based electrochemical advanced oxidation processes [J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2022, 34: 101017.

- [6] BANSAL R C, GOYAL M. Activated carbon adsorption[M]. Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press, 2005: 243-296.
- [7] MCQUILLAN R V, STEVENS G W, MUMFORD K A. The electrochemical regeneration of granular activated carbons: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 355: 34-49.
- [8] DONG Yanan, SU Yanlei, CHEN Wenjuan, et al. Ultrafiltration enhanced with activated carbon adsorption for efficient dye removal from aqueous solution[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, 19(5): 863-869.
- [9] SUN W L, NI J R, LIU T T. Effect of sediment humic substances on sorption of selected endocrine disruptors[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2006, 6(5/6): 583-591.
- [10] YU Xubiao, XU Ronghua, WEI Chaohai, et al. Removal of cyanide compounds from coking wastewater by ferrous sulfate: Improvement of biodegradability [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 302: 468-474.
- [11] HELMS J R, STUBBINS A, RITCHIE J D, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(3): 955-969.
- [12] GUO Xuan, WANG Jianlong. Comparison of linearization methods for modeling the Langmuir adsorption isotherm[J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 296: 111850.
- [13] 解建坤, 岳钦艳, 于慧, 等. 污泥活性炭对活性艳红 K-2BP 染料的吸附特性研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2007, 42(3): 64-70.
- XIE Jiankun, YUE Qinyan, YU Hui, et al. Adsorptive properties of sludge activated carbon to Brilliant Red K-2BP [J]. Journal of Shandong University(Natural Science), 2007, 42(3): 64-70.
- [14] CHIANG C H, CHEN Jian, LIN J H. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(4): 103929.
- [15] ZHU Xiao, ZHANG Liqiang, WANG Tao, et al. An updated study on NO catalytic oxidation over activated carbon: The effect of pore structure and a dual-site mechanism[J]. Fuel, 2022, 311: 122627.
- [16] MATHEWS A, ANABHA E R, SASIKALA K A, et al. Simple methods to synthesize 2-pyridones: Reactions of 2-aryl-3,3-bis(alkylsulfanyl) acrylaldehydes and cyanoacetamide [J]. Tetrahedron, 2008, 64(8): 1671-1675.
- [17] FAYED E A, BAYOUMI A H, SALEH A S, et al. In vivo and in vitro anti-inflammatory, antipyretic and ulcerogenic activities of pyridone and chromenopyridone derivatives, physicochemical and pharmacokinetic studies[J]. Bioorganic Chemistry, 2021, 109: 104742.
- [18] LIANG Gang, LI Shasha, YU Xiaodong, et al. Black carbon-mediated degradation of organic pollutants: A critical review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 160: 610-619.
- [19] ZHEN Yufei, ZHU Shishu, SUN Zhiqiang, et al. Identifying the persistent free radicals(PFRs) formed as crucial metastable intermediates during peroxymonosulfate (PMS) activation by N-doped carbonaceous materials[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(13): 9293-9304.
- [20] 王宁, 侯艳伟, 彭静静, 等. 生物炭吸附有机污染物的研究进展[J]. 环境化学, 2012, 31(3): 287-295.
- WANG Ning, HOU Yanwei, PENG Jingjing, et al. Research progress on sorption of organic contaminants to biochar[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(3): 287-295.
- [21] SU Zhibin, ZHANG Yingying, HUANG Liangliang, et al. Acetone adsorption on activated carbons: Roles of functional groups and humidity[J]. Fluid Phase Equilibria, 2020, 521: 112645.
- [22] SUPONG A, BHOMICK P C, KARMAKER R, et al. Experimental and theoretical insight into the adsorption of phenol and 2,4-dinitrophenol onto *Tithonia diversifolia* activated carbon[J]. Applied Surface Science, 2020, 529: 147046.
- [23] YANG Guo, CHEN Honglin, QIN Hangdao, et al. Amination of activated carbon for enhancing phenol adsorption: Effect of nitrogen-containing functional groups[J]. Applied Surface Science, 2014, 293: 299-305.
- [24] ZHANG Wei, CHANG Qigang, LIU Wandong, et al. Selecting activated carbon for water and wastewater treatability studies[J]. Environmental Progress, 2007, 26(3): 289-298.
- [作者简介] 刘紫岩(1994—), 硕士。电话: 13679261966, E-mail: 616347610@qq.com。通讯作者: 马宏瑞, 教授。E-mail: mahr@sust.edu.cn。
- [收稿日期] 2023-03-14(修改稿)