

# Comparison Study on Removal Micro-pollutants of Yangtze River Water by Biofilters

Hong Xiang<sup>1,2,3</sup>, Xiwu Lü<sup>1\*</sup>, Lihong Yin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Environmental Medicine and Engineering, Ministry of Education; School of Public Health, Southeast University, Nanjing, China

<sup>3</sup>Guizhou Center for Disease Control and Prevention, Guiyang, China  
Email: xiangrhong@yahoo.cn, \*xiwulu@seu.edu.cn

Received 2013

**Abstract:** Taking the raw water of Yangtze River as the research object, micro-pollutant removal efficiencies of biofilters for the river water were investigated. The results showed that the average removal rate of  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  and BDOC was 80.0%, 95.4%, 25.0%, 12.0% and 68.3% in the biologically-enhanced active filter type I, and 85.2%, 95.4%, 26.2%, 12.0% and 70.0% in the biologically-enhanced active filter type II. The rates in the biologically-enhanced active filter type II were not significantly higher than those in the biologically-enhanced active filter type I ( $p > 0.05$ ). The average removal rates of  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  and BDOC by the biological activated carbon filter type I were 84.2%, 95.4%, 24.0%, 16.0% and 67.9%, respectively; The average removal rates of them by the biological activated carbon filter type II were 89.4%, 95.4%, 31.2%, 16.0% and 72.0%, respectively. The removal rates  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and BDOC by the biological activated carbon filter type II were significantly higher than those by the biological activated carbon filter type I. The content of organic material with low MW took great part in Yangtze River, in which the proportion of the organics with MW < 1 k Dalton accounted for 48% - 60%. The biologically-enhanced active filter and biological activated carbon filter processes removed the organics with low MW more effectively than that with high MW. For the removal rate of the organics with low MW, the biologically-enhanced active filter type II was more effectively than the biologically-enhanced active filter type I, and the biological activated carbon filter type II was also more effectively than the biological activated carbon filter type I. Therefore, the biofilter process could make up the deficiency in removing the organics with low MW by conventional water treatment process, and could assure good safety of drinking water.

**Keywords:** Biofilter; Micro-Pollutant; Molecular Weight Distribution; Removal Efficiency

## 不同生物活性滤池处理长江微污染原水的比较研究

向红<sup>1,2,3</sup>, 吕锡武<sup>1\*</sup>, 尹立红<sup>2</sup>

<sup>1</sup>东南大学能源与环境学院, 南京, 中国, 210096

<sup>2</sup>东南大学公共卫生学院环境医学工程教育部重点实验室, 南京, 中国, 210009

<sup>3</sup>贵州省疾病预防控制中心, 贵阳, 中国, 550004

Email: xiangrhong@yahoo.cn, \*xiwulu@seu.edu.cn

收稿日期: 2013

**摘要:** 以长江原水为研究对象, 通过四种生物活性滤池处理单元对长江水源水中微污染物的去除效果进行对比研究。结果显示生物强化滤池 I 和 II 对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  和 BDOC 的平均去除率分别为 80.0% 和 85.2%、95.4%和 95.4%、25.0%和 26.2%、12.0%和 12.0%、68.3%和 70.0%, 生物强化滤池 II 的去除率稍高于生物强化滤池 I, 但差异无显著性 ( $p > 0.05$ )。生物活性炭滤池 I 和 II 对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  和 BDOC

\*Corresponding author 通讯作者。

的平均去除率分别为 84.2%和 89.4%、95.4%和 95.4%、24.0%和 31.2%、16.0%和 16.0%、67.9%和 72.0%，其中生物活性炭滤池 II 对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 BDOC 的去除率高于生物活性炭滤池 I ( $p < 0.05$ )。长江原水中的溶解性有机物主要由小于 1K Daltot 的有机物构成 (占 48% - 60%)，生物活性炭滤池和生物强化滤池对低分子有机物的去除率高于高分子有机物；对于水中的低分子量有机化合物，生物强化滤池 II 对其去除率要高于生物强化滤池 I，生物活性炭滤池 II 的去除率也高于生物活性炭滤池 I。因此，生物活性滤池处理单元能弥补常规工艺难去除低分子量有机化合物上的不足，确保饮用水的优质安全性。

**关键词：**生物滤池；微污染物；分子量分布；去除效果

## 1 引言

随着全球工业化特别是石油化工、农药等的不断发展,使进入水体的化学物质种类和数量猛增,超过了水体的恢复能力,引起水体的污染。现有的常规混凝-沉淀-过滤-消毒水处理工艺主要去除水中悬浮物、胶体物质以及杀灭病菌,对溶解性有机物的去除率很低。近年来,生物处理在饮用水处理中的应用受到越来越多的关注,能有效地去除溶解性有机物、氨氮等,具有经济、简便之优势,成为了处理微污染水强有力的手段<sup>[1-4]</sup>。它是生物活性微生物吸附在固相载体表面,载体通常是活性炭,它具有很大的表面积为细胞吸附-使微生物易于形成生物膜。其的原理是生物反应器中生物膜上的微生物,主要是一些好氧贫营养性微生物,能利用各种化合物,特别是在有机物浓度极低的环境下快速生长繁殖,产生各种代谢相关酶,利用各种底物。源水在与生物膜接触时,通过微生物的代谢活动、生物絮凝和吸附等综合作用,使源水中的污染物如氨氮、有机物、铁和锰等逐渐被氧化和转化,达到净化水质的目的。Stratton 等<sup>[5]</sup>阐述了贫营养微生物利用微量有机物机理,提出了第二级利用理论;如果有一种基质能够提供维持细胞生长的碳源和能源,即使浓度低于最小基质浓度的化合物也能被微生物氧化和利用。第二级利用理论为生物活性滤池对水中微量有机物的去除提供了重要的理论基础。

大量研究表明,生物处理是降低受污染供水污染物特别是有机物的有效方法,生物膜处理的性能受载体聚集生物量的能力影响,生物膜微生物的底物利用率受底物通过滤床的物理扩散率和水中溶解氧百分率影响<sup>[6]</sup>。如 Han 等<sup>[7]</sup>使用双层生物曝气滤池处理污染原水的研究中,结果显示,生物曝气滤池可以有效地除去 TOC 和  $\text{UV}_{254}$ ,其平均去除率分别为 24.62%和

20.74%。原水中的有机污染种类很多,化学成分很复杂,大多数有机污染物浓度太低而不能一一分析。因此,一些综合有机指标如生化需氧量(BOD)、化学耗氧量(COD)、总有机碳(TOC)、溶解氧(DO)和  $\text{UV}_{254}$  等用来描述有机污染水平。当前生物滤池饮水净化效率通常用  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  去除率等评价<sup>[8-9]</sup>, Chen 等<sup>[10]</sup>使用  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TOC、 $\text{UV}_{254}$ 、AOC、BDOC 和 THMs 综合指标评价不同饮水净化工艺,传统工艺结合  $\text{O}_3\text{-BAC}$  能有效的去除有机物,满足饮用水要求标准。

本文以长江水源水为研究对象,通过检测生物滤池进出水水质指标  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 、BDOC 等,同时分析滤池对不同分子量区间有机物的去除效果;对比分析四种生物活性滤池对微污染原水的净化效果,以期为提高饮用水生物处理能力提供科学参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验装置

本研究所取样品来源于某市自来水厂净水中试验装置,该装置运行 6 个月后净水效果达到稳定,流量为  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,其水处理流程见图 1。其中各生物滤池为内径 25 cm、高 100 cm 的圆柱形有机玻璃管,生物强化滤池 I 和 II 分别填充柱状活性炭+砂(2:1)和颗粒活性炭+砂(2:1),生物活性炭滤池 I 和 II 分别填充柱状活性炭和颗粒活性炭(活性炭性能参数见表 1)。生物强化滤池的运行条件:空床接触时间(EBCT)为 10 min,气水联合反冲,气反冲强度  $6 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$ ,历时 5 min,水反冲强度  $15 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$  左右,历时 10 min;生物活性炭滤池的运行条件:EBCT 为 13.5 min,气水联合反冲,气反冲强度  $5 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$ ,历时 5 min,水反冲强度  $12 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2$  左右,历时 15 min。

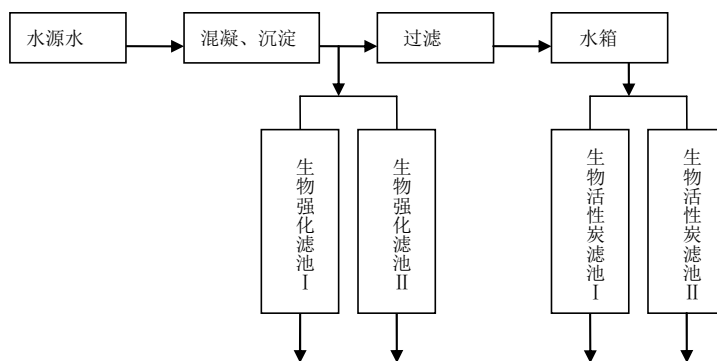


Figure 1. Flow diagram of water treatment process  
图 1. 水处理流程

Table 1. Characteristics of activated carbon  
表 1. 颗粒与柱状活性炭的性能参数

指标	颗粒状活性炭	柱状活性炭
强度/%	95.4	97.9
表观密度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	513	500
pH	8.6	8.9
总灰分/%	9.1	11.8
碘值/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	1003	938
亚甲蓝值/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	262	232
丁烷值/%	24.2	23.4
四氯化碳值/%	62.19	60.14
糖蜜值/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	158	152
单宁酸值/( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	2.85	2.76
有效粒径(mm)	0.60	1.48
均匀系数	1.88	1.15

## 2.2 原水水质

在实验期间原水中溶解性有机碳 (DOC)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、浊度、pH 和温度分别在 1.2~3.8 mg/L、0.02~1.18 mg/L、0.024~0.200 mg/L、14.0~258.0 NTU、7.74~8.06 和 4.5~30℃ 之间。

## 2.3 检测项目及方法

水质浊度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  指标参照生活饮用水标准检验方法 (GB/T 5750.5-2006) 进行测定。水样经 0.45  $\mu\text{m}$  的微滤膜过滤后,采用 UV-2000 紫外可见分光光度计测定 UV254 值。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℃) 培养 10 d,测定培养前后 DOC (溶解性有机碳) 的差值即为 BDOC。有机物分子量分布测定采用超滤膜法,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 kDa、10 kDa、5 kDa、1 kDa、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计算 (如图 2)。

## 3 结果与讨论

### 3.1 两种生物强化滤池的处理效果

从表 2 可见,两滤池的进水浊度波动较大 (即使在较高进水浊度的情况下),但两滤池的出水浊度一直稳定在 0.2NTU 左右。与相关研究结果一致,即生物活性滤池对浊度的去除率较高,出水浊度均能保证在 1NTU 以下<sup>[11-13]</sup>。同时还显示,两种不同炭型的生物强化滤池对浊度去除无差异。生物滤池内稳定生长的硝化菌可以实现对氨氮高效去除<sup>[14]</sup>,生物强化滤池 I 和 II 对  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  平均去除率在 80% 以上,良好的去除效果表明生物强化滤池中存在大量的硝化细菌。

生物强化滤池 I 和 II 对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  平均去除率分别为 25.0% 和 26.2%， $\text{UV}_{254}$  为 12.0%，BDOC 分别为 68.3% 和 70.0%。生物强化滤池 II 的去除率稍高于生物强化滤池 I，但差异无显著性 ( $p > 0.05$ )。

### 3.2 两种生物活性炭滤池的处理效果

从表 3 可见，生物活性炭滤池 I 和 II 出水浊度分

别为 0.22 和 0.19 NTU，差别不大，处理效果较好。它们对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  和 BDOC 的去除率分别达到 84.2%、95.4%、24.0%、16.0% 和 67.9%，其中两者对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 BDOC 的去除率存在差异且有统计学意义 ( $p < 0.05$ )，即生物活性炭滤池 II 高于生物活性炭滤池 I，这表明颗粒状炭生物滤池的净水效果要优于柱状炭生物滤池。通过比较两类活

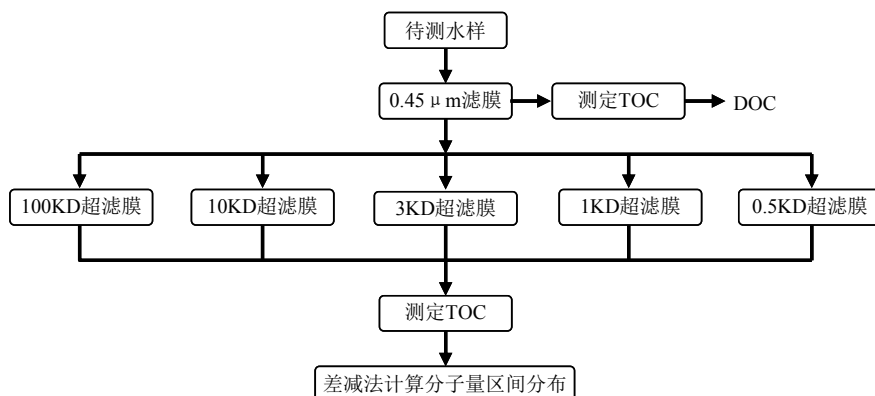


Figure 2. Measurement process of molecular weight distribution of organic matter  
图 2. 有机物分子量分布测定

Table 2. Comparison of purification effect between two biologically-enhanced active filters ( $n = 3$ )  
表 2. 两生物强化滤池的处理效果 ( $n = 3$ )

监测指标	滤池进水	生物强化滤池 I		生物强化滤池 II	
		出水	去除率	出水	去除率
浊度	7.97	0.22	97.2%	0.20	97.5%
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.25	0.05	80.0%	0.037	85.2%
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.022	0.001	95.4%	0.001	95.4%
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	1.60	1.20	25.0%	1.18	26.2%
$\text{UV}_{254}$	0.025	0.022	12.0%	0.022	12.0%
BDOC	0.537	0.17	68.3%	0.165	70.0%

注：表中数据为三次测定的平均值

Table 3. Comparison of purification effect between two biological activated carbon filters ( $n = 3$ )  
表 3. 两种生物活性炭滤池的处理效果 ( $n = 3$ )

监测指标	滤池进水	生物活性炭滤池 I		生物活性炭滤池 II	
		出水	去除率	出水	去除率
浊度	0.83	0.22	73.5%	0.19	77.1%
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.19	0.03	84.2%	0.02	89.4%*
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.022	0.001	95.4%	0.001	95.4%
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	1.25	0.95	24.0%	0.86	31.2%*
$\text{UV}_{254}$	0.025	0.021	16.0%	0.021	16.0%
BDOC	0.486	0.156	67.9%	0.136	72.0%*

注：表中数据为三次测定的平均值，\*表示它们之间的差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ )

性炭填料可知,颗粒活性炭的性能参数中糖蜜值、单宁酸值、碘值大于柱状活性炭,反映颗粒活性炭空隙结构中大孔、中孔的比例高,微孔结构发达,它们为微生物提供良好栖息场所,有利于微生物群落生长繁殖。同时,颗粒活性炭粒径小,均匀度高,过滤过程的水力剪切力小,滤床上优势群落受到的外部影响小,滤池的净水效果显著。

另外,有研究表明,应用于微污染水源水处理的生物活性炭,由于水中有机物含量很低,属于贫营养环境,因此生长在生物活性炭表面的微生物是以长 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 的杆菌为主,而且所形成的生物膜也是破裂分散的,颗粒状活性炭表面存在的 $1\ \mu\text{m}$ 以上凸起有利于微生物在活性炭表面生存和挂膜,为微生物的生物作用创造良好的条件。

综上所述,两种不同炭型填料对生物活性炭滤池在降低浊度、控制出水中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{UV}_{254}$ 等方面影响不大,两种填料的滤池均能具有良好的去除效果;但颗粒状炭在去除有机污染物方面的效果要优于柱状炭。因此,在实际生产工艺中,水厂工艺的改造或升级中滤池填料的选择上应考虑实际情况综合水处理目标、滤池结构和活性炭价格等因素,同时参考滤料除污能力作适宜的选择。

### 3.3 水源水有机物分子量分布与生物滤池去除效果

近年来饮用水水源的有机污染已成为全球普遍存在的主要环境问题之一,随着工业污染和水土流失

的加剧,水源水中有机物含量逐渐提高,成分也越来越复杂。有研究表明,水源水中有机物分子量分布可以反映有机物的特性,如我国黄浦江、太湖、长江、钱塘江流域、杭州水源水、东江、澳门等水源水以低分子(小分子)有机物为主<sup>[15-18]</sup>。各种水处理工艺对于有机物的去除效率相差很大,这与水源水中有机物在不同分子量区间的分布特性有很大关联。因此了解水源水中有机物在不同分子量区间的分布特性,有助于处理工艺的选择<sup>[18]</sup>。同时我们根据长江南京段水源水中有机物分子量分布及其不同分子量有机物的特性出发,对4种生物滤池的不同分子量有机物去除情况进行分析评价。

对长江南京段水源水按春夏秋冬四季进行分子量分布的分析,了解水源水不同季节的水质变化状况,分析其不同季节的主要污染物来源具有重要的作用,对自来水厂选择合适的处理工艺具有重要的指导作用。由图3可知,春夏秋冬四季各分子量区间有机物的DOC浓度变化不大,小分子有机物( $\text{MW}<1\ \text{k}\ \text{Dalton}$ )占总的有机物总量的比例在48%~60%之间,随季节变化比例稍有不同。夏季小分子区间的有机物DOC浓度相对较高,大分子区间的有机物基本上低于其他季节。这一结果与方华等人研究一致,原水DOC在各分子量区间的比例受季节影响呈现出一定的变化,小于 $1\times 10^3\ \text{Da}$ 的低分子量有机物比例在夏季(51%)明显高于春(44%)、秋(44%)、冬(42%)三季,而大于 $10\times 10^3\ \text{Da}$ 的大分子量有机物比例在夏季(20%)则低于春(24%)、秋(26%)、冬(28%)三季<sup>[15]</sup>。

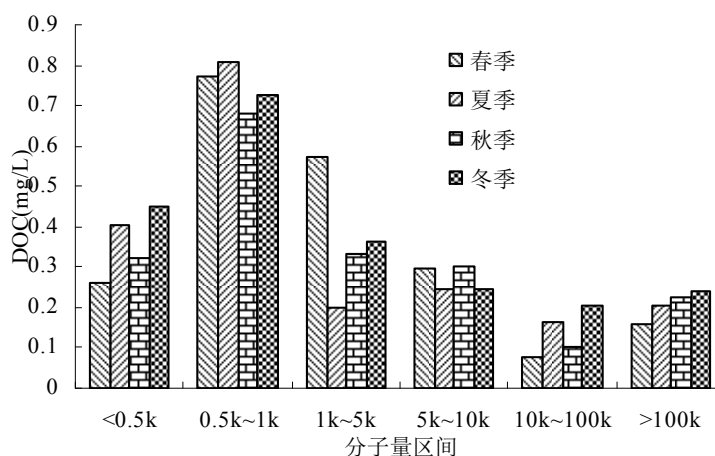


Figure 3. Molecular weight distribution of raw water from Yangzi River  
图 3. 长江水源水中有机物的分子量分布

从表 4 可知, 春夏秋冬原水中分子量为 1 k~5 k 的有机物分别占 26.8%、9.8%、16.9%和 16.3%, 而小于 1 k 的分别占 48.3%、60.0%、51.2%和 52.8%, 长江南京段水源水以低分子(小分子)有机物构成为主, 本研究结果与其他相关研究类似<sup>[15,17]</sup>。

李发站等<sup>[19]</sup>研究显示曝气生物滤池单元对分子量小于 0.5 kD(道尔顿)的有机物去除率最高, 其次是分子量介于 1 kD~3 kD 的有机物; 生物活性炭单元对分子量小于 10 kD 的有机物均能有效去除, 分子量越小, 去除率越高。从表 5 和 6 可知, 生物滤池(生物活性炭滤池和生物强化滤池)对低分子有机物的去除率高于高分子有机物。各滤池对不同分子量的有机物去除率存在明显的梯度, 即对分子量小于 1 kD 的有机物去除率最高、分子量在 1 kD~10 kD 之间的有机物次之, 大于 10 kD 的有机物最低。对低分子量有机化合物来

说, 生物强化滤池 II 对其去除率要高于生物强化滤池 I, 生物活性炭滤池 II 的去除率也高于生物活性炭滤池 I。

生物滤池对有机物的去除率在不同季节是不同的, 生物活性炭滤池对分子量小于 0.5 kD 的有机物的去除率较高, 并随季节不同在 42.8%~80.4%之间变化; 而生物强化滤池对该分子量范围有机物的去除率在 16.6%~41.1%之间。生物活性炭滤池对 0.5 kD~1 kD 之间有机物的去除率随季节波动在 21.2%~71.0%之间; 而生物强化滤池对该分子量范围的有机物去除率在 20.3%~30.6%。生物活性炭滤池对 1 kD~10 kD 之间有机物也有一定去除作用, 去除率随季节波动在 17.5%~46.6% 之间, 而生物强化滤池对该分子量范围有机物的去除率在 11.8%~28.7%。生物活性炭滤池和生物强化滤池对大于 10 kD 有机物的去除率小于 14%。

Table 4. Molecular weight distribution of organics in Yangtze River  
表 4. 原水中有机物分子量分布 (n = 3)

分子量分布区间	季节	原水 DOC	
		数值(mg/L)	占总量比率(%)
< 0.5 k	春季	0.261	12.2
	夏季	0.403	20.0
	秋季	0.324	16.5
	冬季	0.448	20.2
0.5 k~1 k	春季	0.772	36.1
	夏季	0.807	40.0
	秋季	0.682	34.7
1 k~5 k	冬季	0.724	32.6
	春季	0.573	26.8
	夏季	0.198	9.8
5 k~10 k	秋季	0.332	16.9
	冬季	0.362	16.3
	春季	0.299	14.0
	夏季	0.244	12.1
10 k~100 k	秋季	0.300	15.3
	冬季	0.244	11.0
	春季	0.077	3.6
>100 k	夏季	0.163	8.1
	秋季	0.102	5.2
	冬季	0.206	9.3
>100 k	春季	0.156	7.3
	夏季	0.205	10.2
	秋季	0.224	11.4
>100 k	冬季	0.238	10.7

注: 表中数据为三次测定的平均值

Table 5. Removal rate of organics at different MW ranges by the biologically-enhanced active filter type I and biological activated carbon filter type I ( $n = 3$ )表 5. 生物强化滤池 I 和生物活性炭滤池 I 对不同分子量区间有机物的去除效果 ( $n = 3$ )

分子量分布区间	季节	生物强化滤池 I			生物活性炭滤池 II		
		进水 DOC (mg/L)	出水 DOC (mg/L)	去除率 (%)	进水 DOC (mg/L)	出水 DOC (mg/L)	去除率 (%)
< 0.5 k	春季	0.260	0.174	33.2	0.252	0.144	42.8
	夏季	0.401	0.251	37.5	0.404	0.131	67.6
	秋季	0.322	0.269	16.6	0.318	0.088	72.3
	冬季	0.445	0.361	18.9	0.439	0.137	68.8
0.5 k~1 k	春季	0.757	0.603	20.3	0.720	0.477	33.7
	夏季	0.791	0.574	27.4	0.801	0.287	64.2
	秋季	0.668	0.457	31.6	0.678	0.254	62.6
	冬季	0.710	0.555	21.8	0.719	0.248	65.5
1 k~5 k	春季	0.564	0.495	12.2	0.526	0.414	21.4
	夏季	0.188	0.144	23.5	0.172	0.106	38.7
	秋季	0.320	0.250	22.0	0.322	0.176	45.3
	冬季	0.348	0.253	17.4	0.348	0.220	36.7
5 k~10 k	春季	0.239	0.210	12.1	0.218	0.151	30.7
	夏季	0.195	0.145	25.8	0.205	0.139	32.4
	秋季	0.240	0.203	15.5	0.251	0.177	29.6
	冬季	0.195	0.171	12.3	0.232	0.173	25.3
10 k~100 k	春季	0.057	0.052	8.3	0.077	0.070	8.5
	夏季	0.103	0.094	8.8	0.101	0.095	6.3
	秋季	0.086	0.081	5.6	0.082	0.078	5.4
	冬季	0.166	0.145	12.4	0.154	0.138	10.2
> 100k	春季	0.063	0.059	6.5	0.050	0.047	5.8
	夏季	0.105	0.101	4.6	0.098	0.095	3.5
	秋季	0.135	0.123	9.0	0.120	0.114	4.7
	冬季	0.126	0.118	6.3	0.123	0.117	5.0

注: 表中数据为三次测定的平均值

研究表明, 消毒副产物(DBPs)中的  $\text{CHCl}_3$  和  $\text{CHCl}_2$  主要是由分子量为 1000~500 Dalton 的有机物产生, 而毒性更大的  $\text{CHClBr}_2$  和  $\text{CHBr}_3$  则是由分子量小于 500 Dalton 的有机物产生<sup>[20]</sup>。

因此在制水工艺氯化消毒处理前, 应采用有效的

方法消除低分子量有机物, 方能确保出水水质。一些研究显示常规净水工艺对大分子量(大于  $10 \times 10^3$  Dalton)有机物去除较为有效, 而对低分子量有机物去除效果则较差<sup>[21-22]</sup>。

长江原水以小分子量有机物为主而常规工艺主

Table 6. Removal rate of organics at different MW ranges by the biologically-enhanced active filter type II and biological activated carbon filter type II (n = 3)

表 6. 生物强化滤池 II 和生物活性炭滤池 II 对不同分子量区间有机物的去除效果 (n = 3)

分子量分布区间	季节	生物强化滤池 II			生物活性炭滤池 II		
		进水 DOC (mg/L)	出水 DOC (mg/L)	去除率 (%)	进水 DOC (mg/L)	出水 DOC (mg/L)	去除率 (%)
<0.5 k	春季	0.260	0.159	38.8	0.252	0.129	48.8
	夏季	0.401	0.236	41.1	0.404	0.079	80.4
	秋季	0.322	0.251	22.0	0.318	0.068	78.6
	冬季	0.445	0.366	17.8	0.439	0.096	78.1
0.5 k~1 k	春季	0.757	0.577	23.8	0.720	0.567	21.2
	夏季	0.791	0.542	31.5	0.801	0.232	71.0
	秋季	0.668	0.483	27.7	0.678	0.215	68.3
	冬季	0.710	0.528	25.6	0.719	0.224	68.8
1 k~5 k	春季	0.564	0.485	14.0	0.526	0.434	17.5
	夏季	0.188	0.134	28.7	0.172	0.098	43.0
	秋季	0.320	0.236	26.2	0.322	0.172	46.6
	冬季	0.348	0.273	21.6	0.348	0.193	44.5
5 k~10 k	春季	0.239	0.199	16.7	0.218	0.126	42.2
	夏季	0.195	0.146	25.1	0.205	0.131	36.1
	秋季	0.240	0.188	21.7	0.251	0.164	34.7
	冬季	0.195	0.172	11.8	0.232	0.169	27.2
10 k~100 k	春季	0.057	0.053	7.0	0.077	0.071	7.8
	夏季	0.103	0.092	10.7	0.101	0.091	9.9
	秋季	0.086	0.080	7.0	0.082	0.078	4.9
	冬季	0.166	0.144	13.2	0.154	0.139	9.7
> 100 k	春季	0.063	0.057	9.5	0.050	0.043	14.0
	夏季	0.105	0.096	8.6	0.098	0.092	6.1
	秋季	0.135	0.120	11.1	0.120	0.114	5.0
	冬季	0.126	0.116	7.9	0.123	0.101	2.9

注：表中数据为三次测定的平均值

要对大分子量有机物去除效果好的特性，需要通过其他的处理工艺来去除水中小分子量的有机物，才可能从根本上提高出水水质。在本研究中使用生物活性炭滤池和生物强化滤池能有效的去除大分子量在 10 kD 以下的有机物，特别是对原水中占多数的小于 1 K 的有机物去除效果显著。这说明可通过生物强化滤池和

生物活性炭滤池处理单元来完善常规工艺对水源水中不同分子量的去除，实现各处理单元的互补性，达到净水的目的。

#### 4 结论

(1) 生物强化滤池 I 和 II 对  $COD_{Mn}$  平均去除率



分别为 25.0% 和 26.2%，UV<sub>254</sub> 为 12.0%，BDOC 分别为 68.3% 和 70.0%。生物强化滤池 II 的去除率稍高于生物强化滤池 I，但差异无显著性 ( $p > 0.05$ )。两个生物活性炭滤池有良好的除污效果，它们对 NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub> 和 BDOC 的去除率分别达到 84.2%、95.4%、24.0%、16.0% 和 67.9%，其中两者对 NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub> 和 BDOC 的去除率存在差异且有统计学意义 ( $p < 0.05$ )，即生物活性炭滤池 II 高于生物活性炭滤池 I，这表明颗粒状炭生物滤池的净水效果要优于柱状炭生物滤池。

(2) 长江原水中的溶解性有机物主要由小于 1 K 的有机物构成；生物活性炭滤池和生物强化滤池对低分子有机物的去除率高于高分子有机物；对低分子量有机化合物来说，生物强化滤池 II 对其去除率要高于生物强化滤池 I，生物活性炭滤池 II 的去除率也高于生物活性炭滤池 I。

## 参考文献 (References)

- [1] L. P. Qiu, S. B. Zhang, G. W. Wang, *et al.* Performance and nitrification properties of biological aerated filters with zeolite, ceramic particles and carbonate media. *Bioresource Technology*, 2010, 101:7245-7251.
- [2] Y. Feng, Y. Z. Yu, Q. N. Duan. The characteristic research of ammonium removal in grain-slag biological aerated filter(BAF). *Desalination*, 2010, 263: 146-150.
- [3] B. Jiang, W. R. Hu, H. Y. Pei, *et al.* The influence of aeration on nitrification and the nitrifier distribution in an up-flow biological aerated filter for tertiary treatment of municipal sewage. *Desalination and water treatment*. 2010, 24: 308-320.
- [4] S. B. He, G. Xue, H. N. Kong. The performance of BAF using natural zeolite as filter media under conditions of low temperature and ammonium shock load. *Journal of hazardous materials*, 2007, 143: 291-295.
- [5] B. E. Stratton, E. Namkung, B. E. Rittmann. Secondary utilization of trace organics by biofilms on porous media. *J. AWWA*, 1983, 75(9): 463-469.
- [6] E. Carraro, E. H. Bugliosi, L. Meucci, *et al.* Biological drinking water treatment processes, with special reference to mutagenicity. *Water Research*, 2000, 34(11): 3042-3054.
- [7] M. Han, Z. W. Zhao, F. Y. Cui, *et al.* Pretreatment of contaminated raw water by a novel double-layer biological aerated filter for drinking water treatment. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 37(1-3): 308-314.
- [8] J. Y. Tian, Z. L. Chen, Y. L. Yang, *et al.* Hybrid process of BAC and sMBR for treating polluted raw water. *Bioresource Technology*, 2009, 100 (24): 6243-6249.
- [9] Q. H. Wang, C. P. Feng, Y. X. Zhao, *et al.* Denitrification of nitrate contaminated groundwater with a fiber-based biofilm reactor. *Bioresource Technology*, 2009, 100(3): 2223-2227.
- [10] C. Chen, X. J. Zhang, W. J. He, *et al.* Comparison of seven kinds of drinking water treatment processes to enhance organic material removal: A pilot test. *Science of the Total Environment*, 2007, 382(1): 93-102.
- [11] Zhidong L, Yebin D, Xincheng X. An aerated biofilter for treating petrochemical wastewater. *Petroleum Science and Technology*, 2010, 28(11): 1147-1157.
- [12] Pak D, Kim D. Biological filtration for BOM and particle removal from drinking water supplies [A]. In W Verstraete (ed). *European Symposium on Environmental Biotechnology*. Oostende, Belgium: A A Balkema Publishers. 2004, 487-490.
- [13] X. Y. Li, H. P. Chu. Membrane bioreactor for the drinking water treatment of polluted surface water supplies. *Water Research*, 2003, 37(19): 4781-4791.
- [14] Y. Feng, Y. Z. Yu, Q. N. Duan, *et al.* The characteristic research of ammonium removal in grain-slag biological aerated filter (BAF). *Desalination*, 2010, 263(1-3):146-150.
- [15] 方华, 吕锡武, 朱晓超, 等. 黄浦江原水中有机物组成与特性[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(3): 495-499.
- [16] 乔春光, 魏群山, 王东升, 等. 典型南方水源溶解性有机物分子量分布变化及去除特性[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(2): 195-200.
- [17] 董秉直, 曹达文, 范瑾初, 等. 黄浦江水源的溶解性有机物分子量分布变化的特点[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(5): 553-556
- [18] 李爽, 张晓健, 范晓军, 等. 水源水中不同分子量区间有机物的分布及控制对策[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(3): 327-331.
- [19] 李发站, 吕锡武, 李彬, 等. 有机物分子量分布特点对 BAF-O<sub>3</sub>-BAC 净水工艺的评价[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(5): 873-877.
- [20] C. N. Chang, A. Chao, F. S. Lee, *et al.* Influence of molecular weight distribution of organic substances on the removal efficiency of DBPs in a conventional water treatment plant. *Water Science and Technology*, 2000, 41(10-11): 43-49.
- [21] X. H. Luo, L. L. Cao, Z. S. Wang. Study on the removal of different molecular weight organics by water purification process. *China Environmental science*, 1998, 18(4): 341-344.
- [22] C. J. Volk, M. W. Lechevallier. Effects of conventional treatment on AOC and BDOC levels. *Journal of American Water Works Association*, 2002, 94(6): 112-123.