

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.13.012

生物活性炭滤池中轮虫滋生周年变化特征

李彬彬¹, 徐晓平^{1,2}, 赵昌爽¹, 陈涛¹, 陶开燕¹

(1. 安徽工程大学 建筑工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 皖江流域退化生态系统的恢复
与重建省部协同创新中心, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为探究饮用水生物活性炭处理工艺中轮虫的滋生情况,对我国华东地区某水厂不同处理单元开展了为期一年的水质检测和轮虫采集、鉴定工作。结果发现,除pH外,其他水质指标全年变化明显,炭滤池出水菌落数显著高于炭滤池进水。全年水厂进水、炭滤池进水、炭滤池出水和砂滤池出水共检出轮虫分别为27、11、25和6种,平均密度分别为 4.33×10^4 、 3.18×10^3 、 3.04×10^4 和 3.13×10^3 ind./m³,轮虫丰度与温度、溶解氧和菌落数等显著相关。混凝、沉淀和臭氧氧化工艺能明显降低水厂进水中轮虫的种类和数量,炭滤池是轮虫滋生的主要场所,后置砂滤池可有效降低炭滤池中滋生的轮虫种类和数量。水厂进水的优势种为螺形龟甲轮虫和针簇多肢轮虫,炭滤池进水的优势种为盖氏晶囊轮虫,而炭滤池出水和砂滤池出水中优势种则均为月形腔轮虫,提示底栖类轮虫更容易在炭滤池中滋生,应作为重点控制的种类。

关键词: 饮用水; 生物活性炭滤池; 轮虫; 丰度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)13-0087-07

Annual Variation Characteristics of Rotifer Breeding in Biological Activated Carbon Filter

LI Bin-bin¹, XU Xiao-ping^{1,2}, ZHAO Chang-shuang¹, CHEN Tao¹, TAO Kai-yan¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang City Belt, Wuhu 241000, China)

Abstract: A one-year water quality analysis and systematic rotifer collection and identification were conducted across various treatment units of a water treatment plant located in East China, to investigate the breeding conditions of rotifers in the biological activated carbon treatment process for drinking water. Aside from pH, the annual variations in other water quality indicators were substantial. The effluent of the activated carbon filter exhibited a significantly higher number of colony count compared to the influent. Throughout the year, a total of 27, 11, 25, and 6 rotifer species were identified in the influent of the water treatment plant, the influent of the activated carbon filter, the effluent of the activated carbon filter, and the effluent of the sand filter, respectively. The average density were 4.33×10^4 ind./m³, 3.18×10^3 ind./m³, 3.04×10^4 ind./m³, and 3.13×10^3 ind./m³, respectively. The abundance of rotifers

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978001); 安徽省高等学校科学研究重大项目(2023AH040122); 安徽未来技术研究院企业合作项目(2023qyhz01)

通信作者: 徐晓平 E-mail: xuxp1979@126.com

exhibited significant correlations with water quality parameters, including temperature, dissolved oxygen, and colony count. The processes of coagulation, sedimentation, and ozone oxidation substantially decreased the species and quantity of rotifers in the influent of the water treatment plant. The activated carbon filter served as the primary breeding habitat for rotifers, while the subsequent sand filter effectively mitigated the species and quantity of rotifers originating from the activated carbon filter. The dominant species in the influent of the water treatment plant was *Keratella cochlearis* and *Polyarthra trigla*, the influent of the activated carbon filter was *Asplanchna girodi*, respectively. In contrast, the dominant species in the effluent of the activated carbon filter and the effluent of the sand filter were both *Lecane buna*. These findings indicate that benthic rotifers have a higher propensity to proliferate within the activated carbon filter, and should therefore be considered as key species requiring control.

Key words: drinking water; biological activated carbon filter; rotifer; abundance

臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)工艺可以有效去除水中的有机物,在饮用水净化领域应用广泛。同时由于活性炭具有极强的吸附性,还可以有效去除水中的异味^[1-2]。然而, O_3 -BAC工艺的应用也给饮用水系统带来了较大的生物风险^[3]。已有研究发现,在活性炭滤池运行一段时间后,滤床表面可检测到大量的线虫等无脊椎动物^[4-5]。如我国华南某水厂生物活性炭滤池在一年内共检测到了37种无脊椎动物,其出水中无脊椎动物的丰度比进水增加了27~33倍,轮虫是其中的优势种类^[6]。刘丽君等^[7]进一步研究发现,炭池中各类生物演替规律依次是枝角类、轮虫、桡足类和寡毛类。

轮虫是水生态系统中较常见和重要的浮游动物类群^[8],广泛分布于湖泊、水库、江河及近海等各类水体中。轮虫以细菌、藻类和有机物等为食,能够将自然水体中的能量和物质从初级消费者传递给次级消费者,并且由于其繁殖速度快、种群更替迅速和转化效率高,轮虫对水生态系统的物质循环贡献很大,其在淡水生态系统中扮演着重要角色^[9]。然而也有学者发现,轮虫是一些病原体的载体或宿主,一些病原体通过寄生在轮虫体内可以有效躲避消毒剂的灭活^[10],因此当大量的轮虫出现在饮用水处理系统时,必然会带来饮用水的生物安全问题。

笔者以我国华东某市采用 O_3 -BAC工艺的水厂为研究对象,通过为期一年的水质监测和轮虫种类鉴定,分析 O_3 -BAC工艺中轮虫丰度与水质指标之间的内在联系,探究生物活性炭滤池中轮虫滋生特征及其变化规律,旨在为饮用水处理系统中无脊椎动物滋生控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 水处理工艺

该水厂设计规模为 $25\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,计划服务人口约40万人,源水为长江水,主要水处理构筑物有网格絮凝池、平流沉淀池、臭氧接触池、上向流活性炭滤池、砂滤池和清水池。活性炭滤池中单个滤池的面积为 66 m^2 ,炭层厚度为 2.5 m ,采用煤质活性炭,粒径为 $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}$,均匀系数为 2.1 ,比表面积 $\geq 1\,000\text{ m}^2/\text{g}$,碘值 $\geq 950\text{ mg/g}$ 。炭滤池承托层采用三级砾石,粒径自上而下分别为 $2\sim 4$ 、 $4\sim 8$ 、 $8\sim 16\text{ mm}$,每层承托层的厚度为 0.15 m 。滤池的滤速为 12 m/h ,反冲洗强度为 $15\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,反冲洗时长为 30 min ,反冲洗周期为 $5\sim 7\text{ d}$ 。

1.2 水样采集与水质测定

2020年12月—2021年12月,分别在水厂进水、炭滤池进水、炭滤池出水、砂滤池出水位置设置水样采集点,水样用灭菌处理过的 5 L 聚乙烯瓶保存,到达实验室后立即开始测样或保存于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中,测样时间不超过 12 h 。水温、pH、溶解氧和电导率通过便携式水质分析仪进行现场测定,总磷、氨氮、高锰酸盐指数、叶绿素a和细菌数按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。

1.3 轮虫采集与鉴定

在源水进水处水龙头采用挂网过滤,每 150 L 收集一次轮虫。在炭滤池进水和出水以及砂滤池出水位置使用 5 L 有机玻璃取水器取水后过滤,每 150 L 收集一次轮虫。过滤使用的是 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的浮游生物网,过滤浓缩后储存在 200 mL 的聚乙烯瓶中,采用福尔马林溶液固定并最终使样品中福尔马林

浓度为 5%,带回实验室进行轮虫的定量与鉴定。

轮虫样本取回实验室后,避光静置 48 h,去除上清液,保留 100 mL 样本混匀,取 1 mL 置于浮游动物计数板中,在显微镜下进行轮虫种类鉴定和计数,多次计数取平均值。轮虫的鉴定主要参考《中国淡水轮虫志》《淡水微型生物图谱》《淡水浮游生物研究方法》《中国动物志》等。

1.4 数据分析

轮虫密度按式(1)计算。

$$N = V_s \cdot n \cdot 1\,000 / (V \cdot V_a)$$
 (1)

式中: N 为轮虫密度,ind./m³; V 为采样体积,L; V_s 为沉淀体积,mL; V_a 为计数体积,mL; n 为计数所得的轮虫数量。

轮虫优势种类的优势度^[11]按式(2)计算。

$$Y = (n_i / N) f_i$$
 (2)

式中: Y 为优势度; n_i 为第*i*种轮虫的数量; f_i 为第*i*种轮虫出现的频率; N 为轮虫总数量。

轮虫种类的相似性^[12]按式(3)计算。

$$I_c = c / (a + b - c)$$
 (3)

式中: I_c 为两样本相似性指数; a 、 b 分别为两样本出现的种类数; c 为两样本相同的种类数。

采用 Pearson 相关性分析轮虫丰度与水质指标之间的关系。

2 结果与分析

2.1 水质变化情况

各采样点水质参数的年变化范围和年度均值见表 1。可知,全年水温变化明显,pH 相对稳定。由于前置臭氧接触池的作用,炭滤池进水溶解氧浓度相对较高。炭滤池和砂滤池出水的电导率变化较大,高锰酸盐指数、总磷和氨氮在各采样点均变化明显。水厂进水叶绿素 a 浓度全年最高值出现在 7 月,达到了 2.2 mg/cm³;最低值出现在 1 月,为 0.61 mg/cm³。菌落数全年最低值出现在 12 月,最高值出现在 7 月;与水厂进水相比,炭滤池进水菌落数明显减少,但是经炭滤池处理后,出水菌落数却明显上升。

表 1 各采样点水质情况

Tab.1 Water quality indicators at each sampling site

项目	温度/℃	pH	溶解氧/(mg·L ⁻¹)	电导率/(μS·cm ⁻¹)	高锰酸盐指数/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	叶绿素 a/(mg·cm ⁻³)	菌落数/(ind·L ⁻¹)
水厂进水	8.1~32.2 (19.9)	6.96~8.09 (7.6)	5.69~13.35 (8.69)	313~377 (328)	1.96~6.25 (2.86)	0.04~0.11 (0.062)	0.29~1.21 (0.67)	0.61~2.2 (1.02)	28~160 (94)
炭滤池进水	8.4~34.0 (20.2)	6.58~8.03 (7.45)	6.48~15.49 (11.16)	313~388 (330)	0.73~5.17 (1.89)	0.002~0.04 (0.011)	0.04~0.61 (0.39)	0.02~0.61 (0.16)	2~58 (25)
炭滤池出水	7.6~32.9 (19.9)	6.64~7.91 (7.39)	5.32~13.55 (10.53)	265~381 (332)	0.74~4.66 (1.68)	0.004~0.03 (0.008)	0.03~0.43 (0.31)	0.04~0.13 (0.11)	25~190 (60)
砂滤池出水	11~32.5 (19.7)	6.9~7.95 (7.44)	6.18~10.31 (8.65)	168~376 (332)	0.78~3.61 (1.52)	0.002~0.03 (0.007)	0.02~0.34 (0.22)	0.04~0.1 (0.08)	1~11 (6)

2.2 不同采样点轮虫的种类

水厂进水处全年共检出轮虫 27 种,见表 2。其中,较多的有异尾轮虫(4 种)、晶囊轮虫(3 种)、臂尾轮虫(3 种)和单趾轮虫(3 种)。经过混凝、沉淀和臭氧氧化后,轮虫种类数明显减少,炭滤池进水共检出轮虫 11 种,相对较多的有晶囊轮虫(2 种)、龟甲轮虫(2 种)和腔轮虫(2 种)。值得注意的是,经炭滤池处理后轮虫种类数明显上升,炭滤池出水共检出轮虫 25 种,较多的有腔轮虫(7 种)、单趾轮虫(6 种)和异尾轮虫(4 种)。腔轮虫和单趾轮虫种类数合计占炭滤池出水检出轮虫种类数的 52%,为绝对优势种,其中,蹄形腔轮虫、囊形单趾轮虫全年都有检出。经砂滤池处理后轮虫种类数又明显下

降,砂滤池出水共检出轮虫 6 种,其中,腔轮虫 4 种、单趾轮虫 2 种。

表 2 轮虫检出情况

Tab.2 Species composition of rotifers

项目	水厂进水	炭滤池进水	炭滤池出水	砂滤池出水
盖氏晶囊轮虫	+	++	-	-
卜氏晶囊轮虫	+	+	-	-
前节晶囊轮虫	+	-	-	-
扁平泡轮虫	+	-	-	-
冷淡索轮虫	+	-	-	-
黑斑索轮虫	+	-	-	-
巨大巨头轮虫	+	-	-	-
舞跃无柄轮虫	+	-	-	-
鹅形椎轮虫	+	-	-	-
螺形龟甲轮虫	++	+	+	-

续表 2(Continued)

项 目	水厂进水	炭滤池进水	炭滤池出水	砂滤池出水
矩形龟甲轮虫	+	+	+	-
颤动疣毛轮虫	+	+	-	-
长圆疣毛轮虫	+	-	+	-
真翅多肢轮虫	-	+	-	-
针簇多肢轮虫	++	-	+	-
长三肢轮虫	+	+	+	-
角突臂尾轮虫	+	+	+	-
萼花臂尾轮虫	+	-	-	-
裂足臂尾轮虫	+	-	-	-
卵形鞍甲轮虫	-	-	+	-
吕氏猪吻轮虫	-	-	+	-
暗小异尾轮虫	+	+	+	-
圆筒异尾轮虫	-	-	+	-
长刺异尾轮虫	-	-	+	-
细异尾轮虫	+	-	+	-
纵长异尾轮虫	+	-	-	-
等刺异尾轮虫	+	-	-	-
囊形单趾轮虫	-	-	+	-
月形单趾轮虫	-	-	+	-
爪趾单趾轮虫	-	-	+	-
梨形单趾轮虫	-	-	+	-
精致单趾轮虫	+	-	+	+
钝齿单趾轮虫	+	-	+	+
四齿单趾轮虫	+	-	-	-
弯角腔轮虫	-	-	+	-
蹄形腔轮虫	-	-	+	+
月形腔轮虫	-	+	++	++
长圆腔轮虫	-	-	+	+
真腔腔轮虫	+	-	+	-
短趾腔轮虫	-	+	+	+
细爪腔轮虫	+	-	+	-
注： ++表示有检出且为优势种,+表示有检出,-表示未检出。				

2.3 轮虫相似性分析

不同采样点轮虫种类的相似度见表 3。可知,砂滤池出水与水厂进水的相似性指数最低(0.096),显著低于炭滤池出水与水厂进水的相似性(0.33)及炭滤池进水与水厂进水的相似性(0.26)。工艺单元内部数据对比显示,炭滤池(0.24)与砂滤池(0.24)的进出水相似性水平一致,而跨工艺单元中,砂滤池出水与炭滤池进水的相似性仅为 0.067,表明砂滤池对轮虫群落结构具有决定性影响。经过混凝、沉淀后,轮虫种类下降,特别是浮游滤食性轮虫种类明显减少,但在炭滤池和砂滤池中出现了很多进水中没有发现的种类,表明水厂进水中存在没有检测到的其他种类的轮虫幼体

和卵,尤其是单趾轮虫和腔轮虫这样一些底栖性种类,其成体不容易在水厂进水处采集到,但它们的幼体和卵进入水处理系统后,能够继续生长和萌发。炭滤池出水中轮虫种类数较炭滤池进水明显上升,表明炭滤池的环境更加适合单趾轮虫和腔轮虫等的生长和卵的萌发。

表 3 各采样点轮虫相似性指数
Tab.3 Species similarity index of rotifers at each sampling site

项 目	水厂进水	炭滤池进水	炭滤池出水	砂滤池出水
水厂进水	1	—	—	—
炭滤池进水	0.26	1	—	—
炭滤池出水	0.33	0.24	1	—
砂滤池出水	0.096	0.067	0.24	1

2.4 轮虫优势度分析

各采样点轮虫的优势度见表 4。砂滤池出水中轮虫种类数锐减至 6 种(较进水降低 78.8%),总密度降至 3.39×10^3 ind./m³(为进水密度的 72%),但优势度升至 0.27 的工艺峰值(较进水提升 12.5%)。炭滤池出水中轮虫种类数部分恢复(出水较进水上 升 127.3%),其优势度(0.16)仍低于进水水平(0.24)。结果表明,砂滤池驱动轮虫群落向低多样性-高优势度转型,极少数轮虫种类成为绝对主导。水厂进水的全年优势种为螺形龟甲轮虫及针簇多肢轮虫,炭滤池进水的全年优势种为盖氏晶囊轮虫,炭滤池出水和砂滤池出水全年优势种均为月形腔轮虫。螺形龟甲轮虫广泛存在于水生态系统中,对环境具有极强的耐受性。水厂进水中原生动物和有机颗粒的大量存在可能是捕食性晶囊轮虫在炭滤池前成为优势种的主要原因。经过炭滤池和砂滤池,特别是滤池高强度的反冲洗作用后,浮游种类轮虫减少,而底栖种类轮虫成为了优势种类。

表 4 各采样点轮虫的优势度
Tab.4 Dominance of rotifers at each sampling site

项 目	水厂进水	炭滤池进水	炭滤池出水	砂滤池出水
种类数/种	27	11	25	6
总密度/(ind.·m ⁻³)	4.69×10^4	3.44×10^3	3.29×10^4	3.39×10^3
优势度	0.24	0.13	0.16	0.27

2.5 轮虫密度变化情况

表 5 为各采样点轮虫密度的季节性变化。可见,轮虫密度总体上呈现春、夏季高,秋、冬季低的

特点。在各采样点中,轮虫密度最大值一般出现在7月—9月,最小值均出现在1月。从轮虫密度的全年平均值来看,水厂进水、炭滤池进水、炭滤池出水和砂滤池出水分别为 4.33×10^4 、 3.18×10^3 、 3.04×10^4 和 3.13×10^3 ind./m³。

表 5 各采样点轮虫密度的季节性变化

Tab.5 Change in rotifer density at each sampling site with season

时间	轮虫密度/(ind.·m ⁻³)				温度/℃
	水厂进水	炭滤池进水	炭滤池出水	砂滤池出水	
2020年12月	30 000.00	1 333.33	23 333.33	2 000.00	10.75
2021年1月	20 000.00	1 333.33	17 333.33	1 333.33	8.13
2021年2月	30 666.67	1 333.33	19 333.33	1 333.33	11.80
2021年3月	43 333.33	2 666.67	25 333.33	1 333.33	15.95
2021年4月	50 000.00	4 000.00	40 000.00	3 333.33	18.38
2021年5月	51 333.33	4 666.67	38 000.00	3 333.33	23.90
2021年6月	54 666.67	5 333.33	34 000.00	2 000.00	27.83
2021年7月	57 333.33	4 666.67	52 000.00	6 666.67	32.90
2021年8月	47 333.33	6 000.00	38 000.00	5 333.33	29.00
2021年9月	65 333.33	3 333.33	18 666.67	4 666.67	27.60
2021年10月	45 333.33	2 666.67	26 000.00	4 000.00	20.80
2021年11月	32 000.00	2 000.00	30 000.00	3 333.33	18.63
2021年12月	36 000.00	2 000.00	33 333.33	2 000.00	13.40

2.6 轮虫丰度与水质指标的关系

图1为轮虫丰度与水质指标相关性分析结果。

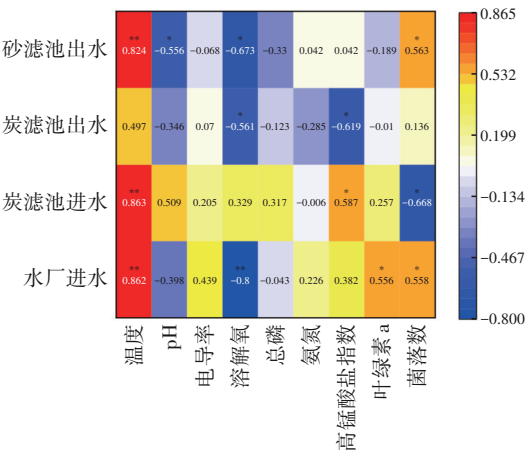


图 1 轮虫丰度与水质指标相关性分析结果

Fig.1 Correlation analysis results of water quality parameters on rotifer abundance

图1中*表示显著相关, $p<0.05$; **表示极显著相关, $p<0.01$ 。可以看出,轮虫丰度与水质指标均呈现一定的相关性,其中,水厂进水轮虫丰度与温度呈极显著正相关,与溶解氧呈极显著负相关,与叶

绿素a和菌落数呈显著正相关。炭滤池进水轮虫丰度与温度呈极显著正相关,与高锰酸盐指数呈显著正相关,与菌落数呈显著负相关。炭滤池出水轮虫丰度与溶解氧和高锰酸盐指数呈显著负相关。砂滤池出水轮虫丰度与温度呈极显著正相关,与pH和溶解氧呈显著负相关,与菌落数呈显著正相关。

3 讨论

3.1 轮虫滋生潜在风险

自O₃-BAC工艺被应用于饮用水处理领域后,不同单元特别是活性炭滤池中无脊椎动物的滋生问题逐渐受到关注^[13]。研究表明^[14],饮用水系统中生物活性炭滤池是无脊椎动物理想的栖息和繁殖场所,与其他构筑物相比,活性炭滤池中无脊椎动物的种类和数量明显较多。Zhu等人^[15]发现,中国东部4座水厂的构筑物中普遍存在无脊椎动物大量滋生问题,轮虫和线虫是主要种类,炭滤池是轮虫二次繁殖的主要场所,其数量最高达到了水厂进水的10倍以上。

学界普遍认为,饮用水系统中无脊椎动物的滋生会带来感官和潜在的生物安全风险。轮虫因为体积较小,肉眼一般不可见,不会给消费者带来不好的感官影响,不易引起人们的注意。但是,轮虫在滋生的无脊椎动物中占有绝对优势,其种类多、数量大,且进一步研究发现,一方面,轮虫主要以细菌等为食,可携“两虫”等病原微生物,帮助其躲避消毒和灭活工艺单元的伤害^[16];另一方面,轮虫死后又被分解为有机物,并可滋生更多的细菌,带来更大的安全风险。

3.2 轮虫滋生原因分析

轮虫在水厂各采样点的滋生表现出明显的种间差异。与水厂进水相比,炭滤池进水中含有19种轮虫未被检出,其中,前节晶囊轮虫等15种轮虫在炭滤池出水、砂滤池出水中都没有被再检出,表明混凝、沉淀和臭氧接触等工艺单元可以有效去除大部分的轮虫。但也有螺形龟甲轮虫等8种轮虫能继续存活进入后续处理单元。此外,月形腔轮虫等3种轮虫在水厂进水中未被检出,但在炭滤池进水中被检出。炭滤池进水中未检出的长圆疣毛轮虫等7种轮虫在炭滤池出水中又被检出。推测原因,一是水厂进水中轮虫种类丰度存在差异,数量的优势能够帮助轮虫个体抵御外在干扰;二是轮虫个体对混

凝、臭氧灭活等处理方法的耐受力存在种间差异,轮虫个体之间的差异会导致其对抗环境的抵抗能力不同;三是不同种轮虫的生活史策略(如个体和卵的大小,以及对环境因子的适应)不同,即便同是一个属,如萼花臂尾轮虫和角突臂尾轮虫在对温度的适应和卵的大小等方面即存在明显差异^[17]。另外,轮虫在外界环境恶化时会产生休眠卵^[18],启动自我保护机制,帮助其躲避不良的外部环境^[19],但休眠卵产生和萌发的时机同样因种类而不同,这可能也是为什么有些轮虫在炭滤池进水中未被检出,而在炭滤池出水中又被检出的重要原因。

如前所述,常规的混凝、沉淀工艺显著降低了轮虫种类和数量,但经过炭滤池处理后,轮虫的种类数基本恢复到水厂进水水平,表明该水厂炭滤池为轮虫提供了良好的繁殖环境。究其原因,首先,炭滤池中活性炭表面生物膜细菌含量较高,为轮虫提供了丰富的食物来源,在本研究中炭滤池出水较高的菌落数也证实了这一点;其次,活性炭滤池较高的溶解氧满足了轮虫这类好氧微生物对氧气的需求;此外,炭床的存在为轮虫提供了良好的栖息地,特别是对于腔轮虫和单趾轮虫,其利用自身的趾固定在炭床表面,相比其他种类更加容易在炭滤池中长期生存。

3.3 轮虫控制方法建议

与传统生物活性炭相比,在生物活性炭单元后设置砂滤池可以有效去除大部分滋生的无脊椎动物^[20]。在本研究中,砂滤池出水中轮虫的检出种类和数量比炭滤池出水明显减少,表明后置砂滤池对控制轮虫滋生发挥了重要作用。与刘丽君^[21]的研究结果相同,腔轮虫是砂滤池出水检出的优势种类,其为典型的底栖型轮虫,具有两只长趾,可以将自身固定在附近的环境载体上,充分利用沉降的细菌和有机物存活。可见,控制腔轮虫的繁殖可以有效解决活性炭滤池中轮虫滋生问题,应是下一步研究的重点工作。

此外,温度和食物密度是影响轮虫生长和繁殖的两大主要外界因素^[22]。在本研究中,温度、菌落数和叶绿素a等均不同程度地与轮虫丰度存在关联,表明可以通过控制该类环境因子达到遏制轮虫滋生的目的,应加强炭滤池等构筑物的水质监测和活性炭的定期检测。同时,还要进一步加强水源水体环境的有效治理和长久保护,避免水体富营养化

等,降低水厂进水轮虫的数量,从源头降低轮虫滋生的可能。

4 结论

华东地区某水厂存在轮虫滋生情况,特别是在生物活性炭滤池中,轮虫种类和数量出现了较大回升。不同采样点轮虫丰度呈现季节性变化,且不同程度地与温度、菌落数和溶解氧浓度等显著相关。混凝、沉淀和臭氧氧化可以有效降低水厂进水中轮虫的种类和数量,后置砂滤池可以有效降低炭滤池中滋生轮虫的种类和数量,且底栖型腔轮虫应是控制的重点。

参考文献:

- [1] GUO Q Y, ZHANG X H, LI X, *et al.* Variation and mitigation of musty, septic, chemical, grassy, fishy odors and corresponding odorants in a full-scale drinking water treatment plant with advanced treatments [J]. *Chemosphere*, 2020, 269:128691.
 - [2] SHAN Y W, LIU C, FENG C L, *et al.* Effects of low frequency ultrasound on ammonium nitrogen removal by biological activated carbon filter [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 38:101682.
 - [3] DONG S, LIU L J, ZHANG Y X, *et al.* Occurrence and succession of bacterial community in O₃-BAC process of drinking water treatment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (17):3112.
 - [4] KOS J, BRMEŽ M, MARKIĆ M, *et al.* The mortality of nematodes in drinking water in the presence of ozone, chlorine dioxide, and chlorine [J]. *Ozone: Science and Engineering*, 2020, 42(2):120-127.
 - [5] ZHU J, TANG X C, WU Z L, *et al.* Migration and control of invertebrates in waterworks with advanced treatment [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, 144(7):04018043.
 - [6] LI X W, YANG Y F, LIU L J, *et al.* Invertebrate community characteristics in biologically active carbon filter [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22 (5):648-655.
 - [7] 刘丽君, 张金松, 李小伟, 等. 生物活性炭吸附池无脊椎动物群落变化及对水质影响 [J]. *给水排水*, 2010, 36(4):7-11.
- LIU Lijun, ZHANG Jinsong, LI Xiaowei, *et al.* Impacts of community change of invertebrates in biological

- activated carbon (BAC) filter on water quality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(4): 7-11 (in Chinese).
- [8] 张根, 陈宝锐. 轮虫生态毒理学测试指标的敏感性研究进展[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 855-864.
ZHANG Gen, CHEN Baorui. Research progress on sensitivity of indices for ecotoxicological assays using rotifers [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 855-864 (in Chinese).
- [9] SNELL T W, PERSOONE G. A rapid, simple screening toxicity test using desiccated bdelloid rotifers: rotifer activity inhibition test (RAIT) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 28: 3810-3819.
- [10] REN X L, LI J Z, ZHOU Z T, *et al.* Impact of invertebrates on water quality safety and their sheltering effect on bacteria in water supply systems [J]. Environmental Pollution, 2023, 330: 121750.
- [11] 沈月含, 丁森, 王慧, 等. 滦河秋季大型底栖动物群落结构空间格局与关键环境影响因子识别[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2298-2307.
SHEN Yuehan, DING Sen, WANG Hui, *et al.* Spatial pattern of macroinvertebrates community structure and identification of key environmental factors in Luanhe River in autumn [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(10): 2298-2307 (in Chinese).
- [12] 王昱, 李宝龙, 冯起, 等. 黑河大型底栖动物功能摄食类群时空分布及水环境评价[J]. 环境科学研究, 2022, 35(1): 150-160.
WANG Yu, LI Baolong, FENG Qi, *et al.* Spatial-temporal distribution and water quality evaluation of macroinvertebrate functional feeding groups in Heihe River [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(1): 150-160 (in Chinese).
- [13] GUNKEL G, MICHELS U, SCHEIDELER M. Climate change: water temperature and invertebrate propagation in drinking-water distribution systems, effects, and risk assessment [J]. Water, 2022, 14(8): 1246.
- [14] WANG Q, YOU W, LI X W, *et al.* Seasonal changes in the invertebrate community of granular activated carbon filters and control technologies [J]. Water Research, 2014, 51: 216-227.
- [15] ZHU J, TANG X C, WU Z L, *et al.* Migration and control of invertebrates in waterworks with advanced treatment [J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, 144(7): 04018043.
- [16] DONG Z J, YIN W C, YANG J X, *et al.* Risk assessment and inactivation of invertebrate-internalized bacteria in pilot-scale biological activated carbon filtration [J]. Science of the Total Environment, 2019, 676: 321-332.
- [17] 温新利, 席贻龙. 镜湖常见臂尾轮虫(*Brachionus*)种群周年动态及生活史对策[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 3956-3963.
WEN Xinli, XI Yilong. Population dynamics and life history strategy of the common *Brachionus* species (rotifera) in Lake Jinghu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 3956-3963 (in Chinese).
- [18] 陈涛, 徐晓平, 李彬彬, 等. 聚苯乙烯微塑料和纳米塑料对萼花臂尾轮虫有性生殖的毒性影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(5): 1306-1314.
CHEN Tao, XU Xiaoping, LI Binbin, *et al.* Effects of polystyrene microplastics and nanoplastics on sexual reproduction of rotifer *Brachionus calyciflorus* [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(5): 1306-1314 (in Chinese).
- [19] ODRIOZOLA M P, ZAGARESE H E, DIOVISALVI N. Zooplankton hatching from dormant eggs in a large pampean shallow lake [J]. Hydrobiologia, 2020, 847: 2097-2111.
- [20] WU Z L, CHEN H B. Comparison of invertebrate removal by traditional-BAC and pre-BAC treatment processes: verification in a full-scale drinking water treatment plant [J]. Water Science and Technology, 2018, 18(3/4): 1261-1269.
- [21] 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, 2010: 20-45.
LIU Lijun. Community Succession and Control of Invertebrate in Drinking Water Treatment System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 20-45 (in Chinese).
- [22] WU B W, DAI S N, WEN X L, *et al.* Chlorophyll-nutrient relationship changes with lake type, season and small-bodied zooplankton in a set of subtropical shallow lakes [J]. Ecological Indicators, 2022, 135: 108571.

作者简介: 李彬彬(1997-), 男, 安徽肥西人, 硕士, 主要研究方向为饮用水生物安全。

E-mail: 18355309525@163.com

收稿日期: 2024-08-10

修回日期: 2024-08-23

(编辑: 任莹莹)