

范志强, 窦茵, 陈洪斌. 生物活性炭砂垫层对饮用水生物安全性控制的研究与应用[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 16-23.

FAN Z Q, DOU Y, CHEN H B. Research and application of biological activated carbon-sand bed in biosafety control for drinking water [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 16-23.



扫我试试?

生物活性炭砂垫层对饮用水生物安全性控制的研究与应用

范志强¹, 窦茵², 陈洪斌^{1,*}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海城投水务(集团)有限公司杨树浦水厂, 上海 200082)

摘要 水厂臭氧生物活性炭工艺长期运行存在生物泄漏问题, 包括颗粒物、老化生物膜和无脊椎动物等, 这会形成供水生物安全的潜在威胁。在生物活性炭滤池增加砂垫层是一种经济实用的调控生物泄漏技术措施, 但其实际应用效果和局限性尚不清晰。文中总结了近年来生物活性炭-砂垫层控制生物泄漏的效果, 从炭砂滤池调控生物安全性、工艺参数、与现有活性炭滤池工艺的适应性、经济可行性等方面探讨了炭砂滤池在缓解微生物泄漏和保证出水水质等方面的可行性, 并对炭砂滤池工艺未来的研究趋势提出了建议。

关键词 炭砂滤池 砂垫层 生物安全性 工艺参数 可行性

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)02-0016-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.02.003

Research and Application of Biological Activated Carbon-Sand Bed in Biosafety Control for Drinking Water

FAN Zhiqiang¹, DOU Ying², CHEN Hongbin^{1,*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Yangshupu Water Treatment Plant, Shanghai Chengtong Water <Group> Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract The long-term operation of biological activated carbon (BAC) filter in waterworks has the problem of biological leakage, including particulate matter, aging biofilms and invertebrates, which forms a potential threat to the biological safety of water supply. Adding sand bed to BAC filter is an economical and practical measure to control biological leakage, but its practical application effect and limitations are still unclear. This paper summarizes the effect of BAC-sand bed in controlling biological leakage in recent years, discusses the feasibility of biological activated carbon-sand dual media filter in alleviating microbial leakage and ensuring effluent quality from the aspects of biological safety control, determination of process parameters, adaptability with existing biological activated carbon filter process and economic feasibility, and puts forward some suggestions for the future research trend of biological activated carbon-sand dual media filter process.

Keywords carbon-sand filter sand bed biosafety process parameter feasibility

自来水厂常规净化工艺适用于水质较好的原水, 主要去除浑浊度、细菌和病毒, 对于溶解性有机

污染物、氨氮、臭味物质的去除效果有限。臭氧-生物活性炭工艺具有强氧化、吸附、生物降解和消毒等功能^[1-2], 能有效去除原水中的微量有机污染物、消毒副产物前驱物、微囊藻毒素等, 降低消毒剂的投加量^[3], 逐渐应用于水厂。

臭氧-生物活性炭工艺根据滤池的水流方向和炭滤池、常规砂滤池的相对位置, 可分为前置上向流、中置上向流和后置下向流。后置下向流是传统

[收稿日期] 2021-05-19

[基金项目] 国家十三五重大水专项(2017ZX07207004)

[作者简介] 范志强(1996—)男, 硕士, 研究方向为饮用水生物安全技术, E-mail: 1932771@tongji.edu.cn。

[通信作者] 陈洪斌, 教授, 研究方向为饮用水生物安全、水污染控制理论与污水生物处理技术等, E-mail: bhctxc@tongji.edu.cn。

臭氧-活性炭工艺形式,具有活性炭负荷小、滤料寿命长、运行成本低等特点;缺点是炭层利用不充分,运行过程中吸附容量逐渐降低^[4],很难兼顾有机物、微型生物和浑浊度的同步去除^[5],易出现生物泄漏的问题^[6]。

为调控后置下向流炭滤池出水的生物泄漏,国内外开展了一系列研究和应用工作,如在活性炭滤池之后增设砂滤池,或增设精密过滤、膜过滤等措施^[7]。考虑到占地和经济因素,在炭滤池的炭层底部增设砂垫层形成的炭-砂滤池作为短流程工艺被开发出来,控制出水生物泄漏。但其在实际应用中的效果,尤其是炭砂混层现象、现有炭滤池的工艺匹配性等问题受到制水企业的高度关注。为此,本文综述了炭滤池生物泄漏的现状,在对比多种控制生物泄漏方法的基础上,重点探讨了炭砂滤池控制生物泄漏在技术和经济方面的可行性。

1 生物活性炭滤池的生物泄漏

活性炭是一种良好的生物载体,有利于各类生物在活性炭表面富集和生长^[8],形成微生物-原生动物-后生动物的食物链^[9]。各类生物的大量繁殖导致了生物活性炭滤池的生物泄漏,主要指携带微生物的活性炭颗粒、老化的生物膜和无脊椎动物等从炭滤池流出进入消毒池或清水池的现象,存在的饮用水生物安全问题主要包括感官恶化、细菌及致病微生物失控繁殖、消毒副产物的致癌风险等^[10]。

1.1 微生物泄漏

一般活性炭滤池进水异养菌(HPC)总数为100 CFU/mL,而出水会增加到1 000 CFU/mL以上,尤其在水质突变、长运行周期和反冲洗效率低等情况下,出水细菌总数高达5 000 CFU/mL^[11],夏季高温甚至达到9 800 CFU/mL^[12]。生物活性炭池中活性炭颗粒上的细菌包括短波单胞菌、黄色单胞菌、鞘氨醇单胞菌、蛭弧菌、芽单胞菌和不动杆菌等^[13]。这些病原微生物可在颗粒物表面吸附生长,并在颗粒物的保护在供水管网内扩散,引发用水居民的大面积疾病感染。

1.2 无脊椎动物泄漏

饮用水处理系统中无脊椎动物的来源主要包括外源性输入和内源性生长。外源性输入主要由原水带入,且原水中无脊椎动物的种类数量繁多,即便经过混凝沉淀和砂滤工艺的优化调控,也难以避免有

部分无脊椎动物泄漏进入生物活性炭滤池。内源性生长指无脊椎动物在水处理构筑物中生长繁殖。自20世纪90年代以来,在生物活性炭滤池中发现无脊椎动物的过度繁殖、泄漏等问题成为普遍现象^[9,14]。吴志玲^[15]的调查结果发现,当水温高于15℃时,活性炭滤池出水中无脊椎动物的内源性生长占比大于83.2%;水温低于15℃时,活性炭滤池出水中无脊椎动物的内源性生长占比大于74.4%。无脊椎动物的泄漏在夏秋季节较为严重,每立方米出水中的无脊椎动物数量最高达到数千个甚至数万个。杭州南星水厂、深圳梅林水厂、笔架山水厂等在臭氧活性炭滤池的出水中均发现了轮虫、线虫、剑水蚤等无脊椎动物^[16]。2020年7月,韩国仁川、京畿道、釜山等多个地区的龙头水中出现幼虫,调查发现是摇蚊虫在活性炭池大量繁殖导致的泄漏。无脊椎动物对饮用水的生物安全风险如图1所示。

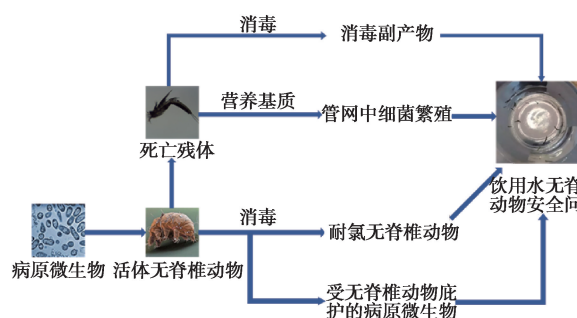


图1 无脊椎动物安全风险来源与路径

Fig. 1 Source and Path of Invertebrates Safety Risk

无脊椎动物泄漏对饮用水水质的影响首先表现为感官上的影响。一些体型较大的无脊椎动物,一旦出现在供水系统中,可能引发消费者的恐慌。其次是会带来潜在生物安全风险。无脊椎动物本身可能是致病性或病原性动物,如无甲腔轮虫感染人泌尿系统的临床病例^[17]。此外,无脊椎动物还可以捕食包括病原微生物在内的细菌,协助抵御消毒剂的杀灭,然后释放到供水管网中^[11]。Wolmarans等^[18]研究发现管网中附着在无脊椎动物上的细菌总数为10~4 000 CFU/只。同时,无脊椎动物大量存在时又可以作为潜在的碳源,从而促进细菌的生长,破坏饮用水的生物稳定性^[19],单个轮虫的代谢产物可以繁殖细菌约为68 300 CFU^[20]。无脊椎动物泄漏还存在着增加饮用水消毒副产物的风险。无脊椎动物及其代谢产物如蛋白质、脂肪等都是消毒副产物的

重要前驱物^[21], 夏季供水系统中轮虫和线虫对三氯甲烷、二氯乙酸、三氯乙酸的贡献分别为 62.72、83.42、70.74 ng/L^[20]。

2 臭氧生物活性炭-砂滤池出水的生物安全性评价

针对生物活性炭滤池出现的生物泄漏问题, 不少研究者提出了在活性炭层下方添加砂垫层形成炭-砂滤池的方法来进一步保证饮用水的生物安全。饮用水的生物安全性评价指标包括直接指标和间接指标。直接指标包括浑浊度、颗粒数、病原微生物、细菌总数、微型动物和细菌群落的变化等^[11]。间接指标以有机物浓度来预测细菌的再生长趋势, 包括可同化有机碳(AOC)、可生物降解有机碳(BDOC)、细菌再生长潜力(BRP)等。砂垫层对有机物的去除率有限, 尤其是小分子有机物, 因此, 选择直接指标评价砂垫层在保障出水安全性方面的作用比较合适。

2.1 浑浊度

浑浊度与两虫的去除率有一定的相关性, 在部分国家浑浊度已被列为微生物学指标。在饮用水的净化过程中, 浑浊度的去除主要依靠砂滤池的物理截留和黏附^[22]。因此, 在活性炭层之后增加砂垫层可以利用密实的石英砂层截留脱落的生物膜和颗粒物等, 保证对浑浊度的去除效果。杨至瑜^[3]发现在待滤水浑浊度为 1.46 NTU 的情况下, 炭砂滤池出水的浑浊度低于砂滤池和后置下向流活性炭池, 浑浊度平均值为 0.10 NTU。可见, 炭砂过滤对浑浊度的去除效果优于炭滤池未加砂的试验条件。刘阳等^[23]同样发现, 炭砂滤池对浑浊度的控制稍优于活性炭柱, 炭砂滤柱出水的浑浊度平均值为 0.12 NTU。

2.2 颗粒数

出水颗粒数与两虫、无脊椎动物等的数量有一定的相关性^[24]。颗粒物能够保护附着细菌抵抗杀菌剂的灭活作用, 对后续消毒工艺产生抗性, 造成供水管网污染^[25], 影响出厂水的生物安全性, 同时, 颗粒附着细菌数要远高于悬浮细菌^[26]。

炭滤池增加砂垫层后出水中的颗粒数随着砂垫层高度的增加逐渐减少, 炭砂滤柱出水中大于 2 μm 的颗粒数约为 100 CNT/mL, 而活性炭柱出水中大于 2 μm 的颗粒数往往超过 300 CNT/mL^[23]。在保证活性炭层颗粒物不泄漏的同时, 还需要密切关注

砂垫层中可能存在的无机颗粒物泄漏问题。目前, 国内对滤后水中颗粒数没有要求, 陈国强等^[25]建议在氯投加量为 1.5 mg/L、消毒时间为 40 min 的情况下, 需控制颗粒物数量小于 150 CNT/mL。

2.3 细菌总数

砂垫层能够在一定程度上截留活性炭层中的细菌, 臭氧-炭砂滤池出水中的细菌总数能够稳定在 500 CFU/mL 以下^[16,27], 且出水细菌数随砂垫层高度增加逐渐减少。保证炭砂滤池出水细菌总量达标的同时, 还需要关注炭砂滤池出水中的细菌能否被消毒剂有效地灭活。当加氯量为 2 mg/L 时, 臭氧-生物活性炭砂滤池出水细菌致死率为 99.5%; 当加氯量大于 3 mg/L 时, 出水细菌致死率为 100%^[5]。炭砂滤池可以保证消毒工艺灭活细菌的效果, 进一步增加出水安全性, 但是对砂垫层在该过程中的作用还需进一步研究。

2.4 无脊椎动物

水中常见的微型动物主要包括鞭毛虫、肉足虫、纤毛虫、轮虫、线虫、腹毛虫、颤蚓、水熊、水螅、摇蚊幼虫和甲壳动物等无脊椎动物。我国现行生活饮用水水质标准中明确规定, 生活饮用水中不得有肉眼可见的异物。石英砂过滤能够在一定程度上截留无脊椎动物, 且截留效率随着砂垫层高度的增加逐渐上升, 但滤料粒径和滤料均匀度对无脊椎动物的截留率因无脊椎动物种类不同而有所差异。当砂垫层高度由 0 增加到 500 mm 时, 轮虫的截留率由 29.8% 增加到 46.6%, 其他较大无脊椎动物的截留率由 41.7% 增加到 85.5%, 并且无脊椎动物的丰度随着砂垫层高度的增加而衰减^[28]。无脊椎动物在砂垫层中还存在着失活的现象^[29], 但石英砂是否具有杀灭无脊椎动物的作用还需要进一步研究。

2.5 砂垫层的生物菌群结构

炭砂滤池深度、营养物质以及溶解氧对细菌群落结构均存在影响, 砂垫层和活性炭层具有相似的主要细菌群落, α -变形菌、酸杆菌、 β -变形菌是活性炭层底部和砂垫层中部最丰富的菌群, 但砂垫层的微生物多样性有所增加^[30]。砂垫层的净水效能一直被认为是物理化学作用, 关于砂垫层中生物菌群结构和变化的研究较少, 对砂垫层附着微生物的净水作用不明晰。胡万超等^[31]认为变形菌门是实现各类物质转化的主要途径, 对水质影响较大, 同时,

研究发现 α -变形菌和 β -变形菌的富集与水质恶化有一定的相关性^[32]。

3 炭滤池生物泄漏控制方法

除了在活性炭层下方添加砂垫层,还有一些针

对生物活性炭滤池生物泄漏问题的优化措施,如干池法、食盐水浸泡法、含氯水反冲洗、上向流炭滤池+砂滤、优化反冲洗参数、膜过滤、强化消毒等^[33-37],各方法的主要特点如表 1 所示。

表 1 控制生物泄漏的主要方法
Tab. 1 Main Methods of Biological Leakage Control

| 方法 | 主要原理 | 优点 | 局限性 |
|---------|---|------------------------|---------------------------------------|
| 优化反冲洗 | 去除附着在活性炭上的部分微生物、营养基质和颗粒物等,抑制微生物的生长和繁殖 | 保证反冲洗效果,在活性炭上保留适量微生物 | 去除效果有限,尤其是夏季高温微生物大量繁殖季节 |
| 添加砂垫层 | 砂滤料对活性炭滤池出水的微生物及颗粒物进行截留 | 占地小,不增加基建费用,有较好的去除效果 | 可能出现滤料混层现象;滤料级配需由试验确定 |
| 干池法 | 滤池放空,微生物脱水死亡,并通过反冲洗去除 | 适用于应急处理 | 活性炭池需要停产 |
| 化学灭杀 | 利用化学药剂浸泡对微型生物进行灭活 | 适用于应急处理 | 影响活性炭的生物氧化功能,破坏活性炭的孔结构;操作复杂,成本高;滤池需停产 |
| 砂滤池强化过滤 | 石英砂滤料对活性炭滤池出水中的微生物及颗粒物进行截留 | 对颗粒物、无脊椎动物等有一定的截留效率 | 运行末期存在集中穿透现象;流程变长,占地面积大 |
| 膜过滤 | 物理截留 | 有效去除颗粒物、病原体等 | 建设、运行、维护的成本高,难以应用于大中型水厂 |
| 强化消毒 | 利用氯、二氧化氯、臭氧和紫外线等破坏微生物的酶系统、结构或 DNA 和 RNA 灭活微生物 | 微生物杀灭效果好,能有效抑制微生物的二次繁殖 | 产生消毒副产物,存在安全风险;颗粒物附着微生物灭杀效果较差 |

前 4 种方法是对活性炭滤池进行改造或干预来调控生物泄漏,后 3 种方法是依靠后续的处理工艺强化对炭滤池泄漏生物进行截留和杀灭。大量小试试验及小型中试试验表明,采用“增加砂垫层+优化反冲洗+强化消毒”的组合技术,是一种效果较好且成本较低的策略。

4 深度处理活性炭-砂滤池的工艺参数

常规处理炭砂滤池的改造限于砂滤池原有条件,活性炭层高度一般为 0.5~1.0 m,砂垫层高度为 0.2~0.6 m,不在本文讨论之列。表 2 总结了国内部分中试及生产应用阶段的生物活性炭-砂滤池的工艺参数,表 2 中前 5 项工艺处于中试阶段,后 5 项处于生产应用阶段。

4.1 砂垫层的石英砂粒径

细砂滤料去除浊度和截留无脊椎动物的效果均优于粗砂滤料,且均质滤料控制生物泄漏的效果较好,不过细砂滤料与活性炭联用时易出现混层现象以及水头损失增加过快的情况。王韬^[43]发现,在

进水浑浊度为 0.38 NTU 时,粒径为 0.62、0.96 mm 的砂垫层对浑浊度的去除率分别为 76%、73%。朱洁等^[44]发现,粒径为 0.3~0.5 mm 的砂垫层对较大体型的无脊椎动物的截留效率明显高于粒径为 0.6~0.9 mm 的砂垫层,可达到 55%以上,且在进水浑浊度仅为 0.1 NTU 的情况下,砂垫层连续过滤 96 h,水头损失最高仅有 0.08 m。工程设计或改造时,结合国内设计规范和实际应用情况,建议使用有效粒径(d_{10})为 0.6~0.9 mm、 $K_{80} \leq 1.4$ 的石英砂,但同时需根据实际应用中的水质,并结合经济因素等确定合适的石英砂粒径和均匀度。

4.2 砂垫层的厚度

砂垫层的厚度在一定范围内决定了炭砂滤池的净水效果。砂垫层越厚,浊度和颗粒物的去除效果越好,但是砂垫层过厚容易导致反冲洗时气水分布不均匀^[43],水头损失增加,反冲洗成本且处理效果提升不明显。段蕾^[5]发现,炭砂滤池出水浊度随厚度增加逐渐降低,但厚度为 300、400 mm 的砂垫层的炭砂滤池出水浊度均为 0.24 NTU;颗粒物

表2 国内部分深度处理炭砂滤池运行工艺参数
Tab. 2 Operation Parameters of Some Advanced Treatment of BAC-Sand Dual Media Filters at Home

| 参考 文献 | 应用 阶段 | 滤速/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$) | 滤料级配 | | | | | 反冲洗 | |
|----------|----------|---|----------------|------------------|----------------|-------------------------|----------|--|---|
| | | | 炭层 高度 /m | 活性炭 粒径 /mm | 砂层 高度 /m | 石英砂 粒径 /mm | 周期 /d | 方式、强度、时间 | |
| [23] | 中试 | 5~9 | 1.5 | 0.8~1.2 | 0.5 | 0.5~1.2 | 2~9 | 5 min 气冲 14 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);15 min 水冲 8 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) | |
| [38] | | 8 | 1.5 | 0.9~1.1 | 0.5 | 0.6~1.0 | / | 2 min 气冲 13.9 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);2 min 水冲 2.8 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);2.5 min 水冲 5.56 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) | |
| [25] | | 7 | 1.5 | / | 0.3 | / | 6 | 4 min 气冲 14 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);8 min 水冲 8 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) | |
| [5] | | 5 | 1.5 | / | 0.4 | 0.5~1.0 | 7~10 | 5 min 气冲 10 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);8~10 min 水冲 12~15 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) | |
| [39] | | 7.87 | 1.3 | 0.9 | 0.5 | 0.5($K_{80}\leq 1.4$) | | 2~3 | / |
| [40] | 水厂 | 10.5 | 2.1 | 0.9~1.1 | 0.3 | 0.6~1.2 | 6 | 2~3 min 气冲 15.3~15.8 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);5~10 min 水冲 6.9~8.1 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) | |
| [16] | | 8~10 | 2 | 1.5 | 0.4 | 0.9~1.2 | 3~6 | 4 min 气冲 8~9 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);1.5 min 小水漂洗 8 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);3.5 min 大水冲洗 12 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$)+1.8 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) 表面扫洗;3 min 小水漂洗 8 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$)+表面扫洗 | |
| [41] | | 8.8 | 2 | / | 0.5 | / | 8 | 气水联合反冲洗 | |
| [42] | | 7.82 | 1.3 | 0.9 | 0.5 | 0.5($K_{80}\leq 1.6$) | | 1~2 | 3 min 气冲 15.3 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);10 min 水冲 6.9 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) |
| [27] | | 7.7 | 1.3 | / | 0.5 | / | / | 3 min 气冲 15 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$);10 min 水冲 7 L/($\text{s}\cdot\text{m}^2$) | |

注: K_{80} 为不均匀系数

的去除率和反冲洗运行初期出水中的细菌总数与砂垫层的厚度大致呈正相关性。

在有条件的情况下,综合分析出水生物安全性直接指标与砂垫层厚度的关系,确定砂垫层的最佳厚度。不具备试验条件的情况下,建议砂垫层厚度在 0.3~0.5 m,并根据实际条件进行调整。将生物活性炭滤池改造为炭砂滤池时,在保证活性炭层厚度至少为 1.5 m 的前提下,可以直接将部分活性炭层改为砂垫层。温度较低的地区,需适当增加炭层厚度保证有机物的去除效率;温度较高的地区,适当增加砂垫层的厚度保证出水的生物安全性。

4.3 炭砂滤池的滤速

炭砂滤池的滤速设计需要根据滤料层厚度、空床接触时间和产水量等进行综合考虑。炭砂滤池炭层接触时间可取 8~15 min,当炭砂滤池以去除嗅味为主时,炭层空床接触时间一般为 8~10 min;当以去除高锰酸盐指数(COD_{Mn})为主时,炭层空床接触时间一般为 12~15 min。

滤速对炭砂滤池有很大的影响。滤速过大,容易出现污染物和颗粒物穿透现象,降低出水水质缩短过滤周期;滤速过小,污染物容易堵塞滤料,造成

上层滤料板结,还会增加滤料的体积和工程造价。段蕾^[5]研究发现,炭砂滤池的滤速由 9 m/h 降到 2 m/h 时,浑浊度的去除率先增加后降低,在 4.5 m/h 时去除率最高;出水细菌总数受滤速影响较小,稳定在 20 CFU/mL 以下。而孟冠州^[45]发现,相较于滤速为 6、10、12 m/h,当滤速为 8 m/h 时,浑浊度去除率最佳。因此,在工程实践中,需要结合进水水质及出水水质要求确定最佳的滤速。

4.4 生物活性炭-砂滤池的反冲洗

反冲洗对于生物活性炭滤池或炭砂滤池的出水细菌总数的控制尤其重要,长时间不冲洗的炭砂滤池出水容易出现细菌总数放大现象。由于砂垫层对微生物的截留量有一定的限值,当脱落生物膜在石英砂层中积累到饱和值后,会发生穿透,造成生物泄漏。生物泄漏量与砂垫层的厚度有一定相关性^[5]:砂垫层越高,运行 7 d 后炭砂滤池的出水中检测出的细菌总数越多。炭砂滤池经过反冲洗后,砂垫层重新恢复对微生物的截留作用。

一般地,浑浊度或水头损失可作为指标判断滤池是否需要反冲洗^[46],但仅仅靠这 2 个指标无法保证炭砂滤池出水生物安全,需要根据水质要求综合

分析常规指标、水头损失、浑浊度、颗粒数、无脊椎动物数量以及细菌总数等各种指标,确定炭砂滤池的适宜反冲洗周期。由于微生物的生长繁殖速率随着温度的变化而变化,活性炭滤池在不同温度条件下发生生物泄漏的周期不同,最好是通过中试或生产性试验确定不同季节条件下炭砂滤池的反冲洗周期。

反冲洗方式对非均质炭砂滤池的床层结构影响较大。滤池反冲洗主要有水反冲洗和气水联合反冲洗2种方式。气冲在反冲洗过程中起到活性炭层生物及非生物颗粒脱附的作用,而水冲主要是对脱附颗粒的漂洗作用。气水联合反冲洗滤池出水中的AOC浓度和细菌总量小于单独水反冲洗滤池,且单独水反冲洗的耗水量大,效果相对较差^[3]。“气冲+气水同时冲洗+水冲”是反冲洗效果最好的一种气水联合反冲洗方式,但是气水同时反冲洗并不适用于炭砂滤池,因为密度较小的活性炭会在气泡的裹挟下随水流向上运动,出现滤料流失现象,并且气水同时冲洗不易控制,容易对活性炭造成一定的机械磨损。而“气冲+水冲”的两段式气水联合反冲洗适用于细滤料和比重小的炭砂滤池。在炭砂滤池的反冲洗过程中,气反冲洗容易使滤池出现混层现象,炭砂界面上升;而合适的水反冲洗强度可以使炭砂界面出现完全的流化,炭砂界面重新变得清晰,并且界面高度回落。

不合理的反冲洗强度会影响滤池的处理效果、过滤周期和滤料的使用寿命。在水厂的长时间运行实践中,由于反冲洗强度不够、膨胀率低、反冲洗时间短等原因,炭砂滤池容易出现无法满足自然分层条件导致的滤料混层、孔隙率降低导致的滤程缩短、泥渣积聚导致的滤料板结等问题^[47]。而反冲洗强度过大,容易破坏承托层结构,导致滤料与承托层混合,还会出现活性炭机械磨损、滤料流失及微生物大量损失的现象。各水厂因不同的原水水质、滤速以及滤池构成等,所选用的反冲洗强度及时间也各不相同,需要根据试验确定最适的反冲洗强度和时间。建议炭砂滤池采用气水联合反冲洗时,气冲强度为 $13\sim 16\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,时间为 $2\sim 3\text{ min}$;水冲洗强度为 $6\sim 12\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,时间为 $8\sim 10\text{ min}$ 。

5 生物活性炭-砂滤池的技术经济性分析

虽然炭砂滤池出水的相关研究中出现了有机物

去除效果有所降低、大粒径颗粒物的泄漏等问题,但是通过合理设置炭砂滤池的厚度和级配,优化反冲洗的相关工艺参数,深度处理炭砂滤池的出水完全可以达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中的标准。部分中试以及生产性炭砂滤池^[5,16,38-39,42,48-49]的出水指标如下。出水总有机碳(TOC)含量为 $0.85\sim 2.2\text{ mg/L}$;COD_{Mn}含量为 $0.32\sim 1.94\text{ mg/L}$;紫外吸光值(UV₂₅₄)为 $0.008\sim 0.033\text{ cm}^{-1}$;氨氮含量为 $0.01\sim 0.2\text{ mg/L}$;亚硝酸盐含量为 $0.002\sim 0.008\text{ mg/L}$;浑浊度为 $0.092\sim 0.24\text{ NTU}$;颗粒数为 $86\sim 180\text{ CNT/mL}$;AOC含量小于 $70\text{ }\mu\text{g/L}$;BDOC含量为 $0.2\sim 0.24\text{ mg/L}$;三卤甲烷生成势(THMFP)含量为 $90\sim 100\text{ }\mu\text{g/L}$;卤乙酸生成势(HAAFP)含量为 $40\sim 60\text{ }\mu\text{g/L}$;藻类为 $59\sim 139\text{ 万个/L}$;叶绿素含量小于 $0.68\text{ }\mu\text{g/L}$;藻毒素含量小于 $0.01\text{ }\mu\text{g/L}$;铁含量小于 0.092 mg/L ;锰含量小于 0.05 mg/L 。

短流程的炭砂滤池相比于在活性炭池后增设砂滤池,节省投资、节约耗能、减少占地面积和构筑物的建造费用。炭砂滤池一体化工艺减少运行管理费用,长三角地区某30万t水厂建设炭砂滤池总投资约 $480\text{ 元}/\text{m}^3$,比新建臭氧-活性炭-砂滤工艺节省成本30%以上^[39]。

6 生物活性炭滤池增设砂垫层的运行管理问题

6.1 活性炭层与砂垫层出现混层现象

活性炭层和砂垫层在反冲洗时,膨胀率不同,导致反冲洗结束后滤料回落时,无法通过密度差异实现上层活性炭和下层石英砂的自然分层,出现下层细小石英砂嵌入上层颗粒粗大的活性炭中的混层现象。活性炭和石英砂的混层会影响炭层的微生物对有机物、氨氮等污染物的生物降解效果,减弱砂垫层的截留效率,增加出水浑浊度及生物泄漏的可能性。主要解决措施如下:(1)根据滤料级配选择合适的反冲洗滤料膨胀率和反冲洗强度;(2)气反冲洗和水反冲洗开启阀门时,应在1min中内逐渐使反冲洗强度增加到设计强度,防止混层;(3)调整反冲洗程序,在气反冲洗和水反冲洗之间增加停留时间 $60\sim 90\text{ s}$,让活性炭和石英砂自然沉降,同时缓解水夹气现象带来的影响。

6.2 滤池跑炭现象

炭砂滤池的反冲洗强度过大和气水联合反冲洗中出现的水夹气现象,都会导致活性炭滤料随反冲洗水流出滤池。主要解决措施如下:(1)通过试验确定合适的反冲洗强度;(2)按照活性炭层反冲洗膨胀率为35%进行设计或改造,增加滤池顶部与活性炭层表面的高度差;(3)根据活性炭的粒径,在滤池顶部加装孔径小于活性炭粒径的钢结构防跑炭网;(4)在气反冲洗和大水量反冲洗之间增加小水量反冲洗方式,带走气反冲洗产生的气泡,缓解水夹气现象带来的影响;(5)保证布水布气系统的水、气均匀分布在滤池上,防止出现部分区域反冲洗强度过大而出现的跑炭现象,以及部分区域反冲洗强度过小导致清洗不干净;(6)选择反冲洗和排水不同步的翻板滤池的池型。

6.3 炭砂滤池的反冲洗参数固定不变

水厂在长期运行过程中,很难根据水质变化对反冲洗参数作出相应的改变,导致滤料磨损、滤料板结及滤程缩短等问题。主要解决措施:根据水质实时监测结果,改变相应的反冲洗条件,如根据出水浑浊度、颗粒数、无脊椎动物泄漏数量,改变反冲洗周期等;根据反冲洗后的水质处理效果,改变反冲洗强度或时间等。另外,炭砂滤池应设计成有观察窗的封闭式滤池或移动式遮光罩的滤池,以防止蚊蝇进入池内繁殖以及滋生藻类,同时满足滤池的日常管理和检修需求。

7 结语

目前,关于臭氧-生物活性炭砂滤池的研究主要针对炭砂滤池改造后的运行效果、影响因素以及活性炭层中微生物,而砂垫层中微生物研究不足,且应用于自来水管厂的案例还比较少,缺少工程应用的经验。因此,臭氧-生物活性炭砂滤池还需要开展进一步研究。

(1)炭砂滤池由于是双层滤料,容易出现活性炭和石英砂的混层、跑炭现象,在工程上,需要明确炭砂滤池的设计参数和设计要点。例如,可以建立炭砂滤池的高效反冲洗数学模型,并通过试验验证其效果,进一步研究滤料级配和优化反冲洗,尤其是不同滤料级配条件下的反冲洗参数。

(2)借助分子生物学方法,研究砂垫层中微生物的群落、结构、数量变化特征,分析砂垫层防止微

生物泄漏的机理,以及出水水质与微生物优势群落之间的关系;并研究添加砂垫层是否对活性炭池出水的生物稳定性影响。

(3)采用多种水质进行炭砂滤池的运行试验,全面分析炭砂滤池针对不同水质处理时的优缺点,以应对突发性水源污染、病原菌冲击等恶劣状况。

参考文献

- [1] SHU S H, LIU S Q, ZHANG D, et al. Removal of DBPs and control of bacteria regrowth in drinking water distribution system [C]. Chengdu: The 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2010.
- [2] ZHANG Y, ZHAO X, ZHANG X, et al. A review of different drinking water treatments for natural organic matter removal[J]. Water Supply, 2015, 15(3): 442-455.
- [3] 杨至瑜. 炭砂滤池去除浊度、有机物和氨氮效果的中试研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [4] KOROTTA-GAMAGE S M, SATHASIVAN A. A review: Potential and challenges of biologically activated carbon to remove natural organic matter in drinking water purification process[J]. Chemosphere, 2017, 167: 120 - 138. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.097.
- [5] 段蕾. 臭氧-炭砂滤池对滦河水深度处理中试研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [6] 陈皓坤, 吴俊业, 沈恺乐, 等. 不同流向臭氧生物活性炭工艺对比分析[J]. 净水技术, 2020, 39(2): 57-65.
- [7] 张易峰, 陈洪斌, 李坤. 净水厂生物活性炭滤池生物泄漏的调控技术述评[J]. 水处理技术, 2021, 47(1): 1-6.
- [8] 冯硕, 张晓健, 陈超, 等. 炭砂滤池在饮用水处理中的研究现状及前景[J]. 中国给水排水, 2012, 28(4): 16-19.
- [9] SCHREIBER H, SCHOENEN D, TRAUNSPURGER W. Invertebrate colonization of granular activated carbon filters[J]. Water Research, 1997, 31(4): 743-748.
- [10] 陈晓, 汪毅, 丁志斌, 等. 饮用水生物安全现状、评价方法及对策措施[J]. 净水技术, 2019, 38(5): 65-72.
- [11] QIAO T, ZHANG X, WU G, et al. Investigation of microbial safety of a full-scale ozonation and biological activated carbon process under high humidity and temperature conditions [J]. Water Science and Technology, 2011, 64(11): 2293-2298.
- [12] 林超. HACCP 评价体系对 O₃-BAC 工艺中水生生物风险评估的应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
- [13] 张明露, 刘文君, 李翠萍, 等. 活性炭净水工艺微生物安全性研究[J]. 给水排水, 2015, 51(8): 22-26.
- [14] LIN T, CHEN W, WANG L L. Excess propagation and disinfection control of Copepod in an ozone-granular activated carbon filter in southern China [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, 2010, 59(8): 512-520.
- [15] 吴志玲. 臭氧-生物活性炭工艺水厂的无脊椎动物迁移规律

- 与控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2018.
- [16] 刘金翠. 南方湿热地区臭氧活性炭净水工艺水质安全性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [17] 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(1): 78-78.
- [18] WOLMARANS E, PREEZ H H D, WET C M E D, et al. Significance of bacteria associated with invertebrates in drinking water distribution networks[J]. Water Science and Technology, 2005, 52(8): 171-175.
- [19] 代西. SBBR-WWTP 红虫爆发机制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [20] 李进哲. 无脊椎动物对供水安全的潜在风险研究[D]. 上海: 同济大学, 2020.
- [21] BOND T, GOSLAN E H, PARSONS S A, et al. Treatment of disinfection by-product precursors [J]. Environmental Technology, 2011, 32(1): 1-25.
- [22] SHEN H, TANG X C, WU N X, et al. Leakage of soluble microbial products from biological activated carbon filtration in drinking water treatment plants and its influence on health risks [J]. Chemosphere, 2018, 202: 626-636. DOI: 10.1016/j.chemosphere. 2018. 03. 123.
- [23] 刘阳, 张燕. 活性炭柱中砂垫层在微污染水源水处理工艺中的应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3822-3826.
- [24] LECHEVALLIER M W, NORTON W D. Examining relationships between particle counts and giardia, cryptosporidium, and turbidity[J]. American Water Works Association, 1992, 84(12): 54-60.
- [25] 陈国强, 王剑, 张正德, 等. 臭氧/生物活性炭工艺的微生物泄漏控制研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(15): 36-41.
- [26] LIN T, CHEN W, WANG L L. Particle properties in granular activated carbon filter during drinking water treatment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(5): 681-688.
- [27] 邵志昌, 王长平, 黄孟斌, 等. 老旧水厂深度处理改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2018, 34(2): 81-85.
- [28] YIN W C, ZHANG J S, LIU L J, et al. Removal efficiency of invertebrates in the filtrate of biologically activated carbon filter with sand bed [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, 2012, 61(4): 228-239.
- [29] NIE X B, TANG Y Z, JIANG C B, et al. Vertical distribution pattern of naids in granular activated carbon filters and potential technology to control their penetration risk [J]. Water Supply, 2018, 18(6): 1976-1983.
- [30] FENG S, CHEN C, WANG Q F, et al. Characterization of microbial communities in a granular activated carbon - sand dual media filter for drinking water treatment [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, 10(5): 917-922.
- [31] 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 等. 饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3604-3611.
- [32] LING F Q, WHITAKER R, LECHEVALLIER M W, et al. Drinking water microbiome assembly induced by water stagnation [J]. The ISME Journal, 2018, 12(6): 1520-1531.
- [33] WANG Q, YOU W, LI X, et al. Seasonal changes in the invertebrate community of granular activated carbon filters and control technologies[J]. Water Research, 2014, 51: 216-227. DOI: 10.1016/j.watres. 2013. 10. 064.
- [34] 徐姮, 陆少鸣, 夏莉, 等. 超滤膜与后置砂滤池净水效果对比[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5485-5490.
- [35] 杨银, 丰桂珍, 徐璠璠, 等. 净水处理中膜技术应用研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(1): 25-30, 37.
- [36] WU Z, ZHU J, TANG X, et al. Synergistic effect of chlorination and sand filtration for efficient elimination of invertebrate leakage in BAC filter[J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 79: 235-242. DOI: 10.5004/dwt. 2017. 20913.
- [37] WANG D, LIU P, XING X. Pre-treatment with mild UV irradiation increases the resistance of nematode *Caenorhabditis elegans* to toxicity on locomotion behaviors from metal exposure [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2010, 29(3): 213-222.
- [38] 尹文超, 张金松, 刘丽君, 等. 砂垫层控制活性炭滤池无脊椎动物穿透研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 41-46.
- [39] 张硕, 王如华, 蔡报祥. 处理沉后水的炭砂滤池优化研究[J]. 环境科技, 2015, 28(6): 48-52.
- [40] 冯霞, 鲁彬, 黄年龙. 深圳笔架山水厂翻板活性炭滤池工艺设计探讨[J]. 给水排水, 2006, 42(10): 1-4.
- [41] 祝玲, 刘文君, 袁永钦, 等. 生物活性炭工艺颗粒物分布及微生物安全性研究. 给水排水, 2009, 45(3): 23-28.
- [42] 胡芃, 方榕华, 王鑫, 等. 炭砂滤池新旧滤料的对比分析[J]. 净水技术, 2020, 39(4): 116-120.
- [43] 王韬. 炭砂滤池用于水厂工艺升级的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [44] 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.
- [45] 孟冠州. 基于引黄水库水的炭砂滤池参数优化与过滤性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [46] 王琳, 张克峰, 王永磊, 等. 炭砂滤池直接过滤处理低温低浊水的试验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30(2): 135-140.
- [47] 王文静. 炭砂滤池应用的问题与探讨[J]. 城镇供水, 2017(3): 23-27.
- [48] 黄孟斌, 王长平, 张毅, 等. 老旧水厂炭砂滤池改造及运行效果[J]. 净水技术, 2019, 38(4): 31-34, 53.
- [49] 张奔, 张克峰, 王小伟. 3种臭氧双层滤料滤池对水中有机物及氨氮去除效果研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(10): 105-109.