

吸附-氧化法应急处理饮用水源突发苯酚污染的研究

王新刚^{1,2} 刘学卿¹ 陈芳艳¹ 唐玉斌¹ 吕锡武² 张东³ 周新宇³

(1. 江苏科技大学生物与环境工程学院, 镇江 212018; 2. 东南大学环境工程系, 南京 210096;

3. 上海市城市水资源开发利用国家工程中心, 上海 200050)

摘要 以黄浦江上游水源地突发苯酚污染为背景, 重点考察了粉末活性炭(PAC)吸附、高锰酸钾(KMnO₄)氧化及两者联用技术的除酚效能。结果表明, 活性炭及氧化剂种类的选择是影响处理效果的重要因素, 微孔发达、比表面积巨大的竹炭对苯酚的去除效果明显优于煤质炭、椰壳炭和木质炭; KMnO₄对苯酚的氧化能力强于次氯酸钠和高铁酸钾。增大PAC和KMnO₄的投加量, 可有效提高对苯酚的去除率; PAC吸附-KMnO₄氧化联用技术可大大提高除酚效能, 投加50 mg/L PAC, 2 mg/L KMnO₄可将初始浓度为250 μg/L和500 μg/L的含酚原水分别处理至18 μg/L和66 μg/L, 是应对高浓度苯酚突发污染的有效应急措施。

关键词 应急处理 苯酚 水源地突发污染 粉末活性炭 高锰酸钾

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)11-2417-06

Research on emergency treatment of accidental phenol pollution of drinking source water by adsorption-oxidation process

Wang Xingang^{1,2} Liu Xueqing¹ Chen Fangyan¹ Tang Yubin¹ Lü Xiwu² Zhang Dong³ Zhou Xinyu³

(1. School of Biotechnology and Environmental Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212018, China;

2. Department of Environmental Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. National Engineering Research Center of Urban Water Resources Development and Utilization, Shanghai 200050, China)

Abstract Against the background of accidental phenol pollution occurred in water head site situated at up-stream of Huangpu River, the removal efficiencies of the adsorption of phenol by powdered activated carbon (PAC) adsorption, potassium permanganate oxidation and the two combination techniques were mainly investigated. The results showed that the choice of activated carbon and oxidizing agent was the significant factor to affect phenol removal rate. The phenol removal by bamboo charcoal with abundant micropores and large specific surface area is obviously better than that by coal-based, coconut shell-based or ligneous-based PAC. The oxidation capacity of potassium permanganate to phenol is better than sodium hypochlorite or potassium ferrate. The phenol removal rate can be effectively increased via raising PAC and potassium permanganate dosage. PAC adsorption coupled with potassium permanganate oxidation could significantly improve the removal efficiency of phenol. Using 50 mg/L PAC combined with 2 mg/L potassium permanganate, phenol content in polluted raw water could be decreased from initial concentration of 250 μg/L and 500 μg/L to 18 μg/L and 66 μg/L, respectively. PAC adsorption coupled with potassium permanganate oxidation process is an effective emergency measure to deal with high concentration phenol pollution.

Key words emergency treatment; phenol; abrupt pollution of water head site; powdered activated carbon; potassium permanganate

近年来,水源地突发水污染事故频频发生,给我
国城市供水系统带来前所未有的压力,已成为我国
当前重大的社会公害。此类事件轻则造成城市供水
中断,影响居民日常生活及工农业生产,重则触发社
会骚乱,影响公共安全和社会稳定。因而,如何快

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划项目(2008AA06A412)

收稿日期: 2010-09-17; 修订日期: 2010-10-29

作者简介: 王新刚(1978~),男,博士,讲师,主要从事水污染控制研
究工作。E-mail: hofs@163.com

速、有效地处理水源地突发水污染事故,已成为供水行业亟待解决的重大问题。以上海黄浦江为例,其原水供应量约占全市供应总量的80%^[1],是上海人民赖以生存及城市正常运转的基本保证。但从上世纪五、六十年代开始,两岸造纸、化纤、印染和食品等重污染行业迅猛发展,致使黄浦江水源地面临众多污染因子的威胁^[2],随时具有发生突发性污染的隐患。因此,开展水源地突发性污染的应急处理技术研究,具有重大的现实意义。

本研究主要以上海黄浦江松浦大桥取水口可能突发的苯酚污染为背景,探讨水源地突发性苯酚污染的快速消减技术。苯酚是一种重要的有机化工原料,广泛应用于石油、化工、造纸、塑料、印染和医药等行业,在有机污染物中,具有一定代表性。苯酚属于高毒物质,具有潜在的致癌、致畸、致突变特性,因此被国家环保总局列入“优先控制污染物黑名单”^[3]。目前,针对水源地突发的苯酚污染,采取的应急措施主要有强化混凝沉淀法、活性炭吸附法和氧化法。有研究表明,由于苯酚对水中胶体颗粒的凝聚脱稳具有阻碍作用,因而强化混凝沉淀法对苯酚的处理效果较差^[4],但活性炭吸附法和氧化法对苯酚确有较好的去除效果^[4,5]。本研究考察粉末活性炭(PAC)吸附、高锰酸钾(KMnO_4)氧化及两者联用技术的除酚效能,为黄浦江松浦大桥取水口突发性苯酚污染的应急处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

木质活性炭、煤质活性炭、竹炭、椰壳炭(购于上海活性炭厂,200目,碘值分别为900 mg/g、800 mg/g、1000 mg/g、900 mg/g;比表面积分别为950 m^2/g 、680 m^2/g 、1100 m^2/g 、900 m^2/g);高锰酸钾(AR,上海化学试剂有限公司);次氯酸钠(AR,汕头市西陇化工有限公司);高铁酸钾(济南津乐泰化工有限公司);铁氰化钾(AR,天津市大茂化学试剂厂);4-氨基安替比林(AR,国药集团化学试剂有限公司);三氯甲烷(AR,国药集团化学试剂有限公司);苯酚(AR,上海化学试剂采购供应五联化工厂);氯化铵(AR,天津市恒兴化学试剂制造有限公司);氨水(AR,莱阳市康德化工有限公司)。

1.2 实验仪器

722型可见分光光度计(上海欣茂仪器公司);SHA-C恒温振荡器(常州国华电器有限公司)。

1.3 原水水质

以夏季上海黄浦江松浦大桥取水口所处江段水为原水,配制不同超标倍数的苯酚溶液,模拟受污染的原水。原水主要监测指标值为:高锰酸盐指数,5.6~6.4 mg/L;浊度,16~30 NTU;水温,27~28 $^{\circ}\text{C}$;pH,7.2~7.4;氨氮,0.7~2.1 mg/L;色度,18~21倍。

1.4 实验方法

1.4.1 吸附实验

称取0.5 g PAC,加入1 L蒸馏水,搅拌均匀配成炭浆;用原水配制所需浓度的苯酚溶液,取120 mL于250 mL锥形瓶中,加入一定量炭浆,振荡20 min(与杨浦原水厂的泵站前池水力停留时间3 min、调压池水力停留时间17 min相一致),过滤,取100 mL滤液于分液漏斗中,采用4-氨基安替比林萃取分光光度法测定剩余苯酚浓度,测定波长为460 nm。

1.4.2 氧化实验

配制不同超标倍数的含酚原水,取120 mL于250 mL锥形瓶中,加入所需浓度的氧化剂溶液,振荡20 min,过滤,检测方法同1.4.1。

2 结果与讨论

2.1 不同种类PAC的处理效果

将木质炭、煤质炭、竹炭和椰壳炭配制成相同浓度的炭浆,用于处理不同程度苯酚污染的原水,对比处理效果。结果如图1所示。

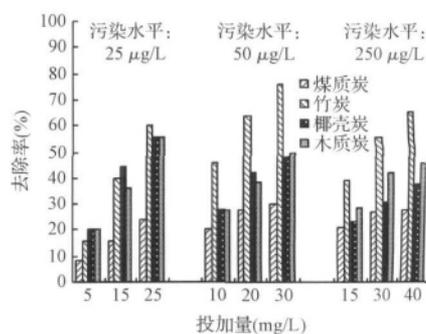


图1 不同种类PAC对各污染水平含酚原水的处理效果

Fig. 1 Removal rate of phenol with different concentrations by various kinds of PACs

由图1可知,在3种污染水平下,随着活性炭投加量的增加,苯酚的去除效率增大,且在较高的污染水平下,活性炭对苯酚的去除效果因炭种不同而有

一定的差异,总体而言,煤质炭处理效果较差,竹炭的处理效果较好。当苯酚初始浓度为 $25 \mu\text{g/L}$ 、活性炭投加量为 25mg/L 时,煤质炭对苯酚的去除效率仅为 24% ,而另 3 种炭质对苯酚的去除效果差异不大,去除率均在 $55\% \sim 60\%$ 左右。当苯酚初始浓度增大到 $50 \mu\text{g/L}$ 时,竹炭显现出处理优势,投加 30mg/L PAC 时,对苯酚的去除率达 76% ;椰壳炭与木炭处理效果接近,对苯酚的去除率约为 50% ,而煤质炭仅为 30% 。当苯酚浓度增至 $250 \mu\text{g/L}$ 时,竹炭对苯酚的去除率亦高于其他炭种,投加 40mg/L 时,竹炭对苯酚的去除率达 65.6% ;木质炭优于椰壳炭,而煤质炭处理效果最差。实验中观察发现,煤质炭在水中分散不佳,极易下沉,与原水溶液混合接触时间较短,而其他 3 种炭质在水中分散均匀,尤其以竹炭分散效果最佳。炭种的选择对实际处理苯酚效果的影响很大,有研究表明,只有活性炭的孔隙结构与水中有机物的尺寸大小相符才能充分发挥活性炭的吸附作用^[6]。苯酚为小分子有机物,吸附主要发生在活性炭的微孔表面^[7],竹炭是竹材热解得到的一种微孔发达的物质,具有较大比表面积,因而对苯酚具有强吸附特性^[8],而其他炭种的比表面积较竹炭小,故吸附效果相对较差。此外,竹炭对许多重金属及有机物均有较好的吸附性能,且吸附速率相对较快^[9-12],因而在应对苯酚突发污染时,可选择比表面积大的竹炭作为吸附剂,以达到最优化的应急处理效果。

2.2 PAC 投加量对处理效果的影响

选取竹炭作为吸附剂,在不同 PAC 投加量下,考察 PAC 对不同污染水平的应急处理效果,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,对于不同水平的苯酚突发污染,增大 PAC 的投加量可显著提高对苯酚的去除率。当苯酚初始浓度为 $25 \mu\text{g/L}$ 和 $50 \mu\text{g/L}$ 时,分别投加 25mg/L 和 30mg/L 的 PAC 即可使苯酚的处理效率达到 60% 以上,将苯酚浓度消减到 $10 \mu\text{g/L}$ 左右,仅为地表水Ⅲ类水质标准的 2 倍。可见,在原水输送至各水厂的管网中只要适当增大 PAC 投加量,即可进一步降低苯酚浓度。且黄浦江供水系统的一个独特条件是从取水口到各水厂之间的输水渠道水力停留时间较长,可保证 PAC 与苯酚的充分接触,这为突发性苯酚污染的应急处理提供了有利条件。

针对 $250 \mu\text{g/L}$ 的苯酚污染,当投加 40mg/L PAC 时,原水中仍剩余 $86 \mu\text{g/L}$ 的苯酚,仍超标 17

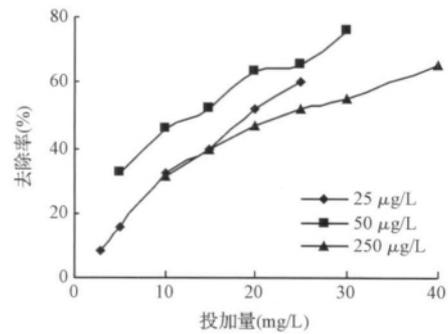


图 2 PAC 投加量对苯酚去除效果的影响

Fig. 2 Effect of PAC dosages on removal of phenol

倍左右,此时不能依靠增大 PAC 投加量来降低苯酚浓度,因为 PAC 投加量过大会导致原水黑浊,给自来水厂的后续处理带来困难,因此,可通过采用活性炭吸附与氧化剂联用的方式应急处理较高浓度的苯酚突发性污染,以期在原水到达水厂之前,最大程度地消除苯酚。

2.3 不同种类的氧化剂对苯酚的处理效果

配制所需浓度的高锰酸钾、次氯酸钠和高铁酸钾溶液,作为备选氧化剂,用于处理不同程度苯酚污染的原水,对比处理效果。结果如图 3 所示。

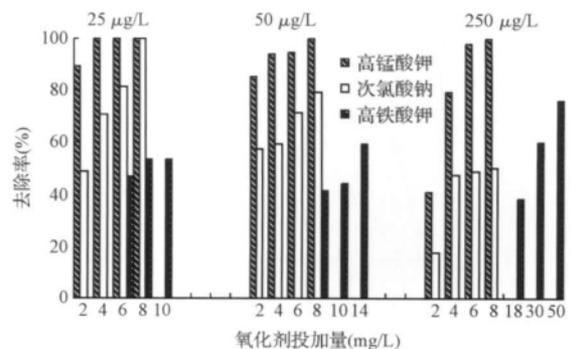


图 3 不同氧化剂对各污染水平含酚原水的处理效果对比

Fig. 3 Contrast of removal effect of phenol with different concentrations between various oxidants

图 3 表明:采用 KMnO_4 作为氧化剂,对各污染水平下苯酚的处理效果明显优于 NaClO 和 K_2FeO_4 。投加 2mg/L KMnO_4 即可将 $25 \mu\text{g/L}$ 苯酚消减至 $2.6 \mu\text{g/L}$,低于Ⅲ类水质标准 ($5 \mu\text{g/L}$);当投加同等量的 NaClO 时, $25 \mu\text{g/L}$ 苯酚仍剩余 $12.7 \mu\text{g/L}$,高铁酸钾对苯酚的处理效果最差,投加 10mg/L 时,去除率仅为 53.6% 。随着污染水平的提高,不同氧化剂对苯酚的处理效果差异愈加明显。当苯酚浓度为标准值的 10 倍时,投加 4mg/L KMnO_4 即可将苯酚

处理至Ⅲ类水质标准,去除率高达94%,相同投加量下,NaClO的处理效率仅为60%,而投加14 mg/L K_2FeO_4 ,去除率仅为60%。针对浓度为标准值50倍的含酚原水, $KMnO_4$ 投加量少,处理效率高的优势更加明显。主要有两方面原因:第一, $KMnO_4$ 本身对苯酚具有较强的氧化能力;第二,天然水中含有多种还原性成分,如腐殖酸、富里酸等,这些物质在氧化过程中使高锰酸钾部分还原生成新生态水合二氧化锰,二氧化锰胶体有巨大的表面积和大量的羟基,可与含羟基、氨基等的有机物生成氢键,通过吸附与催化等作用提高对水中苯酚的去除效果^[13]。而NaClO极不稳定,受原水温度、pH值等因素影响较大^[14]; K_2FeO_4 虽集氧化、杀菌、吸附、絮凝和脱色等功能于一体,但其在水中的稳定性较差,且制备方法复杂,操作条件苛刻,严重影响产品的纯度与产率,导致投加量过大且对苯酚的去除率不理想。因而 $KMnO_4$ 是应对苯酚突发污染的理想选择,既可节约成本,又可达最优应急处理效果。

2.4 $KMnO_4$ 投加量对处理效果的影响

选取 $KMnO_4$ 作为氧化剂,改变投加量,考察对不同程度苯酚污染的处理效果如图4所示。

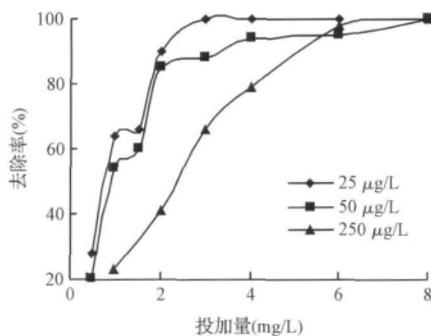


图4 $KMnO_4$ 投加量对苯酚去除效果的影响

Fig. 4 Effect of $KMnO_4$ dosages on removal rate of phenol

由图4可知,针对不同超标倍数的含酚原水,增大 $KMnO_4$ 投加量,苯酚去除率不断提高,但当 $KMnO_4$ 投加量增大到一定程度时,去除率不再变化。当苯酚初始浓度为25 $\mu\text{g/L}$ 时, $KMnO_4$ 投加量从0.5 mg/L增加至2 mg/L时,苯酚去除率由28%上升至89.6%,残余浓度仅为2.6 $\mu\text{g/L}$;针对初始浓度为50 $\mu\text{g/L}$ 和250 $\mu\text{g/L}$ 的苯酚突发污染,分别投加4 mg/L和6 mg/L $KMnO_4$ 时,去除率达94%和98%,均能将苯酚处理至Ⅲ类水质标准以下。但实验过程中发现, $KMnO_4$ 投加量过大(>2 mg/L)会导致出水呈红色,

有造成滤后水中锰超标的风险。因此,在应对苯酚突发污染时, $KMnO_4$ 投加量不宜超过2 mg/L。投加2 mg/L的高锰酸钾可在原水受污程度较轻时收到很好的应急处理效果,但针对250 $\mu\text{g/L}$ 的苯酚突发污染,去除率仅为40.8%,建议采用PAC吸附- $KMnO_4$ 氧化联用技术作为应急处理措施。

2.5 PAC吸附- $KMnO_4$ 氧化联用对苯酚突发污染的处理效果

固定 $KMnO_4$ 投加量为2 mg/L,考察PAC投加量及 $KMnO_4$ 、PAC先后投加次序(氧化3 min,吸附17 min或吸附3 min,氧化17 min)对250 $\mu\text{g/L}$ 和500 $\mu\text{g/L}$ 苯酚突发污染的应急处理效果。结果如图5和图6所示。

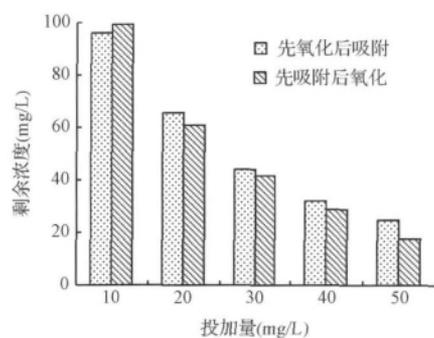


图5 PAC吸附- $KMnO_4$ 氧化对250 $\mu\text{g/L}$ 苯酚的处理效果

Fig. 5 Treatment efficiency of phenol with 250 $\mu\text{g/L}$ by PAC adsorption combined with $KMnO_4$ oxidation

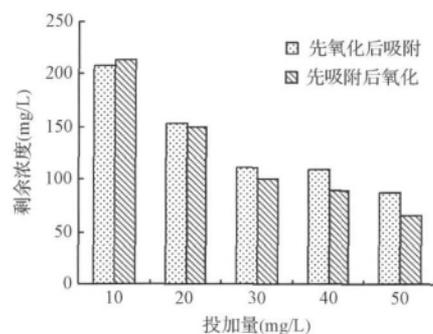


图6 PAC吸附- $KMnO_4$ 氧化对500 $\mu\text{g/L}$ 苯酚的处理效果

Fig. 6 Treatment efficiency of phenol with 500 $\mu\text{g/L}$ by PAC adsorption combined with $KMnO_4$ oxidation

由图5和图6可知,随着PAC投加量的增大,采用PAC吸附- $KMnO_4$ 氧化联用技术可显著提高对苯酚的去除率。针对250 $\mu\text{g/L}$ 的苯酚突发污染,投加40 mg/L PAC,采用先氧化后吸附的联用方式,苯酚残余浓度为32 $\mu\text{g/L}$;采用先吸附后氧化的方式,

剩余浓度为 29 $\mu\text{g/L}$ 。而单独投加 40 mg/L PAC 时,苯酚仍剩余 86 $\mu\text{g/L}$ 。可见,联用技术大大提高了水厂应对苯酚突发污染的处理能力,在最优联用方式下,投加 50 mg/L PAC,苯酚剩余浓度仅为 18 $\mu\text{g/L}$ 。当苯酚初始浓度增至 500 $\mu\text{g/L}$ 时,增大 PAC 的投加量,采用先吸附后氧化的方式对苯酚的处理效果明显优于先氧化后吸附的方式。投加 20 mg/L 活性炭时,2 种投加方式对苯酚的处理效果相差甚微,但当活性炭投加量增加到 50 mg/L 时,采用先吸附后氧化的方式较先氧化后吸附苯酚剩余浓度减少了 21 $\mu\text{g/L}$ 。由此可见,采用 PAC 吸附- KMnO_4 氧化联用技术可显著提高对苯酚的去除率,大大降低后续处理压力,提高出水水质,是应对较高浓度苯酚突发污染的有效措施。

2.6 技术可行性与经济评价

PAC 吸附- KMnO_4 氧化联用技术,处理效率高,操作灵活,可根据水质污染情况随时调整药剂投加量,能够满足治理突发苯酚污染的需要。当饮用水源地的较大水体发生突发性苯酚污染时,除了在水体污染区域进行必要的物理拦截和处理外,对打入原水厂泵站前池和调压池的水源水可采用 PAC 吸附- KMnO_4 氧化联用技术进行应急处理,如果处理仍不达标,可在输水渠道和自来水厂进一步消减污染物。PAC 吸附- KMnO_4 氧化联用技术,可以成为原水厂应对突发性苯酚污染的常用处理方法。

为应对突发性苯酚污染,本研究在实验基础上,从 PAC 性价比和炭源的可再生性等方面综合考虑,确定竹质炭为最佳炭种。上海松浦原水厂日供水量为 500 万 m^3 ,若以最大投炭量 50 mg/L 计,需 250 t/d 。若以每吨活性炭价格 6 000 元计算,则吨水处理成本为 0.3 元;若 KMnO_4 以 2 mg/L 投加量计,需 10 t/d ,按每吨 KMnO_4 成本 1 万元计算,则吨水处理成本为 0.02 元。总计起来,两者联用技术的吨水处理成本为 0.32 元。

若投炭量为 20 mg/L ,按上述价格计算,吨水费用为 0.12 元,加上高锰酸钾的费用,吨水成本为 0.14 元,这一成本与刘韵达等^[4]的处理成本(吨水费用 0.106 元)相比略高,但虑及物价上涨因素,本研究的处理成本可能低些。

需要指出,在情况紧急时,应以快速高效消减污染物、确保城市供水为第一目标,成本问题可忽略不计。

3 结 论

(1) 在应急处理突发苯酚污染时,不同种类的活性炭及氧化剂对苯酚的去除能力有显著差异。竹炭对苯酚的去除效果明显优于煤质炭、椰壳炭及木质炭,且苯酚浓度越高,优势越明显。采用 KMnO_4 作为氧化剂,投加量少,且对各超标倍数苯酚的处理效果明显优于 NaClO 和 K_2FeO_4 。

(2) 增加 PAC 和 KMnO_4 投加量,可显著提高苯酚的去除率。但 PAC 投加量不宜超过 50 mg/L , KMnO_4 投加量不宜超过 2 mg/L ,否则原水将变得黑浊,锰含量将超标,导致水厂处理难度加大。

(3) 采用 KMnO_4 氧化与 PAC 吸附联用的方式是应对较高浓度苯酚突发污染的有效应急措施。先吸附后氧化的联用方式对苯酚的去除效果略优于先氧化后吸附的方式。在最佳复配投加方式下,针对浓度为标准值 50 倍和 100 倍的苯酚突发污染,投加 50 mg/L PAC 和 2 mg/L 的 KMnO_4 ,苯酚剩余浓度分别为 18 $\mu\text{g/L}$ 和 66 $\mu\text{g/L}$ 。

参 考 文 献

- [1] 史贵涛,陈振楼,张翠,等. 上海市饮用水源地周边环境中的重金属. 环境科学, 2008, 29 (7): 1797-1805
Shi Guitao, Chen Zhenlou, Zhang Cui, et al. Heavy metals in environmental media around drinking water conservation area of Shanghai. Environmental Science, 2008, 29 (7): 1797-1805 (in Chinese)
- [2] 阮仁良,张勇. 黄浦江上游水源地突发性水污染事故应急处置预案探讨. 上海水务, 2006, 22(3): 1-4
Ruan Renliang, Zhang Yong. The characterization of river health and its assessment system. Shanghai Water, 2006, 22(3): 1-4 (in Chinese)
- [3] 李改云,鲁安怀,高翔,等. 天然锰钾矿氧化降解水体中苯酚实验研究. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(2): 162-166
Li Gaiyun, Lu Anhuai, Gao Xiang, et al. An investigation into the oxidation and degradation of phenol in water by natural cryptomelane. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2003, 22(2): 162-166 (in Chinese)
- [4] 刘韵达,胡勇有,何向明,等. 饮用水源突发挥发酚污染应急处理中试研究. 环境科学学报, 2008, 28(12): 2503-2508
Liu Yunda, Hu Yongyou, He Xiangming, et al. Pilot study on emergent treatment of raw water suddenly polluted by phenols. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(12):

- 2503-2508(in Chinese)
- [5] 张锦, 李圭自, 马军, 等. 高锰酸钾复合药剂去除水中微量酚类化合物的效能研究. 哈尔滨建筑大学学报, **2001**, 34(3): 65-67
Zhang Jin, Li Guibai, Ma Jun, *et al.* Removal of micro-phenols from water by potassium permanganate composite. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, **2001**, 34(3): 65-67(in Chinese)
- [6] 李景华, 张小满, 高廷耀, 等. 粉末活性炭吸附技术研究. 安徽科技, **1997**, (4): 51-53
- [7] 傅金祥, 王峰, 李敬宝, 等. 应急处理苯胺污染水源水的粉末活性炭吸附工艺研究. 环境污染与防治, **2007**, 29(8): 689-703
Fu Jinxiang, Wang Feng, Li Jingbao, *et al.* Powdered activated carbon adsorption for emergency treatment of aniline contamination. Environmental Pollution & Control, **2007**, 29(8): 689-703(in Chinese)
- [8] 张启伟, 王桂仙. 竹炭对苯酚吸附的热力学及动力学参数的研究. 生物质化学工程, **2008**, 42(2): 19-22
Zhang Qiwei, Wang Guixian. Study on the kinetic and the thermodynamic parameters for adsorption of phenol by bamboo-charcoal. Biomass Chemical Engineering, **2008**, 42(2): 19-22(in Chinese)
- [9] Asada T., Ohkubo T., Kawam K., *et al.* Ammonia adsorption on bamboo charcoal with acid treatment. Health Science, **2006**, 52(5): 585-589
- [10] Mizuta K., Matsumoto T., Hatate Y., *et al.* Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. Bioresource and Technology, **2004**, 95(3): 255-257
- [11] Wu F. C., Tseng R. L., Juang R. S. Preparation of activated carbons from bamboo and their adsorption abilities for dyes and phenol. Environmental Science and Health Part A-toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, **1999**, 34(9): 1753-1755
- [12] 刘创, 赵松林, 许坚. 竹炭对水溶液中 Cd(II) 的吸附研究. 科学技术与工程, **2009**, 9(11): 3009-3012
Liu Chuang, Zhao Songlin, Xu Jian. Adsorption of Cd(II) from aqueous solutions using bamboo charcoal. Science Technology and Engineering, **2009**, 9(11): 3009-3012(in Chinese)
- [13] 杨蕾, 张瑞芹, 燕启社. 高锰酸钾与颗粒活性炭联用去除水中微量有机污染物. 郑州大学学报(理学版), **2007**, 39(4): 164-169
Yang Lei, Zhang Ruiqin, Yan Qishe. Effect of combined potassium permanganate and granular activated carbon for the removal of organic micro-pollutants from water. J. of Zhengzhou Univ. (Nat. Sci. Ed.), **2007**, 39(4): 164-169(in Chinese)
- [14] 周相武, 汪晓军, 刘姣, 等. 次氯酸钠溶液的氧化性研究. 氯碱工业, **2006**, (8): 28-30
Zhou Xiangwu, Wang Xiaojun, Liu Jiao, *et al.* Studies on the oxidizing property of sodium hypochlorite solution. Chlor-Alkali Industry, **2006**, (8): 28-30(in Chinese)