

活性炭滤池中无脊椎动物的孳生与控制

范珊珊, 林 涛, 陈 卫, 张 健
(河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 臭氧活性炭处理工艺在国内外逐步得到推广和应用, 但应用中发现部分无脊椎动物及其幼虫能够穿透砂滤池进入炭池并大量繁殖。分析了炭滤池中无脊椎动物出现并孳生的原因, 对国内外炭滤池中出现的主要无脊椎动物种群及其变化规律进行了归纳, 提出了国内外炭池无脊椎动物研究结果存在差异的原因。通过对炭滤池反冲洗控制、水处理单元的优化和预氧化等对无脊椎动物去除效果的总结, 分析和比较了现行的控制技术及其可行性。

关键词: 饮用水处理; 活性炭滤池; 无脊椎动物; 孳生; 控制

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2010)14-0030-04

Propagation and Control of Invertebrates in Activated Carbon Filter

FAN Shan-shan, LIN Tao, CHEN Wei, ZHANG Jian

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract At home and abroad, ozone/activated carbon process has been promoted and applied gradually. However, some invertebrates and their larvae can penetrate through the sand filters into the carbon filters and be substantially reproduced. Reasons for existence and propagation of invertebrates in carbon filters are analyzed. The species of invertebrates existing in domestic and overseas carbon filters and their variation rules are detailed, and the reasons for difference between the domestic and overseas research results are proposed. The existing control technologies and their feasibility are analyzed and compared through summing the removal efficiency of invertebrates by backwashing, optimizing water treatment and preoxidation.

Key words drinking water treatment; activated carbon filter; invertebrate; propagation; control

自 1977 年西德缪海姆市多奈水厂将生物活性炭 (Biological Activated Carbon, BAC) 技术应用于水处理工艺后, 活性炭净化作为一种主要的深度处理技术已在欧洲、美国和日本等发达国家得到应用, 在我国北京、深圳和昆山等地也有广泛应用^[1]。在 BAC 技术应用过程中, 活性炭滤池的生物安全问题越来越受到关注。研究发现, 活性炭滤池的溶解氧和有机质较高, 为轮虫、线虫、枝角类、桡足类和腹毛

动物等无脊椎动物的孳生提供了丰富的饵料和良好的生存环境, 有利于其在炭池中的二次孳生, 并可能引起随炭池出水的生物泄漏问题。如 Humann 研究表明, 无脊椎动物存在于活性炭滤池中有利于生物净化作用的发挥, 但是密度过高可能堵塞滤池并发生泄漏。

活性炭处理工艺发生无脊椎动物的泄漏, 这不仅违反了生活饮用水卫生标准中对感官性状指标的

规定, 而且可能对人体健康产生威胁。无脊椎动物中的某些种类可能成为寄生虫的宿主, 同时有研究表明, 一个无脊椎动物可携带细菌总数达 $10 \sim 4\,000$ 个, 发生泄漏后其携带致病菌进入管网可能影响饮用水安全^[2]。因此, 鉴于国内部分水源富营养化及水质恶化的趋势, 常规水处理工艺的局限性使活性炭工艺的应用日趋广泛, 而其供水水质的生物安全问题应该引起充分重视。

1 常规水处理工艺中无脊椎动物问题

20 世纪初期活性炭技术还未大规模应用于水处理工艺, 而国外部分学者就发现并证明了饮用水中无脊椎动物的存在。近年来, 我国部分水厂也发现了以剑水蚤为代表的浮游动物穿透砂滤池的问题, 这说明部分具有较强游动性的浮游生物可以突破砂滤屏障而进入后续单元。自 2000 年以来, 我国部分学者对以剑水蚤为代表的桡足类浮游动物开展了相应的生物控制及去除技术研究, 并在控制水源水中剑水蚤孳生和常规工艺除蚤的生产实践中均取得了一定的效果。但随着活性炭深度处理工艺在我国水厂中的逐步推广和应用, 若常规处理工艺无法有效控制无脊椎动物的泄漏, 存活的少数成体或者虫卵进入后续深度处理单元后, 就可能造成其在炭池中的二次生长繁殖。

2 国内外对无脊椎动物研究现状

2.1 国外

随着活性炭工艺在饮用水处理中的应用, 有研究发现穿透砂滤池的无脊椎动物在炭池中出现二次繁殖的现象。研究表明, 在水处理系统中个体较大的无脊椎动物更容易进行二次繁殖; 炭池中的微生物为无脊椎动物的繁殖提供了直接或间接的饵料, 如以蓝藻、硅藻、微生物为饵料的桡足类动物, 在食物充足时其二次孳生速度较快。随着生物活性炭滤池运行时间的延长, 出水中无脊椎动物的密度呈指数增长, 其中轮虫和线虫占其总量的 90% 以上。

Schreiber 等^[3]对以莱茵河水为水源的某水厂活性炭工艺进行了为期 17 个月的调查研究, 结果表明炭池中主要无脊椎动物由轮虫、线虫、腹毛动物、枝角类和桡足类浮游动物等组成。炭池出水中无脊椎动物的密度最高可达 $6\,800$ 个 / m^3 , 其中轮虫的比例可高达 99.8%。研究发现, 炭池运行初期轮虫数量极少, 随着运行时间的延长, 在 230~250 d 后轮虫成为炭池中的优势种群, 数量骤增至 $5\,488$ 个 /

m^3 , 而线虫和腹毛动物的数量则降至最低水平。分析认为, 轮虫数量迅速增加一方面是由于水温及运行时间延长, 引起炭池中溶解氧和有机质浓度增加, 而优势种群无脊椎动物的出现与水质周期中特征有机质的种类和浓度密切相关; 另一方面轮虫和线虫具有渐进的演替顺序, 使得两种无脊椎动物的食物来源及摄食顺序存在差异。反冲洗后炭池中无脊椎动物的密度明显减小, 延长反冲洗时间则能够显著减小无脊椎动物的密度。

2.2 国内

李小伟等^[4]对南方某水厂炭池中无脊椎动物的种群进行了为期 13 个月的调查, 该水厂以水库水为水源, 水质特征为低浊、高藻和微污染。研究发现, 炭池中无脊椎动物共为 3 纲 23 种 (类), 炭池滤后水中无脊椎动物密度最高可达 825 个 / m^3 , 主要为轮虫 (58% ~ 100%), 优势种类有单趾轮虫 (36%)、鞍甲轮虫 (26%)、狭甲轮虫 (10%)、腔轮虫 (7%)、蛭态目 (5%) 等, 其他轮虫及其他类群无节幼体、线虫、枝角类、桡足类和寡毛类密度较低。乔铁军等^[5]通过中试和生产性试验对臭氧—活性炭滤池中的微生物群落进行了评价, 发现炭池滤后水中的无脊椎动物密度最高可达 $12\,484$ 个 / m^3 , 主要为轮虫 (97.72%)、无节幼虫、线虫、桡足类等。

比较发现, 国内外的炭池中无脊椎动物优势种群调查结果存在差异, 分析原因主要有以下几方面:

① 工艺中无脊椎动物的种类组成很大程度上取决于水源的生态特征。炭池中出现无脊椎动物的二次孳生, 一方面是由于随原水进入水处理工艺的少数存活个体成为其生长的种源, 另一方面炭池本身较高的有机质和溶解氧浓度为无脊椎动物提供了良好的生存条件。

② 炭池的设计参数及工艺条件 (如活性炭的材质、类型和滤速等) 对无脊椎动物的生长繁殖有一定影响。反冲洗周期越长, 炭层截留的丰富生物颗粒和非生物颗粒越有利于无脊椎动物的生长和繁殖。

③ 研究中对炭池滤后水中的微无脊椎动物的检测方法存在差异。部分研究选择 $35\ \mu\text{m}$ 的浮游生物网截留炭池滤后水中的微生物, 该孔径对体型细长线虫的截留效果较差, 因此研究结果中线虫等无脊椎动物的数量较少。

炭池中无脊椎动物浓度较高, 可能发生的泄漏

会给后续的消毒工艺带来压力。一些无脊椎动物(如水蚤类)的抗氧化性较强,常规水处理的消毒工艺难以将其有效杀灭。从感官角度看,大型无脊椎动物肉眼可见会导致消费者的投诉或降低饮用水的水质。因此,采取有效的控制技术对保障饮用水的水质安全至关重要。

3 无脊椎动物的控制方法

对于饮用水处理工艺中无脊椎动物的控制方法,目前主要采用常规水处理工艺强化和药剂预氧化杀灭技术等措施^[6]。

3.1 反冲洗对无脊椎动物的去除

反冲洗对炭池中无脊椎动物具有良好的去除效果,能够降低炭池滤后水的生物密度。李小伟等^[4]研究发现,在进水条件一定的情况下,不进行反冲洗的炭柱其出水中无脊椎动物密度增长趋势明显(最高达 $5\ 610$ 个/ m^3 ,平均为 $1\ 301$ 个/ m^3);采用周期性反冲洗的炭柱出水中无脊椎动物最高仅为 825 个/ m^3 ,平均为 119 个/ m^3 。这说明采取合适的反冲洗措施能够控制炭池中无脊椎动物的生长,从而降低出水中的生物密度。

Schreiber等在试验中也发现,反冲洗对炭池滤后水中的无脊椎动物有一定控制作用。其试验结果表明,选择合适的反冲洗强度和反洗时间能够降低炭池及其滤后水中无脊椎动物的密度。

Weeks等^[7]研究了反冲洗对炭池中幼小螺类的去除效果。结果表明,只有当颗粒炭的炭层膨胀度达到 $30\% \sim 40\%$ 时,对螺类的去除率才达到 $40\% \sim 50\%$;但炭池的膨胀度在实际运行中一般不宜超过 20% ,而此时对螺类的去除率仅为 $5\% \sim 8\%$ 。因此,对于炭池中无脊椎动物尤其是具有游动性的浮游生物,只通过反冲洗过程难以将其完全去除,需要进行其他水处理单元的运行优化控制。

3.2 水处理工艺的优化控制

针对无脊椎动物的炭池泄漏问题,一方面可以在水处理工艺前通过强化混凝等工艺措施去除和降低进水中的有机物,以控制炭池中无脊椎动物生长的饵料条件;另一方面在已有的水处理工艺的基础上,增加如膜滤等工艺单元。虽然国内外炭池都存在无脊椎动物的孳生问题,但国外较少发生水蚤等无脊椎动物进入管网或用户水中的现象。分析认为这与国外水厂净水工艺的处理单元有较大关系。与国内某水厂的典型深度处理工艺(原水 $\rightarrow$ 絮凝池 $\rightarrow$

沉淀池 $\rightarrow$ 过滤池 $\rightarrow$ 臭氧接触池 $\rightarrow$ 活性炭滤池 $\rightarrow$ 清水池 $\rightarrow$ 出水)相比,荷兰阿姆斯特丹水厂为能够很好地应对活性炭池中可能出现的生物安全性问题,在炭池后增设了石英砂慢滤池作为水质安全屏障。

3.3 药剂氧化

对于水蚤等无脊椎动物的控制,现行最常见的方法是化学氧化法,常用的几种氧化剂包括氯、二氧化氯、氯胺、臭氧、高锰酸钾等。林涛等研究表明,这些氧化剂对水蚤都有一定的去除效果^[8~13]。崔福义等研究发现,未采取氧化灭活措施的系统对水蚤的去除率较低,依靠传统的澄清工艺难以完全去除剑水蚤类浮游动物^[9]。

目前,增大预氧化剂的投量可使水蚤彻底失活,通过砂滤池的截留去除失活后的水蚤,可以有效控制出水中剑水蚤类浮游动物的数量。需要指出的是,预氧化剂投量的增加不但会提高制水成本,而且很可能引起副产物增加的风险。另外,水中残留过多的氧化剂对活性炭去除有机污染的效能也将造成负面影响。

因此,针对国内炭池滤后水中无脊椎动物的控制,在优化炭池反冲洗工艺的基础上采取高效的消毒技术更为可行。

3.4 其他处理方法

乔铁军等提出可以利用盐水和氨水浸泡炭滤池杀灭其中孳生的剑水蚤。研究表明,投加 20 g/L 的盐水或 10 g/L 的氨水可使活性炭上的生物量降低 $40\% \sim 60\%$,这种方法对水蚤等无脊椎动物的孳生有一定的控制作用。用盐水和氨水浸泡后的滤池,分别稳定运行 5 d 和 $2\sim 3\text{ d}$ 后,微生物活性基本恢复^[14]。干池的方法是指在滤池的运行时间接近反冲洗时排干池内的积水,适当自然干池几天后,再进行反冲洗。李小伟等^[15]研究表明,干池对 BAC 滤池滤后水中桡足类的去除率达到 67% ,要恢复干池前无脊椎动物的密度水平需要 44 d 。但采取上述方法需要炭池停产,另外也可能会对活性炭工艺本身的运行安全带来隐患。

在我国南方,剑水蚤等无脊椎动物的穿透现象一般发生在 $6\text{月} \sim 8\text{月}$,部分水厂可应急采用在炭池出水堰处增设一个孔径合适的丝绢做成的网板,利用丝绢滤网截留无脊椎动物,以控制出厂水中水蚤的密度。但这种方法有一定的局限性,一般只能用于应急情况。

4 结语

随着活性炭工艺在我国饮用水处理中的广泛应用, 其生物安全性也越来越引起人们的注意。由于水源及水处理工艺的差异, 国内外炭池中主要无脊椎动物种群研究存在一定差异。虽然合适的反冲洗工艺对炭池中无脊椎动物的孳生有一定控制作用, 但必须跟其他方法相配合才能有效地解决炭后水中无脊椎动物的泄漏问题。我国现在常见的控制方法以预氧化和干池等为主, 但是同时也存在一定问题。如预氧化剂的投加可能增大了消毒副产物的风险, 同时残留的氧化剂对活性炭吸附效能也可能产生负面影响。

参考文献:

- [1] 林涛, 陈卫, 王磊磊. 饮用水活性炭除微污染技术的生物安全性研究 [J]. 哈尔滨工业大学报, 2006, 38 (12): 2194- 2198
- [2] Wolmarans E, du Preez H H, de Wet E C M, *et al*. Significance of bacteria associated with invertebrates in drinking water distribution networks [J]. Water Sci significance Technol 2005, 52(8): 171- 175
- [3] Schreiber H, Schoenen D, Trauns P W. Invertebrate colonization of granular activated carbon filters [J]. Water Res, 1997, 31(4): 743- 748
- [4] 李小伟, 刘丽君, 杨宇峰, 等. 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): 64- 69
- [5] 乔铁军, 孙国芬. 臭氧 /BAC 工艺的微生物安全性研究 [J]. 中国给水排水, 2008, 24(5): 31- 39
- [6] 林涛, 崔福义, 刘冬梅. 水蚤类浮游动物孳生的生物控制试验研究 [J]. 河海大学学报, 2006, 34(5): 481

- 484

- [7] Weeks M A, Leadbeater B S C, Callow M E, *et al*. Effects of backwashing on the prosobranch snail potamopygus jenkinsi smith in granular activated carbon (GAC) adsorbers [J]. Water Res, 2007, 41(3): 2690- 2696
- [8] 崔福义, 林涛, 马放, 等. 水源中水蚤类浮游动物的孳生与生态控制研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 399- 403
- [9] 崔福义, 林涛, 刘冬梅, 等. 氧化剂对剑水蚤类浮游动物的灭活效能及影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2): 143- 146
- [10] 崔福义, 张敏, 刘冬梅, 等. 氯胺灭活水中剑水蚤类浮游动物的试验研究 [J]. 河海大学学报, 2005, 33 (5): 485- 489
- [11] Lin Tao Cui Fuyi Liu Dongmei. Biological control experiment of excess propagation of Cyclops for drinking water security [J]. J Environ Sci 2007, 19(3): 290- 294
- [12] 崔福义, 林涛, 安东, 等. 二氧化氯对剑水蚤的去除效果 [J]. 中国给水排水, 2003, 19(5): 46- 47
- [13] Lin Tao Cui Fuyi Liu Dongmei *et al*. Full-scale study of removal effect on Cyclops of zooplankton with chlorine dioxide [J]. J Environ Sci 2004, 11(5): 234- 239
- [14] 吴素花, 乔铁军, 张金松. 除蚤剂对活性炭上微生物的影响 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 22- 25
- [15] 李小伟, 刘丽君, 杨宇峰, 等. BAC 滤池水生动物的控制研究 [J]. 给水排水, 2007, 33(11): 7- 12

电话: 13951958292

E-mail: xiaofanshan@163.com

收稿日期: 2010- 01- 28

贯彻执行《中华人民共和国水法》