

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.007

两种碳基材料对二级出水中有机物的去除特性

王 赛¹, 时玉龙^{2,3}, 蒋奇海², 许 骐^{2,3}, 田雅琦^{2,3}, 李魁晓^{2,3}, 郑晓英¹

(1. 北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100022; 3. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124)

摘 要: 针对活性炭与活性焦两种碳基吸附材料, 分别开展静态吸附与动态过滤实验, 考察了两者对城镇再生水厂二级出水中有机物的去除效果。结果表明: 活性焦介孔及大孔丰富, 对应孔体积为 $0.436 \text{ cm}^3/\text{g}$, 为活性炭的 1.6 倍; 准二级动力学模型更适用于两种材料对 COD 的吸附动力学拟合, 活性焦动力学吸附速率常数 k_2 为活性炭的 2 倍; 水温为 22°C 时, 活性焦与活性炭对 COD 的 Langmuir 饱和吸附量分别为 230.38、94.14 mg/g。在近 4 个月的连续运行中, 活性焦滤柱对有机物的去除效果全程优于活性炭滤柱, 尽管两滤柱在由单纯吸附向生物吸附降解转化的过程中对有机物的去除率有所降低, 但对 COD 的去除率仍可分别稳定在 28.43% 和 22.26%。活性焦颗粒与活性炭颗粒表面 ATP 含量最高分别为 7 032.94、5 753.52 ng/g。此外, 活性焦滤柱对 1~10 ku 有机物组分, 以及腐殖酸类物质、溶解性微生物代谢产物等不同荧光特性有机物均有较好的去除效果。与活性炭相比, 活性焦对再生水厂二级出水中有机物的去除效果更优。

关键词: 活性炭; 活性焦; 生物活性焦; 二级出水; 再生水厂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)05-0043-08

Removal Characteristics of Organic Matters from Secondary Effluent by Two Types of Carbon Based Adsorbent

WANG Sai¹, SHI Yu-long^{2,3}, JIANG Qi-hai², XU Qi^{2,3}, TIAN Ya-qi^{2,3},
LI Kui-xiao^{2,3}, ZHENG Xiao-ying¹

(1. Beijing Key Laboratory of Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100022, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Wastewater Resource, Beijing 100124, China)

Abstract: In this study, batch adsorption and continuous filtration experiments were conducted to investigate the effectiveness of activated coke and activated carbon for removing organic matters from secondary effluents of water reclamation plant. The activated coke was shown to be a mesoporous structure with macropores and mesopores volume of $0.436 \text{ cm}^3/\text{g}$, which was 1.6 times higher than that of activated carbon. Kinetic studies revealed that the quasi-second-order kinetic model was more suitable for

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406300)

通信作者: 郑晓英 E-mail: zhengxiaoying@bjut.edu.cn

simulating COD adsorption by two materials, and the adsorption rate constant k_2 of COD onto activated coke was twice as high as it for activated carbon at dosage of 1.0 g/L. The saturated adsorption capacity for COD was 230.38 mg/g and 94.14 mg/g using activated coke and activated carbon respectively based on Langmuir isotherm at 22 °C. Continuous filtration experiments showed that the activated coke filter performed better than the activated carbon filter in organic matters removal during four months operation. The removal efficiency of COD gradually decreased in development of fresh activated coke and activated carbon to biological activated coke and activated carbon, and finally maintained at 28.43% and 22.26% respectively. The total adenosine tri-phosphate (ATP) content of activated coke and activated carbon particles was 7 032.94 ng/g and 5 753.52 ng/g. In addition, activated coke filter obtained an effective removal of organic fractions with molecular weight of 1 – 10 ku, as well as organic matters with different fluorescent characteristics, such as fulvic acid and soluble microbial products. Compared with activated carbon, activated coke is more effective in organic matters removal from secondary effluents.

Key words: activated carbon; activated coke; biological activated coke; secondary effluent; water reclamation plant

近年来城市污水再生利用已成为缓解水资源供需压力、实现水资源可持续利用的有效途径。再生水的制备多采用常规二级处理工艺后接再生水深度处理单元的形式。城市再生水厂二级出水中残留的有机物主要包括微生物代谢产物、天然有机物,以及种类繁多的药物与个人护理品、内分泌干扰物、全氟化合物等有机微污染物^[1-4],这些有机物的存在一方面对再生水受纳水环境产生潜在生态风险,并且可能通过不同暴露途径直接或间接地对人体健康产生损伤^[5-6];另一方面,这也对再生水处理工艺提出了更高的要求。因此,合理选择再生水深度处理工艺对二级出水中的有机物进行有效去除是再生水安全利用的关键。

多孔材料对有机物具有较高的吸附容量,且吸附饱和后可以通过物化、生物等方式进行再生,在水处理领域应用较多。活性炭因其微孔发达、比表面积大等特点,在饮用水深度处理领域被广泛采用^[7-9]。由于二级出水中有机物浓度高,活性炭很快吸附饱和,加之成本较高,制约了其在再生水深度处理领域的推广应用。与之相比,活性焦作为一种新型的碳基吸附材料,具有发达的介孔,且制备成本仅为常规活性炭的1/2^[10-11]。目前,活性焦吸附工艺多应用于工业废水处理^[12-14],郑州马头岗污水厂于2017年在国内率先采用活性焦吸附技术对城市污水深度处理工艺进行升级改造,采取活性焦吸附饱和后热再生的传统生产方式,工艺组成与再生方式均有较大优化空间^[15-16]。

笔者将静态吸附实验与动态连续流过滤实验相结合,对比了活性炭、活性焦两种吸附材料对城镇再生水厂二级出水中有机物的去除特性,重点考察了生物活性焦滤柱在稳定阶段对有机物的去除效果,以期生物活性焦技术在再生水深度处理领域的应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 吸附材料和原水水质

在厂家提供的8~30目活性炭与活性焦颗粒的基础上,通过人工筛分得到实验用20~30目活性炭与活性焦颗粒,并利用全自动比表面积及孔隙分析仪对其比表面积、孔结构参数等进行了测定,结果如表1所示。可以看出,活性炭微孔丰富,微孔体积及其占总孔体积的比例分别为0.312 cm³/g,53.79%;与之相比,活性焦的介孔及大孔发达,两者体积及占总孔体积比例分别为0.436 cm³/g,59.58%。

表1 活性炭和活性焦的孔结构参数

Tab. 1 Pore structure parameters of activated carbon and activated coke

项目	平均孔径/ nm	总孔体积/ (cm ³ · g ⁻¹)	微孔体积/ (cm ³ · g ⁻¹)	介孔及大孔体积/ (cm ³ · g ⁻¹)	比表面积/ (m ² · g ⁻¹)
活性炭	2.51	0.580	0.312	0.268	923
活性焦	3.09	0.732	0.296	0.436	948

实验所用原水为北京市某城镇再生水厂二级出水,COD为15.8~21.2 mg/L,DOC为5.11~6.81 mg/L,UV₂₅₄为0.108~0.141 cm⁻¹,浊度为0.56~2.21 NTU,SS为5.3~16.8 mg/L。

1.2 实验方法

1.2.1 静态吸附实验

① 吸附动力学实验:取系列 250 mL 锥形瓶,使用恒温振荡器,在 150 r/min、25 ℃ 条件下,控制活性炭、活性焦的投加量均为 1.0 g/L,检测不同时间对 COD 的吸附量,绘制吸附量和吸附时间关系曲线,并利用准一级、准二级动力学模型进行拟合。

② 等温吸附实验:取系列 250 mL 锥形瓶,控制活性炭、活性焦的投加量在 0.1 ~ 1.0 g/L。使用恒温振荡器,保持振荡速度为 150 r/min 不变,分别测定 15、22、30 ℃ 条件下,活性炭、活性焦的饱和吸附量,并分别利用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型进行曲线拟合。

1.2.2 动态吸附实验

分别将 20 ~ 30 目活性炭、活性焦装填于两个直径为 5 cm 的有机玻璃滤柱中,装填高度均为 20 cm,空床接触时间(EBCT)为 10 min,稳定后期调整 EBCT 为 20 min。对滤柱进、出水水质开展持续跟踪检测,并在生物活性炭/焦滤柱运行稳定后,对两种填料表面的生物量进行测定。

1.2.3 分析方法

COD 采用 HACH DR6000 型紫外分光光度计测

定;利用 ASAP2420 全自动比表面积及孔隙分析仪测定活性炭、活性焦颗粒的比表面积、孔容及孔径分布;DOC 采用 multi N/C 3100 总有机碳分析仪测定;采用 QuenchGone 21 Wastewater 测试包测定滤料表面 ATP 含量;采用 PL - GPC 50 型凝胶渗透色谱仪测定有机物的分子质量分布;利用 RF - 6000 荧光分光光度计测定进出水的三维荧光光谱。

2 结果与讨论

2.1 静态吸附效果

2.1.1 吸附动力学

活性炭与活性焦吸附 COD 的准一级和准二级动力学模型拟合参数见表 2。在最初的 8 h 内,活性炭和活性焦对 COD 的吸附速率较快,48 h 时吸附基本达到平衡。

由表 2 可知,准二级模型的相关性系数 R^2 略高于准一级动力学模型,能够更好地拟合活性炭与活性焦对 COD 的吸附过程,且该过程主要受化学吸附控制,有机物在溶液中的扩散对吸附过程有一定影响但不是限速步骤^[17-18]。动力学吸附速率常数 k_2 与初始吸附速率 h 均遵循活性焦 > 活性炭,说明与活性炭相比,活性焦对二级出水中的有机物吸附速率更快、吸附容量更高。

表 2 活性炭与活性焦吸附 COD 的动力学拟合参数

Tab. 2 Adsorption kinetics parameters of COD onto activated carbon and activated coke

项 目	准一级动力学模型			准二级动力学模型			
	$q_e/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_1/$ ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	R^2	$q_e/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_2/$ ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	R^2	$h/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
活性炭	8.81	0.331	0.968	9.90	0.047	0.993	4.564
活性焦	9.63	0.707	0.994	10.40	0.096	0.995	10.391

2.1.2 等温吸附效果

用 Langmuir 和 Freundlich 模型对活性焦与活性炭等温吸附实验数据进行拟合,拟合参数见表 3。

表 3 活性炭和活性焦对 COD 的等温吸附拟合参数

Tab. 3 Adsorption isotherm parameters of COD onto activated carbon and activated coke

项目	温度/ ℃	Langmuir			Freundlich		
		$Q_0/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	b	R^2	K_F	$1/n$	R^2
活性炭	15	269.50	0.010	0.972	2.127	0.940	0.989
	22	94.14	0.033	0.990	3.768	0.785	0.991
	30	53.60	0.062	0.980	4.359	0.668	0.981
活性焦	15	791.03	0.009	0.993	7.579	0.958	0.992
	22	230.38	0.026	0.997	6.550	0.864	0.994
	30	178.37	0.034	0.991	6.579	0.837	0.985

由表 3 可以看出,Langmuir 模型和 Freundlich 模型的相关性系数 R^2 较为接近,表明单层吸附与多层吸附同时存在于活性焦与活性炭对 COD 的吸附过程中^[19-20]。在 Langmuir 模型中,活性焦与活性炭的饱和吸附量(Q_0)随温度的升高而减小,且相同温度下活性焦对 COD 的饱和吸附量大于活性炭。在 22 ℃ 时,两种材料的饱和吸附量分别为 230.38、94.14 mg/g。在 Freundlich 模型中,平衡常数 K_F 值越大表示吸附剂的吸附容量越大^[21-22],相同温度下活性焦的 K_F 值均大于活性炭,进一步说明活性焦对 COD 的吸附容量大于活性炭。Li 等研究也发现活性焦对污水中有机物的吸附容量高于活性炭,并将原因归结为活性焦发达的介孔结构^[23]。

2.2 动态连续过滤效果

2.2.1 对 COD 的去除

在近 20 000 个 EBCT 的持续运行中,活性焦滤柱对 COD 的去除率全程高于活性炭滤柱(如图 1 所示)。两个滤柱对 COD 的去除可分为 3 个阶段:

① 第 I 阶段,持续 1 740 个 EBCT,以吸附作用为主,新填充的活性炭与活性焦滤柱对 COD 的去除率均大于 80%,但去除率随运行时间的延长而明显下降。

② 第 II 阶段,持续 6 744 个 EBCT,活性炭与活性焦的吸附位点均逐渐饱和,而微生物在两种颗粒表面附着生长形成的生物膜趋于成熟,生物降解作用的增强,可在一定程度上弥补吸附容量快速饱和和带来的不足,两滤柱对 COD 去除率的衰减速率较第 I 阶段有所减缓,平均去除率分别为 44.37% 和 59.18%。

③ 第 III 阶段为稳定的生物吸附降解阶段,主要依靠生物活性炭与生物活性焦的生物降解作用去除 COD,两个滤柱的出水 COD 分别维持在 13.94、12.80 mg/L 左右,平均去除率稳定在 22.26%、28.43%。吸附作用将有机物富集在颗粒表面,而附着的微生物对富集有机物的降解作用使吸附位点得以重新释放,吸附与生物降解的动态平衡,使生物活性炭与生物活性焦系统能够长期维持稳定运行状态^[24-25]。

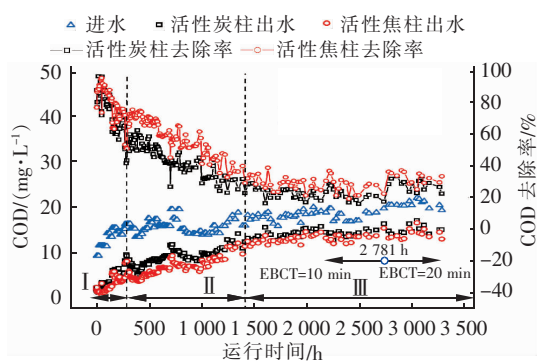


图1 活性炭、活性焦滤柱对 COD 的去除效果

Fig. 1 Removal of COD by activated carbon and activated coke filter

两滤柱运行了 2 781 h 时,将 EBCT 由 10 min 延长至 20 min,生物活性炭滤柱与生物活性焦滤柱对 COD 的去除率均有所升高,在 3 周的运行过程中(2 781 ~ 3 285 h),两滤柱对 COD 的平均去除率分别为 28.13% 和 32.52%。

2.2.2 填料 ATP 含量分析

滤柱运行了 2 255 h 后(稳定期,EBCT = 10 min,13 530 个 EBCT),分别对活性炭/焦滤柱进水段、中间段和出水段滤料表面的 ATP 含量进行了测定,用来表征活体微生物的含量^[26],检测结果以单位质量活性炭/焦的 ATP 含量计。如图 2 所示,两滤柱 ATP 含量均为进水段高、出水段低,且活性焦滤柱进水段的 ATP 含量(7 032.94 ng/g)明显高于活性炭滤柱进水段的(4 919.59 ng/g)。说明与微孔发达的活性炭相比,介孔、大孔发达的活性焦更有利于微生物的附着与生长。加之进水段有机物含量丰富,促进了微生物在该区域的聚集生长。之后随着有机物浓度的降低,活性焦滤柱中间段与出水段滤料表面生物量减少。相比较而言,活性炭滤柱进水段与中间段 ATP 含量变化并不显著。

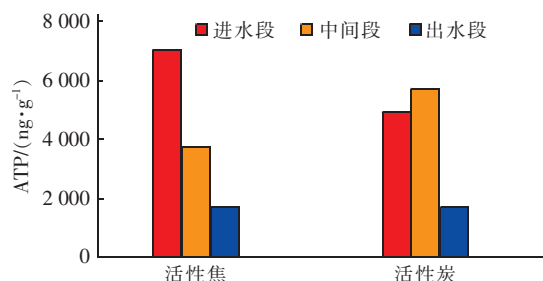


图2 活性炭、活性焦颗粒表面生物膜 ATP 含量沿滤柱变化

Fig. 2 ATP content of biofilm on activated carbon and activated coke particle surface along filter

2.2.3 有机物分子质量分布变化

对稳定期(EBCT = 10 min,13 530 个 EBCT)活性焦滤柱与活性炭滤柱进、出水有机物分子质量分布进行分析,结果如图 3 所示。

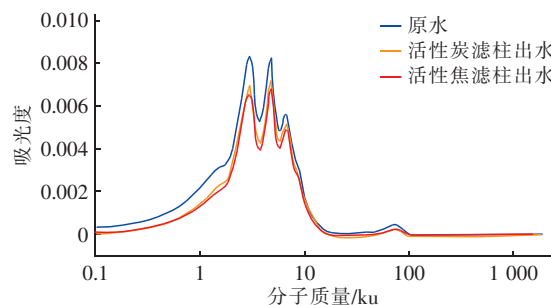


图3 活性炭、活性焦滤柱进出水中有机物分子质量分布

Fig. 3 Molecular weight distribution of organic matters in influent and effluent of activated carbon and activated coke filter

二级出水中主要含有 1 ~ 10 ku 中分子质量有机物组分,以及部分 10 ~ 100 ku 大分子质量及 < 1

ku 的小分子质量有机物组分。经活性炭与活性焦滤柱处理后,出水中的有机物分子质量分布规律基本不变,但紫外吸收强度整体降低,峰宽随之减小,有机物的分子质量分布更为集中。经活性焦过滤后各分子质量区间对应有机物的吸光度降幅均高于活性炭,说明活性焦滤柱对相应有机物组分的去除率高于活性炭滤柱。

2.2.4 有机物荧光特性变化

根据 Chen 等^[27]的研究,可将三维荧光光谱图(3DEEM)分为 5 个区域,其中区域 I 和区域 II 代表芳香族蛋白质,区域 III、IV 和 V 分别代表富里酸类物质、溶解性微生物代谢产物和腐殖酸类物质。稳定期(EBCT = 10 min, 13 530 个 EBCT)活性焦滤柱与活性炭滤柱进、出水有机物的 3DEEM 光谱见图 4。

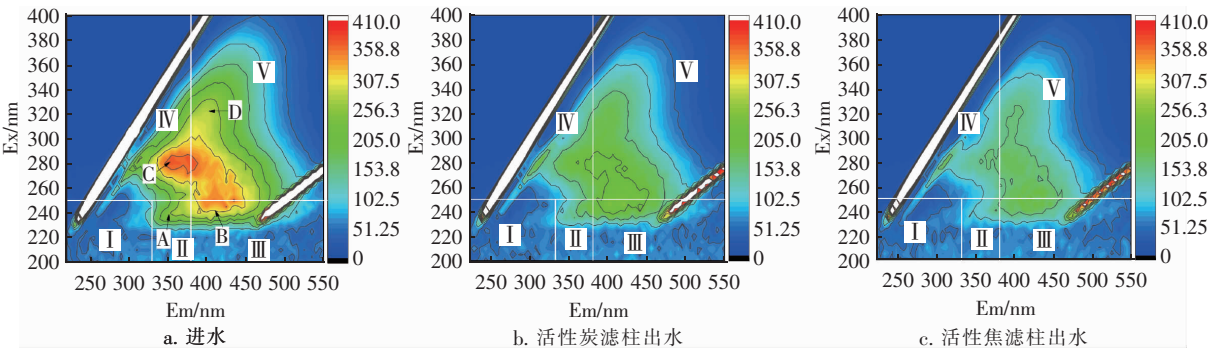


图 4 活性炭、活性焦滤柱进出水 3DEEM 光谱

Fig. 4 3DEEM fluorescence spectra of influent and effluent samples

由图 4 可见,二级出水具有 4 个明显的荧光峰,分别位于区域 II ~ V,其中峰 A 为芳香族蛋白质峰,峰 B 为类富里酸峰,峰 C 为溶解性微生物代谢产物峰,峰 D 为类腐殖酸峰,各荧光峰的位置和强

度如表 4 所示。稳定期由于生物降解作用,二级出水经活性炭滤柱与活性焦滤柱后整体荧光强度明显减弱,且活性焦滤柱对 4 个荧光峰强度的削减率较活性炭滤柱高出 9.11% ~ 14.73%。

表 4 活性炭、活性焦滤柱进出水 3DEEM 荧光峰位置及强度

Tab. 4 Intensities and positions of 3DEEM fluorescence peaks of influent and effluent samples

项 目	峰 A		峰 B		峰 C		峰 D	
	Ex、Em/nm	强度/AU	Ex、Em/nm	强度/AU	Ex、Em/nm	强度/AU	Ex、Em/nm	强度/AU
进水	238/350	247.4	245/400	345.5	280/355	370.3	322/400	285.5
活性炭出水	237/350	149.9	244/403	227.2	279/347	198.4	327/408	171.6
活性焦出水	240/358	116.2	244/404	176.3	280/355	160.4	327/407	145.6

利用荧光区域积分方法(FRI)^[28]对活性炭与活性焦滤柱过滤前后各荧光区域对应的有机物组分含量进行定量分析,得到 5 个区域的积分标准体积 $\Phi_{i,n}$ (见表 5)。积分标准体积间接表征了其所代表有机物的相对含量,将各荧光区域标准体积所占比

例与 DOC 相乘得到各区域对应的 DOC 含量,结果如图 5 所示。可以看出,腐殖酸类物质与溶解性微生物代谢产物为二级出水中的主要有机物组分,分别占荧光区域有机物总量的 63.29%、18.52%,对应 DOC 含量为 3.96、1.16 mg/L。

表 5 活性炭、活性焦滤柱进出水 3DEEM 光谱区域积分标准体积

Tab. 5 Standard integration volumes for 3DEEM fluorescence spectra

AU · nm²

项 目	区域 I	区域 II	区域 III	区域 IV	区域 V
进水	156 946.3	301 278.8	492 730.8	968 102.8	3 308 664.0
活性炭出水	141 472.5	220 146.8	349 145.3	555 997.5	2 135 143.0
活性焦出水	142 530.0	193 499.3	306 988.5	436 042.0	1 742 458.0

活性炭滤柱与活性焦滤柱对溶解性微生物代谢产物的去除效果最好,去除率分别为 27.98% 和 35.78%;其次是腐殖酸类物质,去除率分别为

19.08%、24.90%。对富里酸类、芳香族蛋白质类有机物的去除效果并不明显,其中对溶解性微生物代谢产物的去除是在滤料吸附与生物降解的相互协作

下完成的^[29]。

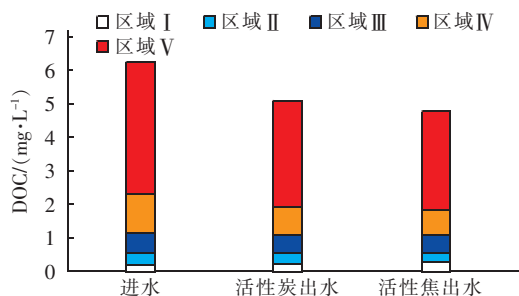


图5 3DEEM光谱5个区域对应DOC含量

Fig. 5 DOC content of five regions in 3DEEM

3 结论

① 活性焦介孔及大孔丰富,对应孔体积为 $0.436 \text{ cm}^3/\text{g}$,是活性炭的1.6倍;活性炭与活性焦对二级出水中COD的吸附均符合准二级动力学模型,动力学吸附速率常数 k_2 与初始吸附速率 h 均遵循活性焦>活性炭;两种材料对COD的吸附等温线与Langmuir、Freundlich模型均具有较好的相关性;22℃时,活性焦与活性炭对COD的饱和吸附量分别为230.38、94.14 mg/g。

② EBCT为10 min时,在近20 000个EBCT运行中,活性焦滤柱对COD的去除率全程高于活性炭滤柱;新鲜活性炭/活性焦向生物活性炭/活性焦的演变分为三个阶段,第I阶段以吸附为主,两滤柱对COD的去除率均大于80%;第II阶段是由吸附向生物降解作用过渡;第III阶段即稳定阶段,生物活性焦滤柱与生物活性炭滤柱出水COD分别维持在12.80、13.94 mg/L左右,对COD的平均去除率稳定在28.43%、22.26%。活性焦与活性炭滤料表面的ATP含量最高分别可达7 032.94、5 753.52 ng/g。

③ 二级出水有机物以1~10 ku中分子质量有机物组分,以及腐殖酸类物质和溶解性微生物代谢产物为主,FRI方法得到后两者对应的DOC含量分别为3.96、1.16 mg/L;稳定运行阶段活性焦滤柱对各主要有机物组分的去除效果均优于活性炭滤柱;两滤柱对溶解性微生物代谢产物的去除率最高,分别为35.78%、27.98%。

④ 与活性炭相比,在静态吸附与动态连续流过滤实验中,活性焦对二级出水中的有机物均表现出优异的去除效能,在再生水深度处理过程中活性焦可用作活性炭的替代材料,生物活性焦工艺具有良好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 郭瑾,盛丰,马民涛,等. 污水二级生化出水有机物(EfOM)性质表征及去除研究现状[J]. 北京工业大学学报,2011,37(1):131-138.
GUO Jin, SHENG Feng, MA Mintao, *et al.* Characterization and removal of secondary effluent organic matter (EfOM) in wastewater [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(1): 131-138 (in Chinese).
- [2] 王鑫,李炳华,黄俊雄,等. 再生水及地下水EDCs和PPCPs污染特征分析与生态风险评估[J]. 北京水务,2019(6):1-5.
WANG Xin, LI Binghua, HUANG Junxiong, *et al.* Analysis of pollution characteristics and ecological risk assessment of EDCs and PPCPs in reclaimed water and groundwater [J]. Beijing Water, 2019(6): 1-5 (in Chinese).
- [3] 温智皓,段艳平,孟祥周,等. 城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险[J]. 环境科学,2013,34(3):927-932.
WEN Zhihao, DUAN Yanping, MENG Xiangzhou, *et al.* Occurrence and risk assessment of five selected PPCPs in municipal wastewater treatment plant and the receiving water [J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 927-932 (in Chinese).
- [4] EDWARD A, BRUCE P, BARBARA K, *et al.* The fate of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs), endocrine disrupting contaminants (EDCs), metabolites and illicit drugs in a WWTP and environmental waters [J]. Chemosphere, 2017, 174: 437-446.
- [5] LUIGI R, SIXTO M, DEMET A, *et al.* Consolidated vs new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 986-1008.
- [6] JUAN L A, FRANCISCO J R, FEMANDO T, *et al.* Micropollutants removal from retentates generated in ultrafiltration and nanofiltration treatments of municipal secondary effluents by means of coagulation, oxidation, and adsorption processes [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 289: 48-58.
- [7] 高志鹏,刘成,陶辉,等. 生物活性炭的热再生效能及在水厂中的应用[J]. 中国给水排水,2019,35(15):48-53.
GAO Zhipeng, LIU Cheng, TAO Hui, *et al.* Thermal regeneration effect of biological activated carbon and its

- application in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(15): 48–53 (in Chinese).
- [8] 杨家轩, 马军, 时玉龙, 等. 气浮/复合滤料生物滤池工艺处理低温、高氨氮原水[J]. 中国给水排水, 2013, 29(21): 5–10.
- YANG Jiakuan, MA Jun, SHI Yulong, *et al.* Combined process of sedimentation, dissolved air flotation and biofilter with multi-layer media for treating raw water with heavy pollution and high ammonia nitrogen at low temperature[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21): 5–10 (in Chinese).
- [9] LOU J C, YANG C Y, CHANG C J, *et al.* Analysis and removal of assimilable organic carbon (AOC) from treated drinking water using a biological activated carbon filter system [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2014, 2(3): 1684–1690.
- [10] 冯治宇. 活性焦制备与应用技术[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007.
- FENG Zhiyu. Technologies of Preparation and Application of Activated Coke [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2007 (in Chinese).
- [11] 陈雪如, 孙丽华, 冯萃敏, 等. PAC/AC 吸附与超滤膜组合去除二级出水中有机物[J]. 市政技术, 2014, 32(2): 129–131.
- CHEN Xueru, SUN Lihua, FENG Cuimin, *et al.* Adsorption of powdered activated carbon and activated coke towards organics removal by ultra-filtration in reclaimed wastewater treatment [J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(2): 129–131 (in Chinese).
- [12] 李若征, 杨宏, 靳昕, 等. 活性焦对典型煤气化废水的吸附及其影响因素[J]. 环境污染与防治, 2016, 29(1): 19–22.
- LI Ruozheng, YANG Hong, JIN Xin, *et al.* Adsorption and effective factors of activated coke in treating coal gasification wastewater[J]. Environmental Pollution and Control, 2016, 29(1): 19–22 (in Chinese).
- [13] SHEN L, WANG W, LI T, *et al.* Powdered activated coke for COD removal in the advanced treatment of mixed chemical wastewaters and regeneration by Fenton oxidation[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 371: 631–638.
- [14] TONG K, LIN A G, JI G D, *et al.* The effects of adsorbing organic pollutants from super heavy oil wastewater by lignite activated coke [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 308: 113–119.
- [15] 李国金, 李霞, 王万寿, 等. 活性焦吸附应用于市政污水深度处理中的系统布置及控制[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 20–23.
- LI Guojin, LI Xia, WANG Wanshou, *et al.* System layout and control of activated coke adsorption process in municipal wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6): 20–23 (in Chinese).
- [16] 李国金, 李霞, 王万寿, 等. 活性焦吸附工艺在市政污水深度处理中的应用[J]. 给水排水, 2018, 44(5): 28–30.
- LI Guojin, LI Xia, WANG Wanshou, *et al.* Application of active coke adsorption process in advanced treatment of municipal wastewater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(5): 28–30 (in Chinese).
- [17] FENG C M, JIN J Y, SUN L H, *et al.* Study on the organics adsorption capacities of powdered activated carbon and activated coke in reclaimed water [J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 62: 200–207.
- [18] HAN R P, LU Z, ZOU W H, *et al.* Removal of copper (II) and lead (II) from aqueous solution by manganese oxide coated sand II. Equilibrium study and competitive adsorption [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 480–488.
- [19] 吴雁, 唐怡, 杨清, 等. 废水中聚丙烯酰胺在 H-Beta 分子筛上的吸附特性[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2798–2804.
- WU Yan, TANG Yi, YANG Qing, *et al.* Adsorption of polyacrylamide in wastewater on H-Beta molecular sieve [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2798–2804 (in Chinese).
- [20] 张艺钟, 刘珊, 刘志文, 等. 壳聚糖凝胶球对 Cu(II) 和 Cr(VI) 吸附行为的对比[J]. 化工进展, 2017, 36(2): 712–719.
- ZHANG Yizhong, LIU Shan, LIU Zhiwen, *et al.* Comparison for Cu(II) and Cr(VI) adsorption behavior onto chitosan hydrogel beads[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(2): 712–719 (in Chinese).
- [21] 马爱军, 周立祥, 何任红. 水溶性有机物对草萘胺在土壤中吸附与迁移的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 356–360.
- MA Aijun, ZHOU Lixiang, HE Renhong. Effects of dissolved organic matter on napropamide adsorption and transport in soil system [J]. Environmental Science, 2006, 27(2): 356–360 (in Chinese).

- [22] KANNAN N, SUNDARAM M M. Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study[J]. *Dyes and Pigments*, 2001, 51(1): 25–40.
- [23] LI P, AILIJIAN N, CAO X, *et al.* Pretreatment of coal gasification wastewater by adsorption using activated carbons and activated coke[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 482: 177–183.
- [24] PRAMANIK B K, RODDICK F A, FAN L H. Long-term operation of biological activated carbon pre-treatment for microfiltration of secondary effluent; correlation between the organic foulants and fouling potential[J]. *Water Research*, 2015, 90: 405–414.
- [25] UMAR M, RODDICK F, FAN L. Impact of coagulation as a pre-treatment for UVC/H₂O₂-biological activated carbon treatment of a municipal wastewater reverse osmosis concentrate[J]. *Water Research*, 2016, 88: 12–19.
- [26] JORGENSEN P E, ERIKSEN T, JENSEN B K. Estimation of viable biomass in waste-water and activated-sludge by determination of ATP, oxygen utilization rate and FDA hydrolysis[J]. *Water Research*, 1992, 26(11): 1495–1501.
- [27] 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 and Technology*, 2003, 37(24): 5701–5710.
- [28] NGUYEN S T, RODDICK F A. Effects of ozonation and biological activated carbon filtration on membrane fouling in ultrafiltration of an activated sludge effluent[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 363(2): 271–277.
- [29] 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.
- WANG Baogui. Wastewater Advanced Treatment for the Removal of Effluent Organic Matter (EfOM) and Their Efficiency for Alleviating Ultrafiltration Membrane Fouling[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013 (in Chinese).

作者简介: 王赛(1995–), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与资源化。

E-mail: 15010293266@163.com

收稿日期: 2020–04–10

修回日期: 2020–04–28

(编辑: 李德强)

(上接第42页)

- [14] 杨航, 黄钧, 刘博. 异养硝化–好氧反硝化菌 *Paracoccus pantotrophus* ATCC 35512 的研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(4): 585–592.
- YANG Hang, HUANG Jun, LIU Bo. Advances in research of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strain *Paracoccus pantotrophus* ATCC 35512[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008, 14(4): 585–592 (in Chinese).
- [15] 李继兵. 基于稳定同位素探针技术的多环芳烃降解微生物研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- LI Jibing. Study on Stable-isotope Probing of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-degrading Bacteria[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2018 (in Chinese).
- [16] SOHN J H, KWON K K, KANG J H, *et al.* *Novosphingobium pentaromativorans* sp. nov., a high-molecular-mass polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium isolated from estuarine sediment[J]. *International Journal of Systematic & Evolutionary Microbiology*, 2004, 54(5): 1483–1487.
- [17] ROMINE M F, FREDRICKSON J K, LI S M W. Induction of aromatic catabolic activity in *Sphingomonas aromaticivorans* strain F199[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 1999, 23(4/5): 303–313.

作者简介: 张晓霞(1976–), 女, 天津人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事市政水处理设计工作。

E-mail: zxx7618@163.com

收稿日期: 2019–09–08

修回日期: 2019–11–04

(编辑: 任莹莹)