

张春雷, 王东升, 樊康平, 等. 2009 活性炭滤池中微生物特征及其对溶解性有机碳的去除作用 [J]. 环境科学学报, 29(11): 2267–2273
 Zhang C L, Wang D S, Fan K P, et al. 2009. Characteristics of biomass in biological activated carbon (BAC) filters and its contribution to DOC removal [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(11): 2267–2273

活性炭滤池中微生物特征及其对溶解性有机碳的去除作用

张春雷^{1, 2*}, 王东升¹, 樊康平², 顾军农², 李涛¹

1 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验, 北京 100085

2 北京市自来水集团水质监测中心, 北京 100192

收稿日期: 2009-02-04 修回日期: 2009-05-12 录用日期: 2009-07-30

摘要: 采用异养菌总数计数 (HPC) 法检测了北京地区 J 水厂活性炭滤池中微生物量, 并分析了活性炭滤池进出水中有机物的组成、活性炭的吸附作用及微生物作用对溶解性有机碳 (DOC) 去除的贡献率。结果表明, 不同炭龄、不同运行周期活性炭滤池中的微生物量有显著的差异。由于溶解性可生物降解有机碳 (BDOC) 占溶解性有机碳 (DOC) 的比例较小, 且受微生物数量、活性等因素的影响, 微生物对 DOC 的去除效果极为有限, 在 1.5 年和 5 年炭龄活性炭滤池中对 DOC 的去除率仅占总去除率的 18.8% 和 26.4%。此外, 微生物对较为敏感的嗅味物质 2-MIB 和 geosmin 去除作用也不显著, 去除率在 15% 以下 (初始浓度为 100 ng L⁻¹); 在使用 5 年活性炭滤池中, 微生物对 2-MIB 和 geosmin 去除率为 12% 和 14%, 分别占总去除率的 32% 和 29%。因此, 北京地区地表水净水厂活性炭滤池中微生物对有机物控制的贡献率较低, 对 DOC 的去除主要以活性炭的吸附为主。

关键词: 活性炭; 溶解性可生物降解有机碳 (BDOC); 溶解性有机碳 (DOC); 微生物量; 异养菌总数计数 (HPC); 嗅味; 吸附

文章编号: 0253-2468(2009)11-2267-07 中图分类号: X171 文献标识码: A

Characteristics of biomass in biological activated carbon (BAC) filters and its contribution to DOC removal

ZHANG Chunlei^{1, 2*}, WANG Dongsheng¹, FAN Kangping², GU Junnong², LI Tao¹

1 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2 Water Quality Monitoring Center of Beijing Waterworks Group, Beijing 100192

Received 4 February 2009; received in revised form 12 May 2009; accepted 30 July 2009

Abstract Heterotrophic plate count (HPC) determination is applied to measure the biomass on the carbon used in the biological activated carbon (BAC) filter in a water treatment plant in Beijing. The effect of the DOC component in the filtered water, the adsorption of active carbon, the biological activity, and their contribution to DOC removal is analyzed. The results indicate that the biomass fluctuates greatly with the service time of the carbon filter and the operation stage. The micro-biological degradation in BAC filters contributes little to the total DOC removal because of the low ratio of BDOC to DOC in the filtered water. The micro-biologically degraded DOC in the 1.5a-carbon filter comprises only 18.8% of total DOC removed, and 26.4% in the 5a-carbon filter. Furthermore, the micro-biological degradation process is not significant for odorous material removal and contributes 32% and 29% to the total removal of 2-MIB and geosmin, respectively, even in the 5a carbon filter. Therefore, the contribution of micro-biological degradation in DOC removal is less than the adsorption of the carbon in this water plant.

Keywords activated carbon; BDOC; DOC; biomass; HPC; odor and taste; adsorption

1 引言 (Introduction)

活性炭处理技术是当前去除水中有机污染物

最成熟、有效的方法之一, 并已在美国、日本和欧洲的多个发达国家以及我国的部分大中型净水厂得到了应用。颗粒活性炭滤池结合了活性炭的吸附作

基金项目: 北京市科技计划重大项目 (No. D0605004040421)

Supported by the Beijing Municipal Science & Technology Key Projects (No. D0605004040421)

作者简介: 张春雷 (1976—), 男, E-mail: cynthe@126.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: ZHANG Chunlei (1976—), male, E-mail: cynthe@126.com; * Corresponding author

用和微生物的降解作用,两者共同决定着对水中有机物的去除效率(Kin *et al.*, 1997).活性炭使用初期主要是依靠其吸附作用,但随着使用时间的延长,吸附作用趋于饱和,生物作用逐渐占据主要地位(Nishijima *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2003).这一结论对净水企业决定活性炭更换周期,评价颗粒活性炭滤池性能等方面有着很大的影响,有研究认为,考虑到成本等因素,活性炭可以被陶粒等多孔载体材料替代(Elias *et al.*, 2002).

鉴于此,本文通过研究北京地区某水厂活性炭滤池中微生物的特征、水源中有机碳的组成以及微生物对水中 DOC 去除效果,探讨活性炭滤池中微生物对有机物去除的贡献率,并对颗粒活性炭工艺中各种因素的作用进行客观评价,以期对颗粒活性炭吸附工艺的实际运行及活性炭更换周期的确定提供指导.

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 化学试剂

NaCl(优级纯),使用前 450°C 烘 2h. 2-MIB 和 geosmin 标样购自美国 Sigma-Aldrich 公司;甲醇溶液浓度分别为 10 g L^{-1} 和 2 g L^{-1} (纯度 $\geq 98\%$).

Tryptone 1.0 g L^{-1} 、EGTA $10^{-3}\text{ mol L}^{-1}$ 、Tris 缓冲溶液 0.01 mol L^{-1} 、Zwittergent 3-12 ($2 \times 10^{-4}\text{ mol L}^{-1}$), R2A 培养基: 酵母浸膏 0.5 g 蛋白胨 0.5 g 酸水解干酪素 0.5 g 葡萄糖 0.5 g 可溶性淀粉 0.5 g 丙酮酸钠 0.3 g K_2HPO_4 0.3 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05 g 琼脂 15 g 蒸馏水 1000 mL

2.2 分析方法

活性炭滤床中微生物量的测定采取 HPC 法(郑丹等, 2007).按照水中溶解性有机碳(DOC)的可生物降解性及其在活性炭上的可吸附性分别测定水

样中可吸附但不可生物降解性 DOC(NB&ADOC)、可生物降解且可吸附性 DOC(B&ADOC)、不可吸附但可生物降解性 DOC(NA&BDOC)、不可吸附且不可生物降解性 DOC(NRDOC)的含量和比例(张朝辉等, 2008).采用叠氮化钠对活性炭滤池中的微生物进行灭活(Frank, 2005),充分反冲洗后,比较灭活前后活性炭滤池出水中 DOC 的含量及不同组分比例.

臭味物质的分析采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(HS-SPME/GC-MSD)法(Lloyd *et al.*, 1998); pH、 COD_{Mn} 、TOC、浊度等水质指标参照《生活饮用水标准检测方法》(GB5750-2006)测定.

微生物对 2-MIB 和 geosmin 的降解作用测定方法如下:过滤后的空气曝气 10 min 使水中溶解氧达到饱和,加入一定量的 2-MIB 和 geosmin 试剂,调整两种物质的浓度分别为 100 ng L^{-1} , 然后加入 2mL 接种液,置于生化培养箱中于 25°C 下培养 28d 分别检测培养前后水样中 2-MIB 和 geosmin 的浓度,以其浓度差表示微生物对 2-MIB 和 geosmin 的降解能力.

2.3 试验条件

活性炭样品来自北京市 J 水厂在用活性炭,该水厂采用传统工艺加活性炭滤池深度处理.为避免预加氯对微生物的影响,炭样取自活性炭滤池表层下 40~60cm 处.2008 年 1 月~2008 年 10 月分别对使用时间 1.5 年、2 年、3.5 年以及 5 年的活性炭进行取样分析,每个炭池取样 18 次,包括至少 2 个运行周期.

中试试验活性炭柱为有机玻璃材质,运行参数与 J 水厂实际生产工艺一致,填装活性炭直接取自 J 水厂活性炭滤池.试验用水与水厂活性炭滤池进水一致,为水厂煤滤池出水,水质指标如表 1 所示.

表 1 试验期间活性炭滤池进水水质指标

Table 1 Influent quality prior to the activated carbon filter

TOC / (mg L^{-1})	COD_{Mn} / (mg L^{-1})	pH	浊度 / NTU	水温 / °C	UV_{254} / cm^{-1}
1.6~2.8	1.5~3.2	7.4~8.1	0.1~0.3	2~18	0.010~0.022

3 结果 (Results)

3.1 活性炭滤池中微生物检测结果

活性炭颗粒电镜扫描如图 1 所示.从图 1 可以

看出,活性炭表面有一定量的微生物生长,主要以球菌、杆菌、放线菌以及部分原生动物为主,而活性炭颗粒内部微生物量很少.

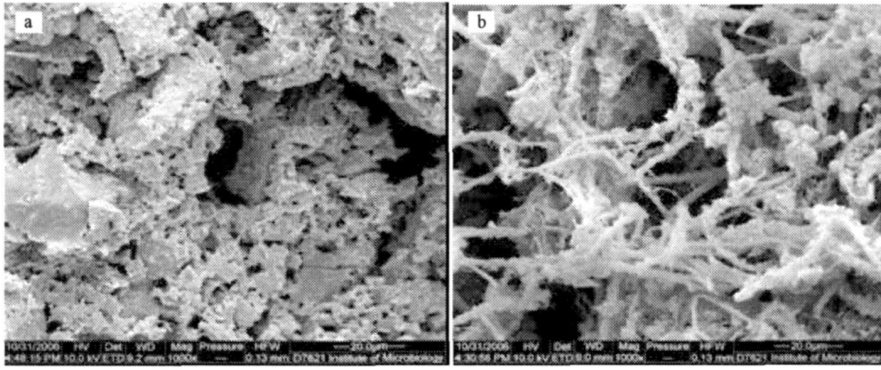


图 1 活性炭颗粒电镜扫描内部图 (a)和表面图 (b) (1000×)

Fig 1 SEM images of the inside(a) and surface(b) of carbon from the BAC filter(1000×)

图 2是 J水厂不同炭龄活性炭在不同时间段的几个完整反冲洗周期内 HPC 反映出的微生物量. 其中,图 2a中的反冲洗周期为 3d 图 2b中的反冲洗周期为 6d 开始时间分别为 1月 20日、4月 25日和 7月 17日,期间水温分别为 2~ 4℃、10~ 15℃和 15~ 18℃ (密云水库取水口位于水下 18m左右, J水厂

原水水温最高为 17~ 18℃). 图 2a中 HPC检测结果 显示,使用时间较长的活性炭 (5年)与使用时间较短的活性炭 (1.5年)炭表面生物量随着运行周期的变化规律基本一致,即在同一个反冲洗周期内,活性炭上异养菌的量随着运行周期的延长而增加. 1.5年上的生物量要略高于 5年炭上的生物量,尤其

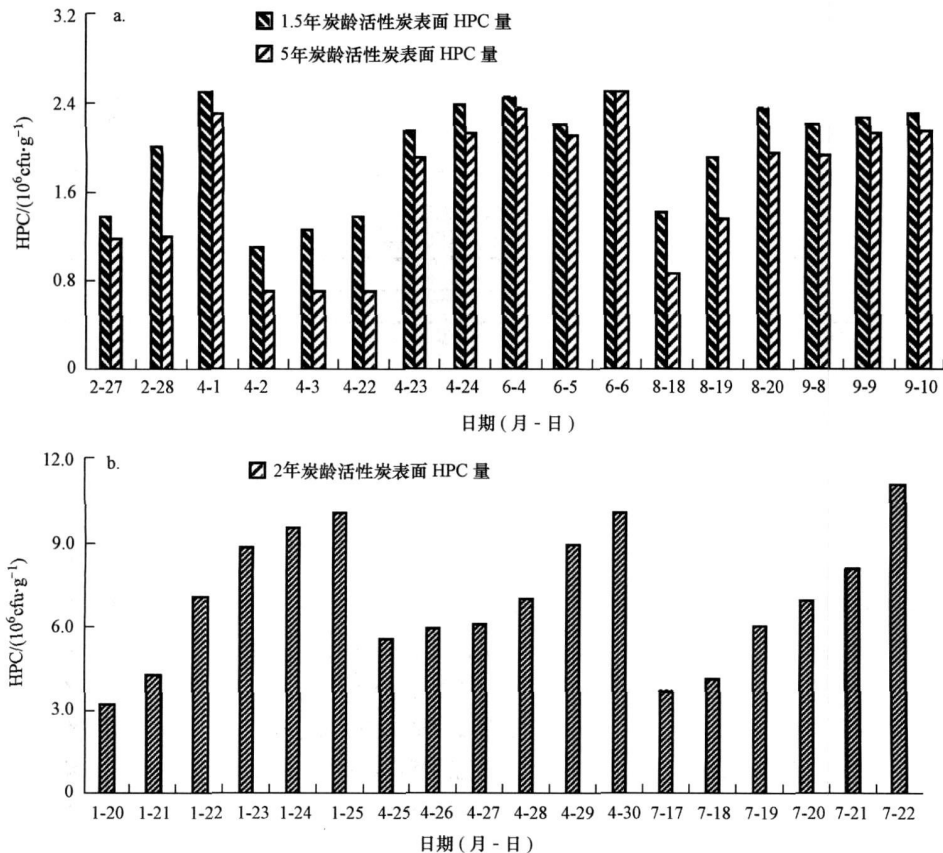


图 2 J水厂不同炭龄反冲洗周期内活性炭表面微生物的量

Fig 2 Comparison of biomass on the different aged activated carbons used in Jwaterwork in a filter backwash period

是同一反冲洗周期初期, 两者的数值差较为明显, 1.5年活性炭表面 HPC 一般比 5年活性炭多 20% ~ 50% 左右, 而运行后期两者的 HPC 量差别不大. 由图 2b可知, 活性炭滤池中微生物数的量随反冲洗周期变化较大, 冲洗后微生物的量通常为冲洗前的 1/3~ 1/2 这可能是由于微生物主要分布在活性炭的表面或颗粒活性炭之间的空隙中, 在反冲洗过程中容易被反冲洗掉(图 1). 由此可见, 微生物的量与试验条件下的水温等自然条件关系不大. 图 2的对比结果也清楚地反映了活性炭表面 HPC 与反冲洗周期有很大的关系, 即在试验条件下, 反冲洗周期越长, 活性炭表面 HPC 量越大.

图 3 显示了同时期 2 个运行周期内由 HPC 法测得的 2 年炭龄活性炭滤池进出水中 HPC 的量和活性炭滤池中不同炭层深度 HPC 量的变化趋势. 其

中, 不同炭层深度的 HPC 量为 2008 年 2 月份数据. 从图 3 中可以看出, 活性炭对水中的微生物有较好的截留作用, HPC 量随炭层深度增加逐渐减少. 由活性炭滤池进出水中 HPC 的差值(图 3a)与过水体积可近似得出一个反冲洗周期内活性炭滤池截留的微生物的量. 同样, 对不同炭层中 HPC 的量(图 3b)进行积分处理可以得出不同检测时期整个炭层中 HPC 的近似数值. 两者的关系如图 4 所示, 图 4 中包括不同时间段内的 2 个反冲洗周期. 一个反冲洗周期内活性炭滤池截留的微生物的量远高于实际炭层测得的生物量, 且炭池中 HPC 的量随着过水体积的增加而增加, 呈现近似的线性关系, 即活性炭滤池可以有效地截流水体中的微生物. 然而截流在炭滤池中的微生物大量死亡, 适应并存活的仅占一小部分.

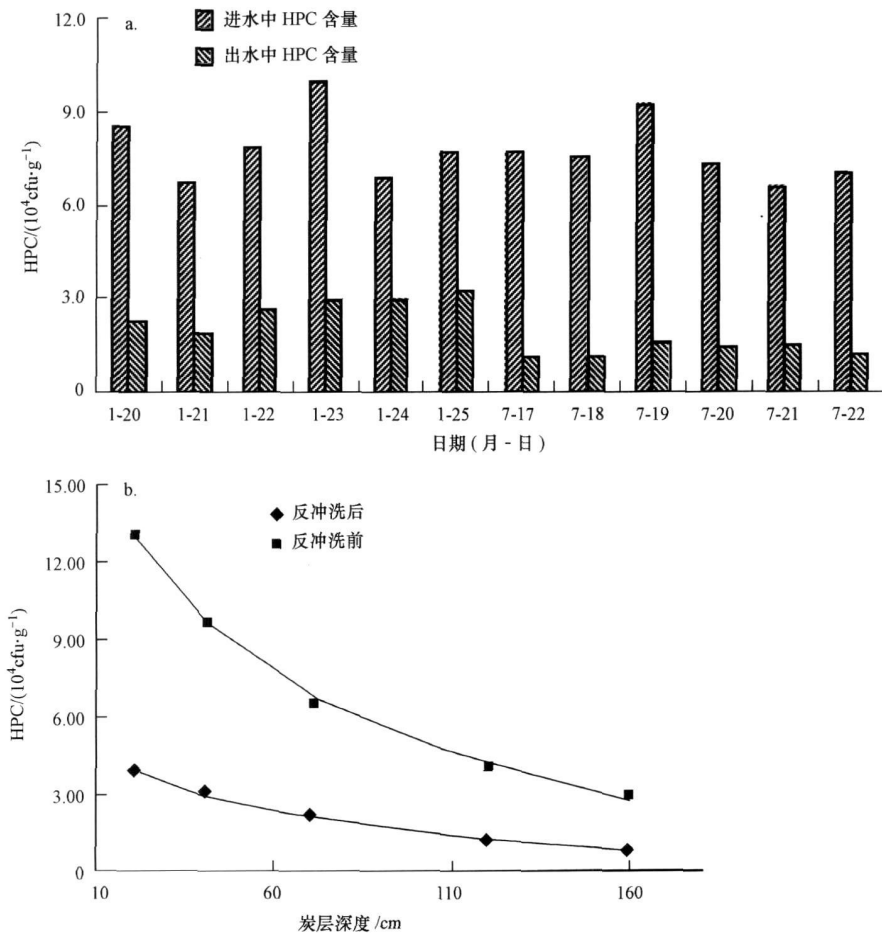


图 3 活性炭滤池进出水 (a) 和不同炭层深度中的微生物量 (b)

Fig 3 HPC in the influent and effluent of BAC filter (a) and HPC on the activated carbons along the carbon filter height (b)

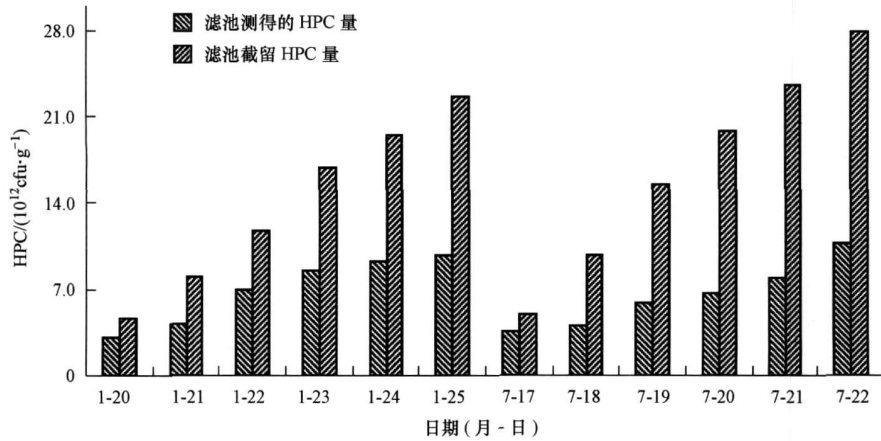


图 4 炭层中微生物量及炭床截留微生物的量对比 (2008年)

Fig 4 HPC on the activated carbons vs HPC theoretically trapped by the carbon filter

3.2 水中 DOC 分类及活性炭滤池对 DOC 的去除效果

图 5 为试验期间 J 水厂不同炭龄活性炭滤池进、出水中 DOC 的成分构成, 水温为 16~18℃, 其中, 新活性炭的使用时间仅为 3~6d 从图 5 中可以看出, 新活性炭具有较强的吸附能力, 对溶解性有机物有很好去处效果, 总去除率为 64.6%; 对 B&ADOC 和 NB&ADOC 的去除率分别达到 80.4% 和 74.8%. 由于此时其表面的微生物极少, 可以认为主要是活性炭的吸附能力在发挥作用. 随着使用时间的延长, 活性炭滤池对 DOC 的处理能力逐渐下降, 并趋于平缓. 1.5 年活性炭与 5 年活性炭的性能差别并不大, 前者的去除效率仅比后者高 7.3%, 此时活性炭的吸附性能随着使用时间的延长有较大程度的下降, 但对 NB&ADOC 依然有一定的去处能力, 去除率分别为 39.7% 和 29.8%, 其去除能力是新炭的 53.1% 和 39.8%.

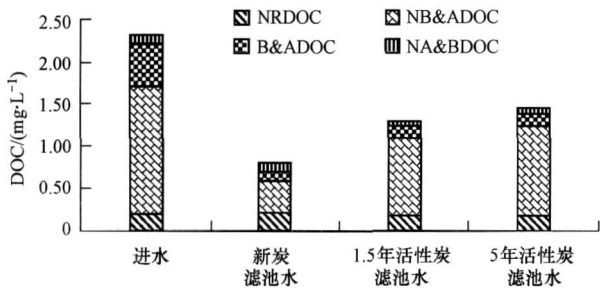


图 5 水样中不同种类 DOC 浓度

Fig 5 DOC concentrations in influent and effluent of different aged activated carbon filters

为更好地比较微生物对去除水中 DOC 的贡献, 采用叠氮化钠对活性炭使用 5 年的滤柱中的微生物灭活, 并比较灭活前后活性炭滤池对 DOC 的去除效果 (图 6). 从图 6 中可以看出, 微生物灭活前后滤池出水 DOC 含量及组成均有一定的变化. DOC 总的去除率略有降低, 从 39.2% 降为 28.5%. 但灭活对可生物降解有机物的去除效果有较大的影响, 由 70.1% 下降为 25.4%. 活性炭对 NB&ADOC 的去除效果影响不大.

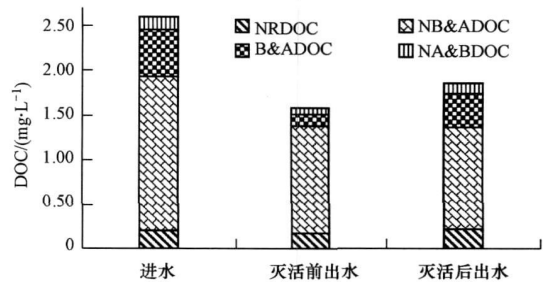


图 6 原水、灭活前后水中不同种类 DOC 浓度

Fig 6 DOC concentrations in influent and effluent of filters before and after sterilization

3.3 活性炭滤床中微生物对致嗅类 DOC 的去除作用

DOC 中的 2-MIB 和 geosmin 等嗅味物质是北京地区水源水中较为敏感的 2 项指标. 在净水工艺中, 活性炭滤池对其有非常好的处理效果, 即便是 3.5 年以上的活性炭对于 2-MIB 和 geosmin 依然有相当于新炭 40% 和 60% 的处理能力 (Jian et al., 2007). 而本试验发现, 微生物对这两种物质的去除效果均十分有限. 初始浓度为 100 ng·L⁻¹ 的 2-MIB 和

geosmin 原水水样, 培养后的浓度分别为 $96.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $92.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率分别为 3.2% 和 7.8%。另外, 采样动态循环法将初始浓度为 $100 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 2-MIB 和 geosmin 原水水样进行微生物降解处理, 48h 后其浓度分别为 $93.6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $90.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率仅为 6.4% 和 9.2%。

图 7 是 5 年活性炭滤柱微生物灭活前后对 2-MIB 和 geosmin 的处理效果。其中, 初始浓度均为 $100 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 过水体积为 20 倍空床体积。从图 7 中可以看出, 使用 5 年的活性炭对 2-MIB 和 geosmin 的吸附能力仅为新炭的 27% 和 35%。灭活前微生物对 2-MIB 和 geosmin 去除率为 12% 和 14%, 分别占总去率的 32% 和 29%。活性炭滤柱中微生物对 2-MIB 和 geosmin 去除率均远高于采用纯水配水试验的去除率数值, 与文献报道一致 (Izaguirre *et al.*, 1998), 即微生物对 2-MIB 的降解有很强的协同性。微生物对 2-MIB 和 geosmin 去除率低于一般文献报道值 (Paul *et al.*, 2005), 可能与北京地区水温、水中溶解氧、微生物的量和种类等因素有关。由试验数据可知, 虽然滤池中微生物对 2-MIB 和 geosmin 有较明显的生物降解作用, 但其单独作用的去除效率有限, 低于活性炭的吸附作用。

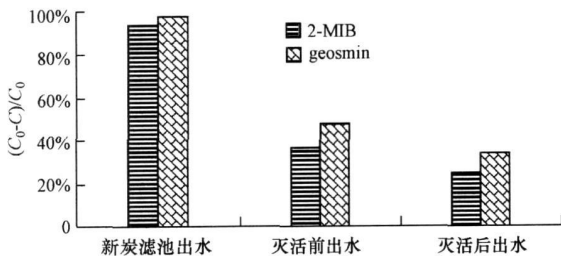


图 7 原水、灭活前后活性炭滤池出水中 2-MIB 和 geosmin 浓度 (C 为出水中物质浓度; C_0 为原始浓度)

Fig 7 2-MIB and geosmin concentration in influents and effluent of filters before and after sterilization (C : concentration in effluent; C_0 : primitive concentration)

综上所述, 虽然活性炭滤床中存在一定数量的微生物, 但其在北京地区水厂有机物去除过程中的贡献率依然较低, 活性炭滤池对水中 DOC 的去除主要靠活性炭的吸附作用。微生物对北京地区较为敏感的嗅味物质 2-MIB 和 geosmin 有一定的去除效果, 约占总去除率的 30% 左右。可以推断, 在活性炭的吸附性能充分饱和以后, 单纯依靠微生物的降解作用很难有效的控制出水中 DOC 的浓度, 尤其是其中的 2-MIB 和 geosmin 等嗅味物质。

4 讨论 (Discussion)

王代平等 (2007) 认为, 北京地区净水厂中生物作用对炭滤池去除 DOC 的贡献率在 32% ~ 57% 左右, 但该文没有详细区分可生物降解有机物中同时可被活性炭吸附的那部分有机物, 使得微生物的贡献率被增大。本研究认为, 被活性炭吸附的可生物降解有机碳最终也将被微生物降解这一结论的前提是假定微生物的生物降解能力足以消耗掉水中全部的 BDOC。

微生物对水中有机物的去除主要依靠其本身的新陈代谢作用, 因此, 起作用的对象是水中可生物降解有机碳。由图 5 可以看出, 滤池出水中 BDOC (包括同时可被吸附的溶解性有机物) 的量占总 DOC 的 26.2%, 其比例并不高。由于活性炭的吸附作用主要通过其大的表面积和发达的孔容积以及表面的官能团 (Roop *et al.*, 2005), 为了区分滤池中活性炭吸附作用和微生物降解作用对去除 B&ADOC 的贡献, 假定活性炭对 B&ADOC 和 NB&ADOC 的吸附能力是相等的, 即仅与其浓度有关且为线性关系 (Badosz *et al.*, 2006), 则根据活性炭对 NB&ADOC 的去除效果, 1.5 年活性炭和 5 年活性炭的吸附作用对 B&ADOC 的去除能力分别为 42.7% 和 32.0%。

事实上, 由图 5 可以看出, 1.5 年炭滤池和 5 年炭滤池对 B&ADOC 的去除能力依然分别高达 72.5% 和 70.6%, 同时, 活性炭滤池对 NA&BDOC 的去除效果也有了一定程度的提高, 分别为 40% 和 30%。由此可以看出, 微生物在中间发挥了较为重要的作用。对比差值可知, 微生物对 B&ADOC 的去除效率大约为 29.8% 和 38.6%。由此推算, 微生物对 1.5 年活性炭滤池和 5 年活性炭滤池总 DOC 去除效果的贡献率仅为 18.8% 和 26.4%。

张朝辉等 (2008) 在研究生物活性炭处理黄浦江水时认为, 活性炭在使用一段时间 (6 个月) 后其吸附性能趋于饱和, 活性炭滤池由最初的颗粒活性炭 (GAC) 滤池转化为生物活性炭 (BAC) 滤池后, 滤池所去除的有机碳主要是可吸附且可生物降解性有机碳 (B&ADOC), 而对可吸附且不可生物降解的有机碳几乎没有什么去除效果 (仅为 2.8%)。因此, 认为活性炭使用后期活性炭滤池对有机物的去除主要甚至于全部依赖微生物的作用。但如前面分析所述, 北京地区即便是使用 5 年的活性炭其吸附作

用依然是活性炭滤池去除 DOC 的主要手段, 微生物的贡献率仅为 26.4%。这一方面可能是北京地区活性炭滤池进水中的有机物远低于黄浦江水, 活性炭的吸附性能尚未完全饱和。另一方面北京地区水源中可生物降解有机碳的含量偏低, 水温也较低, 这也造成了微生物的降解作用不显著。

对比活性炭滤池微生物灭活前后结果可以看出, 微生物的作用使得活性炭滤池对 DOC 去除率增加了约 10.7%, 占总去除率的 28.5%, 与前面估算结果基本接近。即使使用时间为 5 年的活性炭其吸附作用依然是活性炭滤池去除 DOC 的主要手段, 贡献率为 71.5%, 对北京地区较为敏感的 2-MIB 和 geosmin 等致嗅类 DOC 的贡献率也在 70% 左右。说明由于微生物的生物降解作用弱, 去除水中 DOC 的绝对值较小, 导致使用 5 年活性炭滤池中微生物降解作用的贡献率也仅占 30% 左右。

5 结论 (Conclusions)

1) 北京 J 水厂原水中 BDOC 的浓度不大, 仅占 DOC 的 26% 左右。加之水温偏低、接触时间较短等原因, 其生物降解作用不显著, 对去除水中有机物包括北京地区较为敏感的 2-MIB 和 geosmin 等嗅味物质的贡献率不大。

2) 针对北京地区水源水质、自然条件及运行工艺, 活性炭的吸附作用是决定活性炭滤池性能的关键因素, 也是决定活性炭滤池运行管理尤其是活性炭使用时间的主要指标。

3) 微生物的降解作用一定程度上强化或者提高了活性炭滤池对有机物的去除效果, 但不足以单独完成对水中有机物的安全控制, 尤其是对于北京地区较为敏感的 2-MIB 和 geosmin 等嗅味物质。

责任作者简介: 张春雷 (1976—), 男, 高级工程师。

参考文献 (References):

Bandosz T J 2006 Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation[M]. New York Elsevier
 Elias A, Barona A, Ameguy A, et al 2002 Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S [J]. Process Biochemistry, 37: 813—820
 Frank P. 2005. Biofilms in Drinking Water Treatment [M]. Gøteborg

Akademisk Avhandling
 Izaguirre G R L, Wolfe M E G. 1988 Degradation of 2-methylisoborneol by aquatic bacteria [J]. Appl Environ Microbiol 54: 2424—2431
 Kin W H, Nishijima W, Shob E, et al 1997. Competitive removal of dissolved organic carbon by adsorption and biodegradation on biological activated carbon [J]. Water Sci Technol 35 (7): 147—153
 Kin W H, Nishijima W, Aloysius U B, et al 1997. Micro-pollutant removal with saturated biological activated carbon (BAC) in Ozonation-BAC process [J]. Water Sci Technol 36(12): 283—298
 Li X Y, Chu H P. 2003. Membrane bioreactor for the drinking water treatment of polluted surface water supplies [J]. Water Research 37 (19): 4781—4791
 Lydy SW, Lea JM, Zimba PV, et al 1998 Rapid analysis of geosmin and 2-methylisoborneol in water using solid phase micro extraction procedures [J]. Water Research 32(7): 2140—2146
 Nishijima W, Gerardi E, Speake J et al 2004 Fate of biodegradable dissolved organic carbon produced by ozonation on biological activated carbon [J]. Chemosphere 56: 113—119
 Paul W, Summers R S, Chowdhury Z, et al 2005. Ozon-enhanced Biofiltration for Geosmin and MIB Removal [M]. USA: AWWA Research Foundation and AWWA, 101—109
 Roop C, Bansal M G. 2005 Activated Carbon Adsorption [M]. New York Taylor & Francis Group 4—6
 Vestal JB, White D C. 1989. Lipid analysis in micro-bial ecology [J]. Bio-science, 39(8): 535—541
 王代平, 胡海修, 顾军农, 等. 2007. 预 O₃-BAC 与 BAC 饮用水处理工艺中全流程生物作用对比 [J]. 水处理技术, 33(12): 30—33
 Wang D P, Hu H X, Gu J N, et al 2007. The contribution of biodegradation comparison between pre-O₃-BAC and BAC in water treating process [J]. Technology of Water Treatment 33(12): 30—33 (in Chinese)
 Yu JW, Yang M, Lin T, et al 2007. Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-Methylisoborneol (MIB) and geosmin from natural water [J]. Separation and Purification Technology 56: 363—370
 张朝辉, 吕锡武. 2008 生物活性炭滤池去除水中溶解性有机碳的研究 [J]. 中国给水排水, 2(1): 105—108
 Zhang ZH, Li XW. 2008. Study on removal of dissolved organic carbon by biological activated carbon filter [J]. China Water & Waste Water 2(1): 105—108 (in Chinese)
 郑丹, 刘文君. 2007. 水中悬浮颗粒物对 HPC 测定值的影响 [J]. 供水技术, 1(5): 37—43
 Zheng D, Liu W J 2007. Effect of suspended particles on HPC determination in drinking water [J]. Water Technology, 1(5): 37—43 (in Chinese)