

生物活性炭滤池中无脊椎动物孳生问题与对策

刘丽君^{1,2} 张金松² 安娜² 乔铁军² 李小伟³ 苏洪涛⁴

(1 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2 深圳市水务(集团)有限公司, 深圳 518031;

3 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 4 长江航运规划设计院, 武汉 430030)

摘要 以南方 A、B 两座臭氧—生物活性炭深度处理水厂为研究对象, 探讨了生物活性炭滤池中无脊椎动物的来源及其生长繁殖特点。研究表明, 生物活性炭滤池在运行过程中会孳生无脊椎动物, 轮虫是无脊椎动物的绝对优势类群, 其次是甲壳类浮游动物。在取水口或泵站采用氯等化学药剂灭活原水中的甲壳类动物, 是控制生物在水处理系统繁殖和穿透的重要措施; 优化砂滤池的运行参数并加强管理, 控制生物进入生物活性炭滤池, 是解决甲壳类动物穿透的根本途径。对于生物活性炭中孳生的甲壳类浮游动物, 可采用药剂反冲洗和药剂浸泡进行去除和灭活。

关键词 给水厂 深度处理 臭氧—生物活性炭 无脊椎动物 穿透 对策

Problems and solutions of the invertebrates breeding in biological activated carbon filter

Liu Lijun^{1,2}, Zhang Jinsong², An Na², Qiao Tiejun², Li Xiaowei³, Su Hongtao⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Shenzhen Water (Group) Co., Ltd., Shenzhen 518031, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. CSC Changjiang Planning and Design Institute for Shipping, Wuhan 430030, China)

Abstract : Based on the study of two ozone—BAC advanced water treatment plants—A and B, this paper discusses the origin and breeding characteristics of invertebrates in biological activated carbon filters. The results show that: invertebrates will breed during the operation of BAC filter; rotifer is absolutely the dominant invertebrate and the crustacean zooplankton is the second. Crustacean inactivation with chemicals, such as chlorine, in the water inlet or pumping station is the important measure to control the biological breeding and penetrating in water treatment system; sand filter operation parameters optimization and management improvement to control the biological to get into BAC filter is the fundamental way to solve the crustacean penetration problem. Chemical back-washing and chemical soaking can terminate and inactivate the breeding crustacean in BAC.

Keywords : Water treatment plant; Advanced water treatment; Ozone—BAC; Invertebrate; Penetrate; Measures

我国新的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)颁布并实施以后, 由于新增加了 $\text{COD}_{\text{Mn}} < 3 \text{ mg/L}$ 的要求, 而常规水处理工艺对有机物的去除能力有限, 当水源水质劣于Ⅲ类时, 必须采用臭氧—

生物活性炭等深度处理技术, 才能满足饮用水水质标准的要求^[1]。因此, 近几年臭氧—生物活性炭深度处理工艺在我国的应用得到迅速发展, 据统计, 目前已经有二十多家给水厂采用该深度处理工艺, 总

处理能力接近 600 万 m^3/d , 还有更多的给水厂正在建设或设计过程中。

我国南方地区绝大部分给水厂以河流湖库等地表水为主要水源, 水源水中普遍存在轮虫、枝角类、桡足类等微型动物^[2~5], 这些生物在进入深度处理系统以后, 能够利用其中丰富的有机质和微生物作为食物, 从而得到迅速生长并可能产生大量繁殖, 进而穿透生物活性炭滤池进入饮用水中, 影响饮用水的供水安全。

南方某市目前有两座深度处理水厂, 总处理能力 80 万 m^3/d , 分别运行了近 2 年和 3 年多。由于水厂以水库为水源, 水库中生长着丰富的浮游动物, 这些浮游动物进入水处理系统后, 经过优胜劣汰, 仍有部分进入生物活性炭滤池中, 在适宜的条件下存在大量繁殖及穿透的风险。本文以深圳的 A、B 两座水厂为例, 对生物活性炭滤池中以甲壳类动物为主的无脊椎动物的生物学特性与控制技术进行了研究, 并提出了臭氧—生物活性炭工艺甲壳类动物的控制对策。

1 生物活性炭滤池中的无脊椎动物孳生问题

有研究表明, 随着生物活性炭滤池运行时间的增加, 其中无脊椎动物种类组成会发生明显和复杂的演替。通过对炭层微生物镜检发现, 生物活性炭在运行一个月后, 表面开始有零星的细小菌落; 两个月后, 生物膜开始逐渐生长, 并出现少量菌胶团, 在菌胶团中可发现原生动物纤毛虫; 三个月后, 活性炭表面出现大量菌胶团, 并出现丝状菌、原生动物及少量钟虫等后生动物; 五个月后活性炭表面出现了大量的钟虫、轮虫和线虫, 标志着生物相已达到完全成熟^[6]。可见经过不到半年的运行, 生物活性炭中已经形成了从细菌到原生动物再到后生动物的生态系统。

Schreiber^[7]调查了德国 3 座深度处理水厂中无脊椎动物的孳生情况, 其炭池的运行时间为 120 ~ 339 d。生物活性炭滤池进水的无脊椎动物密度在 1 ~ 16 个/ m^3 , 随着运行时间的增加, 生物活性炭滤池出水无脊椎动物密度逐渐增加, 并呈指数上升的趋势, 其中一个炭池在运行 228 d 后达到 6 800 个/ m^3 。无脊椎动物的类群以轮虫为主, 运行半年以上的炭池, 轮虫所占的比例占 94% ~ 99.9%。根据其

丰度, 其次为线虫、桡足类、枝角类、寡毛类以及缓步动物等。

南方某市 A、B 两个水厂以同一水库水为水源, 水处理工艺均为预臭氧—混凝—沉淀—砂滤—主臭氧—生物活性炭—消毒。其中 A 厂主要采用柱状活性炭, B 厂主要采用破碎活性炭。为了分析炭池中无脊椎动物的孳生情况, 进行了模拟炭柱中无脊椎动物的孳生情况研究。以 B 水厂主臭氧出水为模拟炭柱的进水, 并参考水厂的运行参数对炭柱进行气水反冲洗, 炭柱的滤料分别为柱状炭和破碎炭, 模拟炭柱开始运行的时间是 2007 年 1 月 15 日。对模拟炭柱运行过程中进水和出水的无脊椎动物进行了跟踪监测, 进水的无脊椎动物总密度全年维持在 1.7 ~ 98.3 个/ m^3 , 冬季略低, 夏季略高, 但总体变化不大。在炭池出水中鉴定出的无脊椎动物包括轮虫、桡足类、枝角类、寡毛类、线虫以及无节幼体等, 不同无脊椎动物类群所占比例见表 1。

表 1 模拟炭柱出水不同无脊椎动物比例

生物类群	柱状炭	破碎炭
轮虫/ %	65.1	57.62
无节幼体/ %	22.34	32.64
桡足类/ %	7.64	4.58
线虫/ %	1.14	4.33
枝角类/ %	0.78	0.42
寡毛类/ %	2.56	0

模拟炭柱出水中无脊椎动物总密度随炭柱运行时间的变化趋势如图 1 所示。

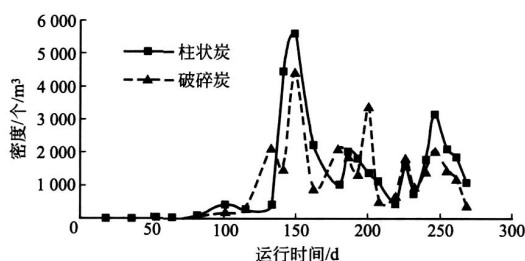


图 1 模拟炭柱出水无脊椎动物密度变化趋势

由图 1 可以看出, 随着炭池运行时间的增加, 炭柱出水的无脊椎动物密度逐渐增加, 无论柱状炭还是破碎炭, 在 150 d 左右达到密度的峰值, 随后逐渐降低, 再出现第二、第三个小峰值。达到最高峰值密度

时,破碎炭出水的无脊椎动物密度为 4 463 个/ m^3 ,柱状炭出水的密度为 5 610 个/ m^3 ,分别比进水提高了 65 倍和 82 倍。说明炭柱中发生了显著的无脊椎动物孳生和繁殖现象。

同时,由表 1 可以看出,除轮虫外,包括枝角类、桡足类和无节幼体的甲壳类动物占活性炭出水中无脊椎动物的第二位。由于轮虫的个体小,长度一般为 4 ~ 500 μm ,肉眼不容易发现,而甲壳类动物的体长一般为 0.2 ~ 3 mm,容易被肉眼发现,且其中部分桡足类动物是某些寄生虫的中间宿主^[8],同时甲壳类动物在适宜的条件下繁殖速度快,因此,也是本课题重点研究的无脊椎动物。

2 生物活性炭滤池中甲壳类动物的来源分析

如前所述,生物活性炭滤池在运行过程中,会形成细菌—原生动—后生动物的生物链。在以地表水为水源的水厂,由于原水中带进了大量无脊椎动物,这些无脊椎动物在水处理系统中的归宿根据其生态习性的不同而不同,大部分被灭活和去除,少部分能够适应环境,生存下来,并生长繁殖。因此,生物活性炭滤池中无脊椎动物的来源有以下三个方面:

(1) 直接生物穿透。由于原水中无脊椎动物密度太高,超过水处理系统的处理能力,或者由于水处理设施运行效果不佳,导致原水中的无脊椎动物穿透各级构筑物最终进入饮用水中。

(2) 生物繁殖。以原水中适宜在某些水处理构筑物中生长的无脊椎动物为种源,在水处理系统中大量繁殖,从而穿透水处理系统,进入饮用水中。

(3) 生物孳生。如前所述,即使没有外界生物的引入,生物活性炭滤池在运行过程中,也会逐渐形成细菌—原生动物—大型无脊椎动物的生物链。

为了弄清生物活性炭滤池中无脊椎动物的主要来源,以便采取有效的控制措施,对 A、B 两个水厂甲壳类动物在水处理构筑物中的群落变化进行了详细分析(见表 2)。

如表 2 所示,A、B 两座水厂原水中甲壳类动物的群落结构相同,经过砂滤后和炭滤后生物的种类数减少,且砂滤后和炭滤后出水中的甲壳类动物种

表 2 A、B 水厂原水与工艺段出水
甲壳类动物的群落结构比较

生物种类	原水		砂滤后		炭滤后	
	A 厂	B 厂	A 厂	B 厂	A 厂	B 厂
象鼻	+	+	+	+	-	-
哲水蚤	+	+	-	-	-	-
无节幼体	+	+	+	+	+	+
裸腹	+	+	+	-	-	+
剑水蚤	+	+	-	-	+	-
秀体汉	+	+	-	-	-	-
猛水蚤	+	+	+	-	+	+
尖额	+	+	+	+	+	+

表 3 A、B 水厂原水与工艺段出水甲
壳类动物优势度指数对比

生物种类	原水		砂滤后		炭滤后	
	A 厂	B 厂	A 厂	B 厂	A 厂	B 厂
象鼻	0.864	0.712	0.037	0.042	0	0
哲水蚤	0.074	0.097	0	0	0	0
无节幼体	0.034	0.102	0.537	0.570	0.649	0.750
裸腹	0.010	0.074	0.018	0	0	0.039
剑水蚤	0.009	0.004	0	0	0.014	0
秀体汉	< 0.001	0.003	0	0	0	0
猛水蚤	< 0.001	0.002	0.375	0	0.324	0.054
尖额	< 0.001	< 0.001	0.032	0.387	0.013	0.156

注:优势度指数 D 为某种生物的平均密度 N 与生物总平均密度 N_0 的比值,即 $D = N / N_0$ 。

类,都是原水中存在的,没有新的甲壳类生物孳生。表 3 表示了在 A、B 两厂原水中的甲壳类动物优势种群结构与砂滤后和活性炭出水的对比情况。

由表 3 可以看出,枝角类象鼻是 A、B 两厂原水中甲壳类动物的绝对优势种类,其他生物的优势度指数都很低;经过常规处理工艺后,第一优势生物种类均为无节幼体,但第二优势生物发生了变化,A 水厂为猛水蚤,B 水厂为尖额;炭滤后的优势生物情况与砂滤后相似。说明原水中的绝对优势种象鼻

由于不能适应水处理构筑物的环境,绝大部分在常规工艺阶段就被去除,到了炭滤后被完全去除。

A、B 水厂炭滤后出水中甲壳类动物的平均密度分别为 105 个/ m^3 和 5 个/ m^3 。根据优势种类的

分析可以发现,由于 A 水厂常规工艺的环境适合桡足类猛水蚤生长,因而在其中大量繁殖并穿透砂滤池,进入炭滤池后,虽然猛水蚤成体的优势度指数没有提高,但其密度显著增加,说明在其中得到进一步繁殖。B 水厂的环境比较适宜于枝角类尖额 生长繁殖,但由于 B 水厂炭滤后出水的甲壳类动物的总体水平非常低,且与砂滤后水基本持平,说明尖额没有发生大量繁殖的现象,B 水厂的无节幼体则主要是由于其个体小所致的直接穿透。

上述分析说明,在 A、B 两个水厂,A 水厂炭池中的甲壳类动物主要来源于以原水中某些生物为种源的生物繁殖,而 B 水厂炭池中的甲壳类动物主要来自原水中生物的直接穿透。而造成这种差异的原因是常规工艺阶段对甲壳类生物不同的处理能力。

3 生物活性炭滤池甲壳类动物孳生与穿透的对策

对于生物活性炭滤池中存在的甲壳类动物孳生与穿透问题,首先应通过对整个水处理流程中生物的监测和鉴定,明确生物活性炭滤池中甲壳类动物的来源,是来源于直接穿透、繁殖还是孳生,然后确定整个水处理系统中引起生物孳生和穿透的关键构筑物,针对关键问题和构筑物采取相应的预防与控制措施。

3.1 预氧化

由于甲壳类动物在水中处于浮游状态,活体的生物不能够通过混凝沉淀去除,而死体的甲壳类动物更容易被矾花附着,提高沉降的速度。图 2 表示了采用烧杯试验测定的甲壳类死体和活体在混凝沉淀过程中的去除效率。由图 2 可知,枝角类和甲壳类的死体 90 %以上都能被矾花附着,而活体的附着率大幅下降,尤其是桡足类,其活体附着矾花的比例在 5 %以下,枝角类由于其多枝角的结构特征,其活体附着矾花的比例明显比桡足类高。死体被矾花附着后,在

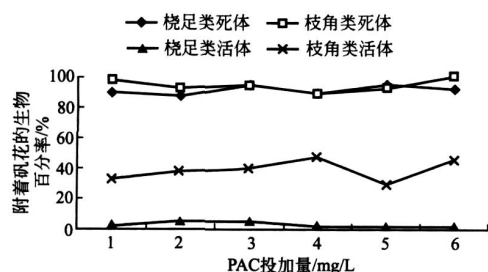


图2 甲壳类动物死体和活体在沉淀过程中矾花附着情况

沉淀过程中一般随矾花沉降,而活体几乎处于浮游状态,附着矾花的活体枝角类运动速度受到一定影响,处于烧杯的中下部,但不会完全沉淀到底部。

因此,在原水进入水厂之前,通过化学药剂进行灭活,是提高常规处理阶段甲壳类动物去除效率的重要措施。

甲壳类的灭活药剂一般采用水处理氧化剂。氯、二氧化氯、次氯酸钠均可以采用,臭氧由于其高氧化性和高分解性,作为预氧化灭活药剂效果不理想。B 水厂常用水处理药剂对甲壳类的灭活效果对比如表 4 所示。

表 4 剑水蚤死亡率 80 %时的药剂浓度及接触时间

项目	氯	二氧化氯	氯胺	臭氧	氨水
浓度/ mg/L	3.0	1.2	3.0	3.0	10
灭活时间/ min	70	45	80	30	30
CT 值	210	54	240	90	300

预氧化药剂的投加点离水厂越远越好,以取水口为最佳,以保证药剂与水有尽可能长的接触时间。药剂的投加浓度应根据 CT 值和投加点至水厂的停留时间确定。

3.2 优化砂滤池运行管理

砂滤池是控制甲壳类动物在生物活性炭滤池中生长繁殖的关键构筑物。如果砂滤池的运行效果差,不仅会导致甲壳类浮游动物直接穿透,进入生物活性炭池,而且生物会在其中大量繁殖。

预防生物直接穿透的主要措施,一是选择适宜级配和均匀度的滤砂;二是优化反冲洗条件。

按照水厂的实际工艺,采用 3 种不同的滤层结构对甲壳类动物进行截留效果试验。1[#] 滤柱为双层滤料,下层为石英砂,粒径 0.4 ~ 0.8 mm,厚 40 cm,上层为无烟煤,粒径为 1.0 ~ 1.6 mm,厚为 55 cm; 2[#] 为石英砂滤料,粒径为 0.6 ~ 1.0 mm,厚 1.5 m; 3[#] 为石英砂滤料,粒径为 0.8 ~ 1.2 mm,厚 1.5 m。试验结果如表 5 所示。

表 5 不同粒径滤砂对甲壳类成体的截留效果

柱编号	样本数 n	进水平均生物密度/ 个/ m ³	出水平均生物密度/ 个/ m ³	去除率/ %
1 [#]	7	390	4.4	98.89
2 [#]	7	380	4.4	98.84
3 [#]	7	380	4.3	98.87

表 5 中的数据是用通过 150 目滤网富集原水中的甲壳类成体进行试验的结果。由表 5 可以看出,三种滤料对甲壳类动物的成体均有很好的去除效果,且去除效果接近。但对于甲壳类的幼体和卵,不同粒径滤砂的截留效果有显著差异。通过颗粒数试验评价滤料对小个体的卵和幼体的去除效果,颗粒数粒径范围为 2 ~ 200 μm 。结果如表 6 所示。

表 6 不同粒径和均匀度滤砂对颗粒物的去除效果

柱编号	d_{10} / mm	K_{80}	样本数 n	运行周期/h	进水颗粒数/个/mL	出水颗粒数/个/mL	去除率 / %
1 #	0.59	1.32	16	48	18 981	148	99.22
2 #	0.87	1.42	16	48	18 981	515	97.29
3 #	0.82	1.48	16	48	18 981	931	95.10

由表 6 可以看出,不同粒径和均匀度的滤砂对颗粒物的去除效果有明显差异,滤砂越细,截留效果越好,粒径接近的情况下,均匀度越好,去除效果越好。因此,为了有效去除水中甲壳类动物的幼体和卵,降低其进入炭池后发生生长繁殖的概率,在不影响正常运行的情况下,应尽可能选用小粒径和均匀度较好的石英砂。

砂滤池反冲洗是控制甲壳类生物穿透的重要工艺过程,在生物爆发的高峰期,应根据情况,适当提高反冲洗强度,延长反冲洗时间。研究表明,为了避免砂滤池出现反冲洗的死区,反冲洗的气水分布应均匀,再者要提高反冲洗流速,以保证滤床在反冲洗过程中处于完全流化状态^[9]。

3.3 炭池中甲壳类动物的去除方法

如果炭滤后水发生了甲壳类动物严重的穿透现象,一般是由于炭池中发生大量繁殖的结果。由于炭池对一般化学药剂具有强烈的吸附作用,对氯等氧化剂有还原作用,因此灭活和去除的方法受到限制。

在炭池中甲壳类生物孳生非常严重的情况下,可采用高浓度食盐水浸泡(20 g/L)灭活,然后通过反冲洗去除。如果不太严重,可以通过化学药剂反冲洗的方式去除其中的活体甲壳类动物。值得注意的是,尽量避免在炭滤前加高浓度的含氯药剂,一方面会将生物驱赶到清水池中,另一方面,会对生物活性炭的性能产生不良影响。

4 结论

综上所述,生物活性炭滤池孳生无脊椎动物,可能成为我国南方地区在应用臭氧—生物活性炭深度处理工艺时面临的新问题。

生物活性炭滤池中无脊椎动物大部分来源于原水中的生物穿透常规工艺构筑物,以及穿透后在活性炭池进行大量繁殖。因此,常规工艺是控制生物活性炭滤池中无脊椎动物孳生的关键。

为了预防生物活性炭滤池甲壳类动物繁殖和穿透,建议采用预氧化措施,在进水进厂前灭活生物体的成体和幼体,然后通过混凝沉淀和过滤的方法去除。

为了降低砂滤过程中甲壳类动物的穿透,一方面要选择适宜的滤料,另一方面要加强运行管理,尤其是反冲洗过程的管理。

如果生物活性炭滤层中出现了甲壳类生物大量繁殖的现象,可通过浸泡和反冲洗的方式进行去除和控制。

参考文献

- 王占生,刘文君. 我国给水深度处理应用发展近况与存在的问题. 全国给水深度处理研究会 2008 年年会论文集,2008. 1 ~ 9
- 邢宏,陈艳萍,张清,等. 水处理工艺中浮游甲壳动物的控制. 中国给水排水,2005,21(3): 77 ~ 79
- 李仁全. 赤城湖水库微型浮游动物组成的初步研究. 四川职业技术学院学报,2007,17(1): 113 ~ 114
- 黄韶华,宫一震. 黄河三角洲平原型水库浮游动物的初步调查. 河北渔业,2008,169(1): 45 ~ 46
- 孙志民,迟守平,李克非. 水源剑水蚤大量繁殖的应急处理措施. 供水技术,2007,1(5): 60 ~ 62
- 刘宏远,张燕. 饮用水强化处理技术及工程实例. 北京:化学工业出版社,2005
- Schreiber H, Schoenen D, Traunsperger W. Invertebrate colonization of granular activated carbon filters. Wat Res,1996, 31(4): 743 ~ 748
- 世界卫生组织编著. 饮用水水质准则. 深圳市水务(集团)有限公司译. 北京:人民卫生出版社,2003
- Adam K, Heath R G M, Steynberg M C. Invertebrates as biomonitors of sand-filter efficiency. Water S A,1998,24(1): 43 ~ 48

○电话:13802553105

E-mail: szliulijun @126. com

收稿日期:2008-12-22