

粉末活性炭吸附 2,4,6-三氯酚的性能研究

马 艳,高乃云,刘欣然,姚娟娟

(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘要: 针对粉末活性炭 PAC 吸附 2,4,6-三氯酚(2,4,6-TCP)的性能进行了研究.考察了 PAC 炭种、投加量和温度 3 因素对 2,4,6-TCP 吸附效果的影响;建立了吸附动力学、等温吸附线以及吸附热力学模型;研究了 PAC 与预氧化联用技术对 2,4,6-TCP 的协同去除作用.结果表明,上述 3 个因素对 2,4,6-TCP 吸附效果影响均显著,其中 PAC 投加量的影响最大,PAC 炭种其次,温度的影响最小.PAC 可以快速有效地吸附水中的 2,4,6-TCP,快速吸附期在前 20 min,吸附容量可达到 80%以上.拟二级动力学模型和 Freundlich 吸附等温线模型可分别较好地描述 PAC 对 2,4,6-TCP 的吸附行为.PAC 吸附 2,4,6-TCP 的过程为自发、放热以及熵减的过程.PAC 与预氧化联用技术可以提高对 2,4,6-TCP 的处理效果.

关键词: 2,4,6-三氯酚;粉末活性炭;吸附;预氧化

中图分类号: TU 991.2

文献标识码: A

Performance of 2,4,6-trichlorophenol Adsorption by Powdered Activated Carbon

MA Yan, GAO Naiyun, LIU Xinran, YAO Juanjuan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The performance of 2,4,6-trichlorophenol (2,4,6-TCP) adsorption by powdered activated carbon (PAC) was investigated in aqueous solutions to evaluate the effects of PAC species, PAC dosage and temperature on the adsorption of 2,4,6-TCP by PAC. The adsorption kinetics, thermodynamics and isothermal models were established. The removal efficiencies of 2,4,6-TCP by the combination of PAC adsorption and pre-oxidation were figured out. The results indicate that the effects of all the three factors on adsorption of 2,4,6-TCP are significant and follow the order of PAC dosage > PAC species > temperature. The PAC adsorption is

an effective method to remove 2,4,6-TCP. The adsorption rate of 2,4,6-TCP by PAC is rapid and more than 80% adsorption capacity of PAC can be reached within the initial 20 min. The adsorption behaviors can be well described by pseudo second order adsorption kinetic model and Freundlich adsorption isotherm model. The adsorption of 2,4,6-TCP by PAC is spontaneous, exothermic and entropy decreasing. The combination of PAC adsorption and pre-oxidation can enhance the removal of 2,4,6-TCP.

Key words: 2,4,6-trichlorophenol; powdered activated carbon; adsorption; pre-oxidation

2,4,6-三氯酚(2,4,6-TCP)及其他氯酚类芳香化合物是难降解有毒物质的典型代表,美国、欧盟各国和中国等均将其列为优先控制污染物^[1].2,4,6-TCP是一种杀菌剂,广泛应用于农药制造、造纸、印染行业.它毒性大,难生物降解,具有三致效应和遗传毒性,已被世界卫生组织正式认定为有致癌性的可疑化合物之一^[1-2].2,4,6-TCP在水环境中溶解度较高,易在环境中残留.研究表明,地下水、污水及土壤中均可检测到它的存在.同时,在饮用水加氯处理过程中,天然有机物特别是广泛存在于水环境中的酚类物质,易被氯化形成三氯酚,对饮用水安全造成威胁^[3].因此,对水中三氯酚的含量控制极为重要,我国城市供水水质标准(CJ/T 206—2005)规定 2,4,6-TCP 质量浓度不得超过 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

关于水中三氯酚的去除方法较多,包括臭氧氧化、光化学氧化、生物降解以及活性炭吸附等^[4].其中,活性炭吸附法由于具有经济、有效和无副产物等优点,已被美国环境保护署(EPA)列为最可行的环境控制技术.粉末活性炭(PAC)作为一种比表面积

收稿日期: 2010-10-12

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX07421-002,2008ZX07421-004);国家“八六三”高技术研究发展计划(2008AA06A412);住房和城乡建设部研究开发项目(2009-K7-4)

第一作者: 马 艳(1986—),女,博士生,主要研究方向为水处理理论与技术. E-mail: my041203@126.com

通讯作者: 高乃云(1950—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为水处理理论与技术. E-mail: gaonaiyun@sina.com

大、吸附速率极快的活性炭,在水处理领域已得到广泛应用,并受到应急处理的特别青睐,是一种有效的应急措施^[5].本试验对 PAC 吸附 2,4,6-TCP 的性能进行了研究,以期为实际应对水源水 2,4,6-TCP 污染提供有效的理论依据和技术指导.

1 材料与方法

1.1 试验材料

2,4,6-TCP(Sigma 公司,纯度>98%)储备液质量浓度为 100 mg · L⁻¹,用去离子水配制,使用时根据需要进行稀释.粉末活性炭分煤质炭、竹质炭和椰壳炭 3 种,具体指标见表 1.高锰酸钾和次氯酸钠皆为分析纯,购于国药集团.流动相甲醇、乙腈为 HPLC 级(Sigma 公司),冰醋酸为优级纯.

表 1 不同 PAC 的主要性能指标				
Tab.1 The main performance parameters of different PACs				
炭种	目数	碘值范围/ (mg · g ⁻¹)	亚甲基蓝值/ (mg · g ⁻¹)	比表面积/ (m ² · g ⁻¹)
煤质炭	200	800~1 100	130	≥900
椰壳炭	200	900~1 200	130	≥1 000
竹质炭	200	900~1 200	135	≥1 050

1.2 试验方法

准确称取干燥恒重的粉末活性炭 0.4 g,置于 100 mL 去离子水中,搅拌成 4 g · L⁻¹的炭浆.于装有 200 mL 反应液的细口瓶中加入适量搅拌均匀的炭浆,放入 HZQ-X300 型恒温振荡器以 25 ℃,160 r · min⁻¹频率振荡,按一定时间间隔取样,样品过 0.22 μm 膜后采用高效液相色谱法进行分析.

1.3 2,4,6-TCP 分析方法

2,4,6-TCP 的浓度变化采用高效液相色谱仪(岛津 LC-2010AHT)测定;使用 Shim-pack VP-ODS 色谱柱(250.0 mm×4.6 mm);流动相为 V(甲醇):V(水(含质量分数为 1%的乙酸))=80:20;流动相流速 1.0 mL · min⁻¹;分析时间 10 min;柱温 40℃;检测波长 289 nm.

2 结果与讨论

2.1 粉末活性炭吸附 2,4,6-TCP

2.1.1 PAC 炭种选择

粉末活性炭因自身性质不同,会表现出不同的

吸附特性.试验采用投加煤质炭、竹质炭和椰壳炭 3 种粉末活性炭进行吸附试验,研究 PAC 炭种对吸附效果的影响.3 种 PAC 的投加量均为 20 mg · L⁻¹,2,4,6-TCP 初始质量浓度为 5 mg · L⁻¹,吸附时间为 2 h,试验结果见图 1.图中,ρ₀,ρ 分别为水中 2,4,6-TCP 的初始和不同时刻的质量浓度.由图 1 可知,竹质炭对 2,4,6-TCP 的吸附速率最快、去除率最高,其次为椰壳炭,最差为煤质炭.这主要是因为 3 种 PAC 中,竹质炭的比表面积最大(见表 1),对 2,4,6-TCP 具有良好的吸附效果,为处理 2,4,6-TCP 污染的最佳炭种.在实际处理过程中,应根据静态试验结果,优先选用吸附能力强的 PAC.

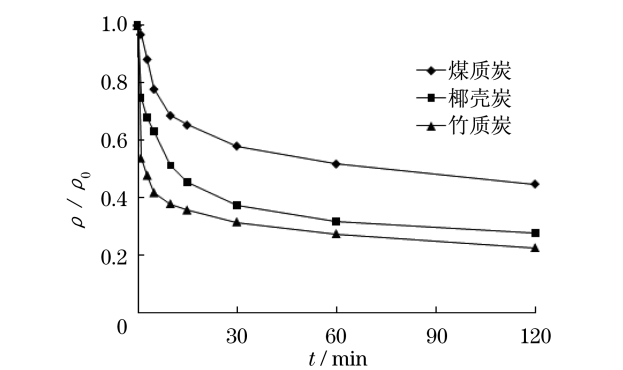


图 1 不同炭种对吸附 2,4,6-TCP 的影响
Fig.1 Effects of different carbon species on adsorption of 2,4,6-TCP

2.1.2 PAC 投加量确定

在相同质量浓度反应液中分别投加不同质量的竹质炭,考察 PAC 投加量对吸附 2,4,6-TCP 的影响,试验结果见图 2 和表 2.结果表明,随着 PAC 投加量的增加,2,4,6-TCP 的去除率提高,当 PAC 投加量达到 30 mg · L⁻¹时,反应 2 h 后 2,4,6-TCP 的去除率即可达到 90%以上,说明 PAC 可以有效去除三氯酚.但 PAC 吸附量随着 PAC 投加量增加而下降,PAC 投加量越大,其吸附容量利用越不充分.因此,在实际应用中,应根据水厂的 actual 水质情况,确定合理、经济的 PAC 投加量,使出水达标且尽可能充分利用 PAC 的吸附容量.

2.1.3 反应温度的影响

试验在恒温条件下进行,反应温度分别控制在 15,25,35 ℃,PAC 投加量范围为 2.5~50.0 mg · L⁻¹.图 3 为不同反应温度条件下,PAC 对 2,4,6-TCP 的去除效果.由图 3 可以看出,低温有利于吸附过程的进行,温度低,吸附容量大,去除效果好.在实际应用中,水温条件会对 PAC 吸附产生较大的影响.

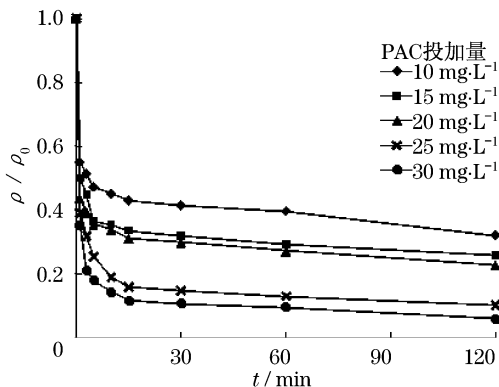


图 2 不同炭投加量对吸附 2,4,6-TCP 的影响
Fig.2 Effects of different carbon dosages on adsorption of 2,4,6-TCP

表 2 不同 PAC 投加量的吸附效果
Tab.2 Adsorption of 2,4,6-TCP under different PAC dosages

PAC 投加量/ (mg · L ⁻¹)	2,4,6-TCP 去除率/ %	PAC 吸附量/ (mg · mg ⁻¹)
10	64.17	0.32
15	74.11	0.25
20	77.59	0.19
25	84.70	0.17
30	91.10	0.15

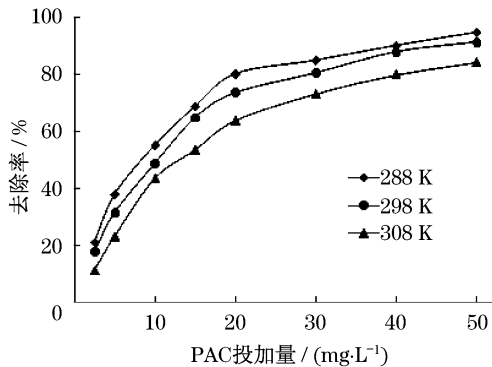


图 3 反应温度对 PAC 吸附 2,4,6-TCP 的影响
Fig.3 Effect of reaction temperature on adsorption of 2,4,6-TCP

2.1.4 影响因素主次分析

采用 3 因素 3 水平正交试验分析 PAC 炭种、投加量和温度对吸附效果的影响顺序,试验方案及结果见表 3.由表 3 数据可以看出,各因素对 2,4,6-TCP 去除率影响均较为显著,影响最大的是 PAC 投加量(极差 = 28.23),其次为 PAC 炭种(极差 = 18.27),影响最弱为温度(极差 = 15.43).因此在实际应用中应注重 PAC 投加量的合理控制,以求在保

证经济的同时达到最优去除效果.

表 3 粉末活性炭吸附 2,4,6-TCP 正交试验方案及方差分析
Tab.3 Testing program and analysis of variance on 2,4,6-TCP adsorbed by PAC

试验编号	炭种	PAC 投加量/ (mg · L ⁻¹)	温度/℃	2,4,6-TCP 去除率/%
1	竹质炭	10	15	64.17
2	竹质炭	20	25	77.59
3	竹质炭	30	35	77.09
4	煤质炭	10	25	38.36
5	煤质炭	20	35	49.73
6	煤质炭	30	15	75.96
7	椰壳炭	10	35	42.20
8	椰壳炭	20	15	75.18
9	椰壳炭	30	25	76.38
k_1	72.95	48.24	71.77	
k_2	54.68	67.50	64.11	
k_3	64.59	76.47	56.34	
极差	18.27	28.23	15.43	

注: k_1, k_2, k_3 分别为因素取第一水平、第二水平、第三水平时所得试验结果的算术平均值.

2.2 吸附等温线及吸附热力学

2.2.1 吸附等温线

将不同投加量的 PAC 加入到 2,4,6-TCP 反应液中,放入恒温摇床,振荡频率 160 r · min⁻¹,充分吸附 24 h 后测定水样中剩余 2,4,6-TCP 质量浓度,绘制吸附等温线,并用 Langmuir, Freundlich 和 Tempkin 模型进行拟合,3 种吸附等温线模型分别由式(1)~(3)表达,拟合参数见表 4.由表 4 数据可以看出, Freundlich 和 Tempkin 吸附等温模型能较好地描述所研究的吸附等温线.这可能是由于 Langmuir 模型假设吸附剂表面能量均一且忽略了吸附质分子之间的相互作用, Tempkin 模型考虑了吸附质之间的相互作用力, Freundlich 模型则认为吸附剂表面不均匀,且假定吸附热随覆盖度增加而呈指数下降^[6].活性炭表面的能量并不均一,且水中 2,4,6-TCP 之间必然存在一定的作用力,因此对于 PAC 吸附 2,4,6-TCP 的等温吸附过程, Freundlich 和 Tempkin 模型拟合较好,其中 Freundlich 模型最为符合(相关系数 $r > 0.98$).

$$q_e = \frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad (1)$$

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

$$q_e = \frac{RT}{z} (\ln A + \ln C_e) \quad (3)$$

式(1)~(3)中: q_e 为平衡吸附容量,即单位质量的活性炭所吸附污染物的质量, $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$; x 为吸附污染物的质量, mg ; m 为活性炭的用量, mg ; C_e 为液相的平衡质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_f , n 为 Freundlich 吸附等温线模型的常数; K_L , a_L 分别为 Langmuir 吸附等温线的常数; 最大吸附容量 $q_m = K_L/a_L$, $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$; A 为 Tempkin 常数; R 为气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为绝对温度, K ; z 为 Tempkin 等温线吸附热, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$.

表 4 2,4,6-TCP 的 PAC 吸附等温线模型参数
Tab.4 Isotherm model parameters for 2,4,6-TCP adsorption onto PAC

T/K	Langmuir 吸附等温线参数			Freundlich 吸附等温线参数			Tempkin 吸附等温线参数		
	$q_m/(\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1})$	$a_L/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	r	$K_f/(\text{mg}^{(1-1/n)} \cdot \text{L}^{1/n} \cdot \text{mg}^{-1})$	n	r	A	RT/z	r
288	0.634	0.436	0.944	0.184	1.710	0.989	5.320	0.125 1	0.948
298	0.554	0.374	0.966	0.147	1.648	0.995	4.034	0.115 5	0.970
308	0.391	0.358	0.976	0.102	1.623	0.981	3.022	0.092 6	0.983

2.2.2 吸附热力学

应用吉布斯方程及 van't Hoff 方程(见公式(4)~(5))计算温度对平衡吸附系数的影响,并得到 PAC 吸附 2,4,6-TCP 的热力学参数,包括吉布斯吸附自由能 ΔG 、吸附焓 ΔH 和吸附熵 ΔS .

$$\Delta G = -RT \ln K \tag{4}$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \tag{5}$$

$$\ln K = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \tag{6}$$

式(4)~(6)中: K 为热力学平衡常数(吸附系数),为吸附平衡时单位固体吸附污染物量 C_{Ae} 与液相平衡质量浓度 C_e 的比值.以 $\ln(C_{\text{Ae}}/C_e)$ 对 C_{Ae} 作线性相关直线拟合,其垂直轴截距即为 $\ln K$ ^[7]. K 随温度和吸附热而变,其关系可由公式(6)表示.

试验结果表明, $\ln K$ 与 $1/T$ 成线性关系: $\ln K = 3\,547/T - 6.479$ (相关系数 $r = 0.989$), 由斜率计算得到 $\Delta H = -29.49 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 根据吉布斯方程计算得出不同温度下的 ΔG 及 ΔS , 具体数据见表 5. 结果表明, 温度升高, K 减小, 且 ΔH 为负值, 表明在所研究的范围内吸附过程为放热过程, 降低温度有利于吸附, 与上文温度对 2,4,6-TCP 吸附的影响结果一致. Von Open B 等^[8]测定了各种作用力引起的吸附热的范围: 范德华力 $4 \sim 10 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 疏水作用力约 $5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 氢键结合力 $2 \sim 40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 配位基交换力约 $40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 偶极力 $2 \sim 29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 化学键力大于 $60 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. 由 ΔH 值 ($-29.49 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 可知, PAC 吸附 2,4,6-TCP 过程中主要以物理吸附为主, 不存在化学键力, 可能存在其他的相互作用力. ΔG 为负值且受温度的影响不大, 体现了 PAC 对 2,4,6-TCP 的吸附过程是自发

进行的. 吸附反应包括 PAC 表面溶剂水分子释放及 2,4,6-TCP 吸附两个过程, 前者为无序度增加过程, 熵值增加; 而后者为有序度增加过程, 熵值减少. ΔS 为负值说明 PAC 吸附 2,4,6-TCP 是有序度增加的过程, 2,4,6-TCP 在 PAC 表面的吸附为反应主导过程.

表 5 不同温度下 PAC 吸附 2,4,6-TCP 的
吸附系数及热力学参数

Tab.5 Adsorption coefficient and thermodynamic
parameters for 2,4,6-TCP adsorption onto
PAC under different temperatures

T/K	K	$\Delta G/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S/(\text{J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1})$
288	331.95	-13.90	-29.49	-54.13
298	242.26	-13.60	-29.49	-53.32
308	148.86	-12.81	-29.49	-54.16

2.3 吸附速率和吸附动力学

本试验利用吸附动力学描述 PAC 吸附 2,4,6-TCP 的速率快慢, 通过动力学模型对数据的拟合, 研究其吸附机理. 由图 1 和图 2 可见, PAC 对 2,4,6-TCP 的快速吸附期为前 20 min, 可达 80% 以上的吸附容量. 说明 PAC 在较短时间内即可对 2,4,6-TCP 达到很好的吸附效果, 这也说明利用 PAC 吸附处理 2,4,6-TCP 污染是可行的.

分别对不同 PAC 炭种对 2,4,6-TCP 的吸附速率曲线进行拟一级、拟二级和颗粒内扩散动力学模型拟合, 具体参数见表 6. 拟一级、拟二级和颗粒内扩散动力学模型可分别用公式(7)~(9)表示^[9].

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \tag{7}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \tag{8}$$

$$q_t = k_p t^{0.5} + L \tag{9}$$

式(7)~(9)中: q_t 为 t 时刻的固相浓度, $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$; k_1 为拟一级动力学模型的速率常数, min^{-1} ; k_2 为拟二级动力学模型的速率常数, $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$; k_p 为颗粒内扩散速率常数, $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min}^{0.5})^{-1}$; L 为截距.

比较表 6 中各动力学模型拟合相关系数 r 可知,拟二级动力学模型能很好地描述 PAC 对 2,4,6-TCP 的吸附行为. 因为拟二级模型包含了吸附的所有过程,如外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内扩散等^[10],更真实全面地反映了 2,4,6-TCP 在 PAC 上的吸附机理.

表 6 粉末活性炭吸附 2,4,6-TCP 的动力学参数
Tab.6 Kinetic parameters for 2,4,6-TCP adsorption onto PAC

反应条件		拟一级动力学		拟二级动力学		颗粒内扩散模型	
炭种	投加量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$k_1/(\text{min}^{-1})$	r	$k_2/(\text{mg} \cdot(\text{mg} \cdot \text{min})^{-1})$	r	$k_p/(\text{mg} \cdot(\text{mg} \cdot \text{min}^{0.5})^{-1})$	r
竹质炭	20	0.959	0.947	2.138	0.999	0.007 2	0.921
煤质炭	20	0.090	0.986	0.526	0.997	0.012 2	0.907
椰壳炭	20	0.182	0.949	1.178	0.999	0.011 8	0.908

2.4 预氧化与 PAC 联用

2.4.1 PAC 与高锰酸钾联用

试验采用高锰酸钾预氧化与 PAC 联用对 2,4,6-TCP 进行吸附去除,去除效果见图 4. 由图 4 可以看出,PAC 与高锰酸钾联用可以明显提高 2,4,6-TCP 的吸附效果,并且随着高锰酸钾投加量增加,2,4,6-TCP 的去除率提高. 这可能是由于少量高锰酸钾可以增加 PAC 的吸附量,可使有机物在 PAC 表面发生氧化聚合作用,并且高锰酸钾在氧化有机物的同时生成水合二氧化锰,该物质具有一定的氧化、吸附和催化作用,从而可以提高 PAC 对 2,4,6-TCP 的吸附效果^[11].

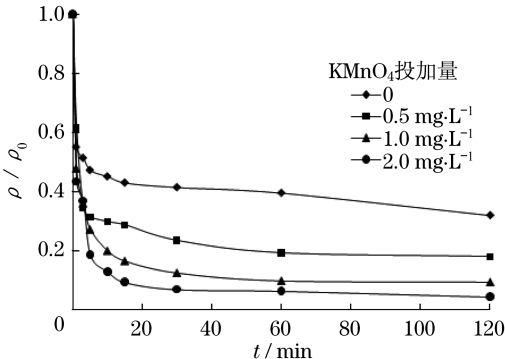


图 4 PAC 与高锰酸钾联用对 2,4,6-TCP 的去除效果(PAC 投加量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Fig.4 Removal effect of 2,4,6-TCP by PAC associated with potassium permanganate(PAC dosage: $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

试验还通过改变高锰酸钾和 PAC 投加顺序确定两者的相互影响程度. 当 PAC 和高锰酸钾投加量分别为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,先投加 PAC 的 2,4,6-TCP 去除率最高,反应 2 h 后达到 93.98%,

其次为高锰酸钾和 PAC 同时加,最差为先投加高锰酸钾,去除率分别为 91.87% 和 87.42%. 原因可能是 PAC 吸附一定时间后,一部分 2,4,6-TCP 已被去除,剩余的再与高锰酸钾反应,协同作用更加明显. 高锰酸钾先投加时,2,4,6-TCP 先与高锰酸钾发生氧化反应. 研究表明^[12],高锰酸钾在还原性物质(如 PAC)存在时才能快速生成水合二氧化锰. 因此当高锰酸钾先投加时,单纯预氧化阶段生成的水合二氧化锰较少,催化促进作用不明显.

2.4.2 PAC 与预氯化联用

图 5 为 PAC 与预氯化联用对 2,4,6-TCP 的吸附效果. 由图 5 可知,PAC 与预氯化联用可促进 2,4,6-TCP 的去除,随着次氯酸钠投加量的增加,2,4,6-TCP 的去除率下降,但去除率高于单独 PAC 吸附. 本次试验中,当次氯酸钠投加量为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,2,4,6-TCP 的去除率最高. 有研究表明^[13],

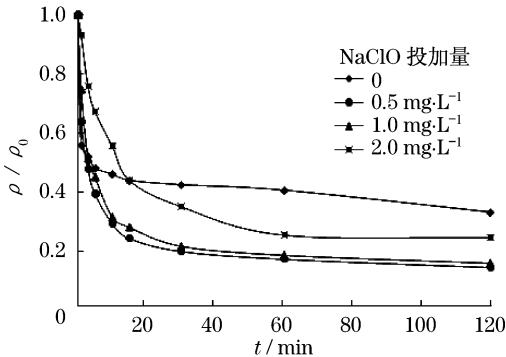


图 5 PAC 与预氯化联用对 2,4,6-TCP 的去除效果(PAC 投加量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Fig.5 Removal effect of 2,4,6-TCP by PAC associated with pre-chlorination (PAC dosage: $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

粉末活性炭与氯化联用工艺用于去除酚类物质时, PAC 可以催化 HOCl 在其表面产生羟基自由基, 促进物质的去除效果. 此外, 氯可以改变活性炭表面的化学结构, 使得极性功能团增加, 降低活性炭对污染物的吸附效果^[14]. 因此, 次氯酸钠投加量较小时, 2, 4, 6-TCP 的去除率有所增加, 但当次氯酸钠投加量增大时, PAC 表面化学结构发生较大的改变^[13-14], 影响其对 2, 4, 6-TCP 的吸附容量, 使吸附效果下降.

3 结论

(1) PAC 可以有效快速吸附水中的 2, 4, 6-TCP, PAC 炭种、投加量和温度对吸附效果均有较显著的影响, 3 种 PAC 的吸附效果为竹质炭 > 椰壳炭 > 煤质炭. PAC 投加量增加, 吸附速率变快, 吸附效果提高. 低温条件更利于 PAC 吸附 2, 4, 6-TCP. 因素主次分析结果为 PAC 投加量为主要影响因素, 其次为 PAC 炭种, 最弱因素为温度. 实际应用中应根据水质情况, 获取合理经济的 PAC 投加量.

(2) Freundlich 模型能更好地描述 2, 4, 6-TCP 在 PAC 上的吸附等温过程, 拟二级动力学模型能很好地描述 PAC 对 2, 4, 6-TCP 的吸附行为. 热力学分析说明 PAC 对 2, 4, 6-TCP 的吸附为自发放热过程, 温度升高, 吸附量减少.

(3) PAC 与高锰酸钾联用对 2, 4, 6-TCP 的去除具有明显的协同作用, 随着高锰酸钾投加的增加, 2, 4, 6-TCP 的吸附效果提高; PAC 与预氯化联用可以促进 2, 4, 6-TCP 的去除, 随着次氯酸钠投加量的增加, 2, 4, 6-TCP 的去除率下降.

参考文献:

- [1] Goretti D D, María C G M, Carmen B L, et al. Heterogeneous catalytic 2, 4, 6-trichlorophenol degradation at hemin-acrylic copolymer[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2010, 96(1/2): 51.
- [2] Lua A C, Jia Q P. Adsorption of phenol by oil-palm-shell activated carbons in a fixed bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 150 (2/3): 455.
- [3] Ahmaruzzaman M. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: a review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2008, 143(112): 48.
- [4] Marc P T, Veronica G M, Miguel A B, et al. Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2004, 47(4): 219.
- [5] 张晓建. 松花江和北江水污染事件中的城市供水应急处理技术[J]. *给水排水*, 2006, 32(6): 6.
ZHANG Xiaojian. Emergent drinking water treatment in water pollution accidents in Songhuajiang River and Beijiang River [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, 32(6): 6.
- [6] 卢宁, 高乃云, 黄鑫. 水中高氯酸根的颗粒活性炭吸附过程及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1572.
LU Ning, GAO Naiyun, HUANG Xin. Adsorption of perchlorate in water by granular activated carbon and impact factors analysis[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1572.
- [7] Tan A W, Hameed B H, Ahmad A L. Equilibrium and kinetic studies on basic dye adsorption by oil palm fibre activated carbon [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 127(123): 111.
- [8] Von Open B, Kordel W, Klein W. Sorption of nonpolar and polar compounds to soils: processes measurement and experience with the applicability of the modified OECD-guideline [J]. *Chemosphere*, 1991, 22(3/4): 285.
- [9] Kavitha D, Namasivayam C. Experimental and kinetic studies on methylene blue adsorption by coir pith carbon[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1): 14.
- [10] Chang M Y, Juang R S. Adsorption of tannic acid, humic acid, and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2004, 278(1): 18.
- [11] 姜成春, 马军, 李圭白. 高锰酸钾与粉末活性炭联用去除水中微量有机污染物[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2000, 33(6): 45.
JIANG Chengchun, MA Jun, LI Guibai. Study on the effectiveness of potassium permanganate in combination with powdered activated carbon for the removal of micropollutants from water [J]. *Journal of Harbin University of C E & Architecture*, 2000, 33(6): 45.
- [12] 李圭白, 杨艳玲, 马军, 等. 高锰酸钾去除天然水中微量有机污染物机理探讨[J]. *大连铁道学院学报*, 1998, 19(2): 1.
LI Guibai, YANG Yanling, MA Jun, et al. Research on mechanism of removal of microorganic pollutants in natural water by permanganate[J]. *Journal of Dalian Railway Institute*, 1998, 19(2): 1.
- [13] Jackson D E, Larson R A, Snoeyink V L. Reaction of chlorine and chlorine dioxide with resorcinol in aqueous solution and adsorbed on granular activated carbon [J]. *Water Research*, 1990, 24(4): 427.
- [14] 李学艳, 沈吉敏, 马军, 等. 预氯化对粉末活性炭吸附水中 2-MIB 的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(6): 874.
LI Xueyan, SHEN Jimin, MA Jun, et al. Influence of prechlorination on powdered activated carbon adsorption of 2-MIB from water[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(6): 874.