生产规模 O₃-BAC 滤池中的微生物生物量和活性研究

伍治林^{1,2},于鑫^{2*},朱亮^{1*},刘冰²,沈飚³,富良³

(1. 河海大学环境科学与工程学院,南京 210098; 2. 中国科学院城市环境研究所,厦门 361021; 3. 平湖市自来水公司,浙 江 平湖 314200)

摘要:利用脂磷法、SOUR 法,系统研究了生产规模臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)滤池中纵向断面的生物量及生物活性.结果表明,由于 O_3 对 TOC 沿程分布规律的影响,以及残余 O_3 本身对生物的抑制作用,滤池纵向断面上的生物量先上升,在 10 cm 填料处达到最大值后呈下降趋势.单位生物量的 SOUR 在 10^{-4} mg/(nmol·h)的水平,其分布状况与生物量相反.单位体积填料的 SOUR 在 10^{-2} mg/(cm³·h)时,在滤池0~20 cm 段,呈现与生物量沿程分布相同的变化趋势,从 20 cm 向下,呈现与单位生物量的 SOUR 沿程分布相同的变化趋势.滤池中的生物量均具有一定的活性势(activity potential)增量,下层填料的增量较大, 说明代谢活性的提高可能是生物滤池抗冲击负荷的一种途径.

关键词:饮用水; O3-BAC 工艺; 生物量; 微生物活性; 活性势

中图分类号:X701; X172 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)05-1211-04

Microbial Biomass and Activity in a Full-scale O₃-BAC Filter

WU Zhi-lin^{1,2}, YU Xin², ZHU Liang¹, LIU Bing², SHEN Biao³, FU Liang³

(1. College of Environmental science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. Pinhu Water Supply Company, Pinghu Zhejiang 314021, China)

Abstract: The microbial biomass and activity in a full-scale drinking water O_3 -BAC filter was investigated using the methods of lipid-P and SOUR. Because of the effect of O_3 residue on TOC distribution and the formation of biofilm in biofilters could be inhibited by O_3 residue in influent, the biomass in filter showed an "increase-reduce" pattern along vertical section and had a peak at the depth of 10 cm. The SOUR per unit biomass fluctuated at the magnitude of $10^{-4} \text{ mg/}(\text{ nmol} \cdot \text{h})$ with an adverse distribution to the biomass itself. The SOUR per unit volume media was around $10^{-2} \text{ mg/}(\text{ cm}^3 \cdot \text{h})$ and presented same tendency with biomass distribution at the media depth of 0-20 cm. The deeper distribution of SOURs per unit volume media had the same tendency with SOURs per unit biomass. All biomass demonstrated a certain increase of activity potential and the biomass attached to deeper media had a higher increase, which suggested the increase of metabolic activity provided a possible pathway for resistance of the reactors to shock load. Key words; drinking water; O_3 -BAC; biomass; microbial activity; activity potential

臭氧-活性炭(O_3 -BAC)工艺是集臭氧氧化、活 性炭吸附和生物降解于一体的给水处理技术,由于 其处理效果的高效性,受到了广泛关注.国内外已经 开展 O_3 -BAC 工艺研究多年^[1,2],并已广泛用于工程 实践,如德国慕尼黑的多奈水厂、法国巴黎市 Choisy-Le-Rei 水厂、美国的密执安州克莱门山市水 厂、日本的柏井水厂等;国内目前也有北京、昆明、嘉 兴等地的多家水厂采用了 O_3 -BAC 工艺.

大量研究表明^[3-6],O₃-BAC 工艺去除水中有机 物是活性炭吸附和生物降解的协同作用,而且在滤 池不同的运行阶段,两者的作用优势有所不同,在滤 池运行初期,由于活性炭表面生物较少,活性炭吸附 占主导优势,随着生物活性炭使用时间延长,生物作 用越来越突出,在该工艺稳定运行期,微生物对有机 物的降解占主导作用^[7].因而考察活性炭滤层填料 表面的生物量和微生物活性分布对 O₃-BAC 工艺的 设计及其优化、运行过程的调控以及滤池中微生物 生态学的研究都具有重要的意义.本研究以平湖市 古横桥水厂两级 O₃-BAC 滤池工艺^[8,9]的第一级作 为研究对象,系统地分析了 O₃-BAC 工艺中,活性炭 滤池纵向断面的生物量及生物活性的分布规律,以 期为饮用水深度处理中微生物作用的研究提供理论 支持.

1 材料与方法

1.1 BAC 滤池工艺参数及进水水质

现场实验研究利用平湖古横桥水厂一级 O₃-BAC 滤池(以下简称 BAC 滤池或 BAC), BAC 滤池 采用 8~30 目破碎柱状活性炭,活性炭颗粒粒径约

收稿日期:2009-06-25;修订日期:2009-09-18

基金项目:浙 江 省 科 技 厅 重 大 科 技 专 项 社 会 发 展 项 目 (2007C13031);国家自然科学基金项目(50678080)

作者简介:伍治林(1983~),男,硕士研究生,主要研究方向为水处 理原理与技术,E-mail:wuzhilinmy2006@163.com

^{*} 通讯联系人, E-mail: xyu@iue.ac.cn; zhulianghhu@163. com

为 1 mm,不均匀系数 \leq 1.5.所用活性炭比表面积 > 1 000 m²/g,碘值约1 050 mg/g,亚甲基蓝值为 200

mg/g. BAC 滤池的主要工艺参数如表 1,研究期间进 水水质如表 2 所示.

表1 BAC 滤池的主要工艺参数

Table 1 Parameters of BAC filter												
规模	滤池面积	池深	滤料高度	停留时间	滤速	反冲洗	反冲洗	接触池 O ₃ 投加量				
$/m^3 \cdot d^{-1}$	$/m^2$	/ m	/ m	/min	$/m \cdot h^{-1}$	周期∕d	方式	$/$ mg • L $^{-1}$				
5×10^4	42	5.5	2	12	10	5 ~ 7	先气冲后水冲	2.0				

表 2 实验期间 BAC 滤池进水水质

Table 2 Quality of the influent for the BAC filter during the study

项目	高锰酸盐指数/mg・L⁻¹	$\rm NH_4^{\ *}$ -N/mg \cdot L $^{-1}$	NO_2 -N/mg \cdot L $^{-1}$	NO $_3^-$ -N/mg · L $^{-1}$	PO_4^{3-} -P/mg · L ⁻¹	DO/mg · L $^{-1}$	温度/℃
最高	3.52	0.35	0.00	5.88	0.03	15.60	24.60
最低	2.85	0.19	0.00	2.75	0.00	10.10	13.20
平均	3.12	0.24	0.00	4.04	0.01	12.83	21.29

1.2 分析方法

1.2.1 水质指标的测定方法

表2中各项指标的测定均采用国家标准方法^[10],TOC采用TOC-VCPH型总有机碳分析仪(SHIMADZU)测定.

1.2.2 生物量的测定方法

本实验采用脂磷法测定生物量^[11].从 BAC 滤 池不同高度取出适量活性炭,用氯仿、甲醇和水萃取 活性炭载体上微生物的磷脂组分,消解后测定其磷 酸盐含量,以单位体积填料中磷含量(nmol/cm³)表 示 BAC 滤池不同高度处的生物量.1 nmol 磷约相当 于 *E. coli* 大小的细胞 10⁸ 个.

1.2.3 微生物活性测定方法

微生物活性的测定主要参考了文献[12,13]的 方法,以 BAC 滤池进水为实验用水,通过测定微生 物在一定时间内消耗 02 的量,以单位体积填料的微 生物活性 $[mg/(cm^3 \cdot h)]$ 和单位生物量的活性 「mg/(nmol ⋅ h)],即比氧摄取速率(specific oxygen uptake rate, SOUR),表征反应器中微生物的活性.具 体如下:① 从生物滤池取适量样品(GAC 15~30 mL);② 将样品转移至内置磁性转子的 250 mL 窄 口瓶中;用含有足够 DO(本实验中通常 > 10 mg/L)的反应器进水将窄口瓶充满,如果进水 DO 不足,可 以事先曝气;轻轻插上安装有 DO 探头的探杆,保证 瓶内没有气泡以及生物量不流失;③ 开动磁力搅拌 器(90-1型,上海凯欣仪器厂,555牌)至适当转速, 同时打开 DO 测定仪,读数稳定后记录 DO 值及时 间,每隔10 min 记录一次 DO,50 min 后或 DO < 5 mg/L时停止搅拌,关闭 DO 测试仪;④ 窄口瓶中不 加入填料,按②、③测定水样空白 SOUR;⑤ 在上述 测定值减去空白值的基础上计算出单位体积填料的 微生物活性 $[mg/(cm^3 \cdot h)]$ 和单位生物量的活性 $[mg/(nmol \cdot h)].$

1.2.4 活性势

由于饮用水的贫营养状态,微生物在反应器中 的活性会受到基质水平的限制,因此本研究向实验 用水中添加很容易被微生物利用的乙酸盐,测定微 生物在不同乙酸碳浓度下的 SOUR,以得到微生物 在充足的营养条件下所能表现出的最高活性,即活 性势(activity potential).

2 结果与讨论

2.1 O₃-BAC 滤池生物量的分布

通过对该 BAC 滤池纵向断面的微生物量的分 析测定,发现该滤池的生物量处于 10² nmol/cm³ 的 水平.BAC 滤池中生物量及 TOC 浓度的沿程分布见 图 1,从中可见,二者具有相同变化趋势.





BAC 滤池利用活性炭表面附着生物的新陈代 谢作用,实现水中污染物的去除,从而改善饮用水水 质.因此,BAC 滤池中的生物量水平与其处理效果

密切相关.通常情况下,在普通的生物滤池中,由于 基质浓度的差异,滤池中的生物量自上而下呈明显 递减的趋势^[14],且反应器上段生物量下降幅度较 大^[15]. 而 O₃-BAC 滤池中生物量的分布与普通滤池 并不一致.图1的结果表明,在滤池表层部分,滤池 中水样 TOC 的浓度逐渐增加,这可能与水中残留的 少量 O₃ 将水中的有机物不完全分解造成可被 TOC 仪检出的有机物浓度提高有关,TOC 在 10 cm 深度 达到峰值 5.63 mg/L时, 生物量也最大, 为 185 $nmol/cm^{3}$. 滤池表层部分 $(0 \sim 10 cm)$ 生物量呈递增 的趋势另一个重要原因可归结于残留 O₂本身对生 物的抑制作用,在 O₃-BAC 工艺中,臭氧氧化阶段的 出水中仍能存在较低浓度的 0,,其强氧化性可在一 定程度上抑制填料表面微生物的生长,而在 O₃ 与活 性炭接触过程中,活性炭本身的还原性表面和巨大 的比表面积的吸附作用^[16],以及与活性炭表面的化 学成分不断反应^[17],使得 0。随着活性炭填料深度 逐渐被消耗,其对微生物的影响逐渐减弱.随着填料 深度的进一步增加,约占 TOC 20%~35% 的可生物 降解溶解性有机碳^[18] (biodegradable dissolved organic carbon, BDOC)不断降低, 生物量也随之减 少,在 40 cm 填料深度以下的滤池中,微生物量已经 很少,稳定地维持在 30 nmol/cm³左右的水平.从实 验结果可以看出,BAC 滤池内部纵向位置上的生物 量的差异十分明显,微生物主要分布在 BAC 滤池中 5~15 cm 填料处,滤池中生物量的最大值约为最小 值的7倍.

2.2 O₃-BAC 滤池中微生物的活性

笔者研究了 BAC 滤池中单位生物量的微生物 活性和单位体积填料的微生物活性,结果见图 2.结 果表明,BAC 滤池中,单位生物量微生物活性的沿 程分布与生物量的分布规律相反,从10 cm 向下,填 料越深,单位生物量的活性越高.在10 cm 深填料处 的 SOUR 只有 1.45×10⁻⁴ mg/(nmol・h), 而 100 cm 深填料处则达到 9.98×10⁻⁴mg/(nmol·h).其原因 在于,在基质浓度一定的情况下,生物量越少,单位 生物量获得的基质浓度越高,而从图3可知,对于单 位生物量而言,基质浓度越高,微生物活性越强;所 以在活性测定用水均为反应器进水,基质浓度一定 的情况下,生物量低的填料出处,单位生物量的活性 反而越高,从而显示出与生物量分布相反的规律.但 同时必须指出,0,强氧化性对微生物的活性具有一 定抑制作用,与实验用水相比,在 O₃-BAC 工艺的实 际运行中,进水中 0, 的浓度是相对稳定的,所以对 于受 O₃ 影响明显的表层填料(图 2 中 0 ~ 10 cm), 实际的单位微生物的活性应略小于图 2 所示.有研 究认为^[19],生物膜厚度能阻碍基质和 O₂ 向生物膜 内部的微生物传输,从而影响生物的活性,相关研究 表明^[15],滤池中生物膜厚度在进水端至中间部分较 厚,沿水流方向逐渐变薄,这样,由于滤池上层填料 大于下层填料表面生物膜厚度,上层填料微生物活 性小于下层填料微生物活性.





单位体积填料的微生物活性[mg/(cm³ · h)] 是单位生物量的微生物活性[mg/(nmol · h)]与生 物量(nmol/cm³)的乘积,其变化趋势是两者共同作 用的结果.从图1和图2可知,在上层大约0~10 cm 部分,由于生物量较高且变化明显,单位体积填料的 微生物活性受生物量影响更大一些,呈现与生物量 相同的趋势;但在填料20 cm 以下,生物量变化已经 不太明显,此时,单位生物量的微生物活性成了单位 体积填料的微生物活性的主要因素.

2.3 BAC 滤池中微生物的活性势

图 3 是滤池各层填料在添加不同浓度乙酸钠后 的单位生物量 SOUR. 实验结果表明,进水中添加乙





酸钠溶液能提高单位生物量 SOUR,但其活性的提高具有一定限度,当活性不随乙酸钠添加浓度的增加而上升时,则认为此时微生物达到其活性的最大值,即活性势.从图 1 可知,各个层次的微生物达到活性势时与未添加任何营养物质时的 SOUR 差值即活性增量是不一样的,滤池 10 cm 填料处生物量最大,而微生物活性增量最小,为 0.32 × 10^{-4} mg/(nmol·h).0、20 cm 处的微生物的活性增量分别是 1.19×10⁻⁴和1.11×10⁻⁴mg/(nmol·h).而在生物量较小的 40、60 和 100 cm 填料处,微生物活性增量较大,分别为 3.50×10⁻⁴、2.86×10⁻⁴和2.84×10⁻⁴mg/(nmol·h).总体来看,在增添 20 mg/L乙酸钠时各层微生物达到各自的活性势,且滤池下层的微生物活性增量明显大于滤池上层.

从图1已经知道基质浓度与生物量具有相同的 变化趋势.图3反映出处于较低基质浓度的下层填 料对外加基质浓度比较敏感,更易被激发其潜在的 生物活性,相比之下,上层填料表现比较迟钝.这同 时也说明生物活性炭滤池在污染物浓度突然提高的 情况下,可能通过提高代谢活性的方式在一定程度 上获得抗冲击负荷的能力.

3 结论

(1)由于 O₃对 TOC 沿程分布规律的影响,以
 及残余 O₃本身对生物的抑制作用,滤池生物量呈现
 先上升后下降趋势,最大值出现在距填料表面大约
 10 cm 处.

(2) 单位生物量的 SOUR 在 10⁻⁴ mg/(nmol・h)的数量级上,其分布正好与生物量的规律相反,单位体积填料的 SOUR 在 10⁻² mg/(cm³・h)的数量级上,在滤池0~20 cm 段,呈现与生物量沿程分布相同的变化趋势,从 20 cm 向下,呈现与单位生物量的 SOUR 沿程分布相同的变化趋势.

(3)滤池填料所处基质浓度越低,越易被外加 基质浓度激发其潜在的生物活性;微生物代谢活性 的提高可能是生物滤池抗击污染物冲击负荷的一种 机制.

参考文献:

学

- [1] 王琳,王宝贞,马放,等.臭氧化-生物活性炭净化水厂的运行 功能[J]. 中国环境科学,1998,18(6):552-556.
- [2] 左金龙,崔福义,赵志伟,等.国内外臭氧活性炭工艺在饮用 水处理中的应用实例[J].中国给水排水,2006,22(10):68-72.
- [3] Seredynska S B, Tomaszewska M, Morawski A W. Removal of humic acids by the ozonation-biofiltration process [J]. Desalination, 2006, 198(3):265-273.
- [4] 郭召海,杨敏,张昱,等. 预臭氧与后臭氧-生物活性炭联用工艺研究[J].环境科学,2005,26(6):79-83.
- [5] 贺道红,高乃云,曾文慧,等.生物活性炭深度处理工艺挂膜研究[J].工业用水与废水,2006,37(2):16-19.
- [6] 孔令宇,张晓健,王占生.生物活性炭内吸附与生物降解协同 去除有机污染物[J].环境科学,2007,28(4):777-780.
- [7] 金鹏康,许建军,姜德旺,等. 臭氧生物活性炭有机物吸附与
 生物降解量化分析[J]. 安全与环境学报,2007,7(2):22-25.
- [8] 周建平,雷挺,沈飚,等.平湖市古横桥水厂设计介绍[J]. 给 水排水,2006,32(8):1-4.
- [9] 富良,沈飚,林涛,等.平湖市古横桥水厂扩建工程调试和运行[J].给水排水,2007,33(3):11-14.
- [10] GB 5749-2006,生活饮用水标准检验方法[S].
- [11] 于鑫,张晓健,王占生.饮用水生物处理中生物量的脂磷法测 定[J]. 给水排水,2002,28 (5):1-5.
- [12] Surmacz G J, Gernaey K, Demuynck C, et al. Nitrification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements[J]. Water Res, 1996, 30(5): 1228-1236.
- [13] Urfer D, Huck P M. Measurement of biomass activity in drinking water biofilters using a respirometric method [J]. Water Res, 2001,35(6):1469-1477.
- [14] 金鹏康,姜德旺,张小峰,等. 臭氧-生物活性炭工艺中生物群 落分布特征[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007,**39**(6):829-833.
- [15] 邱立平,马军.曝气生物滤池的生物膜及其微生物种群特征 [J].中国环境科学,2005,**25**(2):214-217.
- [16] 马军,张涛,陈忠林,等.水中羟基氧化铁催化臭氧分解和氧 化痕量硝基苯的机理探讨[J].环境科学,2005,**26**(2):78-82.
- [17] Valde H, Sanchez P M, Rivera U J, et al. Effect of ozone treatment on surface properties of activated carbon [J]. Langmuir, 2002,18(6):2111-2116.
- [18] 王占生,刘文君. 微污染水源饮用水处理[M]. 北京:中国建 筑工业出版社,1999.251-253.
- [19] 于鑫,张晓健,刘晓玲,等. 生物滤池中微生物的 SOUR 活性 研究[J]. 中国给水排水,2004,**20**(3):16-20.