

张小璇, 任源, 贺明和, 等. 2009 污水处理厂尾水中有机氯化物的活性炭吸附深度处理 [J]. 环境科学学报, 29(3): 548– 554
Zhang X X, Ren Y, He M H, *et al*. 2009. Adsorption of chlorinated organic compounds in effluents from wastewater treatment plants with powdered activated carbon[J]. A cta Scientiae C ircumstantiae, 29(3): 548– 554

污水处理厂尾水中有机氯化物的活性炭吸附深度处理

张小璇¹, 任源², 贺明和², 张伏中², 彭丽花², 韦朝海^{1, 2 *}, 朱伍坤³, 曾渭初³, 张伟⁴

- 1 华南理工大学化学与化工学院, 广州 510640
- 2 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006
- 3 东莞市环境保护技术服务中心, 东莞 523011
- 4 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

收稿日期: 2008-05-29 录用日期: 2009-01-13

摘要: 考虑到经氯消毒的城市污水处理厂尾水中可能存在的副产物, 选择广东省东莞市两个典型污水处理厂尾水为研究对象, 采用 GC-MS 分析其中的有机氯化物, 并以某种粉末活性炭进行吸附深度处理及考察其效果. 分析结果表明, 尾水中存在二氯甲烷、三氯甲烷、四氯化碳、二氯一溴甲烷、二溴一氯甲烷、二氯硝基甲烷等多种有机氯化物, 其中, 三氯甲烷和四氯化碳在所取样品中都存在且相对含量之和超过 80%; 吸附结果表明, 所选择的活性炭样在 1 g L⁻¹投加量下, 尾水中未检出有机氯化物. 说明适宜的活性炭能够应用于污水处理厂尾水中多种有机氯化物的分离去除.
关键词: 有机氯化物; 粉末活性炭; 吸附; 深度处理

文章编号: 0253-2468 (2009) 03-548-07 中图分类号: X 703 文献标识码: A

Adsorption of chlorinated organic compounds in effluents from wastewater treatment plants with powdered activated carbon

ZHANG Xiaoxuan¹, REN Yuan², HE Minghe², ZHANG Fuzhong², PENG Lihua², WEI Chaohai^{1, 2 *}, ZHU Wukun³, ZENG Weichu³, ZHANG Wei⁴

- 1 College of Chemistry and Chemical Engineering South China University of Technology, Guangzhou 510640
- 2 College of Environmental Science and Engineering South China University of Technology, Guangzhou 510006
- 3 Dongguan Environmental Protection Technical Service Center, Dongguan 523011
- 4 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640

Received 29 May 2008 accepted 13 January 2009

Abstract The effluents from two typical wastewater treatment plants in Dongguan City in Guangdong Province were studied to measure the byproducts produced in chlorination of municipal wastewater. Chlorinated Organic Compounds (COCs) in the effluents were analyzed by GC-MS before and after adsorption onto selected Powdered Activated Carbon (PAC). The analysis showed that the raw effluents contain various COCs such as dichloromethane, chloroform, carbon tetrachloride, bromodichloromethane, dibromochloromethane and nitrodichloromethane, and the total content of chloroform and carbon tetrachloride found in all samples exceeds 80% of the COCs. The PAC adsorption results indicate that COCs are not detected in the effluent after adsorption by 1 g L⁻¹ of PAC. Therefore, suitable PAC adsorbents can be used to remove COCs in the effluents from the wastewater treatment plants.
Keywords chlorinated organic compounds; powdered activated carbon; adsorption; advanced treatment

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 20777018); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2006AA06Z378); 广东省科技计划项目 (No. 2007B030103011); 2007 年度东莞市科技计划项目

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20777018), the Hi-Tech Research and Development Program of China (No. 2006AA06Z378), the Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (No. 2007B030103011) and the Science and Technology Plan Project of Dongguan City (2007)

作者简介: 张小璇 (1976—), 女, 博士研究生, E-mail: zhxx1976@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: cecwhe@scut.edu.cn; Tel (Fax): 020-39380588

Biography: ZHANG Xiaoxuan (1976—), female, Ph.D. candidate, E-mail: zhxx1976@163.com; * **Corresponding author:** E-mail: cecwhe@scut.edu.cn; Tel (Fax): 020-39380588

1 引言 (Introduction)

《斯德哥尔摩公约》中优先控制的 12 种持久性有机污染物全部为有机氯化物, 欧共体也将卤代烃和在环境中能形成卤代烃的物质排在黑名单的首位, 说明集合了氯代脂肪烃、氯代芳香烃及其衍生物的持久性有机氯化物 (Persistent Chlorinated organic compounds PCOCs) 的“致癌、致畸、致突变”效应仍然是水处理界关注的热点. 已经证明的三卤甲烷对哺乳动物的神经系统、生殖系统、肝、肾都有毒害作用 (Gopal *et al.*, 2007) 成为有机氯化物环境生态学研究的一个重要案例.

自然环境中的有机氯化物主要来源于自来水厂和城市污水处理厂的氯消毒副产物及工农业生产中的直接排放. 据 2006 年的统计, 我国共有烧碱生产企业 220 多家, 氯气产量约为 1374 万 t 主要用于生产聚氯乙烯、环氧丙烷、甲烷氯化物 (一氯甲烷、二氯甲烷、三氯甲烷和四氯化碳) 等产品或直接使用 (薛祖源, 2007), 在生产和使用过程中不可避免地将含有机氯化物的废水排入环境. 污(废)水处理中的消毒或脱色是氯产品使用的重要领域, 若以 2006 年全国废水排放总量 (536.8 亿 t) 其中广东省废水排放总量为 65.4 亿 t 生活污水为 42 亿 t) (中华人民共和国国家统计局, 2008) 为基数, 假设这些废水排放前需投氯 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 则全国每年需要 536800 t 氯, 环境所接纳的有机氯化物总量将是惊人的. 由于氯消毒后会产生大量三卤甲烷、卤代乙酸等副产物, 其浓度和种类因废水性质不同而变化 (Yang *et al.*, 2005), 因此, 对进入环境的有机氯化物物种及数量的评估尚有困难. 六六六 (HCHs) 和滴滴涕 (DDTs) 等有机氯农药 (OCPs) 虽然禁用多年, 但仍广泛存在于环境中, HCHs 和 DDTs 在广东省典型区域农业土壤中的检出率分别为 95.9% 和 95.7%, 平均浓度分别为 $5.90 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $10.18 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (杨国义等, 2008), 珠江干流河口洪、枯季水体中 OCPs 浓度分别为 $9.7 \sim 26.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $41.7 \sim 122.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (杨清书等, 2005), 澳门水域枯季水体中 OCPs 浓度为 $25.1 \sim 67.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (杨清书等, 2004).

目前, 针对饮用水消毒副产物削减的研究主要包括去除水源水中的前体物 (Tan *et al.*, 2005)、改变消毒剂与改进消毒工艺 (郑致远等, 2007) 以及分离消毒副产物 3 个方面, 针对废水中有机氯化物的

研究则较少. Q 等 (2004) 发现废水氯消毒过程所产生卤代乙酸的量与消毒剂的用量、废水的特性及处理工艺有关; 在研究废水氯消毒生成三卤甲烷和卤代乙酸的过程中, Yang 等 (2005) 发现生成物浓度在加氯折点前随加氯量增加而缓慢增加, 在加氯折点后随加氯量增加而快速增大, 废水中存在高浓度溴离子时, 含溴的副产物种类较多. 虽然可通过优化消毒工艺或选择氯的形态减少副产物的形成, 但由于废水中有机物组成的复杂性, 不可避免地形成各类有机氯化物并进入环境, 因此, 针对含有机氯化物的尾水的深度净化显得非常重要.

广东省东莞市以服装、纺织、造纸、食品饮料、化工制品、家具、电子信息、电器机械等产业为工业的支柱 (邓文浩, 2006), 2007 年全市 GDP 为 3151 亿元, 约占广东省 GDP 的 10% (广东省统计局, 2008). 2006 年全市工业废水排放量约为 2.4 亿 t 是广东省工业废水排放量最多的城市; 生活污水排放量约为 4.7 亿 t 仅次于广州、深圳, 是广东省第三大生活污水排放城市, 占广东省生活污水排放总量的 11% (广东省统计局, 2008). 东莞市城区污水处理厂位于南城区石鼓村水洲, 收集莞城区、南城区、东城区全部和万江区南部的生活污水及这四个区的清掏粪便, 废水处理消毒后排入厚街水道 (东江水务有限公司, 2008). 樟木头污水处理厂位于樟木头镇柏地村, 收集樟木头全镇生活污水. 本文以东莞市城区污水处理厂及樟木头污水处理厂作为研究对象, 在水质常规监测数据基础上重点分析尾水中有机氯化物的种类分布和相对含量, 讨论氯消毒副产物形成机理、浓度分布与活性炭的吸附规律, 评价粉末活性炭吸附去除有机氯化物的能力.

2 实验部分 (Materials and methods)

2.1 水样来源

水样取自东莞市两个典型的污水处理厂 (东莞市城区污水处理厂及樟木头污水处理厂), 其中样品 1 和样品 2 为 2007 年 10 月 17 日和 23 日东莞城区污水处理厂尾水, 样品 3 和样品 4 为 2007 年 10 月 16 日和 22 日樟木头污水处理厂尾水, 样品在 4℃ 下密封保存.

2.2 材料和仪器

在若干选择性研究工作基础上取广东鸿生活性炭厂的 300# 粉末活性炭作为研究炭样 (活性炭选择实验参见文献 (张小璇等, 2007)), 用去离子水浸

泡 2 h 去除溶解性杂质,在 105℃下烘 24 h 冷却后密封于试剂瓶中备用.常规化学试剂均为市售分析纯.主要仪器有江苏太仓 THZ-C-1 台式冷冻恒温振荡器、德国 Lique TOC 总有机碳分析仪、TEKMAR XPT 吹扫捕集仪、日本岛津 GCMS-QP2010Plus

2 3 实验方法

水样经简单沉降过滤后分析各项常规水质指标.样品 1~4 用活性炭吸附处理:取 250 mg 粉末活性炭加入装有 250 mL 水样的 500 mL 锥形瓶中,在 25℃条件下以 120 r min⁻¹ 的速率恒温振荡 4 h,取吸附前后的水样各 200 mL,过滤后经吹扫捕集做 GC-MS 分析.

2 4 分析方法

COD、BOD、色度、pH、SS 均参照《水和废水监测分析方法》测定(国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会,2002).总有机碳由 TOC 分析仪测定.吹扫捕集条件:以流量为 40 mL·min⁻¹ 的氮气吹扫水

样 11 min 用 Vocab3000 型捕集管捕集挥发性有机物,然后在 250℃的条件下解析 1.5 min,在 270℃下烘烤 5 min GC-MS 分析条件:色谱柱 RTX-1ms(30 m×0.25 mm id×0.25 μm film);升温程序为在 45℃下保持 5 min 后以 25℃·min⁻¹ 的速率升至 250℃并保持 5 min 进样口温度为 250℃,分流比 10:1,柱流量为 1.2 mL·min⁻¹;接口温度为 230℃,离子源温度为 200℃,数据采集模式为 scan(*m/z* 29~450),EM 电压为 0.80 kV.

3 实验结果 (Results)

3 1 污水处理厂尾水中污染物的考察结果

表 1 为东莞城区污水处理厂和樟木头污水处理 厂 2006 05~2007 10 常规水质指标监测数据的统计值.表中数据表明,两个污水处理厂尾水中 COD 的平均值均大于 30 mg L⁻¹.样品 1~4 的 TOC 测定值分别为 22.84、23.18、24.72 和 24.65 mg L⁻¹.

表 1 2006 05~2007 10 污水处理厂水质监测数据的统计值
Table 1 Qualities of effluents from wastewater treatment plants in 2006 05~2007 10

指标	pH	COD / (mg L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg L ⁻¹)	色度 倍	SS/ (mg L ⁻¹)
一级标准 B 标准 ¹⁾	6~9	60	20	30	20
东莞城区污水处理厂尾水	5.50~7.79(7) ²⁾	15.6~66.7(35)	5.8~10.6(8)	5~20(12)	9~18(12)
樟木头污水处理厂尾水	5.00~7.00(6)	17.8~62.1(33)	5.0~9.6(7)	5~20(12)	2~10(5)

注: ¹⁾ 国标 GB18918-2002 ²⁾ 括号内为平均值.

3 2 样品中挥发性有机物的分析

采集所述的典型污水处理厂尾水水样,对样品进行吹扫捕集后做 GC-MS 分析以调查尾水中有机氯化物的浓度与分布,结果如图 1a 示,将检出的有机物列入表 2 中. GC-MS 分析结果表明,污水处理厂尾水中存在有机氯化物,其中三氯甲烷和四氯化碳在 4 个样品中都有检出且相对含量较高,两者之和大于 80%.

针对污水处理厂尾水中出现的有机氯化物,借

鉴笔者曾以几种活性炭处理焦化废水尾水时获知的广东鸿生活性炭厂的 300# 粉末活性炭在 TOC 浓度为 40.0~60.0 mg L⁻¹ 时,投加 1 g L⁻¹ 的该活性炭,吸附容量可达 (37.2±7.8) mg·g⁻¹,而且发现其对卤化物有较好的吸附效果(张小璇等,2007)的相关工作,选择该活性炭作为尾水深度净化的吸附剂.吸附前后水样的 GC-MS 结果如图 1 所示,吸附前水样中检出 6 种有机氯化物,而吸附后未检出任何挥发性有机物,将数据列入表 2 中.

表 2 活性炭吸附前后水样中的有机物种类和相对含量
Table 2 Kinds and relative contents of organic compounds in effluents before and after treatment with activated carbon

名称	吸附前相对含量				吸附后相对含量
	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 1~4
甲苯	0.4%	—	2.1%	—	—
二甲苯	—	—	2.9%	—	—
二氯甲烷	15.3%	—	—	53.7%	—
三氯甲烷	62.7%	90.0%	79.3%	73.3%	—
四氯化碳	20.3%	6.6%	12.3%	13.7%	—
二氯一溴甲烷	0.5%	1.3%	—	1.2%	—
二溴一氯甲烷	0.8%	2.1%	—	1.7%	—
二氯硝基甲烷	—	—	3.4%	6.4%	—

注: “—”表示未检出.

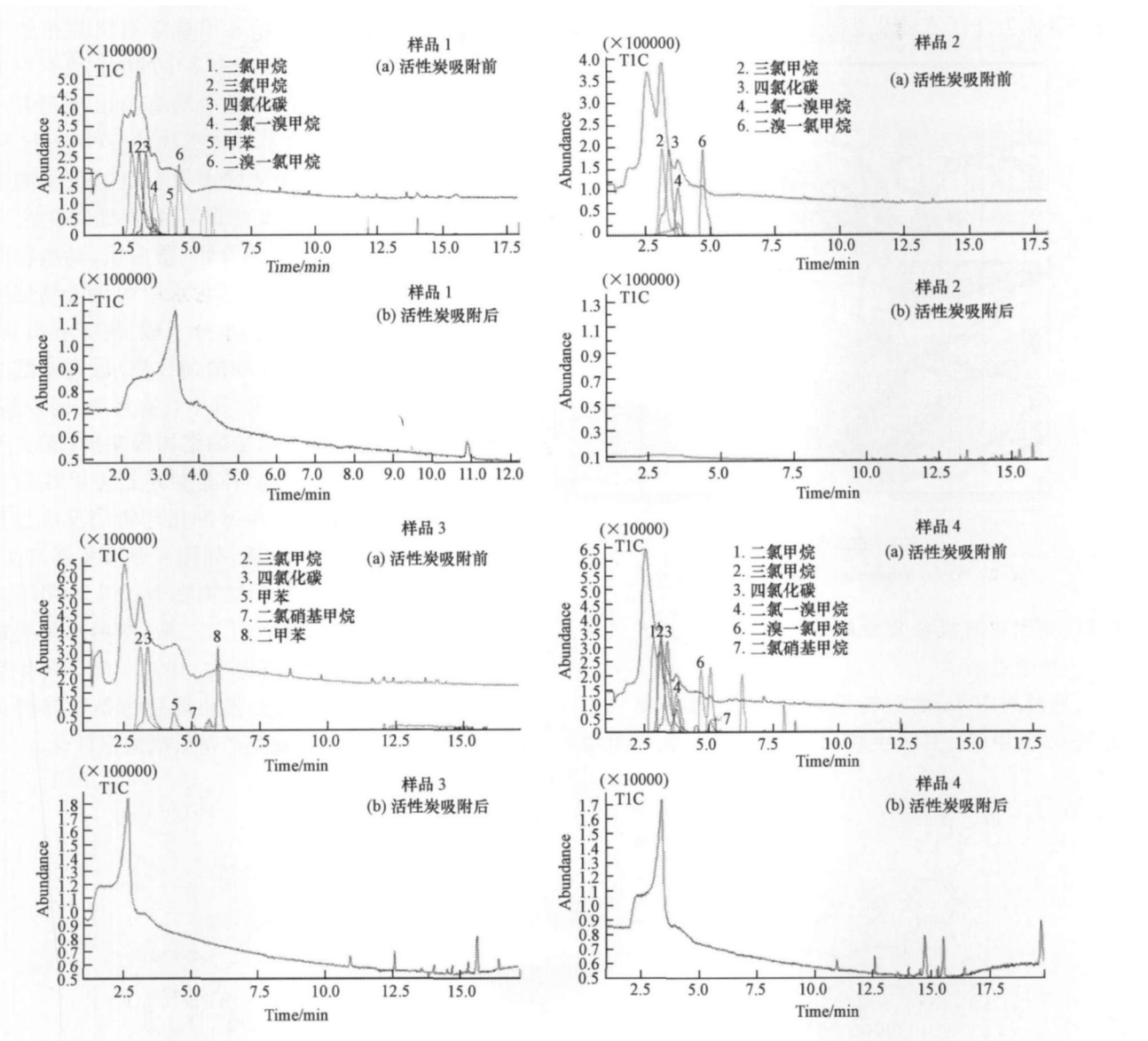


图 1 样品的 TCE 图

Fig 1 TCE chromatogram of samples (1 dichloromethane 2 chloroform 3 carbon tetrachloride 4 bromodichloromethane 5 toluene 6 dibromochloromethane 7 nitrodichloromethane 8 xylene)

4 讨论 (Discussion)

4.1 污水处理厂尾水中污染物的影响

表 1 中的数据显示, 2006.05~2007.10 东莞城区污水处理厂和樟木头污水处理厂尾水中 COD 的平均值均大于 30 mg L^{-1} , 若 2006 年东莞市的 $4.7 \times 10^8\text{ t}$ 生活污水以同等水平达标排放, 则有 14100 t COD 排入水体环境. 以样品中 TOC 的最小浓度 22.84 mg L^{-1} 计算, 仍有 10734.8 t 有机碳随尾水进入河流. 由于 COD 和 TOC 浓度反映了水体中氯消毒副产物前体物的量 (Kin et al, 2002), 可以判断经氯消毒后尾水中三氯甲烷等有机氯化物的存在是河流水体中本底值的主要贡献.

东莞市废水接纳水体最终进入东江, 流经狮子洋、虎门进入伶仃洋 (见图 2). 因为海水水质 COD 的标准值是以 KMnO_4 为氧化剂, 与污水处理厂测定的 COD_C 没有可比性, 所以采用 TOC 指标衡量东莞市生活污水排放对珠江口水质的影响. 1997 年枯水期测得伶仃洋水域的 TOC 浓度为 3.16 mg L^{-1} , 而伶仃洋的年平均径流量为 1800 亿 m^3 , 其中, 枯水期径流量仅占 20%, 却接收了东莞市全年 50% 的废水量 (林洪瑛和韩舞鹰, 2001), 以此计算, 东莞市排放的生活污水可使伶仃洋的 TOC 浓度增加 0.06 mg L^{-1} , 在枯水期则增加了 0.15 mg L^{-1} . 由于陆源污染使珠江口呈由东南部向北部水域污染物浓度逐渐递增的趋势 (杨美兰等, 2005), 所以从源头控

制污染成为珠江流域及近海水质改善的关键。

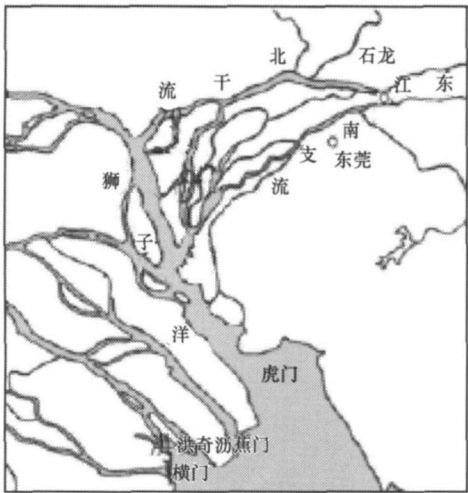


图 2 东江水系图

Fig 2 Water system map of the Dongjiang River

4 2 尾水中有机氯化物的形成机理及活性炭吸附能力分析

通过对图 1a的分析可知, 污水处理厂尾水中存在二氯甲烷、三氯甲烷、四氯化碳、二氯一溴甲

烷、二溴一氯甲烷、二氯硝基甲烷等有机氯化物和甲苯、二甲苯等污染物. 比较表 2中的数据发现三氯甲烷和四氯化碳在所取样品中均有检出且两者相对含量之和占尾水中挥发性有机物的 80% 以上, 可考虑检测两者浓度来评估尾水中有机氯化物的去除效果. 由于这两个污水处理厂主要处理生活污水, 其中的污染物有碳水化合物、蛋白质、动植物脂肪、尿素、合成洗涤剂等, 生活污水中的污染物经生物作用后还可产生腐殖酸、小分子酸、酮等有机物, 这些有机物成为有机氯化物的前体物. 以腐殖酸为例, 其模型结构如图 3所示, 其中含有羟基、酚羟基、醇羟基、羧基、羰基和间苯二酚结构等基团 (霍夫里特等, 2004). 一般认为, 氯消毒生成三卤甲烷的机理有两种, 第一是用氯与甲基酮化合物的反应过程说明三卤甲烷的生成过程, 如图 4所示 (李君文, 1994); 第二认为间苯二酚结构在 NaOCl作用下先生成中间产物 2 4 6三氯间苯二酚, 然后水解生成三氯甲烷, 如图 5所示 (李君文, 1994). 实际的生活污水和工业废水经不同工艺处理后污染物降解产物复杂多变, 导致了消毒副产物形成的多样性.

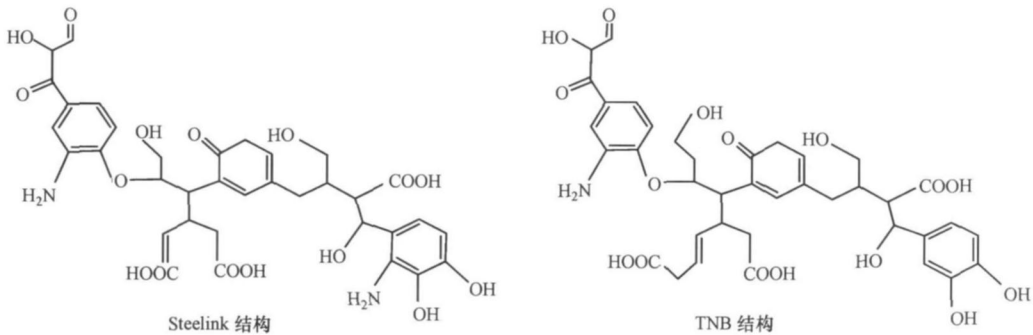


图 3 腐殖酸的模型结构

Fig. 3 Model structures of humic acid

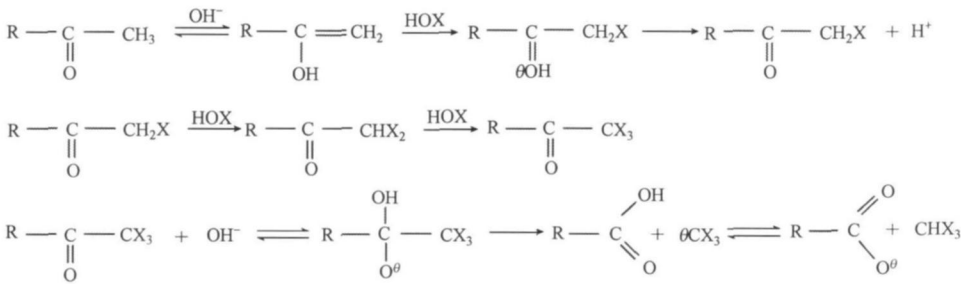


图 4 THMs 形成的经典反应途径

Fig. 4 Classical reaction pathway of THMs formation

对比水样经广东鸿生活性炭厂的 300[#]粉末活性炭吸附前后的结果(图 1)可以看出,经 1 g L^{-1} 的该活性炭吸附后尾水中未检出任何挥发性有机物,说明该活性炭可以有效地吸附去除尾水中检出的有机氯化物.表 1 中的数据显示两个污水处理厂尾水的 pH 值在 5~8 之间,使活性炭表面的羧基、酚

羟基等含氧基团保持电中性状态,有利于三氯甲烷、四氯化碳等弱极性和非极性有机氯化物的吸附(张小璇等, 2007).尾水中检出的三氯甲烷、四氯化碳等有机氯化物分子小,容易进入活性炭的微孔中,可充分利用活性炭内部的活性位点也是吸附效果明显的一个原因.

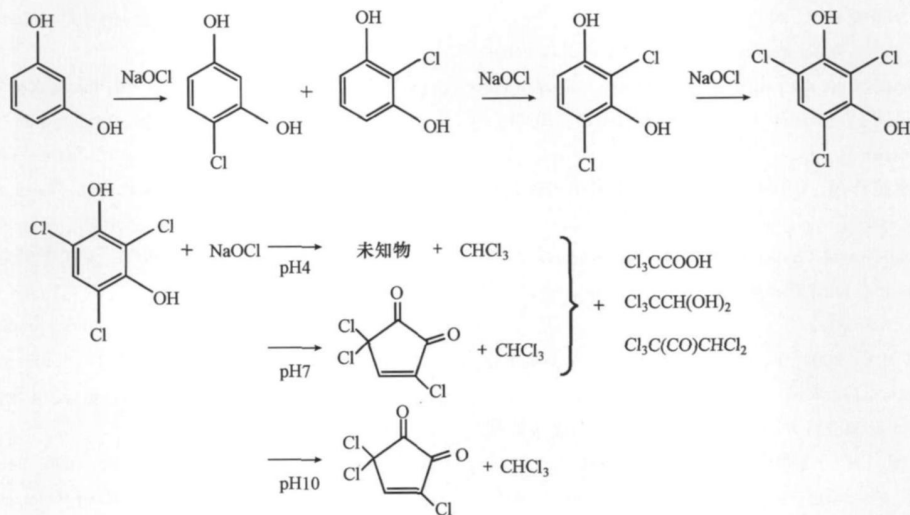


图 5 间苯二酚的氯化反应步骤

Fig 5 Reaction steps in the chlorination of resorcinol

5 结语 (Conclusions)

针对东莞市两个典型污水处理厂尾水中有机氯化物存在与分布的考察,明确了二氯甲烷、三氯甲烷、四氯化碳、二氯一溴甲烷、二溴一氯甲烷、二氯硝基甲烷为主要存在形式的物种;发现三氯甲烷和四氯化碳的相对含量之和占尾水中有机氯化物的 80% 以上,可考虑检测两者浓度来评估尾水中有机氯化物的去除效果;选择广东鸿生活性炭厂的 300[#]粉末活性炭作为吸附剂在 1 g L^{-1} 的投加量条件下对水样进行吸附处理,反应 4 h 后尾水中未检出有机氯化物,且在自然尾水 pH 值范围内表现出高的吸附能力.有必要考虑基于不同有机氯化物的生成机理来选择具有更高吸附容量的活性炭品种及其再生方法.

责任作者简介: 韦朝海 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为水污染控制理论与技术, 主要兴趣为废水处理的流态化过程及有毒难降解有机污染物的高级氧化过程, 曾主持国家、省部级科研项目 22 项以及焦化废水、印染废水、化工废水、制药废水等环境工程技术开发与应用项目 30 余项, 发表论文 190 余篇, 有 4 项通过省部级鉴定的科研成果

果并获奖.

参考文献 (References):

- 邓文浩. 东莞支柱产业快速增长 [OL]. 2006-07-31. http://www.sun0769.com/news/dongguan/radionews/20060731_124310.htm
- Deng W H. Rapid growth of Dongguan pillar industries [OL]. 2006-07-31. http://www.sun0769.com/news/dongguan/radionews/20060731_124310.htm (in Chinese)
- 东江水务有限公司. 厂简介和工艺流程 [OL]. 2008-02-20. <http://www.dgws.com.cn>
- Dongjiang water supplies company, Ltd. Introduction and process flow of Dongguan City wastewater plant [OL]. 2008-02-20. <http://www.dgws.com.cn> (in Chinese)
- Gopal K, Tripathy S S, Bersillon J L, et al. 2007. Chlorination byproducts: their toxicodynamics and removal from drinking water [J]. Journal of Hazardous Materials 140: 1—6
- 广东省统计局. 广东统计年鉴 2007 [OL]. 2008-4-27. http://www.gdstats.gov.cn/tjnj/table/19/c19_12.htm
- Guangdong provincial bureau of statistics. Guangdong statistical yearbook 2007 [OL]. 2008-4-27. http://www.gdstats.gov.cn/tjnj/table/19/c19_12.htm (in Chinese)
- 霍夫里特 M, 斯泰因比歇尔 A 编, 郭圣荣 译. 2004. 生物高分子 (I) [M]. 北京: 化学工业出版社, 294—304
- Hofrichter M, Steinbüchel A, Guo S R. 2004. Biopolymers (I) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 294—304 (in Chinese)

- Kim J, Chung Y, Shin D, *et al*. 2002. Chlorination by-products in surface water treatment process [J]. *Desalination*, 151: 1—9
- 李君文. 1994. 氯化消毒时三卤甲烷的形成(1) [J]. *环境保护科学*, 20(1): 5—9
- Li JW. 1994. Formation of trihalomethanes in chlorinated water (I). Mechanisms and effect factors of trihalomethanes formation [J]. *Environmental Protection Science*, 20(1): 5—9 (in Chinese)
- 林洪瑛, 韩舞鹰. 2001. 珠江口伶仃洋枯水期十年前后的水质状况与评价 [J]. *海洋环境科学*, 20(2): 28—31
- Lin H Y, Han W Y. 2001. Water quality assessment and analysis before and after the decade of the dry period in Lingdingyang estuary of the Pearl River Mouth [J]. *Marine Environmental Science*, 20(2): 28—31 (in Chinese)
- 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2007 [OL]. 2008-4-15. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2007/indexch.htm>
- National bureau of statistics of China. China statistical yearbook 2007 [OL]. 2008-4-15, <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2007/indexch.htm> (in Chinese)
- Qi Y, Shang C, Lo I M C. 2004. Formation of haloacetic acids during monochloramination [J]. *Water Research*, 38: 2375—2383
- 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- State Environmental Protection Administration of China. 2002. Monitoring and Analysis Methods of Water and Wastewater (4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)
- Tan Y, Kikiluff J E, Kitis M, *et al*. 2005. Dissolved organic matter removal and disinfection byproduct formation control using ion exchange [J]. *Desalination*, 176: 189—200
- 薛祖源. 2007. 我国氯碱行业生产发展评析 [J]. *中国氯碱*, 12: 1—6
- Xue Z Y. 2007. Analysis on development of domestic chlor-alkali production [J]. *China Chlor-Alkali*, 12: 1—6 (in Chinese)
- 杨国义, 万开, 张天彬, 等. 2008. 广东省典型区域农业土壤中六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)的残留及其分布特征 [J]. *环境科学学报*, 21(1): 113—117
- Yang G Y, Wan K, Zhang T B, *et al*. 2008. Residues and distribution character of HCHs and DDTs in agricultural soils from the typical areas of Guangdong province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 21(1): 113—117 (in Chinese)
- 杨美兰, 林钦, 黄洪辉, 等. 2005. 珠江口水域化学耗氧量(COD)的分布特征 [J]. *海洋通报*, 24(4): 22—26
- Yang M L, Lin Q, Huang H H, *et al*. 2005. Distribution feature of COD in the waters of Pearl River estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 24(4): 22—26 (in Chinese)
- 杨清书, 麦碧娴, 罗孝俊. 2004. 澳门水域水体有机氯农药的垂线分布特征 [J]. *环境科学学报*, 24(3): 428—434
- Yang Q S, Mai B X, Luo X J, *et al*. 2004. Vertical distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in Macau coastal waters [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 24(3): 428—434 (in Chinese)
- 杨清书, 麦碧娴, 傅家谟, 等. 2005. 珠江干流河口水体有机氯农药的研究 [J]. *中国环境科学*, 25(增刊): 47—51
- Yang Q S, Mai B X, Fu J M, *et al*. 2005. Studies on organochlorine pesticides (OCPs) in waters of Pearl River estuary water [J]. *China Environmental Science*, 25 (Suppl.): 47—51 (in Chinese)
- Yang X, Shang C, Huang J C. 2005. DBP formation in breakpoint chlorination of wastewater [J]. *Water Research*, 39: 4755—4767
- 张小璇, 任源, 韦朝海, 等. 2007. 焦化废水生物处理尾水中残余有机污染物的活性炭吸附及其机理 [J]. *环境科学学报*, 27(7): 1113—1120
- Zhang X X, Ren Y, Wei C H, *et al*. Adsorption mechanism of organic pollutants from biologically treated coking wastewater by powdered activated carbon [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(7): 1113—1120 (in Chinese)
- 郑致远, 许健宁. 2007. 如何控制水质处理中三氯甲烷的生成 [J]. *净水技术*, 26(1): 73—75
- Zheng Z Y, Xu J N. 2007. Discussion on how to control the formation of trichloromethane in water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 26(1): 73—75 (in Chinese)