·综 述·

粉末活性炭在饮用水处理中应用的研究进展

王文清，高乃云，刘 宏，王 永

(同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化国家重点实验室，上海 200092)

摘要：介绍了粉末活性炭 (PAC) 的基本性质，并对其在饮用水处理应用中的重要影响因素进行了探讨；综述了 PAC去除原水中嗅味物质、藻毒素、消毒副产物前驱物以及农药等痕量有机污染物的研究现状；分析了粉末活性炭 (PAC) 与其他工艺的组合技术在饮用水处理中的应用效果，并对其应用前景做出展望。

关 键 词：粉末活性炭 (PAC)；组合技术；饮用水；净化；吸附

中图分类号：X131.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-3644(2008)05-0084-05

Research Advance of Drinking Water Treatment Using Powdered Active Carbon

WANG Wen-qing, GAO Nai-yun, LIU Hong, WANG Yong

(State Key Laboratory of Pollution Control & Resources Reuse, School of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The basic characteristics and application in drinking water treatment of powdered active carbon (PAC) were introduced. The effects of PAC on removal of trace organic pollutants such as odor substance, algae toxin, disinfection by-products precursors and pesticide by PAC were reviewed. In addition, the application effect of PAC combined with other technologies in drinking water treatment was discussed. The application of PAC in future was prospected.

Keywords: Powdered active carbon (PAC); the combination of different technologies; drinking water; purification; adsorption

1 引 言

活性炭在水处理中的应用已有悠久的历史[1]。据记载，原捷克斯洛伐克在 1925年率先在水处理中使用活性炭。到了 20世纪 50年代以后，活性炭主要用于去除水中天然或加氯后产生的异嗅和异味。到 1970年，法国的大型水厂引入粉末活性炭 (PAC) 处理工艺。由于活性炭能有效去除污水中大部分有机物和某些无机物，因此，20世纪 60年代初，欧美各国开始大量使用活性炭吸附法处理饮用水和工业废水，而日本到 1963年已普遍实现用粉末活性炭 (PAC) 净化饮用水。目前给水处理中应用粉末活性炭 (PAC) 已成为深度处理和微污染水处理的有效手段。

2 PAC的基本性质

PAC是由无定形炭和不同数量灰分共同构成的一种吸附剂，其微孔结构发达，内外比表面大，吸附性能优良，可有效去除嗅、味、色度、氯化有机物、农药、天然有机物及人工合成有机物，且生产方便。PAC制造分成炭化和活化两步。炭化是在温度小于 600℃的条件下，隔绝空气加热原材料，通过炭化去除大部分挥发成分，是原材料裂解成碎片，再组成稳定的新结构。通过活化，烧掉炭化时吸附的炭氢化合物及孔隙边缘炭原子，使活性炭孔隙结构发达，成为一种有多孔结构的炭[1]。

根据 X射线分析，活性炭的结构由许多石墨型层状结构的微晶不规则集合而成。微晶的各层是以六个炭所组成的圆环为母体，但是有些部位上可以看到，炭原子之间的共价键已经断裂，特别是在层的边缘部位还有许多非结晶结构，这样的非结晶

收稿日期：2008-05-28

基金项目：国家"十一五"科技支撑计划资助项目 (2006BAJ08B06)。

作者简介：王文清 (1984-)，男，安徽太湖人，同济大学环境科学与工程学院市政工程专业 2007级在读硕士研究生，研究方向为饮用水处理理论与技术。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部位容易进行化学反应。微晶按三维空间连接时，在微晶之间所形成的空隙，是活性炭具有微孔结构的基础。这样，活性炭的多孔性使活性炭具有极大的内表面积，而非结晶部位更加强了他对外界物质的吸附作用[1]。PAC吸附分物理吸附和化学吸附两种，物理吸附和化学吸附的比较见下表[1]。

表　物理吸附和化学吸附的比较

Tab.　Comparison between physical adsorption and chemical adsorption

性质	物理吸附	化学吸附
吸附力	范德华力	化学键
吸附热	近于液化热	近于反应热
选择性	无	有
可逆性	可逆	不可逆
吸附速度	快，不需活化能	慢，常需活化能
吸附层数	单层或多层	单层
吸满单层的压力	约在 $p/p_0 \approx 0.1$附近	在 $p/p_0 \ll 0.1$附近
吸附温度	吸附物沸点附近或以下	远高于吸附物的沸点

3　PAC在饮用水处理应用中的重要影响因素

水厂在使用 PAC时应注意最佳炭种选择、投加点选取以及投加量确定这三个重要问题。

3.1　炭种选择

粉末活性炭因其孔隙形状大小分布、表面官能团分布以及灰分组成和含量等性质的不同，表现出不同的吸附特性。这种化学性和孔隙组成的不同，会影响有机物在活性炭孔隙中的迁移和扩散速度，并使活性炭对有机物的吸附具有一定的选择性[1]。在水处理中，对于不同的水质，所采用的活性炭炭种会不同，所以应在实验的基础上，选择合适该水源水质的高效经济的炭种。采用静态吸附试验，可以初步判断活性炭的吸附能力和吸附速度，初选最佳炭种[2]。

3.2　投加点选取

粉末活性炭投加点选择主要解决可由混凝去除与粉末活性炭吸附去除有机污染物的竞争问题，和絮凝体对粉末活性炭颗粒的包裹问题[3]，目的是在充分发挥混凝去除有机污染物能力的同时，再利用粉末活性炭去除剩余有机污染物，而又要避免絮凝体对粉末活性炭颗粒的包裹，使总去除率最高，粉末活性炭用量最省。不同投加点具有的水利条件不一样，导致粉末活性炭的吸附效果差别很大。对于不同的原水水质，粉末活性炭的最佳投加点也有所不同，因此投加点应视情况具体分析。

3.3　投加量确定

对于 PAC的投加量，当投加较少时，其吸附容量可以充分利用，PAC基本上没有浪费，但同时目标物质出水浓度则较高，难以达标。相反，若 PAC投加过多，虽然目标物质出水浓度很小，能满足饮用水要求，但 PAC没有被充分利用，制水成本会很高。因此，应根据水厂的实际水质情况，确定合理、经济的投加量[4]。

3.4　其他影响因素

除了上面这三个重要的影响因素，其他因素的影响作用也不容忽视。而环境因素如 pH值、温度、并存有机物等均不同程度的影响 PAC的吸附效果。伍海辉等人[5]采用投加粉末活性炭 (PAC)进行强化黄浦江下游原水常规工艺处理效果的试验，结果表明：调节 pH值为 6.0～6.5时其处理效果达到最好。虽然混凝预处理可以去除大分子有机物，避免某些胶体颗粒的在粉末活性炭上的竞争吸附，但水中仍然存在一些背景有机物可能会参与竞争吸附。这种竞争吸附毫无疑问会降低粉末活性炭对目标有机物的去除[6]。

4　粉末活性炭 (PAC)对特殊有机污染物的去除

混凝沉淀等常规工艺对某些特殊有机污染物的去除效果很差，原因是这些物质分子量都较小，很难通过混凝沉淀去除。

4.1　PAC对嗅味物质的去除

饮用水中的嗅味问题已成为供水界面临的普遍问题。原水中土嗅味的产生归因于某些藻类大量繁殖产生的两种代谢物：土臭素和二甲基异冰片[7]。而混凝、沉淀、过滤、消毒等常规处理工艺很难将这些物质从水中去除。粉末活性炭 (PAC)发达的微孔结构和巨大的比表面积可有效地吸附水中的嗅味物质。李大鹏等研究表明[8]，除嗅效果与 PAC投加量有一定的线性相关性，随着 PAC投加量的增加出水嗅阈值降低，且在一定范围内每增加 10mg/L的 PAC投加量则去除率就上升 5%。其原因是，其他有机物也占用了 PAC的吸附空间，导致 PAC投加量小时的除嗅率较低，增加 PAC投加量后增加的那部分 PAC相应的补充了吸附其他有机物所耗费的炭量，从而提高了对嗅味的去除率。因此在除嗅过程中，消除原水中其他有机物的干扰是提高除嗅效果的一个关键。另外原水嗅阈值的大小对

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

PAC的除嗅效率没有明显的影响。李伟光研究表明[9]，PAC后移至混凝开始后再投加的效果比PAC与混凝剂（如碱铝）同时投加会更好，在混凝中段投加PAC的除嗅效果明显优于投加在混凝前，而且在达到同样的效果时平均可节约10mg/L的PAC。这是因为，原水中存在着一部分即可被混凝去除又可被PAC吸附去除的有机物，如果将PAC直接投加在原水中，则其不可避免的会吸附部分可以混凝去除的有机物，这些有机物既占据了致嗅物质的吸附位置又限制了小分子有机物在空袭内的迁移，大大降低了PAC吸附嗅味物质的能力。Jianwei Yu等研究表明[10]，虽然活性炭表面的性质（如表面C=O基、C-O基含量、微孔含量、碘值以及亚甲蓝值等）对其吸附能力有很大影响，但在PAC吸附土臭素和二甲基异冰片时，只有微孔数量这一参数与其吸附能力之间有很好的线性相关性，其他的参数如碘值等对其吸附能力影响甚微，因此可以将微孔数量作为表征PAC吸附嗅味物质能力的有效表征参数。

4.2 PAC对藻毒素的去除

富营养化湖泊中的微囊藻毒素（水华蓝藻的次生代谢产物）对环境和人类健康的危害已成为全球关注的重大环境问题之一。微囊藻毒素能强烈地抑制蛋白磷酸酶（PP1、PP2A）的活性，是一种强烈的促癌剂。中国科学院武汉水生生物研究所近期的研究结果表明，微囊藻毒素以肝脏为唯一的靶器官，动物性腺是其攻击的第二靶器官[11,12]。然而，水厂常规混凝工艺对溶解性微囊藻毒素的去除效果较差，去除率一般在20%以下，难以满足要求。有研究表明，PAC对溶解性的微囊藻毒素具有较好地吸附作用[13,14]。考虑到微囊藻毒素的季节性特征，PAC吸附可以作为微囊藻毒素污染的应急处理措施。PAC吸附污染物需要一定的时间，其过程可分为快速吸附、基本平衡和完全平衡三个阶段。刘成等研究表明[15] PAC对两种典型的微囊藻毒素（MC-RR和MC-LR）快速吸附阶段大约需要40min，可以达到80%的左右的吸附容量。因此对于取水口到净水厂有一定距离的水厂，可在取水口处投加PAC，利用管道输送时间来完成吸附过程；而对于取水口距离水厂很近，只能在水厂内投加粉末活性炭的情况，由于吸附时间短，加之与混凝剂形成矾花后还会影响其与水中微囊藻毒素的接触，使得粉末炭的吸附能力难以发挥，因此需适当增加PAC的投量。随着粉末活性炭投量的增加，对微囊藻毒素的去除效果得到明显改善。PAC投量为20mg/L时，对MC-RR和MC-LR的去除率分别为90%和76%，也就是说对于一般原水中两种微囊藻毒素可能发生的最大浓度（10μg/L），投加20mL的粉末活性炭即可将两种毒素的浓度分别降低到1μg/L和2.4μg/L，加之其他水处理单元（混凝、消毒等）对微囊藻毒素的去除，出水水质可以达到国家新颁布的标准（MC—LR的限值为1μg/L）。此外，PAC对微囊藻毒素的去除率与藻毒素初始浓度无关，这可以用理想吸附溶液理论和当量本底化合物理论来证明[15]。因而，可根据原水中目标化合物的浓度和标准的要求值来判定所需的粉末活性炭投量。

4.3 PAC对消毒副产物（DBPs）前驱物的去除

消毒副产物（DBPs）如三卤甲烷（THM）、卤乙酸（HAA）等属三致物质，饮用水中含量超标时对人体健康影响巨大。而对消毒副产物（DBPs）前驱物的去除能有效减少饮用水中DBPs的形成。因此，DBPs前驱物的有效去除是现代饮用水处理中最具挑战性的任务之一[16]。DBPs前驱物以天然有机物（NOM）的形式存在于所有地表水中，能用下面的指标来反映其存在情况：溶解性有机炭（DOC），254nm紫外线吸光度（UV_{254}），比紫外吸光度（SUVA）以及三卤甲烷形成潜能（THMFP）。Rizzo等研究说明[17] 80mg/L的氯化铁对于意大利的两种地表水源水能分别产生42%和35%的DOC去除率以及56%和48%的UV_{254}去除率，此时混凝剂消耗过高。因此Vedat Uyak等人引进PAC强化氯化铁混凝以降低处理费用[16]。在相同的氯化铁-PAC投加量下，UV_{254}比DOC去除率更大，说明这种工艺去除芳香类物质比去除其他的NOM更有效，而芳香类物质是DBPs最强的前驱物。比紫外吸光度（SUVA）是一个计算参数，其值等于（UV_{254}/DOC）×100，该参数表征了水中的腐殖含量，NOM中的腐殖酸也是一类主要的DBPs前驱物，PAC对SUVA的降低效果亦优于单独的混凝。THM形成潜能（THMFP）代表了水中三卤甲烷前驱物的含量。氯化铁-PAC工艺对去除THMFP效果显著，在单独100mg/L氯化铁混凝工艺中，THMFP的去除率为47%，且出水THM浓度达到155μg/L，然而投加PAC后出水THM浓度可降至80μg/L。PAC强化混凝工艺对前驱物去除效果明显优于常规工艺，其原因在于，常规混凝去除的主要是带负电荷的大分子，对于其他低分子量的NOM有机物的去除能力很差，而PAC对低分子量不带电的NOM物质吸附效果非常好，因此PAC可

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以有效去除 DBPs前驱物。

4.4 PAC对农药的去除

随着工农业的发展，农药的使用量逐年在增加，这些农药残留物进入饮用水水源中，就会污染自来水，给水厂的工艺提出了新的问题。PAC被广泛的用于去除饮用水中的痕量有机物，然而NOM的存在会负面影响 PAC对微污染物的吸附容量和吸附动力学[18]。Jiang等[19]的小试研究表明，混凝、软化、氯化等常规工艺均不能有效去除阿特拉津等嗪除草剂。原因是混凝等常规工艺主要去除相对分子量在 10000以上的有机物，对阿特拉津此类相对分子质量很小的有机物几乎没有去除能力。程蓓蓓等[20]研究表明 PAC对阿特拉津吸附 20min后可完成主要去除，考虑到竞争吸附问题 PAC与混凝剂不能同时投加，可以将 PAC先投加待反应 20min左右后再进行混凝反应。随着 PAC投加量的增加，滤后水阿特拉津德去除率也随之增长，但是阿特拉津德去除率并不是均匀增加。PAC浓度越高，阿特拉津德去除率增长越不明显，以致 PAC50mg/L和 PAC60mg/L时的去除率基本一致。原因可能是，去除效果是由 PAC对阿特拉津的吸附性质及原水中多组分物质的竞争吸附共同决定，投加量增加，单位质量 PAC对阿特拉津的吸附容量降低，因此阿特拉津的去除率呈减速增长。另外，Hugues Humbert等人研究表明[21]，阴离子交换树脂 (AERs) 与 PAC同步联合使用比单独使用 PAC能更有效的去除原水中的杀虫剂等农药物质。

5 粉末活性炭 (PAC) 与其他工艺的组合使用

5.1 微滤 (MF) -PAC组合工艺

Han - Seung Kim等人[22~24]研究了微滤 (MF) 和 PAC联合工艺在饮用水深度处理方面的应用。在 MF系统中使用高剂量的 PAC能使微滤膜在出水水质和过滤时间等方面的达到更好的效果。PAC能去除 MF膜不能去除的小分子物质。而在相同的 PAC投加量之下，滤速 (或通量) 不会影响处理效率。另一方面，活性炭能提高过滤效率是通过降低滤速来缓解逐渐增加的膜渗透压，以达到延长运行周期的目。对于去除表面活性剂，这种联合技术比 PAC单独使用更有效果，主要原因可能是粉末活性炭在 MF膜表面上和孔隙内部形成了次生膜。

5.2 超滤 (UF) -PAC组合工艺

溶解性的有机物是造成膜污染的主要因素，因此，超滤膜常与混凝、PAC组合，形成深度处理膜工艺[25]。UF - PAC联合技术比超滤单独使用能更有效地去除原水中的有机物和消毒副产物，该系统中 PAC的作用是吸附 UF不能去除的低分子量有机化合物，且运行时 PAC能有效防止膜污染、提高膜通量，促进反冲洗时膜的有效恢复[25,26]。

5.3 离子交换树脂 (IERs) -PAC组合工艺

Hugues Humbert等人[21]研究了阴离子交换树脂 (AERs) -粉末活性炭 (PAC) 联合技术对去除天然有机物 (NOM) 和杀虫剂 (锈去津和异丙隆) 的效果。结果表明，PAC对 AERs去除 DOC只有很小的辅助效果；而对去除锈去津和异丙隆等杀虫剂，该联合工艺效果显著，其原因是 AERs去除了阻塞 PAC孔隙的高分子量物质。

5.4 高锰酸钾 -PAC组合工艺

高锰酸钾与 PAC联合使用能有效去除常规处理很难去除的物质，且降低了粉末活性炭的投加量，节约了制水成本。针对太湖 B支流水体发臭现象严重、采用常规工艺处理很难去除嗅味物质的情况，李伟光等人[27]通过试验考察了单独投加高锰酸钾、单独投加粉末活性炭以及高锰酸钾与粉末活性炭联用三种方法对嗅味的去除效果。静态及生产性试验结果表明：高锰酸钾与粉末活性炭联用工艺的除嗅效果最好，并且可节省粉末活性炭投量约 20%。此外，高锰酸钾与粉末活性炭联用对藻类也有较好的去除效果。

6 PAC在饮用水处理中应用的发展趋势

在突发事故时 (如蓝藻暴发)，大量投加 PAC会导致运行费用的大量增加，因此须考虑新的 PAC工艺以增加其使用效率。因活性炭的吸附容量是吸附平衡时吸附质浓度的函数[28]，出水水质越高，则活性炭的使用效率越低，那么在水厂正常生产中，PAC的吸附空间没有得到高效的利用，如何高效地、充分地使用 PAC的吸附容量尚有待进一步研究。目前水厂中使用的 PAC最后大都在沉淀池随污泥排走，没有实现重复利用。考虑到 PAC回收的困难以及回收分离时损失很大，常用颗粒活性炭 (GAC) 代替 PAC，但是 GAC的吸附效果不及 PAC。如何有效回收 PAC，实现资源的重复利用还需深入研究和探讨。在采用 PAC干投装置的水厂，操作时劳动强度极大，在装卸、拆包、配制和投加过程中，粉尘是一个很大的问题。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有时，PAC会从过滤水中泄漏出来进入配水系统，因此在水厂使用 PAC时应注意滤池的安全运行以保证出水水质。PAC与其他水处理药剂 (尤其是氧化性药剂）相互作用会使其他药剂失去应有的效果，同时也降低了 PAC的吸附能力，大幅度的增加制水成本，因此在某些联合工艺中如何避免氧化性药剂与还原性 PAC相互损耗，是一个值得研究的问题。

PAC与高级氧化等其他深度处理方法不同，它是靠吸附分离技术来去除水中的污染物质和杂质，因此它基本上不产生化学副产物，在使用时安全有效，在以后的水处理领域仍将会得到广泛应用。

参考文献：

[1] 高乃云，严 敏，乐林生. 饮用水强化处理技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2005.

[2] 王建平，黄长均. 粉末活性炭吸附技术在水厂的应用 [J]. 中国给水排水，2006, 22(10): 17-20.

[3] 张小满，曹达文，高廷耀，徐迪民，范谨初，李景华. 常规水处理工艺应用粉末活性炭技术的最佳投点选择研究 [J]. 给水排水，1998, 24(2): 29-32.

[4] 金 伟，李怀正，范谨初. 粉末活性炭吸附技术应用的关键问题 [J]. 给水排水，2001, 27(10): 11-12.

[5] 伍海辉，康兰英，高乃云. 粉末活性炭工艺强化处理黄埔江下游原水的试验研究 [J]. 净水技术，2007, 26(5): 22-25.

[6] Graham M R, Summers R S, et al. Modeling equilibrium adsorption of 2-Methylisoborneol and Geosmin in natural waters [J]. Wat Res, 2000, 34(8): 2291-2300.

[7] Koch B. Control of 2-methylisoborneol and geosmin by ozone and perxone: a pilot study [J]. Wat Sci Tech, 1992, 25(2): 291-298.

[8] 李大鹏，李伟光，王铁民. 投加粉末活性炭去除原水中的嗅味 [J]. 中国给水排水，2004, 20(6): 44-46.

[9] 李伟光，李大鹏，张金松. 用粉末活性炭去除饮用水中嗅味 [J]. 中国给水排水，2002, 18(4): 47-49.

[10] Jianwei Yu, Min Yang, Tsair-Fuh Lin, Zhaohai Guo, Yu Zhang, Junnong Gu, Suxia Zhang. Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-methylisoborneol (MIB) and geosmin from natural water [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 56: 363-370.

[11] Chen J, Xie P. Tissue distributions and seasonal dynamics of hepatotoxic microcystins-LR and-RR in two freshwater shrimps, Palaemon modestus and Macrobrachium nipponensis, from a large shallow eutrophic lake of subtropical China [J]. Toxicon, 2005, 45(5): 615-625.

[12] Chen J, Xie P. Tissue distributions and seasonal dynamics of hepatotoxic microcystins-LR and-RR in a freshwater snail (Bellamya aeruginosa) from a large shallow, eutrophic lake of the subtropical China [J]. Environmental pollution, 2005, 134(3): 423-430.

[13] Newcombe G, Nicholson B. Water treatment options for dissolved cyanotoxins [J]. Water Supply Research and Technology, 2004, 53(4): 227-239.

[14] Newcombe G, Cook D, Brooke S, et al. Treatment options for microcystin toxins: similarities and differences between variants[J]. Environmental Technology, 2003, 24(3): 299-308.

[15] 刘 成，高乃云，马晓雁. 高藻及微囊藻毒素污染原水的应急处理工艺研究 [J]. 中国给水排水，2006, 22(21): 9-13.

[16] Vedat Uyak, Sema Yavuz, Ismail Toroz, Sahin Ozaydin, Esra Ates Genceli. Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption [J]. Desalination, 2007, 216: 334-344.

[17] Rizzo L, Belgiorno V, Gallo M, Meric S. Removal of THM precursors from a high-alkaline surface water by enhanced coagulation and behaviour of THMFP toxicity on D. magna [J]. Desalination, 2005, 176: 177-188.

[18] Pelekani C, Snoeyink, V L. Competitive adsorption in natural water: role of activated carbon pore size [J]. Water Res, 1999, 33(5): 1209-1219.

[19] Jiang H, Adams C. Treatability of chloro-s-triazines by conventional drinking water treatment technologies [J]. Water Research, 2006, 40(8): 1657-1667.

[20] 陈蓓蓓，高乃云，刘 成，姚娟娟，尚亚波，秦祖群. 粉末活性炭去除原水中阿特拉津突发污染的研究 [J]. 给水排水，2007, 33(7): 9-13.

[21] Hugues Humbert, Herve Gallard, Herve Suty, Jean-Philippe Croue. Natural organic matter (NOM) and pesticides removal using a combination of ion exchange resin and powdered activated carbon (PAC) [J]. Water Research, 2008, 42: 1635-1643.

[22] Han-Seung Kim, Hiroyuki Katayama, Satoshi Takizawa, Shinichiro Ohgaki. Development of a microfilter separation system coupled with a high dose of powdered activated carbon for advanced water treatment [J]. Desalination, 2005, 186: 215-226.

[23] Han-Seung Kim, Satoshi Takizawa, Shinichiro Ohgaki. Application of microfiltration systems coupled with powdered activated carbon to river water treatment [J]. Desalination, 2007, 202: 271-277.

[24] Canan Akbil Basar, Ahmet Karagunduz, Avni Cakici, Bulent Keskinler. Removal of surfactants by powdered activated carbon and microfiltration [J]. Water Research, 2004, 38: 2117-2124.

[25] 董秉直，陈 艳，高乃云，范谨初. 粉末活性炭-超滤膜处理微污染原水试验研究 [J]. 同济大学报 (自然科学版)，2005, 33(6): 777-780.

[26] Sylwia Mozia, Maria Tomaszewska. Treatment of surface water using hybrid process—adsorption on PAC and ultrafiltration [J]. Desalination, 2004, 162: 23-31.

[27] 李伟光，郜玉楠，黄晓东，孙士权，张金松. 高锰酸钾与粉末活性炭联用去除饮用水中嗅味 [J]. 中国给水排水，2007, 23(5): 18-21.

[28] Shishir Kumar Behera, Jung-Hoon Kim, Xuejun Gao, Hung-Suck Park. Adsorption equilibrium and kinetics of polyvinyl alcohol from aqueous solution on powdered activated carbon [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153: 1207-1214.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net