

常规处理与深度处理工艺对南京长江原水中有有机物去除效能比较

刘武平^{1,2}, 吕锡武², 朱光灿², 单国平³, 周克梅³

(1.中国市政工程西南设计研究总院, 四川成都 610081 2.东南大学环境科学与工程系, 江苏南京 210096 3.南京市自来水总公司, 江苏南京 210002)

摘要 以长江南京段原水为研究对象, 通过常规处理及深度处理工艺(强化过滤工艺和生物活性炭工艺)对长江南京段水源水中有有机物的去除效能进行对比研究。结果表明常规工艺对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 及 BDOC 的去除率分别为 30 %、41 %、27 % 及 25 %。强化常规工艺和生物活性炭工艺各指标的去除率分别为 34 %和 52 %、48 %和 50 %、37 %和 40 %及 74 %和 82 %。强化过滤工艺及生物活性炭工艺对 1,2,4-三氯苯的去除效果明显, 能显著提高出水水质。常规工艺对 MW 大于 5 kDa 的有机物去除效果明显, 强化过滤工艺对 MW 小于 1 kDa 的有机物去除率大于 25 %, 生物活性炭工艺对各个分子量区间的去除效果都比较好, 特别是对原水中占多数的 MW 小于 1 kDa 的有机物去除率大于 30 %。

关键词 常规工艺 强化过滤工艺 生物活性炭工艺 溶解性有机物 氯苯类化合物 分子量分布

中图分类号 :TU991.2 X522 **文献标识码** :A **文章编号** :1009-0177(2012)02-0024-06

Comparison of Organic Matters Removal Efficiency between Conventional and Advanced Treatment Processes for Yangtze River Raw Water in Nanjing

Liu Wuping^{1,2}, Lu Xiwu¹, Zhu Guangcan¹, Shan Guoping², Zhou Kemei²

(1.Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China;

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

3.Nanjing Tap Water General Company, Nanjing 210002, China)

Abstract Organic matter removal efficiencies of conventional water treatment process and advanced water treatment process for Nanjing raw water in Yangtze River was introduced. Removal efficiencies of COD_{Mn} , UV_{254} , DOC and BDOC of conventional water treatment process, biological enhanced activated (BEA) process and biological activated carbon (BAC) of the original data process are about 30 %, 34 %, 52 %; 41 %, 48 %, 50 %; 27 %, 37 %, 40 %; 25 %, 74 %, 82 %, respectively. In advanced water treatment process, chlorobenzene compounds are removed obviously. In conventional water process, organic matters whose molecular weights (MW) is larger than 5 kDa are removed obviously. Organic matters whose MW is less than 1 kDa contained a large portion of dissolved organic carbon (DOC) in the Nanjing raw water of Yangtze River, and furthermore in BEA process and BAC process removal rate of which are more than 25 % and 30 %, respectively. In BAC process, organic matters of various MW are removed effectively.

Keywords conventional treatment process enhanced filtration process biological activated carbon (BAC) process dissolved organic matter (DOM) chlorobenzene compounds molecular weight distribution (MWD)

水环境的污染加剧了水源地水质的变差, 近年来, 水源中污染物的种类越来越多, 其中有机物污染问题最为突出。有机污染物种类的增多, 给传统的饮用水处理工艺提出了很大的挑战^[1-4]。长江南京段水源水质个别指标(如冬季的氨氮为 IV 类), 且呈

现恶化趋势, 原水高锰酸盐指数及微量有机物种类均有一定的升高, 表明水源水已呈现微污染特征。

饮用水常规处理工艺主要由混凝、沉淀或澄清、过滤和消毒构成, 主要去除对象是水源水中的悬浮物、胶体杂质和细菌。

强化过滤工艺是常规过滤、颗粒活性炭吸附与生物膜氧化技术结合在一起的新型过滤工艺。采用生物强化滤池代替常规滤池, 在不增加过多投资的条件下, 只需对现有的常规过滤适当加以改进(如更换滤料、培养生物膜、改变预消毒方法和用不含

[收稿日期] 2011-06-30

[基金项目] 江苏省建设厅科技计划项目(JS2007JH22), 东南大学优秀青年教师教学科研资助计划项目

[作者简介] 刘武平(1981-), 男, 硕士, 助理工程师。

电话: 15912136053; Email: lhw85927@163.com。

氯水进行反冲洗等),即可达到去除水中悬浮颗粒和微量有机物的双重目的^[5-7]。

生物活性炭^[8]技术利用活性炭对水中有机物及溶解氧有较强的吸附特性,将其作为载体,使其成为微生物聚集、繁殖生长的良好场所,延长活性炭的吸附饱和时间和活性炭使用寿命,强化活性炭吸附处理效果^[9],能有效去除水中有机污染物、氨氮、亚硝酸盐等,从而达到限制消毒副产物生成的目的。

本文以长江南京段水源水为研究对象,对比分析了常规处理工艺、生物强化工艺与生物活性炭工

艺对长江南京段原水中有机污染物的去除效果。

1 试验工艺流程及方法

1.1 试验工艺流程

本试验分两条处理工艺流程,即常规处理工艺和深度处理工艺。

常规处理工艺为“原水-混凝-沉淀-砂滤池”,深度处理工艺分为强化过滤工艺和生物活性炭工艺,强化过滤工艺为“原水-混凝-沉淀-生物强化滤池”,生物活性炭工艺为“原水-混凝-沉淀-砂滤-生物活性炭滤池”,试验装置如图1所示。

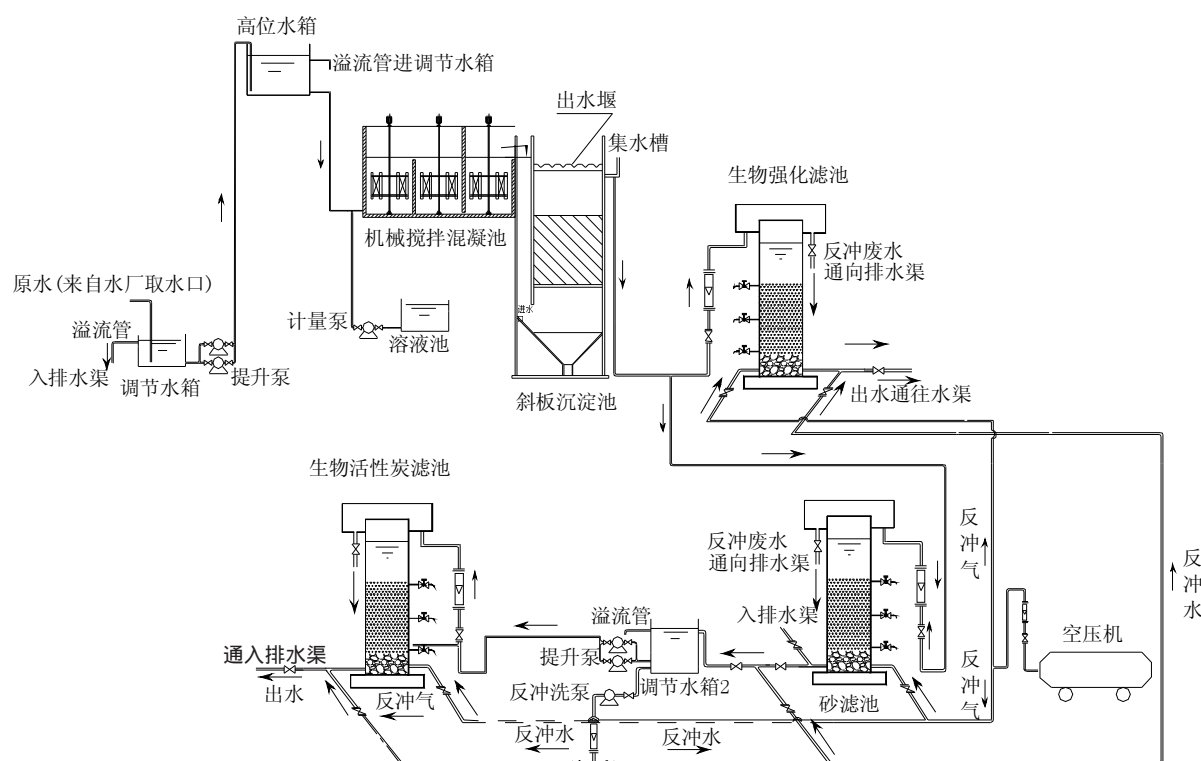


图1 试验工艺流程简图

Fig.1 Process Diagram of Experiment

砂滤池的设计尺寸:总高为2500 mm、直径为250 mm、底部填料承托层高度为400 mm、均质石英砂填料高度为1000 mm。

生物强化滤池(BEAF)的设计尺寸:总高为2500 mm、直径为250 mm、底部填料承托层高度为400 mm、均质石英砂填料高度为350 mm、活性炭填料高度为650 mm。在滤池的不同高度设有水样取样口和活性炭填料取样口。

生物活性炭滤池(BACF)的设计尺寸:总高为2500 mm、直径为250 mm、底部填料承托层高度为400 mm、活性炭填料高度为1000 mm。在滤池的不

同高度设有水样取样口和活性炭填料取样口。

1.2 试验运行条件

装置的净水生产能力 $Q=1\text{ m}^3/\text{h}$ 、最大产水能力 $Q_{\max}=1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。主要由机械絮凝池、斜板沉淀池、砂滤池、生物强化滤池和生物活性炭滤池组成。

单体均在适宜工况条件下同时运行。机械搅拌絮凝池运行流量和水力停留时间分别 $1\text{ m}^3/\text{h}$ 、20 min。斜板沉淀池运行流量和颗粒沉降速度分别为 $1\text{ m}^3/\text{h}$ 、 0.4 mm/s 。砂滤池运行条件:滤速 $v=8\text{ m/h}$,气水联合反冲,气反冲强度 $q_{\text{气}}=8\text{ L/s}\cdot\text{m}^2$,历时5 min,水反冲强度 $q_{\text{水}}=15\text{ L/s}\cdot\text{m}^2$ 左右,历时10 min。

生物强化滤池运行条件: 空床接触时间(EBCT)=10 min; 气水联合反冲, 气反冲强度 $q_{\text{气}}=6 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$, 历时 5 min, 水反冲强度 $q_{\text{水}}=15 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$ 左右, 历时 10 min。生物活性炭滤池运行条件: EBCT=13.5 min; 气水联合反冲, 气反冲强度 $q_{\text{气}}=5 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$, 历时 5 min, 水反冲强度 $q_{\text{水}}=12 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$ 左右, 历时 15 min。

1.3 原水水质

本中试试验在南京某自来水厂进行。原水水质指标见表 1。

表 1 原水水质指标
Tab.1 Water Quality Indexes of Raw Water

水质指标	数值范围	水质指标	数值范围
水温/ $^{\circ}\text{C}$	4.5~30	pH	7.74~8.06
浊度/NTU	14.0~258	$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.2~3.8
$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.02~1.18	$\text{DO}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	5.6~9.7

1.4 分析方法

检测项目包括 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC、BDOC、有机物分子量分布和氯苯类化合物。

BDOC 采用生物砂培养测定法测定, 先将待测水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 膜过滤, 去除悬浮物和胶体, 同时去除微生物, 然后向待测水样中接种含有同源细菌的生物砂, 在恒温条件下(一般为 20°C)培养 10 d, 测定培养前后 DOC 的差值即为 BDOC。

有机物分子量分布测定采用超滤膜法。膜过滤采用平行法, 即水样用 $0.45 \mu\text{m}$ 微滤膜过滤后, 先测定滤液的 DOC, 再分别通过 100、10、5、1、0.5 kDa 的超滤膜, 再次测定过滤液的 DOC。各个分子量区间的有机物用差减法得到。采用设备为 Amicon 公司的 8200 型氮气加压搅拌型超滤器, 有效容积为 160 mL、最大耐压为 0.53 MPa。

氯代苯类化合物的测定采用固相萃取滤柱(SPE)萃取、气相色谱测定^[10]。其余指标按照 GB 5750—2006 饮用水标准检验方法检测^[11]。

2 结果与讨论

2.1 对有机物指标的去除效果

强化过滤工艺与生物活性炭工艺对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 及 BDOC 的去除效果见表 2。

表 2 各工艺对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 及 BDOC 的去除效果
Tab.2 Removal Efficiency of COD_{Mn} , UV_{254} , DOC and BDOC in Different Process Units

水质指标	原水 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	沉淀池出水 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	砂滤池出水 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	常规工艺去除率 /%	BEAF 出水 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	强化过滤工艺去除率 /%	BACF 出水 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	BAC 工艺去除率 /%
COD_{Mn}	1.78	1.6	1.25	30	1.18	34	0.86	52
UV_{254}	0.042	0.025	0.025	41	0.022	48	0.021	50
DOC	2.162	1.582	1.361	27	1.361	37	1.306	40
BDOC	0.627	0.469	0.161	25	0.161	74	0.113	82

常规工艺对 COD 的去除率在 30 % 左右, 出水的 COD_{Mn} 一般在 1.5 mg/L , 可以满足供水水质要求。经过强化过滤工艺或者生物活性炭工艺处理, 有机物可以得到进一步去除, 分别使 COD_{Mn} 的值降低到 1.18 和 0.86 mg/L , 整个工艺的去除率达到 34 % 和 52 %。这样的去除效果主要源自物理化学作用和生物化学作用, 除微生物的生物氧化和生物过滤作用外, 微生物通过胞外酶降解微孔内吸附的有机物达到对活性炭的生物再生, 使活性炭保持一定的吸附容量, 提高了活性炭对有机物的去除效果。

生物强化工艺和生物活性炭工艺对 UV_{254} 的去除效果不明显, 出水的 UV_{254} 平均值分别为 0.022 和

0.021 cm^{-1} , 较常规工艺出水的 0.025 cm^{-1} 去除效果提升幅度不大。在波长 254 nm 下存在吸收峰的物质主要为大分子的芳香族化合物, 其分子结构复杂, 生物降解性很差, 生物氧化作用不明显; 其次可能是因为滤池进水中吸收 UV_{254} 物质浓度较低, 不利于生物发挥吸附作用; 另外, 微生物生命活动可能会分泌出一些具有紫外吸收峰的物质, 从而使得滤池对 UV_{254} 的去除效果不佳。

常规工艺对 DOC 及 BDOC 的去除率很低, 分别为 27 % 和 25 % 左右, 由于 DOC 和 BDOC 不能在常规工艺中有效去除, 常规工艺处理一般很难达到出水的水质生物安全性的要求, 要进一步去除 DOC

及 BDOC 只能通过生物作用来解决,生物作用对 BDOC 的去除作用明显,强化过滤工艺和生物活性炭工艺对 DOC 及 BDOC 的去除率分别为 37 %、74 % 及 40 %、82 %,强化过滤工艺及生物活性炭工艺对 DOC 及 BDOC 的进一步去除提高了水质的生物安全性,解决了常规工艺对有机物去除能力不佳的问题,是解决微污染源水中有有机物问题的有效方式。

2.2 对氯苯类化合物的去处效果

氯苯系化合物广泛存在于染料、制药、农药、油漆等工业废水中,严重污染环境。此类化合物损害人体肝脏、肾脏,抑制神经中枢。由于氯苯类化合物具有污染面广,毒性较大,不易生物降解的特性,被美国环保署(EPA)列为优先控制污染物^[12]。

试验水样中仅检出 1,2,4-三氯苯,其含量为 0.249 $\mu\text{g/L}$,低于生活饮用水水质非常规检测项目中对 1,2,4-三氯苯的限值 0.2 mg/L 。水样中未检测出氯苯类化合物中的氯苯、1,4-二氯苯和 1,2-二氯苯。图 2 为 1,2,4-三氯苯在处理工艺中各处理单元的出水含量的变化情况。

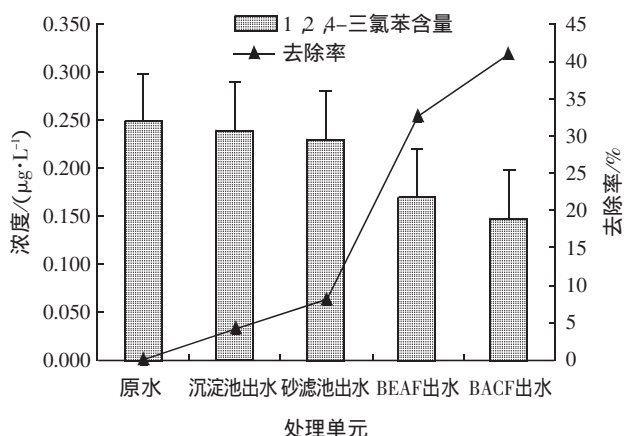


图 2 1,2,4-三氯苯在不同处理工艺中各处理单元浓度变化

Fig.2 1,2,4-trichlorobenzene Concentration in Different Process Units

原水中的 1,2,4-三氯苯经过常规工艺、强化过滤工艺及生物活性炭工艺后浓度依次降低,去除率依次增加,分别为 8.0 %、36.7 %、40.9 %。由试验结果可知混凝沉淀和砂滤对 1,2,4-三氯苯的去除率极低,也就是说常规工艺对 1,2,4-三氯苯基本没有去除率,而强化过滤工艺及生物活性炭工艺对其的去除效果明显增加。可见,类似于 1,2,4-三氯苯的特殊微量有机物只有通过生物处理技术,利用微生物的生物降解作用才能去除。

生物活性炭工艺对 1,2,4-三氯苯的去除相对于常规处理单元而言有大幅度地提升,处理效果也优于强化过滤工艺。

2.3 出水有机物分子量分布特性

有机物分子量分布特性是用于评价和解释净水工艺对有机物的去除效果和机制的有效手段,并且可以作为判断水质和水处理工艺相互协调性并进行单元工艺选择的重要依据。

图 3、表 3 和表 4 为各单元工艺进出水的分子量分布情况及去除情况。

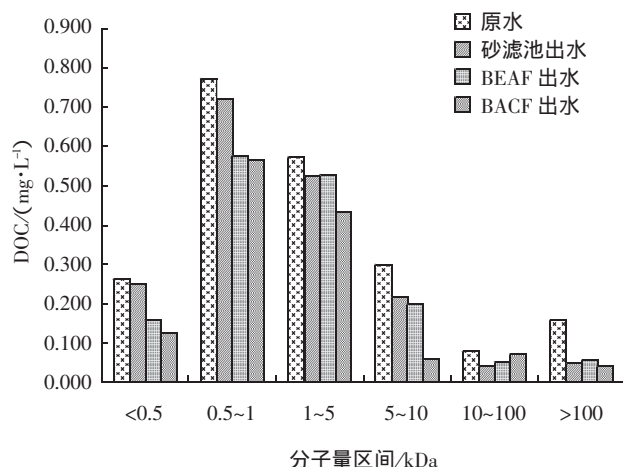


图 3 各单元出水有机物分子量分布

Fig.3 MW Distribution of Organics in Effluent of Different Processes

表 3 原水及各单元工艺出水中有机物分子量分布

Tab.3 MW Distribution of Organics in Raw Water and Effluent of Different Prolesses

分子量区间 /kDa	原水 DOC		砂滤出水 DOC		BEAF 出水 DOC		BACF 出水 DOC	
	绝对值 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	占总量比率 /%	绝对值 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	占总量比率 /%	绝对值 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	占总量比率 /%	绝对值 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	占总量比率 /%
<0.5	0.261	12	0.252	14	0.159	10	0.129	10
0.5~1	0.772	36	0.720	40	0.577	37	0.567	44
1~5	0.573	27	0.526	29	0.528	34	0.434	33
5~10	0.299	14	0.218	12	0.199	13	0.059	5
10~100	0.077	4	0.042	2	0.053	3	0.071	5
>100	0.156	7	0.050	3	0.057	4	0.043	3

由上可知原水中分子量为 1~5 kDa 的有机物占 27 %、小于 1 Da 的占 48 % ,长江南京段原水中的溶解性有机物主要是由小分子的有机物构成。

分子量小于 0.5 kDa 的有机物在常规工艺中去除率仅为 4 % ,有时还会出现负去除的情况。强化过滤和生物活性炭工艺都对该分子量区间有机物有较好的去除效果 ,去除率分别为 39 %和 50 %。一般认为生物处理对小分子有机物最具效果 ,其在生物滤池内的去除主要是附着在活性炭上的生物膜起作用。

分子量为 0.5~1 kDa 的有机物在常规工艺中仅有 6.7 %得到去除。而强化过滤和生物活性炭工艺的去除率约为 26 %。

分子量为 1~5 kDa 的有机物在常规和强化常规工艺中去除率仅为 8 %左右 ,而在生物活性炭工艺中大幅降低 ,去除率达 24 %。

分子量为 5~10 kDa 的有机物在常规工艺阶段就有 27 %的去除率。强化过滤工艺去除率比常规工艺高约 6 %。生物活性炭工艺去除率高达 80 %。这是由于常规工艺和 BAC 滤池都对这一区间有较好的去除效果。

分子量大于 10 kDa 的有机物主要在常规工艺中去除 ,去除率达到 68 % ,而生物强化活性滤池和生物活性炭滤池出水中大分子有机物都出现不同程度的升高 ,导致工艺整体去除率有所下降。

表 4 各单元工艺对不同分子量区间有机物的去除效果
Tab.4 Removal Efficiency of Organic Matters with Different MW

分子量区间 /kDa	原水 /(mg·L ⁻¹)	砂滤池出水 /(mg·L ⁻¹)	常规工艺去除率 /%	BEAF 出水 /(mg·L ⁻¹)	强化过滤工艺去除率 /%	BACF 出水 /(mg·L ⁻¹)	BAC 工艺去除率 /%
<0.5	0.261	0.252	4	0.159	39	0.129	50
0.5~1	0.772	0.720	7	0.577	25	0.567	27
1~5	0.573	0.526	8	0.528	8	0.434	24
5~10	0.299	0.218	27	0.199	34	0.059	80
10~100	0.077	0.042	45	0.053	32	0.071	8
>100	0.156	0.050	68	0.057	63	0.043	73

由表 4 可知,常规工艺对 5 kDa 以上的大分子有机物的去除效果较好,而对小于 5 kDa 的有机物去除效果差,而且还有可能导致水中分子量小于 1 kDa 的有机物增加。这是因为大分子有机物具有较强的憎水性,较易吸附在固液界面,容易被矾花吸附而形成较大的絮体,从而在沉淀过程中被有效去除,而小分子有机物多为亲水性,故较难被混凝沉淀工艺去除,而小分子有机物的增加与腐殖质的吸附特性有关。腐殖质易于通过其类似海绵的结构,吸附水中的无机和有机小分子物质^[13]。向水中投加混凝剂之后,由于金属离子与腐殖质所形成的水溶性络合物更加稳定,使腐殖质原来吸附的小分子有机物被释放出来,从而导致了常规出水中小分子有机物的增加。而长江南京段原水以小分子有机物为主和常规工艺主要对大分子有机物去除效果好的特性说明,只有采用对小分子有机物去除效果好的工艺,才能全面控制出水的有机物含量。

强化常规工艺对 1 kDa 以下的有机物去除率在 25 %以上,远高于常规工艺,但对大于 10 kDa 的有机物去除率比常规工艺低。这种现象是普通砂滤池

和生物强化滤池的滤料构成不同所造成的。首先,对于大分子有机物的去除,生物处理并不是有效的方法,而常规过滤却可对其较为有效地去除。强化滤池中粒径小、空隙率低、物理截留作用好的石英砂滤料仅占总体积的 35 %,大大少于普通石英砂滤池,故对大分子有机物的去除有影响。其次,强化滤池上层为吸附性能很强的活性炭,分子量>10 kDa 的有机物可以在其孔径较大的过渡孔中得到吸附去除,但过渡孔面积占活性炭总表面积较小,故活性炭对大分子有机物的吸附容量较小,短时间内即可吸附饱和。而且活性炭上的附着的微生物只能让小分子有机物透过细胞膜进入细胞内参与代谢,而将大分子有机物挡在膜外,造成大分子物质难被利用随水流出。同时,微生物的溶解性分泌物(SMP)主要为多糖、蛋白质、核酸和一些细胞碎片。这些都是相对分子量较大的有机物,也就不难解释强化滤池出水大分子有机物增多的现象了。

生物活性炭工艺对小分子有机物的去除效果明显优于强化常规工艺,但是对 10~100 kDa 的有机物去除效果较差。这是因为 BAC 滤池中对小分子

有机物效果显著的活性炭滤层比强化滤池高 350 mm,再者 BAC 滤池进水浊度较低,水中溶解性有机物与炭层接触机会更多,炭层中微生物可附着的空间也更大。

从上述分析可知,常规工艺对大于 5 kDa 的有机物去除效果显著,但对小分子有机物去除效果不明显,甚至容易导致分子量小于 1 kDa 的有机物增加。强化常规工艺对小于 1 kDa 的有机物去除效果,显著高于常规工艺。生物活性炭工艺结合了常规和生物活性炭工艺单元的特点,对各个分子量区间的去除效果都比较好,特别是对原水中占多数的小于 1 kDa 的有机物去除效果显著。通过试验发现,各工艺单元对溶解性有机物的去除具有明显的互补性。在水处理过程中,应该仔细考察原水水质特点和处理后水质要求,结合各工艺单元的净水特点,才能有效地去除各分子量区间的有机物,提高整个工艺对有机物的去除效率^[14]。

3 结论

(1) 常规工艺对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 及 BDOC 的去除率分别为 30 %、41 %、27 %和 25 %。强化常规工艺和生物活性炭工艺在此基础上进一步提高了出水水质。对各指标的去除率分别为 34 %和 52 %、48 %和 50 %、37 %和 40 %及 74 %和 82 %。强化过滤工艺和生物活性炭工艺在有机物的去除方面较常规工艺有其明显的优势。

(2) 经过常规工艺、强化过滤工艺及生物活性炭工艺后原水中的 1,2,4-三氯苯浓度依次降低,去除率依次增加,分别为 8.0 %、36.7 %、40.9 %。强化过滤工艺和生物活性炭工艺对特殊微量有机物的去除效果明显,能显著提高出水水质。

(3) 对各工艺出水有机物分子量分布特征研究表明长江南京段原水中的溶解性有机物主要由小于 1 kDa 的有机物构成。常规工艺对大于 5 kDa 的有机物去除效果明显;强化过滤工艺对小于 1 kDa 的有机物去除率大于 25 %,生物活性炭工艺对各个分子量区间的去除效果都比较好,特别是对原水中

占多数的小于 1 kDa 的有机物去除率大于 30 %。

在常规工艺不能满足微污染水源水的处理要求时,强化过滤工艺在不增加过大投资的基础上,能很好地去除原水中的有机物,是解决常规工艺局限性的有效手段之一。在建设场地及资金充足的情况下,可以考虑利用生物活性炭工艺(或臭氧生物活性炭工艺)来降低出水中的有机物含量,提高出水水质,增强城市供水的安全性。

参考文献

- [1] 徐亚同,张秋卓,周扬,等.上海水源地的安全与保护对策[J].净水技术,2010,29(2):1-2,14.
- [2] 上海市环境科学研究院,上海市环境监测中心.上海市郊区饮用水源地环境现状调研报告[R]. 2002.
- [3] 曹学静,郝斌,马青兰.引黄工程沿线水质现状分析与发展趋势预测[J].净水技术,2011,30(2):10-13.
- [4] Deok-hee CHO, Sung-ho KONG, Seong-genu OH. Analysis of trihalomethanes in drinking water using headspace-SPME technique with gas chromatography[J]. Water Research, 2003,37(2): 402-408.
- [5] 姚洁.给水处理工艺系统分析与优化[J].净水技术,2011,30(5): 56-60.
- [6] 许国仁,李圭白.高锰酸钾复合药剂强化过滤微污染水质的效能研究[J].环境科学学报,2002,22(5):664-670.
- [7] 张长,曾光明,余健.生物强化滤池处理有机微污染源水的研究与发展浅析[J].水处理技术,2002,21(4):9-12.
- [8] 陆坤明.微污染水源和城市供水臭氧生物活性炭处理工艺的应用[J].净水技术,2010,29(4):19-23.
- [9] 聂凤明.生物活性炭技术在水处理中的应用现状与前景[J].南方冶金学院学报,2005,26(4): 40-44.
- [10] Muneer M., Theurich J., Bahnemann D. Titanium dioxide mediated photocatalytic degradation of 1,2-diethylphthalate[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry,2001,143:213-219.
- [11] GB 5075—2006,生活饮用水标准检测方法[S].
- [12] 王玉芬,张肇铭,胡筱敏.含氯苯类化合物废水处理技术研究进展[J].工业安全与环保,2006,32(3):32-39.
- [13] 汪力.从分子质量的变化分析臭氧活性炭工艺[J].中国给水排水,2005,21(3):12-16.
- [14] 高炜,陈学源,安东,等.典型水处理工艺处理黄浦江原水有机物变化规律初探[J].净水技术,2011,30(4):26-30.