

砂垫层控制活性炭滤池无脊椎动物穿透研究

尹文超¹, 张金松^{1,2}, 刘丽君², 赵岩¹, 李拓¹, 林超³

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院环境科学与工程研究中心, 518055 广东 深圳;

2. 深圳水务(集团)有限公司, 518031 广东 深圳; 3. 广州大学 土木工程学院, 510006 广州)

摘要: 为控制无脊椎动物穿透带来的过滤水感官问题和潜在的安全风险, 添加一系列不同粒径和不同高度的砂垫层于5根活性炭(Granular activated carbon, GAC)滤柱中. 在10个月的连续运行期间, 滤柱出水中共检出7类无脊椎动物(其中轮虫和甲壳类生物为优势种群). 结果表明: 砂垫层的添加可以有效防止无脊椎动物的穿透, 且随着砂垫层高度的增加去除率逐渐升高, 轮虫和体长大于200 μm 无脊椎动物的去除率分别达46.6%和85.5%, 石英砂粒径对轮虫的去除影响较大; 砂垫层可以有效去除水中颗粒物, 且出水中颗粒数与无脊椎动物丰度显著相关.

关键词: 饮用水; 无脊椎动物; 颗粒活性炭过滤; 砂垫层; 轮虫; 甲壳类

中图分类号: TU991.25

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)02-0041-06

Penetration control of invertebrates in the granular activated carbon filtration process with sand bed

YIN Wenchao¹, ZHANG Jinsong^{1,2}, LIU Lijun², ZHAO Yan¹, LI Tuo¹, LIN Chao³

(1. Environmental Science and Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 518055 Shenzhen, Guangdong, China; 2. Shenzhen Water (Group) Co., Ltd., 518031 Shenzhen, Guangdong, China;

3. School of Civil Engineering, Guangzhou University, 510006 Guangzhou, China)

Abstract: In view of the aesthetic problem and potential threat to safe drinking water caused by invertebrates, a series different depth of sand beds were located under granular activated carbon (GAC) media in five pilot-GAC filtration (GAC_F) columns to restrict invertebrates' penetration into the distribution system. During the study period of 10 months, 7 groups of invertebrates (rotifers and crustaceans as the predominant species) were detected in the filtrates of the five GAC_F columns. The experimental results indicated that invertebrates could be removed effectively with the added sand beds compared with the sand bed-free GAC_F column. The mean abundances of invertebrates decreased significantly with the increase of the depth of sand beds. The 46.6% of rotifers and 85.5% of larger invertebrates (size > 200 μm) could be removed from the filtrate. Sand sizes had a greater impact on rotifers removal than larger invertebrates. Also increasing removal ratios of particle matter were detected with the sand beds added. Further data analysis showed that there was significant correlation between the mean values of particle counts and abundances of invertebrates in the filtrates.

Key words: drinking water; invertebrates; GAC filtration; sand beds; rotifers; crustaceans

鉴于无脊椎动物带来的感官问题^[1]及潜在的安全风险^[2-4], 有必要采取经济和技术上均可行的方式防止无脊椎动物穿透生物活性炭

(BAC)滤池. 目前, 针对BAC滤池无脊椎动物穿透控制的研究较少. H Schreiber等^[5]采用优化的反冲洗程序可较有效地减少无脊椎动物的穿透, 但当BAC滤池中无脊椎动物孳生到较高水平时, 出水中无脊椎动物丰度仍高达 $1\ 720\ \text{m}^{-3}$. M A Weeks等通过小试玻璃滤柱模拟反冲洗对GAC滤料中蜗牛幼虫的去除后指出当床层膨胀度达

收稿日期: 2012-04-18.

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07423-003).

作者简介: 尹文超(1984—), 男, 博士研究生;

张金松(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 张金松, zhangjinsong@waterchina.com.

30%~40%时,较小的蜗牛幼虫去除率为40%~50%,同时指出在实际的GAC吸附滤池中超过20%的床层膨胀度是不能实现的^[6].可见,单独通过优化反冲洗程序限制BAC滤池中无脊椎动物的穿透仍有不足之处.

砂滤工艺可有效去除进水中的无脊椎动物^[7-8].K Adam等^[7]指出采用新型快砂滤池可保障出水中无脊椎动物量在可接受的水平.刘丽君^[8]的研究证实,经快砂滤池过滤后,原水中的无脊椎动物可去除98.1%和99.9%.为此,考虑在BAC滤池活性炭滤料下布设石英砂垫层来防止无脊椎动物的穿透.采用不同高度垫层和不同粒径大小的石英砂滤料研究其对无脊椎动物的拦截去除效果,并评价砂垫层添加对BAC滤池出水水质的影响.

1 实 验

1.1 GAC 过滤系统

采用一套包含5个GAC滤柱的中试系统在中国南方某城市进行实验,当地处于亚热带地区,年平均水温在23℃以上,为无脊椎动物在GAC

滤柱中孳生提供了良好的环境.滤柱组成和设计参数如表1所示.

中试滤柱(滤速 $8.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$;空床接触时间11.25 min)从2010年5月开始稳定运行至2011年3月,期间不进行反冲洗.经两个月运行后,GAC滤料表面生物膜基本成熟,滤柱可视为BAC滤柱.图1为装置流程示意图.

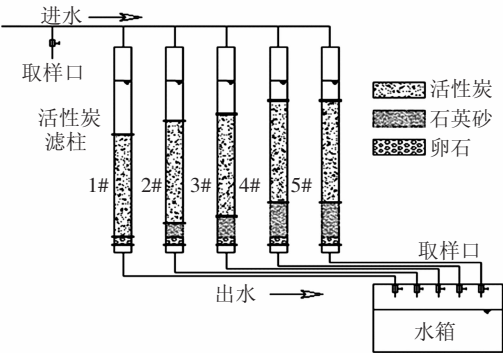


图 1 GAC 过滤系统流程图

1.2 试验水质

GAC滤柱进水采用当地水厂臭氧化后水,水质指标如表2所示.

表 1 GAC 滤柱设计参数

滤柱	活性炭粒径/ mm	活性炭类型	滤柱直径/ m	滤柱高度/ m	活性炭层高度/ m	砂垫层高度/ mm	石英砂粒径/ mm	承托层高度/ mm	承托层粒径/ mm
1#						0	无砂垫层		
2#						200	0.6~1.0		
3#	0.9~1.1	破碎炭	0.2	2.6	1.5	300	0.6~1.0	100	3~12
4#						500	0.6~1.0		
5#						500	0.8~1.2		

表 2 GAC 滤柱进水水质

参数	水温/ ℃	pH	浊度/ NTU	溶解氧/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD_{Mn} / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	余氯/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
范围	13.9~31.3	7.41~9.56	0.11~0.79	4.7~11.0	0.72~2.31	0.07~0.80
均值	25.3	8.48	0.2	7.64	1.27	0.27

1.3 检测方法

无脊椎动物样品采用200目尼龙滤网(74 μm)挂网富集,过滤水量 1 m^3 ,采样频率为每周或每双周取样一次,样品由滤网中洗脱后定容至50 mL,加质量分数为3%的福尔马林溶液固定.在显微镜(BX-51, Olympus, Japan)下鉴定和计数,放大倍数为100倍,经图像处理软件(Mshot MD 20和SPOT advanced)测定无脊椎动物长度.

取滤柱进出水测定浊度(2100P, HACH, USA)、颗粒数(IBR, USA)、 COD_{Mn} ^[9]、水温、溶解

氧(550A, YSI, USA)、pH(Orion 3-Star Plus, Thermo Scientific, USA).

数据差异统计学意义分析和相关分析采用SPSS 13.0软件,箱形图采用Origin 8.0绘制.

2 结果与讨论

2.1 无脊椎动物种类组成和丰度比较

实验期间共取样48次,滤柱出水中共检出包含轮虫、枝角类、桡足类成体(两种)、无节幼体、线虫、摇蚊幼虫、寡毛类在内的7类无脊椎动物.表3为各种无脊椎动物丰度范围.

表3 GAC 滤柱出水中无脊椎动物丰度范围值 m⁻³

种类	1#柱	2#柱	3#柱	4#柱	5#柱
轮虫	0 ~ 17 030	0 ~ 13 000	0 ~ 11 080	0 ~ 9 780	0 ~ 16 760
无节幼体	0 ~ 1 000	0 ~ 1 677	0 ~ 173	0 ~ 124	0 ~ 315
剑水蚤	0 ~ 887	0 ~ 809	1 ~ 60	0 ~ 112	0 ~ 116
猛水蚤	0 ~ 3 500	0 ~ 235	0 ~ 198	0 ~ 47	0 ~ 231
枝角类	0 ~ 11	0 ~ 12	0 ~ 6	0 ~ 5	0 ~ 6
摇蚊幼虫	0 ~ 20	0 ~ 16	0 ~ 15	0 ~ 9	0 ~ 35
线虫	0 ~ 4	0 ~ 4	0 ~ 4	0 ~ 3	0 ~ 1
寡毛类	0 ~ 7	0 ~ 8	0 ~ 2	0 ~ 3	0 ~ 2
生物总数	5 ~ 17 548	6 ~ 13 078	1 ~ 11 296	1 ~ 9 953	2 ~ 16 798

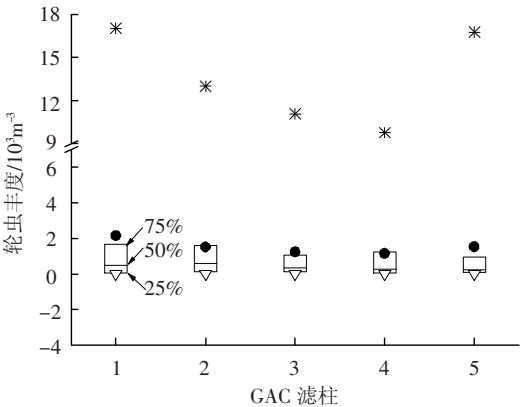
从表3可以看出,在所有滤柱出水中,轮虫均是绝对优势种群. 在GAC 滤柱运行初期,检出的轮虫主要为旋轮虫属;在运行的绝大多数时间内,鞍甲轮虫属、单趾轮虫属、狭轮虫属为优势种属. 从数量上看,桡足类生物是第二优势种群,桡足类成体主要由温剑水蚤属和美丽剑水蚤属组成. 枝角类和寡毛类生物主要为尖额溞属和仙女虫属. 线虫和摇蚊幼虫未作定性检测.

由表3还可以看出,由于砂垫层的添加,滤柱出水中轮虫、桡足类成体和幼体的数量均明显下降. 与无砂垫层滤柱相比,随着砂垫层高度的增加,滤柱出水中轮虫截留率由29.8%增加至46.6%,其他较大无脊椎动物去除率由41.7%增至85.5%. 去除效果最优的为采用500 mm 砂垫层、石英砂粒径为0.6~1.0 mm 的4#滤柱,轮虫去除率为46.6%,无节幼体去除率为77.8%,剑水蚤去除率为95.1%,猛水蚤去除率为95.1%. 5#滤柱(500 mm 砂垫层,粒径0.8~1.2 mm)对桡足类成体和无节幼体的去除效果与4#滤柱接近,但轮虫的去除率明显低于4#滤柱. 在运行期内,滤柱出水中枝角类、摇蚊幼虫、线虫和寡毛类生物的数量均较少.

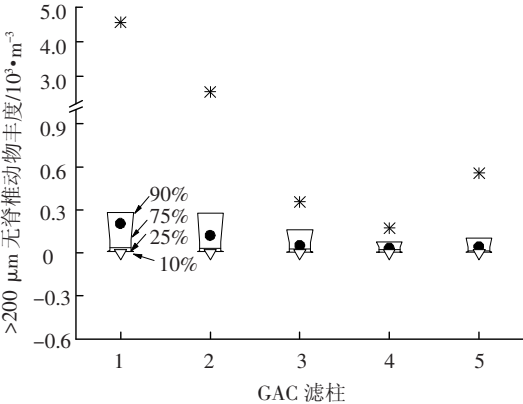
自1997年以来,有研究报道了BAC 滤池无脊椎动物穿透的情况^[4-5,10]. 无脊椎动物在滤出水中具体丰度不同,但结果显示,在不同国家和地区的GAC/BAC 滤池出水中,轮虫均为绝对优势种属,在本研究中也同样得到了证实. 欧洲较多国家的研究认为线虫是第二优势种群^[4-5],而我国的多数研究认为第二优势种群为桡足类成体和幼体^[8,10].

图2为不同砂垫层高度滤柱出水中轮虫(图2(a))和体长大于200 μm 无脊椎动物(图2(b))箱形图. 从图2(a)可以看出,轮虫出水丰度最大值、均值和均值标准偏差都随砂垫层(粒径0.6~1.0 mm)高度的增加逐渐减小,但5#滤柱对轮虫的去除效果不明显;从图2(b)可以看出,对个体较大的无脊椎动物,随砂垫层(粒径0.6~

1.0 mm)高度的增加其去除较轮虫更为明显,且石英砂粒径仅对穿透峰值有较大影响.



(a) 轮虫 25% 分位数, 50% 中位数, 75% 分位数



(b) 大于 200 μm 无脊椎动物 10% 分位数, 25% 分位数, 75% 分位数, 90% 分位数

* 代表最大值; ▽ 代表最小值; • 代表均值

图2 各滤柱出水中轮虫和个体大于 200 μm 无脊椎动物丰度箱形图

测量结果显示,GAC 滤柱出水中不同种类的无脊椎动物体长差异明显,其中轮虫最小为(110±10) μm;无节幼体(200±20) μm;桡足类成体:猛水蚤(520±30) μm 和剑水蚤(920±50) μm;枝角类(380±20) μm;寡毛类(1 200±100) μm 和摇蚊幼虫(2 000±100) μm. 而理论计算的砂垫层孔隙率分别为92.8~154.7 μm(粒径0.6~1.0 mm)和123.8~185.6 μm(粒径0.8~1.2 mm),可以从一定程度上解释上述实验结果.

图 3 为轮虫和体长大于 200 μm 的无脊椎动物的丰度随砂垫层高度增加的衰减曲线. 数据拟合发现随着砂垫层高度的增加轮虫和体长大于 200 μm 的无脊椎动物的丰度均值都呈指数衰减. 如图 3 (b)所示,相比轮虫,体长大于 200 μm 的无脊椎动物丰度随砂垫层高度增加而下降的幅度更大. 由图 3(a)中拟合公式可知:1)对应 4#滤柱砂垫层高度 500 mm 计算的轮虫穿透丰度为 $1\,132\text{ m}^{-3}$,与实际监测值较接近;2)通过增加砂垫层的高度不能实现轮虫的完全截留去除,存在一个理论计算的最低值 $1\,019\text{ m}^{-3}$. 而根据图 3(b)中拟合公式理论计算可知,通过增加砂垫层高度至 815 mm 可以达到大于 200 μm 无脊椎动物的完全截留去除.

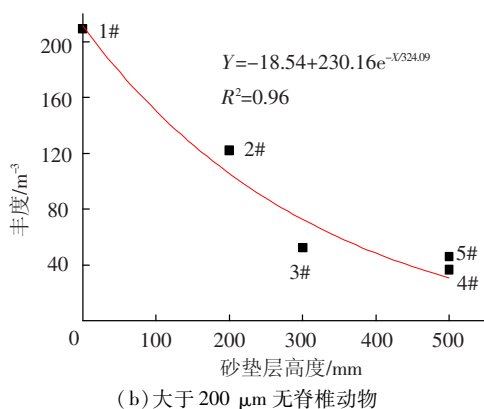
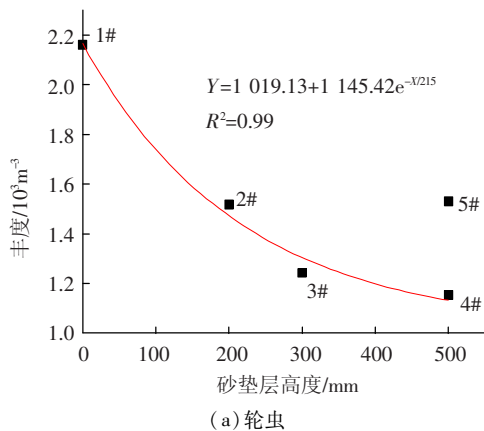


图 3 轮虫和体长大于 200 μm 无脊椎动物的穿透丰度随砂垫层高度增加的衰减曲线

2.2 不同无脊椎动物丰度随时间变化情况

图 4 为装置运行期间,1#~4#滤柱出水中 4 种无脊椎动物丰度随时间增长的变化趋势. 可以看出,4 种无脊椎动物分别为轮虫、无节幼体、桡足类成体(两种),运行期间枝角类、摇蚊幼虫、线虫和寡毛类生物丰度一直处于较低水平,不做变化趋势比较. 在 4 个滤柱出水中轮虫的高峰穿透次数、峰值及最高穿透峰值均存在明显差异. 随砂垫层高度的增加,高峰穿透次数总体呈下降趋势,1#柱为 5 次,2#和 3#柱为 4 次,4#柱为 3 次;最高穿透峰值也逐渐递减,依次为 $17\,030\text{ m}^{-3}$ (1#

柱)、 $13\,000\text{ m}^{-3}$ (2#柱)、 $11\,080\text{ m}^{-3}$ (3#柱)、 $9\,780\text{ m}^{-3}$ (4#柱);最高穿透峰值出现时间也随砂垫层高度的增加而推迟,1#和 2#柱出现在 110 ~ 130 d,而 3#和 4#柱出现在 180 d 附近.

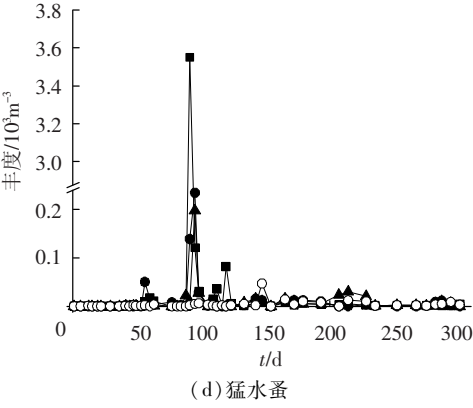
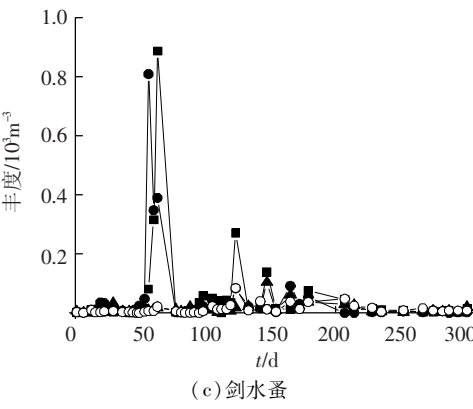
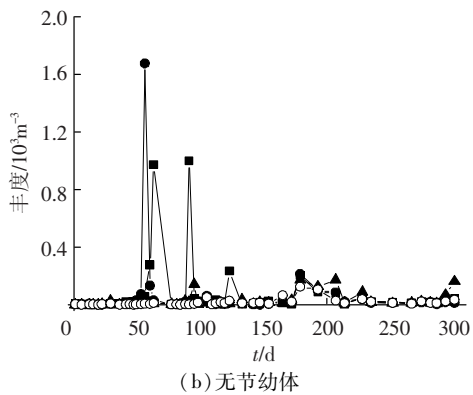
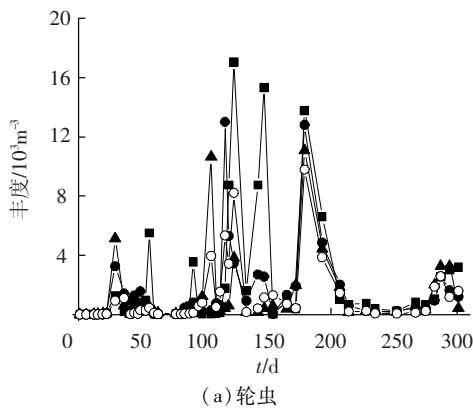
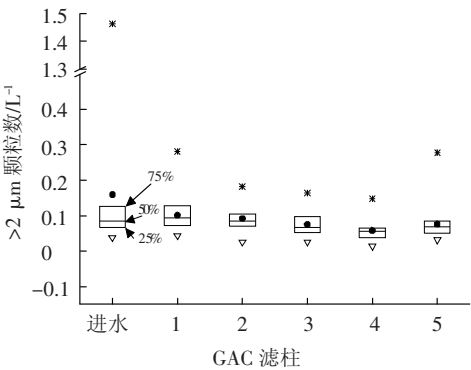
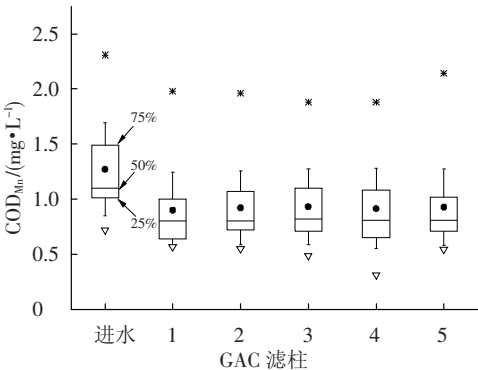


图 4 GAC 滤柱出水中无脊椎动物丰度随时间变化

作为第二优势种群,在无砂垫滤柱出水中,无节幼体出现了 3 个明显的峰值穿透,分别在第 60 天、120 天和 150 天;2#滤柱出水出现了 1 个明显峰值穿透,也是 4 个滤柱出水中最高穿透丰度($1\,677\text{ m}^{-3}$),出现在第 60 天;3#和 4#滤柱出水中无节幼体最高穿透峰值分别为 272 和 184 m^{-3} ,均出现在第 180 天. 对于桡足类成体,3#和 4#滤柱出水中剑水蚤丰度均低于 100 m^{-3} ,均未出现明显的峰值穿透,而 1#和 2#滤柱出水中剑水蚤丰度在运行至第 60 天时出现了明显的峰值穿透,且丰度均高于 800 m^{-3} . 对于另一种桡足类生物,在装置运行至第 90 天,1#~3#滤柱出水中猛水蚤出现明显的峰值穿透,但穿透丰度随砂垫层高度的增加而下降,4#滤柱出水中猛水蚤未出现明显峰值穿透,一直处于较低水平.



(a) 颗粒数 25% 分位数, 50% 中位数, 75% 分位数



(b) COD_{Mn} 25% 分位数, 50% 中位数, 75% 分位数

* 代表最大值; ▽ 代表最小值; • 代表均值

图 5 各滤柱出水中颗粒数和 COD_{Mn} 箱形图

WHO^[1]指出为了防止饮用水中微型动物对用户带来不利的感官和卫生安全影响,在饮水系统中应该进行长期控制. 首先对出厂水进行有效消毒,使进入供水管网的微型动物不能二次繁殖;另一个重要的方面是尽可能地控制管网中微型动物可能的食物来源,防止食物从水厂进入管网,最有效的方式是将进入管网中的颗粒有机物限制到最低水平. 本研究中砂垫层在有效防止无脊椎动物穿透滤池进入管网的同时,能够有效地控制颗粒有机物进入管网,可以抑制无脊椎动物在管网中的二次繁殖.

2.4 反冲洗对砂垫层的影响

图 6 为现场反冲洗后石英砂垫层与 GAC 滤料界面的变化. 可以看出,经过 2 min、强度为 50 m/h 的气体反冲洗后,在滤柱中的炭砂界面处,明显地出现石英砂向上进入 GAC 滤料中的情况,炭砂界面变得崎岖不平,界面最高处较反冲前

2.3 滤出水中颗粒数和 COD_{Mn} 比较

图 5 为滤柱出水中颗粒数和 COD_{Mn} 比较. 从图 5(a)可以看出,进水中粒径大于 2 μm 的颗粒数为 159 mL^{-1} ,而在添加砂垫层的滤柱出水中,颗粒数均值、最大值及标准偏差值均随砂垫层高度的增加而逐渐减小,其中 4#滤柱出水中颗粒数均值和标准偏差值均为最小. 与 4#滤柱相比,5#滤柱出水颗粒数去除效果不理想. 由图 5(b)可以看出,砂垫层的添加对 COD_{Mn} 的去除效果无明显影响. 尽管颗粒数不能直接替代无脊椎动物的丰度,但相关性分析表明,滤柱出水中无脊椎动物丰度与颗粒数相关关系明显(轮虫: $r_s = 0.883$, $p = 0.047$; 体长大于 200 μm 无脊椎动物: $r_s = 0.914$, $p = 0.03$),所以,颗粒数可以一定程度上反映无脊椎动物的穿透情况.

上升了约 200 mm,同时导致 GAC 滤料在局部出现下沉;在气冲之后采取 2 min 强度 10 m/h 的水反冲,石英砂垫层在此情况下并不能充分流化,但是之前被气冲带入活性炭滤料中的石英砂出现回落,继续加大水反冲洗强度至 20 m/h,在炭砂界面处出现较明显的流化,在水力分级的作用下水冲进行到 2.5 min 时,炭砂界面重新变得清晰,混入活性炭滤料中的石英砂继续回落,距离低于基础界面;继续加大水反冲洗的强度至 30 m/h 时,在炭砂界面处出现完全的流化,炭砂在界面处翻滚,并有部分活性炭滤料在水力作用下卷入石英砂垫层.

通过以上分析可以看出,不同反冲洗方式对活性炭滤柱床层结构的影响差别较大,在气体反冲洗后必须经过适当强度的水反冲使炭砂界面恢复,但水冲强度不宜过大.

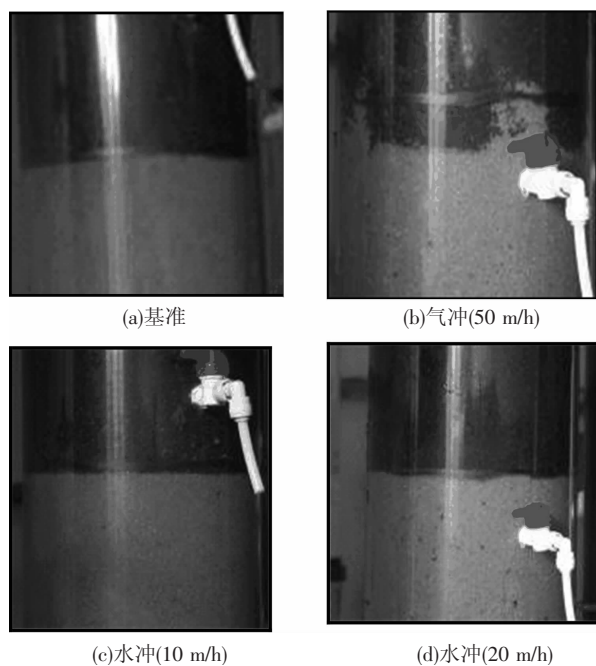


图6 气水反冲洗对砂垫层的影响现场图

3 结 论

1) 砂垫层的添加可较有效地截留生物活性炭滤池出水中的无脊椎动物,且随着砂垫层高度的增加,截留去除率逐渐上升. 理论上通过增加砂垫层的高度可以完全去除体长大于 200 μm 的无脊椎动物,但不能实现轮虫的完全截留;石英砂粒径对轮虫的去除效果有较大的影响.

2) 砂垫层的添加可较有效地减少无脊椎动物的峰值穿透次数,并能推迟峰值到来的时间. 同时,可以减少生物活性炭滤池出水中的颗粒物. 不同砂垫层高度出水中颗粒物的数量与无脊椎动物的丰度具有显著的相关性,通过测定出水颗粒数一定程度上能够反映无脊椎动物的穿透情况.

参考文献

- [1] World Health Organization. 2004 safe piped water: managing microbial water quality in piped distribution systems [R]. ISBN: 1 84339 039 6. London: IWA Publishing, 2004.
- [2] LOCAS A, BARBEAU B, GAUTHIER V. Nematodes as a source of total coliforms in a distribution system [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2007, 53(5): 580 - 585.
- [3] BICHAI F, BARBEAU B, PAYMENT P. Protection against UV disinfection of *E. coli* bacteria and *B. subtilis* spores ingested by *C. elegans* nematodes [J]. Water Research, 2009, 43(14): 3397 - 3406.
- [4] BICHAI F, BARBEAU B, DULLEMONT Y, *et al.* Role of predation by zooplankton in transport and fate of protozoan (oo) cysts in granular activated carbon filtration [J]. Water Research, 2010, 44(4): 1072 - 1081.
- [5] SCHREIBER H, SCHOENEN D, TRAUNSPURGER W. Invertebrate colonization of granular activated carbon filters [J]. Water Research, 1997, 31(4): 743 - 748.
- [6] WEEKS M A, LEADBEATER B S C, CALLOW M E, *et al.* Effects of backwashing on the prosobranch snail *Potamopyrgus jenkinsi* Smith in granular activated carbon (GAC) adsorbers [J]. Water Research, 2007, 41(12): 2690 - 2696.
- [7] ADAM K, HEATH R G M, STEYNBERG M C. Invertebrates as biomonitors of sand-filter efficiency [J]. Water SA, 1998, 24(1): 43 - 48.
- [8] 刘丽君. 饮用水处理系统中无脊椎动物群落演替与控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2010.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水分析监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [10] LI Xiaowei, YANG Yufeng, LIU Lijun, *et al.* Invertebrate community characteristics in biologically active carbon filter [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(5): 648 - 655.

(编辑 刘 彤)