

微孔滤布过滤对氯接触池出水中无脊椎动物的截留

吴志玲¹, 唐贤春², 陈洪斌²

(1. 天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 如何有效控制供水系统中的无脊椎动物是亟需解决的问题。采用微孔滤布过滤对氯接触池出水中无脊椎动物进行截留, 结果显示 $5\ \mu\text{m}$ 孔径的滤布对其有着良好的去除效果, 总去除率可维持在 85% 以上, 对轮虫的去除率达到 94% 以上, 对线虫的去除率也可达到 70% 以上。综合考虑对不同种类无脊椎动物的截留效果以及微孔滤布运行情况, 建议在采用 $5\ \mu\text{m}$ 孔径的微孔滤布截留无脊椎动物时, 将进水流量控制在 $5.5\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以内, 水头损失控制在 50 cm 以内。

关键词: 无脊椎动物; 微孔滤布过滤; 截留; 供水系统

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0023-06

Interception of Invertebrates in the Effluent of Chlorination Contact Tank by Micro-pore Cloth Filtration

WU Zhi-ling¹, TANG Xian-chun², CHEN Hong-bin²

(1. School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: How to effectively control the invertebrates in the water supply system is a problem need to be solved urgently. Micro-pore cloth filtration was used to remove invertebrates in the effluent of the chlorination contact tank. The results showed that the micro-pore cloth with pore size of $5\ \mu\text{m}$ had good removal efficiencies on invertebrates. The removal rate of the total invertebrates could be maintained above 85%; the removal rate of rotifers and nematodes could reach more than 94% and 70% respectively. Considering the removal efficiencies of different kinds of invertebrates and the operation of micro-pore cloth, it was suggested that when the micro-pore cloth with pore size of $5\ \mu\text{m}$ was used, the inflow rate should be controlled within $5.5\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and the head loss should be controlled within 50 cm.

Key words: invertebrate; micro-pore cloth filtration; interception; water supply system

随着供水系统的无脊椎动物孳生和进入水龙头等现象更加频繁, 供水系统中无脊椎动物的二次繁殖和泄漏问题越来越得到研究者的关注^[1]。无脊椎动物会给供水安全带来一定的风险, 主要表现为感官风险和潜在的生物安全风险^[2-4]。2011年5

月我国某居民管网水中出现肉眼可见的白色虫体, 经检验为活体的线虫和剑水蚤^[5]。在我国也曾发现过无甲腔轮虫感染人泌尿系统的临床病例^[6]。研究表明, 线虫的捕食作用可以为总大肠菌群提供庇护, 使总大肠菌群寄生于线虫肠道内而不被水中

的余氯杀灭,从而导致总大肠菌群在含氯的条件下仍能在供水系统中迁移^[7]。虽然目前针对无脊椎动物还没有制定强制性的控制标准,但是出于对饮用水水质的总体考虑,需要对饮用水中的无脊椎动物加以控制。目前对于供水系统中无脊椎动物的控制措施主要有以下几个方面:①对现有的水处理工艺进行优化。以滤池为例,对滤池的反冲洗周期、强度进行优化可以在一定程度上减少滤池出水中的无脊椎动物密度^[8-10]。②增加截留措施,如石英砂过滤、氯消毒和石英砂过滤相结合等^[11-12]。但现有的截留措施对无脊椎动物的截留效果仍有待提高,尤其是线虫。③其他调控措施,如对活性炭滤池实行干池法、食盐浸泡法等^[13],这两种方法在使用的过程中,活性炭滤池需要停产,对自来水厂生产会产生影响,因此只适用于应急处理。

水处理中膜过滤技术多为中空纤维超滤膜方面的研究,可有效去除贾第鞭毛虫和隐孢子虫^[14]。因此可以推断,超滤膜同样能够去除相较“两虫”尺寸更大的无脊椎动物。但这些膜过滤技术需在较高的压力下进行,大型水厂的投资和运行成本高,应用难度大。微孔滤布同样具有非常细微的结构和非常小的开孔或微孔,并且微孔滤布过滤可以利用较小的占地面积就可保证较大的处理能力。因此笔者在前期研究的基础上设计加工了一套可自压运行的微孔滤布过滤装置,以期能够实现对无脊椎动物,尤其是线虫的良好截留效果。

1 材料与方法

1.1 进水水质

试验在上海地区以青草沙水库为水源的某水厂开展,该水厂采用臭氧/生物活性炭深度处理工艺。试验所用原水为该水厂的氯接触池出水,其水质如表1所示。

表1 氯接触池出水水质

Tab.1 Effluent quality of chlorination contact tank

项 目	数 值
水温/℃	16 ~ 23
pH 值	7.32 ~ 7.98
浊度/NTU	< 0.1
COD _{Mn} /(mg · L ⁻¹)	1.0 ~ 1.4
氨氮/(mg · L ⁻¹)	0.19 ~ 0.32
余氯/(mg · L ⁻¹)	1.0 ~ 1.1

1.2 微孔滤布过滤装置及试验方法

微孔滤布过滤系统主要由进水泵、外部罐体、微

孔滤布、过滤筒、液位计、反冲洗泵和储水罐组成。试验装置见图1。其中微孔滤布固定在过滤筒上,固定好微孔滤布后的过滤筒倒扣在外部罐体内。外部罐体上设有液位计以测定装置的水头损失,液位越高则水头损失越大,罐体内压力也越大。外部罐体内的进水通过微孔滤布后经由过滤筒上的小孔进入筒内,再由出水管进入到储水罐内。储水罐内设有一根导水管,滤后水上升到一定高度后再进入储水罐内,这是为了保证微孔滤布全部浸没在水中,使滤布达到100%的利用率。研究中使用的涤纶微孔滤布的表面积为0.22 m²,孔径约为5 μm,经线和纬线直径均为34 μm,孔隙率为1%,质量为65 g/m²,厚度为80 μm。

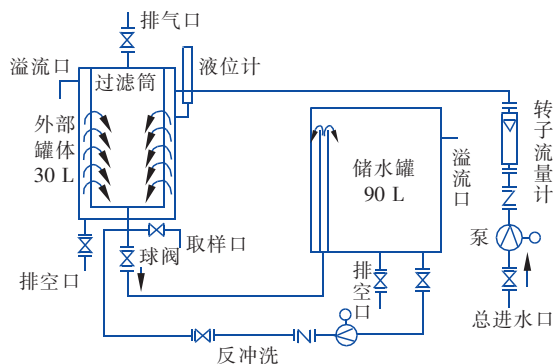


图1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of micro-pore cloth filtration system

试验过程中,氯接触池出水经由进水泵进入到外部罐体,进水流量范围为4.5 ~ 6.5 m³/(m² · h)。能通过过滤筒上微孔滤布的物质直接进入储水罐,不能通过滤布的无脊椎动物、杂质等则留在外部罐体内或者沉积在微孔滤布上。随着过滤时间的延长,液位计液面上升,在达到预先设置的最高液位或者无脊椎动物出现穿透时,停止过滤并对装置进行反冲洗。反冲洗泵直接抽取储水罐内的清水对沉积在滤布上的杂质进行冲洗。通过对微孔滤布过滤装置进出水取样并检测无脊椎动物,结合装置水头损失变化,考察该装置对氯接触池出水中无脊椎动物的截留效果。

1.3 无脊椎动物取样及检测方法

使用德国 Hydro-Bios 微米级孔径浮游生物采样网对水样中的无脊椎动物进行取样,采样网孔径为10 μm,网口直径为50 mm,网长为50 cm。取样时

将浮游生物采样网底部收集管的阀门关闭,过滤浓缩300 L水样,待采样网内水样全部进入收集管后,用超纯水将采样网冲洗几遍,随后待液面降至收集管中部左右时,转移收集管中浓缩水样至取样瓶中,用甲醛固定后带回实验室检测;如果需要对活体无脊椎动物进行计数,则不加入甲醛。

对于轮虫等形体较小且密度较大的无脊椎动物,充分混匀浓缩样品后,用1 mL移液枪吸取1 mL混匀样品,注入1 mL浮游动物计数框内,涂匀后全部计数其中的无脊椎动物数量,重复3次,取平均值。对于甲壳类、寡毛类等形体较大的无脊椎动物,将浓缩的水样分若干次用5 mL浮游动物计数框全部计数。将显微镜下计数获得的结果用公式(1)换算得到单位体积的无脊椎动物个数。

$$N_1 = \frac{V_s \times n}{V \times V_a} \times 1\,000 \quad (1)$$

式中 N_1 ——1 m³ 水中无脊椎动物个体数,个/m³
 V ——过滤水量总体积,L
 V_s ——浓缩水样体积,mL
 V_a ——显微镜镜检水样体积,mL
 n ——显微镜下镜检计数获得的无脊椎动物个数,个

2 结果与讨论

2.1 进水中的无脊椎动物数量

对进水中无脊椎动物的检测结果见表2。

表2 微孔滤布过滤系统进水中无脊椎动物的种类及丰度
 Tab.2 Invertebrate composition and abundance in the inflow of the micro-pore cloth filtration system

项目	范围/ (个·m ⁻³)	平均值/ (个·m ⁻³)	平均比例/ %	检出率/%
轮虫	338.6 ~ 2 094.7	947.3 ± 420.2	83.5	100
线虫	22.6 ~ 172.6	91.9 ± 53.5	8.1	100
甲壳类	8.7 ~ 96.2	53.1 ± 22.2	4.7	100
腹毛虫	0 ~ 82.0	32.5 ± 26.4	2.9	75
水螅	0 ~ 37.1	7.8 ± 10.4	0.69	50
水熊	0 ~ 7.7	1.5 ± 2.8	0.13	25

试验期间微孔滤布过滤系统进水中检测到的无脊椎动物主要有轮虫、线虫、甲壳类、腹毛虫、水螅等,其总密度的变化范围为439.5 ~ 2 337.5 个/m³,平均值为(1 134.1 ± 475.1) 个/m³。其中轮虫为优势种,其次是线虫、甲壳类和腹毛虫。轮虫、线虫和甲壳类的检出率为100%,腹毛虫的检出率为75%。水螅和水熊无论从其密度占无脊椎动物总密度的平

均比例来看,还是从检出率来看都较低。

图2反映了试验期间微孔滤布过滤系统进水中检测到的无脊椎动物的存活情况。可知系统进水中无脊椎动物的存活率为21.56%,说明氯消毒对无脊椎动物有一定的灭活效果。此外,存活的无脊椎动物中仅含有轮虫和线虫,且线虫占到了94.49%,说明水厂常规氯消毒对线虫的灭活效果较差。

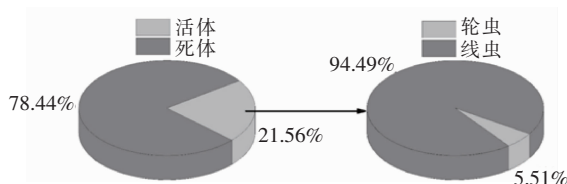


图2 微孔滤布过滤系统进水中无脊椎动物存活情况

Fig.2 Survival situation of the invertebrates in the inflow of the micro-pore cloth filtration system

2.2 水头损失与累积处理水量的关系

图3是在进水流量为4.5 m³/(m²·h)时,滤布过滤装置的水头损失(1 m水柱产生的压力约为9.8 kPa,下同)随着单位面积滤布的累积处理水量(简称为累积处理水量)的变化。随着累积处理水量的增加,滤布上累积的杂质越来越多,从而在滤布表面形成了滤饼,而滤饼有助于截留粒径更小的颗粒物和无脊椎动物,从而更加剧了滤布的堵塞,导致滤饼逐渐加厚,滤布所受压力越来越大,且增加的速度越来越快。

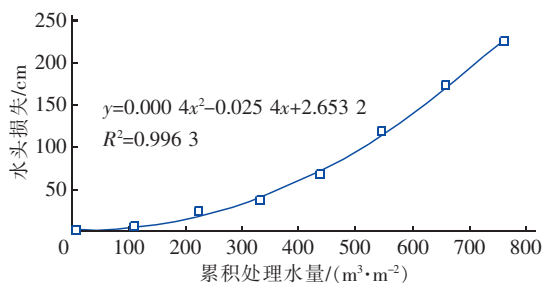


图3 水头损失随累积处理水量的变化规律

Fig.3 Variation of head loss with cumulative treatment capacity

2.3 无脊椎动物去除率与累积处理水量的关系

图4显示的是微孔滤布过滤系统对无脊椎动物的去除率与累积处理水量的关系。可见,微孔滤布对无脊椎动物的去除率随着累积处理水量以及水头损失的增加而逐渐减小。当水头损失小于100 cm时,微孔滤布过滤对无脊椎动物的去除率高达96%

以上;当水头损失超过 100 cm 后,尽管去除率有所降低,但仍旧保持在 85% 以上,并且出水无脊椎动物密度始终保持在 $100 \text{ 个}/\text{m}^3$ 以下,大大降低了无脊椎动物可能带来的生物安全风险。

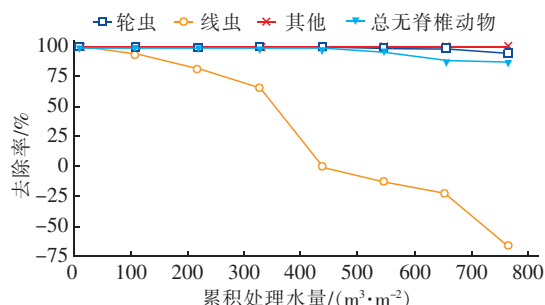


图4 滤布系统对无脊椎动物的去除率随累积处理水量的变化规律

Fig.4 Variation of invertebrate removal efficiency with cumulative treatment capacity

从微孔滤布过滤装置对主要类别无脊椎动物的过滤截留效果来看,其对轮虫有较好的去除效果。当水头损失低于 100 cm 时, $5 \mu\text{m}$ 孔径的滤布能够完全去除轮虫;当水头损失超过 100 cm 后,有少量轮虫出现在出水中,但去除率仍能达到 94% 以上。分析原因可能是,轮虫虽然在 $1 \text{ mg}/\text{L}$ 浓度的余氯条件下活性大大降低,但是当水头损失增加到一定数值时,过滤器内的压力增加,一些体积较小的轮虫(直径在 $25 \sim 40 \mu\text{m}$)可能会被挤压出滤布。

微孔滤布对线虫的去除率随着累积处理水量的变化较为明显。当水头损失低于 50 cm 时,滤布对线虫的平均去除率可达 85%;当水头损失超过 50 cm 时,该滤布对线虫的截留率显著降低,并在很短的时间内出现出水中的线虫数量高于进水,也就是发生了线虫泄漏的现象。分析认为,线虫是细长型无脊椎动物,靠纵向肌肉的伸缩来运动,具有很强的钻穿能力,并且 $1 \text{ mg}/\text{L}$ 左右的余氯对线虫几乎没有灭活效果,活体线虫容易穿透滤布而进入出水中,并且随着水头损失的增加,穿透的线虫增多。穿透过滤布的线虫大部分为活体,体宽为 $30 \sim 40 \mu\text{m}$,体长为 $200 \sim 600 \mu\text{m}$ 。

微孔滤布对其他种类无脊椎动物的去除率并没有随着累积处理水量以及水头损失的增加而降低,而是始终保持着 100% 的去除。其中甲壳类的体宽一般都大于 $100 \mu\text{m}$,体长大于 $500 \mu\text{m}$,远大于滤布孔径,并且氯接触池出水中的甲壳类均为死体,因此

很容易被滤布截留。此外,虽然一些相对较小的其他类型的无脊椎动物,如腹毛虫和水螨,也存在由于过滤器内压力的增加而被挤出滤布的可能性,但是由于在进水中这些无脊椎动物的密度相对较小、检出率较低,因此被挤出的可能性就会大大降低,从而被检测到的可能性也大大减小。

2.4 无脊椎动物去除率与进水流量的关系

上述研究表明,当过滤系统的水头损失高于 50 cm 时,线虫去除率显著降低并出现穿透现象,因此在分析不同进水流量对无脊椎动物去除效果的影响时,仅仅比较水头损失在 $30 \sim 50 \text{ cm}$ 时的去除率,结果如图 5 所示。

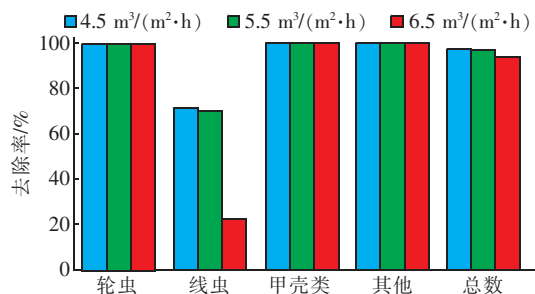


图5 不同进水流量下滤布过滤系统对不同无脊椎动物的截留率

Fig.5 Removal efficiency of different kinds of invertebrates under different inflow rates

由图 5 可以看到,在低水头损失的条件下,微孔滤布对无脊椎动物总数的去除率均能达到 89% 以上,并且随着进水流量的增加,总去除率的变化并不明显;微孔滤布对除线虫以外的其他无脊椎动物均能达到 100% 的去除;微孔滤布对线虫的截留率随进水流量的增加而降低,进水流量为 $5.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时的去除率相较 $4.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降低不明显,去除率均能达到 70% 左右,当进水流量增加至 $6.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,去除率降低明显,为 22.2%。

2.5 反冲洗对微孔滤布过滤性能的恢复效果

在不同进水流量下,当装置的水头损失超过 300 cm 时停止进水,对其进行反冲洗。反冲洗强度为 $8.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,考察不同反冲洗时间下滤布过滤系统的恢复情况(以初始水头来表征)。图 6 显示的是反冲洗时间与初始运行水头的关系。可以看出,该强度的反冲洗对滤布的恢复有一定的作用。水头损失先随着反冲洗时间的增加而迅速降低,之后趋于平稳。不同进水流量条件下的反冲洗规律相似,并且当反冲洗时间达到 2 min 时,装置的初始水

头低于 150 cm;当反冲洗时间达到 4 min 时,装置的初始水头低于 100 cm;当反冲洗时间达到 6 min 时,装置的初始水头不高于 50 cm。但随着反冲洗时间的继续增加,装置的初始水头也很难恢复至滤布刚投入使用时的值。分析原因可能是滤布上残存一些杂质,常规的水反冲洗难以将其完全去除。

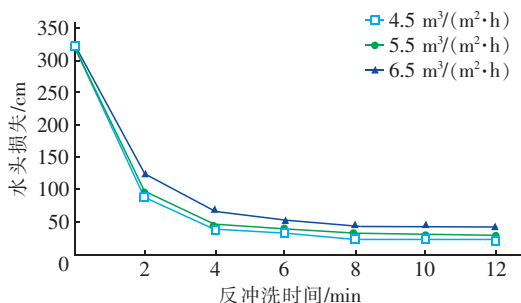


图6 反冲洗对滤布效能的恢复效果

Fig.6 Recovery of the cloth efficiency by backwashing

3 结论

① 5 μm 孔径的滤布对无脊椎动物的截留效果良好,总去除率可维持在 85% 以上,随着水头损失的增加而略有降低,且受进水流量的影响不明显。

② 5 μm 孔径的滤布对轮虫的截留效果较好,截留率均在 94% 以上,在水头损失超过 100 cm 后,会有少量轮虫被挤出滤布;其对线虫的去除率受进水流量、水头损失变化的影响较大,会随着进水流量、水头损失的增加而减小。

③ 综合考虑对不同种类无脊椎动物的截留效果,建议在采用 5 μm 孔径的微孔滤布截留无脊椎动物时,控制进水流量在 5.5 m³/(m²·h) 以内,水头损失控制在 50 cm 以内,一方面可以保证对线虫的去除率在 70% 以上,对轮虫等动物的去除率达到 100%;另一方面可以减缓滤布的污染,增加滤布使用寿命。

参考文献:

- [1] 吴志玲,陈洪斌. 供水系统中无脊椎动物的孳生及调控技术进展[J]. 中国给水排水,2016,32(22):20-24.
Wu Zhiling, Chen Hongbin. Propagation and control of invertebrates in water supply system[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 20-24 (in Chinese).
- [2] van Lieverloo J H, Bosboom D W, Bakker G L, et al. Sampling and quantifying invertebrates from drinking

water distribution mains[J]. Water Res, 2004, 38(5): 1101-1112.

- [3] Bichai F, Dullemont Y, Hijnen W, et al. Predation and transport of persistent pathogens in GAC and slow sand filters: a threat to drinking water safety? [J]. Water Res, 2014, 64: 296-308.
- [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 Res, 2010, 44(4): 1072-1081.
- [5] 朱荔云,王忠东,王华岭. 一起铁路居民饮用水中出现小虫事件的调查[A]. 铁路卫生防疫学术年会论文集[C]. 北京:中国铁道学会劳动委员会,2012.
Zhu Liyun, Wang Zhongdong, Wang Hualing. An investigation into a little bug in the drinking water of railway residents [A]. Proceedings of the Annual Conference on Railway Hygiene and Epidemic Prevention [C]. Beijing: Labor Committee of China Railway Academy, 2012 (in Chinese).
- [6] 檀风海,王桂清,刘学山,等. 我国首例无甲腔轮虫泌尿系感染[J]. 临床军医杂志,2000,28(1):78.
Tan Fenghai, Wang Guiqing, Liu Xueshan, et al. The first case of urinary infection in the absence of a cavity rotifer in China [J]. Clinical Journal Medical Officers, 2000, 28(1): 78 (in Chinese).
- [7] 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.
- [8] Schreiber H, Schoenen D, Traunspurger W. Invertebrate colonization of granular activated carbon filters [J]. Water Res, 1997, 31(4): 743-748.
- [9] 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) absorbers [J]. Water Res, 2007, 41(12): 2690-2696.
- [10] 朱洁. 微污染原水净化的微型动物的迁移泄漏及控制研究[D]. 上海:同济大学,2014.
Zhu Jie. Study on the Migration, Leakage and Control of Invertebrates in Purification Processes with Polluted Raw Water [D]. Shanghai: Tongji University, 2014 (in Chinese).
- [11] 朱洁,陈晨,陈洪斌,等. 生物活性炭滤池微型动物泄漏的强化过滤控制[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(6): 862-868.

(下转第35页)