

生物活性炭滤池微型动物泄漏的强化过滤控制

朱 洁, 陈 晨, 陈洪斌, 戴晓虎

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用孔径 $10\ \mu\text{m}$ 的浮游生物网对 A 水厂活性炭滤池出水的微型动物进行监测, 结果表明泄漏的微型动物优势种类为轮虫、线虫、寡毛类和甲壳类。在活性炭层底部增加厚度为 40 或 50 cm 粒径为 0.3~0.5 mm 的石英砂层, 当流速为 $10\sim 12\ \text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 对轮虫、甲壳类和寡毛类等体型较大的微型动物能够截留 55% 以上, 但对线虫截留率较低。建议采用 $10\ \mu\text{m}$ 的微孔滤网过滤氯接触池出水, 可使微型动物穿透进入供水管网的风险降低一个数量级, 且工作周期达 96 h。

关键词: 微型动物泄漏; 强化过滤; 微孔滤网; 活性炭滤池; 水厂

中图分类号: TU991.2

文献标志码: A

Enhanced Filtration Control of Micro-Metazoan Leakage in Granular Active Carbon Filter

ZHU Jie, CHEN Chen, CHEN Hongbin, DAI Xiaohu

(College of Environment Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The $10\ \mu\text{m}$ plankton sampling network was used to survey the microfauna in the outflow of granular active carbon (GAC) filter in Plant A, which showed that the dominant species were Rotifera, Nematode, Oligochaeta and Crustacea. When the thickness of quartz sand filter layer was 40 or 50 cm, the grain size was 0.3~0.5 mm and the flow rate was $10\sim 12\ \text{m}\cdot\text{h}^{-1}$, more than 50% of the large Metazoan, such as Rotifera, Crustacean, and Oligochaeta, could be intercepted, but few Nematode could be intercepted. It was proposed that the $10\ \mu\text{m}$ microstrainer should be added after the chlorine chamber, and this enhanced filtration could reduce the risk of microfauna leakage by one grade and the work cycle could reach 96 h.

Key words: micro-Metazoan leakage; enhanced filtration; microstrainer; granular active carbon filter; water plant

近年来, O_3 -BAC 工艺正成为水质性缺水地区提高供水水质的核心净化单元, 但该工艺引发了微型动物在活性炭滤池的二次繁殖^[1-2], 进而增加了后续消毒工艺的负担和饮用水生物风险。自来水中微型动物主要包括摇蚊幼虫、寡毛类、溞类、轮虫和线虫等无脊椎动物, 这些微型动物不仅影响人的感官, 有些还具有致病性。目前饮用水中微生物风险已大于化学性风险, 并成为当前对健康风险更大的污染物, 安全饮水法的重点已由长期的致癌风险调整到急性的微生物风险^[3]。自 2004 年至 2010 年, 饮用水输配中由水生生物引发的公共卫生安全事件的报道多达 190 余起, 其中 20% 是由于微型动物穿透水处理工艺屏障进入到输配水管网中引起的^[4]。WHO 规定, 安全的饮用水不应该存在可导致人类感染的虫卵、幼虫以及其他有害生物^[5]。

目前国内关于微型动物泄漏的控制还处于起步阶段, 且普遍采用孔径为 $35\ \mu\text{m}$ 及以上孔径的浮游生物取样网来研究自来水中的微型动物^[6], 该孔径截留的微型动物是否能准确反映活性炭滤池微型动物数量和种类仍需进一步研究。因此, 课题组考察了不同孔径的微型滤网对微型动物的截留效果, 旨在探寻更合理的微型动物取样方法, 准确反映微型动物在活性炭滤池中的分布和泄漏规律。

微型动物控制方法主要包括物理截留和化学灭杀, 其中物理截留主要通过改善絮凝和过滤工艺、优化活性炭滤池的反冲洗参数达到^[7-8], 但实际运用中效果并不理想, 因此考虑在 A 水厂的活性炭滤池和氯接触池后增加小粒径石英砂和微孔滤网等强化过滤装置进行微型动物的控制研究。考察两者对微型动物的截留效率, 进一步分析该强化过滤装置的有效性, 从而提出生产上可行的强化过滤或截留措施,

收稿日期: 2012-07-06

基金项目: 国家水专项课题(2012ZX07403-002-04); 国家自然科学基金(50678118)

第一作者: 朱 洁(1984—), 女, 博士生, 主要研究方向为污染原水净化技术。E-mail: zhujie198461@163.com

通讯作者: 陈洪斌(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为水污染控制理论和水的资源化技术开发。

E-mail: bhctxc@tongji.edu.cn

降低微型动物进入管网的风险。

1 方法与材料

1.1 试验方法与装置

(1) 细石英砂强化过滤试验

石英砂滤柱设两根,有机玻璃材质,内径 150 mm,高 2.2 m,柱体采用法兰连接,方便拆卸及填充不同厚度石英砂层;布水板上依次铺设粗砾石 10 cm、细砾石 10 cm,然后铺细石英砂,其中 1 号滤柱的石英砂粒径为 0.6~0.9 mm,2 号填充粒径为 0.3~0.5 mm,砂层高度可调,试验过程分别采用了 40、50 cm 砂层高度。细砂柱的进水为上海地区 A 水厂的臭氧生物活性炭生产装置出水,试验过程中细砂柱的滤速分别为 8、10 和 12 m·h⁻¹。

(2) 微孔滤网过滤现场试验

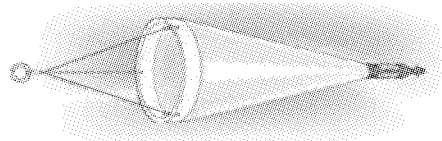
同样对 A 水厂的臭氧生物活性炭生产装置出水开展连续流试验。分别利用活性炭滤池出水和氯消毒出水的取样管,改造后用于挂设微孔滤网过滤微型动物。微孔滤网是由微型动物取样器改造后使用。每次挂网前确定流速和水量,过滤一定时间后将过滤浓缩液收集并立即生物镜检。

1.2 微型动物取样、镜检计数方法及主要仪器

试验过程微型动物的取样采用微孔滤网过滤水样,收集浓缩液镜检。微孔滤网有两种:① PTN-S500 型微型浮游生物网。网口直径 20 cm,网高 50 cm,滤网孔径为 25 μm,如图 1a 所示。② Hydro-Bios 浮游生物取样网。滤网上口直径 25 cm,下口直径 5 cm,网高 50 cm,网孔直径有两种,分别为 10 μm 和 5 μm,如图 1b 所示。



a PTN-S500 型微型浮游生物网

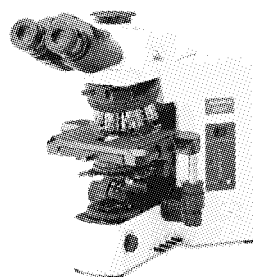


b Hydro-Bios 浮游生物网

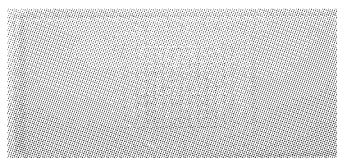
图1 PTN-S500 和 Hydro-bios 浮游生物网

Fig.1 ptn-S500 and Hydro-bios plankton sampling network

微型椎动物采用如图 2a 所示的 Olympus BX51 生物显微镜观测、计数和测量,计数框采用如图 2b 所示的北京普利特仪器公司 CC-F 浮游生物计数框,玻璃材质,计数框的体积为 0.1 mL。



a Olympus BX51 生物显微镜



b CC-F 浮游生物计数框

图2 显微镜和浮游生物计数框

Fig.2 Microscope and plankton counting chamber

水中微型动物的密度计算方法为挂网浓缩后的水样用显微镜计数后按下式计算:

$$N = \frac{V_s n}{100 V V_a} \quad (1)$$

式中: N 为水中微型动物的密度,个·(100 L)⁻¹; V 为采样过滤水样体积, L; V_s 为浓缩水样体积, mL; V_a 为显微镜检水样体积, mL; n 为显微镜检六次的微型动物数量平均值, 个。

2 试验结果与讨论

2.1 关于生物活性炭滤池微型动物泄漏检测的准确度探讨

目前国内文献^[6-10]关于自来水中微型动物的研究只涉及到溞类和寡毛类等体型较大的微型动物,对体型较小的轮虫和线虫极少涉及,究其原因是孔径为 35 μm 及以上的浮游生物网只能截留到摇蚊幼虫、寡毛类、溞类等体型较大的微型动物。采用 10 μm 的浮游生物网测得国外某水厂活性炭滤池出水微型动物的密度最高可达 680 个·(100 L)⁻¹^[1],而李小伟等^[6]采用孔径为 35 μm 的浮游生物取样网测得南方某水厂炭滤后水最高密度仅为 82.5 个·(100 L)⁻¹。鉴于取样工具的差异很大程度上决定了样品中微型动物数量与种类差异,因此考察不同孔径的浮游生物取样网对微型动物取样的准确性,有

利于更加准确地掌握国内自来水厂活性炭滤池微型动物分布和泄漏规律。

以 A 水厂秋冬季节生物活性炭滤池出水为例,不同滤网孔径(5, 10, 25 μm)对微型动物种类和数量检出效果的差异见图 3。

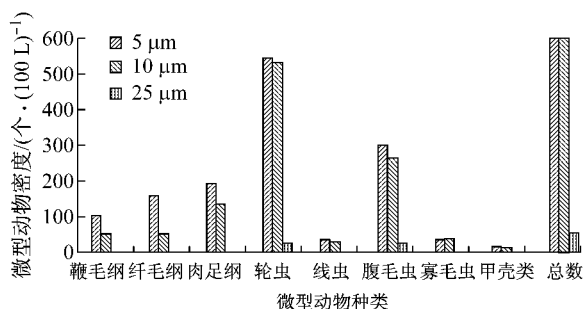


图 3 不同孔径滤网检出的微型动物种类和数量

Fig.3 The variety and quantity of Metazoa detected by micro-strainers of different diameters

由图 3 可以看出, 5 和 10 μm 滤网对生物活性炭池出水检测出的微型动物总数量基本相当, 均远远高于 25 μm 的滤网, 约为 25 μm 滤网的 25 倍。在微型动物检出种类方面, 5 和 10 μm 滤网检出的原生动物包括鞭毛纲的眼虫, 纤毛纲的楯纤虫、急游虫, 以及肉足纲的放射太阳虫和变形虫等, 后生动物包括轮虫、线虫、腹毛虫、寡毛类与甲壳类。其中轮虫为主要族群, 5 和 10 μm 滤网检测结果中轮虫的密度分别为 546.0 个 $\cdot (100 \text{ L})^{-1}$ 和 531.0 个 $\cdot (100 \text{ L})^{-1}$, 约占微型动物总数的一半左右。而 25 μm 滤网仅能检测到后生动物, 且数量较少, 轮虫和腹毛虫密度各为 25.0 个 $\cdot (100 \text{ L})^{-1}$, 寡毛类和甲壳类仅 2.0~3.0 个 $\cdot (100 \text{ L})^{-1}$ 。

由以上结果可知, 采用小孔径 5 和 10 μm 的滤网提高了后生动物如轮虫、腹毛虫、寡毛类和甲壳类动物的检出率, 同时可检测到 25 μm 孔径滤网检测不到的原生动物等, 其中 5 μm 滤网的检出率总体上又略高于 10 μm 滤网, 但由于 5 μm 的滤网对水样的截留阻力较大, 浓缩定量所需时间较长, 综合考虑检测结果的准确性和取样的便捷程度, 选用 10 μm 滤网作为取样工具更为合适。后续试验将采用 10 μm 滤网测定 A 水厂活性炭滤池微型动物的分布规律及泄漏情况, 并将其作为分析手段考查细砂和微孔滤网过滤前后水中微型动物的总数, 用于计算强化过滤装置的截留率。

2.2 生物活性炭滤池出水的微型动物密度及其泄漏

以 A 水厂为例, 该水厂以青草沙水库原水为进水, 采用 10 μm 采样器进行采样, 考察不同季节条件

下生物活性炭滤池出水的微型动物多样性, 试验结果见图 4。

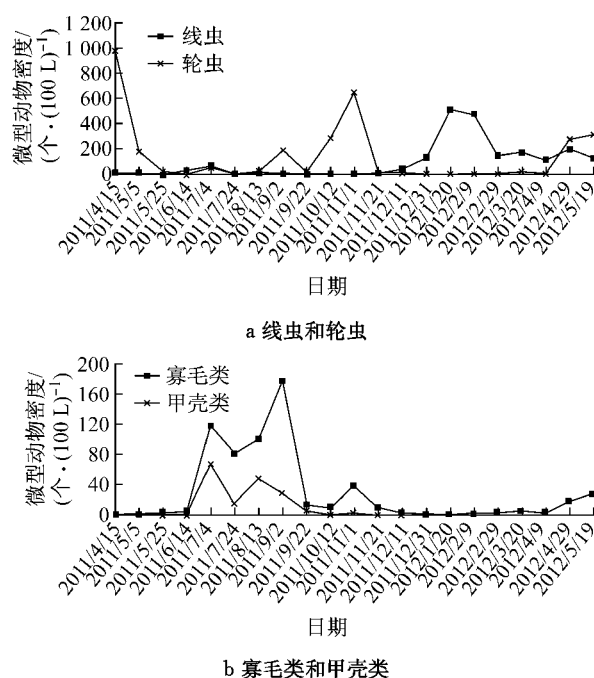


图 4 生物活性炭滤池总出水中微型动物的密度变化趋势

Fig.4 The density change of Metazoa in the GAC outflow

由图 4 可知, A 水厂生物活性炭滤池总出水的优势微型后生动物为轮虫、线虫、寡毛类和甲壳类。生物活性炭滤池出水的微型动物优势种类和数量呈季节性变化, 春秋季节(2011 年 4 月—6 月, 2011 年 9 月—12 月)轮虫数量较多, 最高可达 980.0 个 $\cdot (100 \text{ L})^{-1}$; 夏季高温(2011 年 6 月—9 月)条件下寡毛类和甲壳类较多, 寡毛类最高可达 177.1 个 $\cdot (100 \text{ L})^{-1}$; 冬季低温(2012 年 1 月—3 月)条件下, 微型动物种类较少, 轮虫和寡毛类基本绝迹, 此时线虫是优势动物种群, 水温为 5~10 $^{\circ}\text{C}$ 时线虫个数最高可达 510.0 个 $\cdot (100 \text{ L})^{-1}$ 。有研究表明, 低温会直接影响某些微型动物的生长发育, 延长胚胎发育时间^[11-12], 同时由细菌组成的生物膜的生物活性和生长率均下降, 微型动物的食物来源也会受到限制^[13], 因而低温时微型动物数量和种类极少; 低温条件下线虫的孵化期较长, 但孵出后的二龄线虫幼虫在低温条件下存活时间更长, 5 $^{\circ}\text{C}$ 时可达 60 天^[14], 因此线虫在低温下竞争者减少、食物充足的条件下容易大量存活并泄漏到清水池。

为进一步探索生物活性炭滤池一个运行周期内(72 h)的微型动物泄漏规律, 在夏季微型动物的种类丰富、数量较多的情况下选取了单独一格滤池进行监测, 结果如图 5 所示。

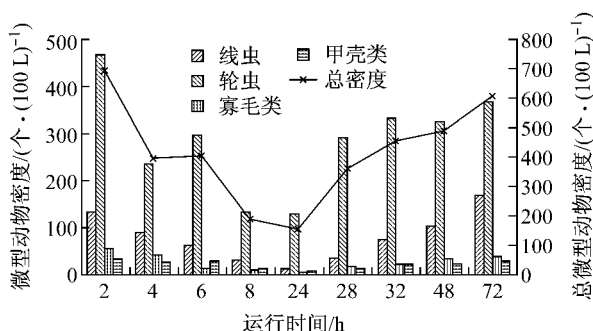


图5 一个工作周期内活性炭滤池出水中泄漏的微型动物种类和密度变化

Fig.5 The change of variety and density of leaking Metazoan in an operation circle of GAC

由图5可知,一个周期内,单格滤池出水微型动物总密度呈先下降后上升的趋势,初滤水中的微型动物密度是稳定后微型动物密度的3倍左右,这是因为被反冲洗从活性炭表面冲脱而残留在滤池中的微型动物进入初滤水;活性炭滤池运行的24 h内,穿透滤池的微型动物数量基本趋于稳定;运行24 h后活性炭滤池出水的微型动物密度开始增加,运行至末期,微型动物的泄漏更为严重,达到603.0个·(100 L)⁻¹。分析原因认为,经过反冲洗后,活性炭上的微型动物数量稀少,24 h生物活性炭滤池进水重新引入的微型动物和活性炭滤池原有的微型动物在活性炭滤池中重新生长和繁殖,且由于活性炭滤池过滤截留的杂质等也起到了强化过滤的作用,因此

出水的检出数量不高;此后大量繁殖的微型动物和部分老化的生物膜会在水流的冲刷和自身的运动下穿过滤池,使得泄漏问题逐渐加剧。

活性炭滤池为微型动物提供了良好的生境,不仅适合细菌生长,同样适合微型动物生长并繁殖,优化混凝、过滤和反冲洗参数等方法都因无法抑制微型动物在活性炭滤池的二次繁殖而达不到预期效果,可见在整个运行周期内,只要活性炭滤池进水中存在微型动物,活性炭滤池正常运行就会发生微型动物的二次繁殖和泄漏问题。长期监测A水厂的出厂水发现,活性炭滤池出水泄漏严重时,出厂水中的轮虫最高可达126.0个·(100 L)⁻¹,线虫最高可达50.6个·(100 L)⁻¹,即使经过消毒工艺有时还可在出厂水中检测到微型动物活体。因此,采用强化过滤装置拦截微型动物,对最大限度减少进入后续工艺的微型动物数量和减轻后续消毒工艺的负担十分必要。

2.3 细砂过滤对微型动物的强化截留

目前国内关于微型动物泄漏及控制方面仅对甲壳类和寡毛类的截留效率有研究,如赵建树^[15]利用级配为0.8~1.2 mm的石英砂层(30 cm)截留甲壳类后生动物,出水的甲壳类数量仅下降了39.0%。本研究考虑采用粒径更小(0.6~0.9 mm和0.3~0.5 mm)的石英砂进行强化过滤,在中试条件下,一个运行周期内(96 h)不同滤速和石英砂层厚度对轮虫、线虫、甲壳类和寡毛类的平均截留率见图6。

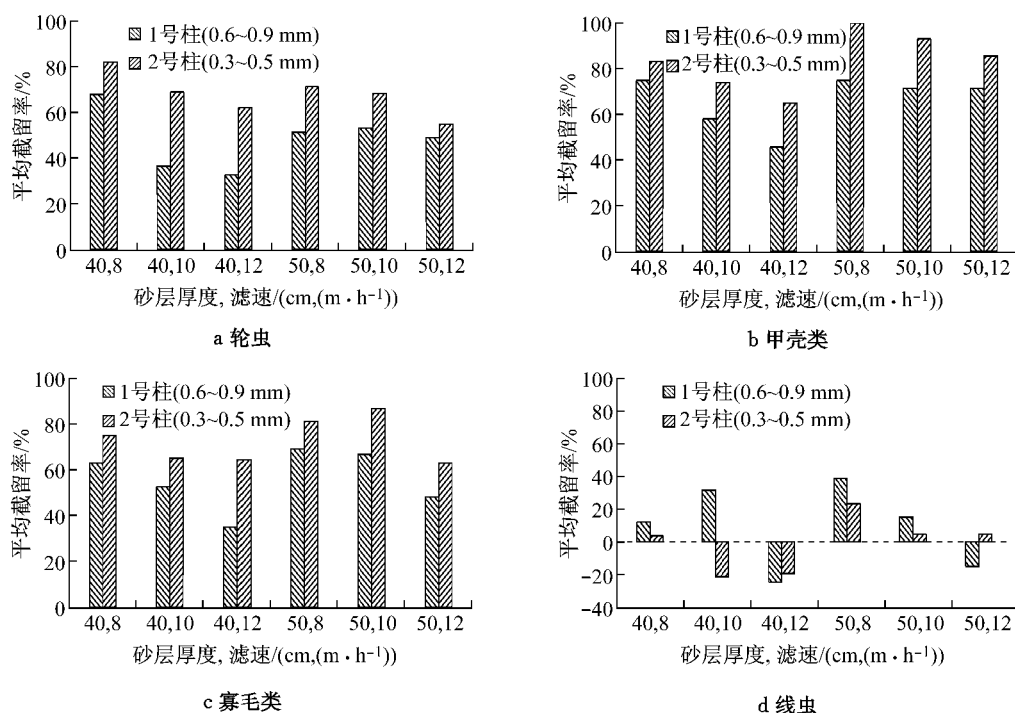


图6 细砂滤柱对不同微型动物的截留率

Fig.6 The interception rate of fine sand column for different Metazoan

由图6可知,粒径为0.3~0.5 mm的细砂层对轮虫、线虫、甲壳类和寡毛类的截留效果均明显优于粒径为0.6~0.9 mm的粗砂层,前者对甲壳类的截留率达到60%~100%,轮虫的截留率超过55%;两种粒径石英砂对轮虫、甲壳类和寡毛类微型动物的截留效果均随砂层厚度的增加而增加,随过滤速度的升高而降低。从图6d来看,两种粒径的石英砂对线虫截留效果均不理想,当厚度为50 cm、滤速为8 m·h⁻¹时,截留率达到20%~40%,有的工况还出现出水数量高于进水的现象。这可能与线虫细长的体型和较强的钻穿能力有关,同时石英砂层为线虫提供了再繁殖的生境,增加了出水线虫的检出率。

试验过程中还考察了不同工况条件下过滤时水头损失的变化。结果表明,水头损失与石英砂粒径、砂层厚度以及滤速均成正比。由于活性炭滤池出水的浊度仅为0.1 NTU左右,石英砂层连续过滤96 h内水头损失较小,最高只有0.08 m,所以即使在活性炭层底部增加一层细砂,也不会对活性炭滤池的水头损失造成明显影响。水厂活性炭滤池的滤速通常控制在10~12 m·h⁻¹,试验发现两种粒径的石英砂在该流速范围内对轮虫和甲壳类均有较好的截留率;从水头损失来看,石英砂层厚度达到40 cm或50 cm均可行。对于原水质量较差的水厂,建议在活性炭层底部铺设细砂层,能够在一定程度上控制微型动物进入消毒清水池的数量,降低微型动物泄漏风险,从试验得出的具体参数可以看出其具有一定的现实可操作性。至于铺设细砂层对活性炭滤池的布水板设计、反冲洗强度要求以及滤料流失等问题,还需进一步在生产性试验中验证。

2.4 微孔滤网对活性炭滤池出水和氯消毒出水的微型动物的截留

尽管砂滤在一定程度上可缓解微型动物泄漏的风险,但其对于线虫等穿透力较强的微型动物截留效果不佳;微滤或超滤能够有效去除滤池反冲洗水中的原生动物如贾第虫、隐孢子虫^[16],推测其可以完全拦截尺寸更大的微型后生动物,但微滤和超滤均需在压力条件下进行,投资和运行成本高,应用难度大。由第2.1节可知,5和10 μm的微孔滤网对各种微型动物均有良好的截留效果,且能够自压运行,而5 μm滤网的水头损失增加很快,连续工作12 h就需要反冲洗,因此不适合长期连续过滤,因此选择将10 μm滤网作为强化过滤工具进行连续流微型动物截留试验。A水厂活性炭滤池出水浊度维持在0.1 NTU左右,圆台形滤网总体积为10.1 L,连续流条

件下,流速随时间变化,维持流量为300 L·h⁻¹时10 μm可连续过滤48 h不溢流。图7为过滤周期为48 h时10 μm微孔滤网对活性炭滤池出水中微型动物的截留效果。

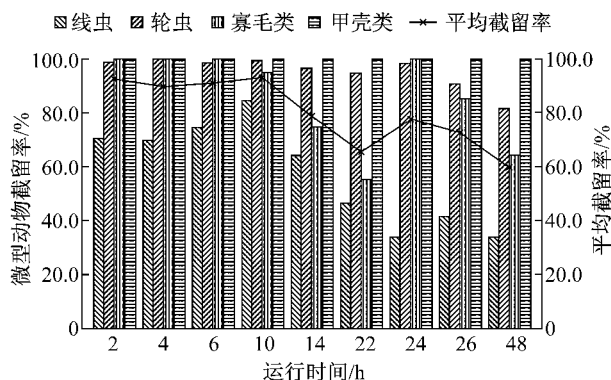


图7 连续流条件下10 μm滤网对活性炭滤池出水微型动物截留效果

Fig. 7 The interception effect of 10 μm microstrain for Metazoan after GAC filter in continuing flow condition

由图7可知,48 h内10 μm滤网对甲壳类微型动物的截留率保持在100%;对轮虫的截留率维持在81.5%~99.5%之间;过滤初期10 μm滤网对寡毛类微型动物的截留率达到100%,此后有所降低,48 h后降低到64.0%。过滤前期线虫的截留率最高达到84.4%,随过滤时间增加,线虫截留率逐渐降低,最低仅有33.7%。由于过滤初期微孔滤网截留的杂质附在滤网内壁,形成了一层更细的滤膜,起到强化过滤的作用,截留效果良好;随着过滤周期增加,滤网的水头损失增加,寡毛类和线虫的运行能力强,能够收缩前进^[17],可以在水压和自身收缩运动作用下穿过比自身直径小的孔缝,而体表坚硬、体型较大的甲壳类则难以穿透10 μm的滤网,少数轮虫在长期水力冲刷下也可以穿透10 μm滤网。

由上可知,10 μm滤网对活性炭滤池出水中大多数微型动物均具有显著的截留效果,但对于某些体型小且穿透力极强的线虫的去除效果较差,且运行周期较短。为进一步考察其在生产装置应用的可能性,采用10 μm滤膜对氯消毒出水进行连续过滤试验,结果见图8。

氯消毒出水(下面简称氯后水)的浊度低于活性炭滤池出水,流速为300 L·h⁻¹时,连续流条件下10 μm滤网过滤氯后水的工作周期达到96 h仍未发生溢流现象。与活性炭滤池出水相比,氯后水的微型动物大部分为死体。由图8可知,48 h内10 μm滤网

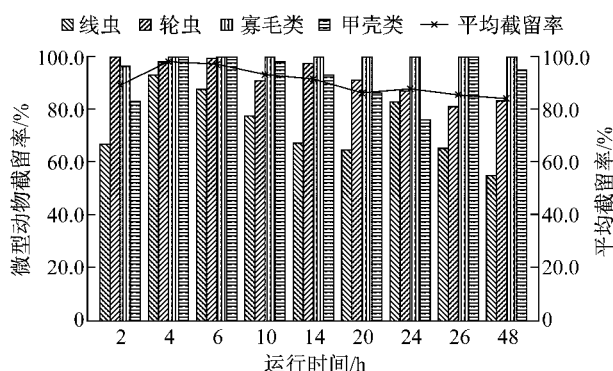


图8 连续流条件下10 μm滤网对氯池出水微型动物截留效果

Fig. 8 The interception effect of 10 μm microstrain for Metazoa after chlorination chamber in continuing flow condition

对氯后水的轮虫截留效果与生物活性炭滤池出水的效果相近,截留率均在90%左右,表明轮虫是否为活体对滤膜过滤效果影响不大.滤网对氯后水的线虫截留率最高为93.0%,最低为54.8%,优于活性炭滤池出水直接过滤.线虫对次氯酸钠的抗性较强,80 mg · L⁻¹的NaClO浓度仍不能使线虫100%灭活^[18],因此氯消毒出水的线虫仅有部分死亡,死亡线虫由于不具有伸缩性可直接被滤网拦截,但是活体仍能穿透10 μm滤网,由于氯后水的线虫活体数量相对较少,因此拦截率高.由于寡毛类对氯的抗性强,氯后水的寡毛类动物全部死亡,有些完全解体^[5],因此氯后水中寡毛类数量远低于生物活性炭滤池出水,发生部分解体的寡毛残体基本能被10 μm滤网截留,因而截留率基本为100%.与生物活性炭滤池出水相比,10 μm滤网对氯后水甲壳类的截留率较低,主要是由于氯消毒出水的甲壳类基本死亡且身体发生部分解体,滤网运行至后期,少数甲壳类残体在水流压力下穿透滤网.

目前,某些以湖泊高藻类水体作为原水的水厂已有采用微孔滤网过滤藻类,降低后续处理的难度.从本研究结果来看,将微孔滤网用于拦截微型动物,也具有现实可操作性,且对微型动物截留率可达90%或更高,也就说微型动物泄漏的风险降低了一个数量级.从过滤活性炭出水和氯后水的效果来看,微孔滤网放置于氯消毒后不仅能显著提高微型动物的截留效率,并且效果更稳定、运行周期更长.水厂如果考虑设置微孔滤网过滤微型动物,建议将微孔滤网放置于氯消毒池之后,实际操作中还需考虑滤网反冲洗水排放等问题,避免发生微生物的二次污染.

3 结论

(1) 采用孔径为10 μm的滤网对水厂净化过程和活性炭滤池出水的微型动物取样,能够准确反映微型动物种类和数量,可以满足水厂常规检测和科学研究的要求.

(2) 水厂生物活性炭滤池泄漏的微型动物优势种类是轮虫、线虫和寡毛类.不同季节活性炭滤池出水的微型动物种类和数量差异很大,春秋季轮虫数量最高达到980.0个·(100 L)⁻¹,冬季低温时线虫数量达到510.0个·(100 L)⁻¹.从活性炭滤池的一个运行周期(72 h)的微型动物泄漏趋势看,运行后期的微型动物泄漏数量大幅增加.

(3) 在活性炭层底部增加厚度为40或50 cm粒径为0.3~0.5 mm的石英砂层,当流速为10~12 m · h⁻¹时,水头损失不超过10 cm,对轮虫、甲壳类和寡毛类等体型较大的微型动物能够截留55%以上,能够在一定程度上降低微型动物泄漏的风险,具有现实可操作性.

(4) 孔径为10 μm的微孔滤网对各类微型动物的截留效果均远优于石英砂过滤,微型动物穿透进入供水管网的风险可降低一个数量级;微孔滤网对氯后水微型动物的截留效果优于直接对活性炭滤池出水过滤,且工作周期延长,实际应用中还需考虑反冲洗排放避免二次污染.

参考文献:

- [1] Schreiber H, Schoenen D, Traunsperger W. Invertebrate colonization of granular activated carbon filters [J]. Water Research, 1996, 31(4):743.
- [2] 陈晨. 饮用水臭氧生物活性炭深度处理的微型动物泄漏控制技术[D]. 上海: 同济大学, 2012.
CHEN Chen. The study on the control of microfauna leakage of advanced BAC treatment for drinking water [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [3] Hoffman R, Marshall M M, Gibson M C, et al. Prioritizing pathogens for potential future regulation in drinking water[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43:5165.
- [4] Baldursson S, Karanis P. Waterborne transmission of protozoan parasites: Review of worldwide outbreaks—an update 2004—2010[J]. Water Research, 2011, 45(20):6603.
- [5] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality[M]. Geneva: World Health Organization, 2004.
- [6] 李小伟, 刘丽君, 杨宇峰. BAC滤池无脊椎动物滋生对饮用水安全性的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(12):65.
LI Xiaowei, LIU Lijun, YANG Yufeng. Influence of

- invertebrate colonization in biological activated carbon (BAC) filter on the safety of drinking water[J]. Journal of Hunan University; Natural Sciences, 2008, 35(12): 65.
- [7] 孙兴滨. 摇蚊幼虫生态学特征及其在水处理过程中去除技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- SUN Xingbin. Ecological characteristics of chironomid larvae and study on its removal in water treatment process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [8] 李小伟, 刘丽君, 杨宇峰, 等. 生物活性炭滤池水生动物的控制研究[J]. 给水排水, 2007, 33(11): 7.
- LI Xiaowei, LIU Lijun, YANG Yufeng, et al. Study on control of aquatic animals in biological activated carbon filter [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(11): 7.
- [9] 武海霞. 给水处理中水生生物的生长习性与灭活试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- WU Haixia. Characteristics and killing experiment of aquatic animals in drinking water [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [10] 李伟. 净水工艺中颤蚓污染风险控制技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- LI Wei. Reproduction and migration characteristics of worms and the controlling of their pollution in drinking water treatment process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [11] Deborah Chapman. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring [M]. 2nd ed. London: Spon Press, 1996.
- [12] 于娟, 张瑜, 杨桂朋, 等. 饵料、温度和盐度对两种海洋桡足类摄食与排粪的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(7/8): 45.
- YU Juan, ZHANG Yu, YANG Guipeng, et al. Effects of diet, temperature and salinity on ingestion and egestion of two species of marine copepods [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(7/8): 45.
- [13] 刘建广, 张晓健, 王占生. 温度对生物炭滤池处理高氨氮原水硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 233.
- LIU Jianguang, ZHANG Xiaojian, WANG Zhansheng. Influence of temperature on treating nitrification of high ammonia nitrogen source water in biological carbon filter [J]. China Environment Science, 2004, 24(2): 233.
- [14] 郑经武, 林茂松, 方中达. 温度对燕麦孢囊线虫二龄幼虫孵化及生活力的影响[J]. 南京农业大学学报, 1996, 19(1): 109.
- ZHENG Jingwu, LIN Maosong, FANG Zhongda. Effect of temperature on hatching and viability of heterodera avenae [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1996, 19(1): 109.
- [15] 赵建树. 臭氧生物活性炭工艺中甲壳类生物控制与灭活技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHAO Jianshu. Study on control of Crustacea and its removal technology in ozone and active carbon process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [16] 卞璐, 许仕荣, 陈益清, 等. 滤池反冲洗水的超滤处理回收中试[J]. 中国给水排水, 2007, 23(14): 83.
- KUANG Lu, XU Shirong, CHEN Yiqing, et al. Pilot-scale test on reclamation of backwash water from sand filter by ultrafiltration [J]. China Water & Waste Water, 2007, 23(14): 83.
- [17] George O, Poinar Jr. Nematode and nematomorpha [J]. Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates, 2001, 9: 255.
- [18] 严克平, 张明德, 周文琪, 等. 次氯酸钠消毒剂对绕线虫的灭活动力学研究[J]. 净水技术, 2010, 29(6): 28.
- YAN Keping, ZHANG Mingde, ZHOU Wenqi, et al. Inactivation kinetics of plectus Sp. in application of disinfection with sodium hypochlorite [J]. Water Purification Technology, 2010, 29(6): 28.