

方芳. 反冲洗对4种换炭模式下生物活性炭层生物量和水质指标的影响[J]. 净水技术, 2024, 43(2):190–197.

FANG F. Influence of backwashing on biomass in BAC layer and water quality parameters under 4 modes of used carbon substitution[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2):190–197.

反冲洗对4种换炭模式下生物活性炭层生物量和水质指标的影响

方 芳*

(上海市供水调度监测中心, 上海 200080)

摘 要 以水厂砂滤池出水作为生物活性炭柱的反冲洗水, 研究了4种换炭模式下反冲洗前后炭层中生物量和出水水质指标的变化情况。结果表明, 旧炭(已经运行使用3年的颗粒炭)的装填比例对炭层中生物量和出水水质指标均有不同程度的影响。通常情况下, 全新炭柱上的生物量略高于旧炭, 但反冲洗后旧炭比例高的炭柱生物量损失率更低。气水先后反冲洗后总生物量的损失率比单独水冲后总生物量的损失大, 但附着生物量的损失基本不变, 说明生物活性炭池可尝试使用单独水反冲洗。除高锰酸盐指数(COD_{Mn})变化不明显外, 紫外吸光度(UV_{254})、可溶性有机碳(DOC)、生物可降解溶解性有机碳(BDOC)、生物不可降解溶解性有机碳(NBDOC)和三卤甲烷生成潜能(THMFP)的去除率在反冲洗后均有不同程度的上升。因此, 反冲洗有利有弊, 它既能冲刷掉部分附着在活性炭上的生物膜, 对生物的冲刷力较强, 同时又能恢复活性炭的吸附能力, 使有机物的去除效果增强。反冲洗对填装精制新炭的4#炭柱炭层的吸附容量的恢复力最强, 但其生物量的损失率却最大, 说明相对于填装粗制新炭的3#炭柱, 4#炭柱上的生物系统抵抗水力冲刷能力相对较弱, 因此, 精制或粗制炭的选择应根据活性炭池是主要发挥其吸附能力还是生物降解能力的需要进行。

关键词 生物活性炭池 反冲洗 生物量 出水水质 三卤甲烷生成潜能(THMFP) 换炭

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)02-0190-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.024

Influence of Backwashing on Biomass in BAC Layer and Water Quality Parameters under 4 Modes of Used Carbon Substitution

FANG Fang*

(Shanghai Municipal Water Supply Control & Monitoring Center, Shanghai 200080, China)

Abstract Taking the outflow of sand filter of the water treatment plant (WTP) as the backwashing water of the biological activated carbon column, the effects of backwashing on biomass in carbon layer and outflow parameters under four modes of carbon substitution were studied. The results showed that the loading ratio of worn carbon had an influence on biomass and outflow indices to different extents. Generally, the biomass on the new carbon was slightly higher than that of worn carbon (granular charcoal that had been in use for three years), while the biomass loss rate of carbon column with high proportion of worn carbon after backwashing was lower. The loss rate of total biomass after air-water backwashing was greater than that after water backwash alone, but the loss of attached biomass was basically unchanged, indicated that the use of water backwashing alone could be attempted in the biological activated carbon pool. While the change of COD_{Mn} in the outflow was not obvious, the removal rates of UV_{254} , DOC, BDOC, NBDOC and THMFP all increased to different extents after backwashing. Therefore, backwashing had both advantages and disadvantages. It could not only flush out some biofilms attached to the activated carbon, but also had a strong scouring force on microorganism. At the same time, it could restore the adsorption capacity of activated carbon and enhanced the removal effect of organic matter. Backwashing had the strongest recovery ability on the adsorption capacity of the carbon layer of the 4# carbon column filled with refined new carbon, but its biomass loss rate was the highest, indicated that compared to the 3# carbon column filled with crude new carbon, the biological system on the 4

[收稿日期] 2023-10-08

[通信作者] 方芳(1972—), 女, 高级工程师, 主要从事供水生产运行管理及相关信息化研究工作, E-mail: 65852177@qq.com。

carbon column had relatively weak resistance to hydraulic erosion. Therefore, the selection of refined or crude activated carbon should be based on whether the activated carbon tank mainly utilizes its adsorption capacity or biodegradation ability.

Keywords BAC tank backwashing biomass outflow quality THMFP used carbon substitution

近年来,随着生活饮用水水质指标的不断提升,越来越多的水厂采用臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)深度处理工艺以应对日益受到微污染的原水水质^[1]。BAC池主要是利用微生物的生物降解作用和颗粒活性炭的吸附来去除水中的微量有机物。为了充分发挥炭池的微生物作用,炭层中需要有足够的生物量。活性炭需要得以再生,且截留杂质不宜过多。因此,反冲洗是维护活性炭池正常运行的关键因素,与常规处理工艺中砂滤池反冲洗的目的不同,BAC反冲洗的目的是通过水流剪切摩擦、活性炭颗粒间碰撞摩擦等过程的多重作用下,使老化的生物膜及杂质在强烈的剪切、碰撞作用下得以脱落,促进生物膜的更新,同时,需要保持必要的生物量,以满足下一个周期的正常运行^[2]。

随着近年 O_3 -BAC工艺在水厂中的持续运行,大部分采用 O_3 -BAC工艺的水厂均面临着大规模炭池换炭问题。在活性炭换炭方式的选取上,研究^[3]表明,相比于部分换炭,全换炭方式对水质处理效果更佳,但全换炭用炭量大,总体投入大,短期投资效益低。我国南方某水厂提出,在原水水质相对较好的情况下,通过装填2/3旧炭、1/3新炭的方式就能够使出水水质显著提高^[4]。上海某

水厂提出更换2/3的旧炭更为合适^[5]。由此可见,不同的换炭方式对 O_3 -BAC工艺稳定运行具有重要意义。

因此,本文主要考察4种换炭模式下,即1/3新炭和2/3旧炭(已经在生产中运行使用3年的颗粒炭)、2/3新炭和1/3旧炭、全部粗制新炭以及全部精制新炭,反冲洗对生物量以及水质指标的影响,研究成果可为保障饮用水深度处理工艺的安全高效运行提供理论与技术指导。

1 试验部分

1.1 试验设备及其工艺流程

试验采用的模型BAC柱高为3.5 m,溢流口和进水口均位于3 m的高度,活性炭层高为1.8 m,炭柱直径为100 mm,炭柱下层铺设20 cm厚的绿豆砂承托层,起到承托和反冲洗时均匀布水的作用,与生产的活性炭池相当。活性炭柱的流量控制在60 L/h,流速为7.7 m/h,空床接触时间为14 min。反冲洗水箱尺寸:长为50 cm,宽为30 cm,高为40 cm,容积为60 L。反冲洗水泵和提升水泵均采用高压自吸管道泵,型号为SCP-180A,扬程为25 m,流量为16 m³/h,吸程为6 m,转速为2 850 r/min。试验采用的工艺流程如图1所示。

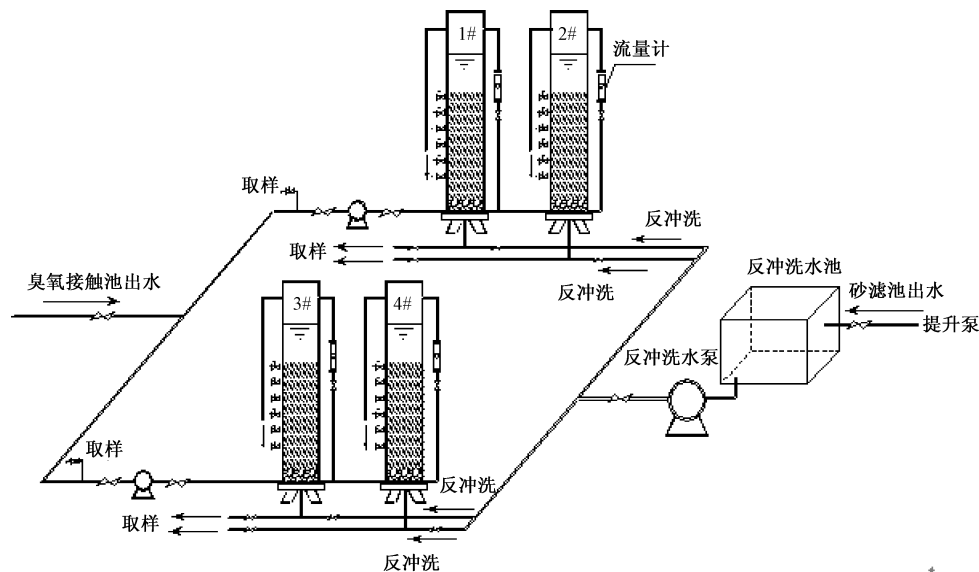


图1 试验设备及工艺流程

Fig. 1 Test Apparatus and Process Flow

试验采用粗制和精制颗粒活性炭,其各项参数 如表 1 所示。

表 1 粗制炭和精制炭的性能参数
Tab. 1 Parameters of Crude and Refined Carbon

活性炭类型	碘/(mg·g ⁻¹)	亚甲基蓝/(mg·g ⁻¹)	堆密度/(g·mL ⁻¹)	水分	灰分	颗粒度/目	炭种类型
粗制炭	1 000	266	0.45~0.50	<3%	<12%	12×40	煤质,不定型
精制炭	1 000	250	0.44	<2%	<10%	12×40	煤质,不定型

4 根活性炭柱的填装新炭和旧炭的比例和品种状况如表 2 所示。

表 2 试验炭柱填装活性炭种类
Tab. 2 Filling Kinds of Activated Carbon in Experimental Columns

活性炭柱编号	填装种类
1#	1/3 新炭,2/3 旧炭
2#	2/3 新炭,1/3 旧炭
3#	100%的粗制新炭(表 1)
4#	100%的精制新炭(表 1)

1.2 试验活性炭柱反冲洗参数

某水厂 BAC 柱的反冲洗以膨胀率间接指示反冲洗强度,4 根活性炭柱的膨胀率均为 25%,旨在考查不同的换炭方式对单独水反冲洗的适应情况。

反冲洗周期以旧炭比例最高的 1#活性炭柱为准,每周反冲洗 2 次。反冲洗均采用砂滤池滤后水

进行。研究认为,反冲洗时 20%~30%为炭层最佳膨胀率^[6-7],因此,本试验采用了大部分水厂常用的反冲洗膨胀率。反冲洗参数选择如下:炭层膨胀率 $e=25\%$,冲洗时间为 10 min,对应的反冲洗强度约为 $25\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。试验阶段的水温为 28℃。一方面,反冲洗时间取 10 min 是为了使炭层内积聚较多的悬浮固体和老化的生物膜能够充分剥离炭层,提高反冲洗效果;另一方面,反冲洗时间又不宜过长,以防造成大量生物膜的损失。

1.3 采样与检测方法

反冲洗前测定的指标在炭池生产周期结束反冲前 30 min 取样,反冲后测定的指标则在反冲洗后运行 20 min 取样。活性炭载体生物量的测定:所取炭样均为相距炭层表面 50 cm 处(上层)的炭。水质指标和三卤甲烷生成潜能(THMFP)以及生物量等分析方法与使用仪器如表 3 所示。

表 3 水质指标分析及仪器
Tab. 3 Analysis Methods of Water Quality Parameters and Instruments

分析项目	测试方法	测定仪器
浑浊度	—	HACH2100 型试验室浑浊度仪
氨(以 N 计)	纳氏试剂比色法	立式比色器
紫外吸光度(UV ₂₅₄)	—	HACH DR4000U 分光光度计
高锰酸盐指数(COD _{Mn})	高锰酸钾酸性法	—
可溶性有机碳(DOC)	—	岛津 TOC-V _{CPH} 总有机碳分析仪
生物可降解溶解性有机碳(BDOC)	28 d 悬浮培养测定法 ^[8]	旋转蒸发仪、旋片式真空泵、 岛津 TOC-V _{CPH} 总有机碳分析仪
THMFP	GB 5750—1985, EPA524.2 气相色谱	岛津 GC2010 气相色谱仪
生物量	脂磷法(Lipid-P) ^[9]	UV755B 紫外分光光度计

2 结果与讨论

2.1 反冲洗对活性炭试验柱炭层中生物量的影响

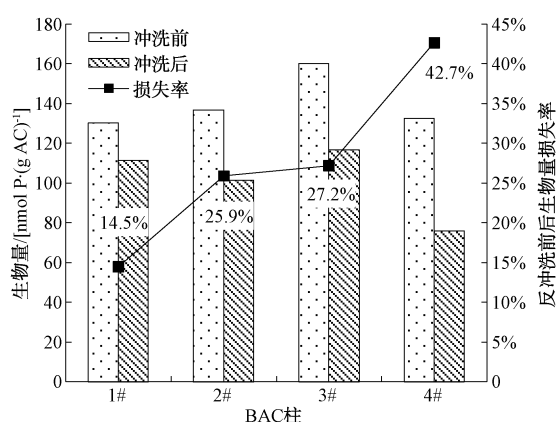
采用惯用的脂磷分析方法对炭层中的生物量进行测定^[9],该法测定的是炭层样品中的生物总量。根据有关研究^[9],硝化细菌在炭层生物总量中所占比例很少,因而测定结果不能反映硝化自养细菌的数量,而脂磷法在测定不可培养型生物量方面具有

优势。

磷脂为所有细胞中生物膜的主要组分^[10],往往在细胞死亡后快速分解,其在细胞中含量约为 50 μmol/(g 干重),在不同生理和化学压力之下波动一般不超过 30%~50%。生物膜脂类(90%~98%)以磷脂形式存在,磷脂中的磷含量用比色法测定,称“脂磷法”,用其来表示生物量,已经在饮用水 BAC

处理研究中得以应用。生物量结果往往以 nmol Lipid-P/g 或 nmol Lipid-P/(mL 填料)来表示,1 nmol P 大约相当于水中 1×10^8 个大肠杆菌(*E. Coli*)细胞的大小。试验采用反冲洗强度约为 $25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

由图 2 可知,反冲洗前后活性炭上层的生物量发生明显变化,4 根炭柱生物量均有不同程度损失。根据 BAC 池中微生物之存在形式,可将其分为附着型微生物和悬浮型微生物。试验结果^[11]表明,附着型微生物的量较大(占 80%左右),且与炭粒之间结合力比较强;而悬浮型微生物约占生物总量的 20%,游离于炭粒之间。



注:AC——活性炭。

图 2 BAC 柱反冲洗前后炭表面的生物量变化和损失率比较

Fig. 2 Comparison of Biomass Change and Loss Rate on the Surface of Carbon before and after Backwashing of BAC Column

异养菌的主要作用被认为是降解有机物,可用 COD_{Mn} 表示,其活性大小以及数量关系到水中有机物的去除效果。由图 2 可知,反冲洗前后有效降解有机物的生物损失量并不大,其降解有机物的作用并未因水力冲刷而减弱,而生物量的降低主要是为悬浮态的微生物受反冲洗水力冲刷脱落所致,并且这些损失的悬浮态微生物对降解有机物的贡献不大,真正对有机物降解的异养菌大多为附着态,比较稳定的生态系统中的生物才是降解有机物的关键。

一般而言,微生物活性是由基质浓度和微生物量两个方面来共同决定的。在进水基质浓度基本稳定的情况下,反冲洗使活性炭上层的微生物量损失大,那么总降解能力就会下降,这恰恰为下层微生物创造了相对较大的基质浓度,此时微生物活性将会有所提高。这就是在对生物系统进行了水力冲刷

后,BDOC 去除率仍然上升的原因。

试验对炭柱的总生物量进行了测定,1#炭柱生物量的损失率低,2#炭柱损失的生物量略低于 3#炭柱,但是反冲洗前后生物量的损失率和 3#炭柱接近。同时,炭柱中旧炭比例的高低和炭的粗制与精制均对生物量的大小略有影响,3#炭柱装填全新炭(粗制),炭层的生物量比其余 3 根炭柱(1#、2#和 4#)更多。但 4#炭柱装填全新炭(精制),不仅生物量不高,而且生物量的损失也明显较大,相对于 3#炭柱,4#炭柱上的生物系统更无法抵抗水力冲刷。这说明前期吸附阶段表现优异的炭未必适应 O_3 -BAC 的长期运行,以生物载体作用为主的活性炭,不仅要有好的吸附效果,更重要的是要为异养菌和硝化自养菌提供合适的生长环境,这可为 BAC 池选炭提供参考。

2.2 某水厂活性炭池反冲洗对炭层中生物量的影响

由于本研究试验条件的限制,无法对炭柱进行气冲的试验研究。因此,对某水厂生产工艺上的反冲洗工况进行了生物量的对比测定研究(炭柱中的旧炭来自该水厂的炭池)。滤池反冲洗过程以往都是采用水冲洗,后来才发展为气水冲,生产上的炭池沿用了滤池的气水冲洗。实际上炭的质量低于石英砂,即炭比砂轻,所以在某种意义上单独使用水冲洗,理念上也可行,但需要试验研究结果来证明。因此,做单独水反冲洗试验,进行对比研究,具有实用意义。

某水厂生产上运行的炭池反冲洗采用气水先后反冲,反冲洗过程为先气冲 5 min,气冲强度为 $55 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;然后再水冲 5 min,冲洗强度为 $25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,冲洗周期是 5 d。测定所取炭样为近炭面的 BAC。

对某水厂生产上正在运行的条件相仿的 4 个活性炭池(亦分别编号为 1#、2#、3#和 4#)分别取自 BAC 池上层,分析测定其在反冲洗前后的总生物量(图 3)与附着生物量(图 4)。由图 3 可知,生产运行中的炭池内 BAC 上层的生物量相较试验模型炭柱中的普遍要高,一方面,这可能是由于正在生产中的炭池运行时间较长;另一方面,也可能由于取炭样的高度不同,存在误差。试验模型炭柱取的是上层炭样,其距离炭面约有 50 cm;生产上运行的 BAC 池由于取样条件的局限,取的是靠上层炭样,其相对于

下层炭,上层炭中的基质浓度会更高,因而生物量也会相对更多。

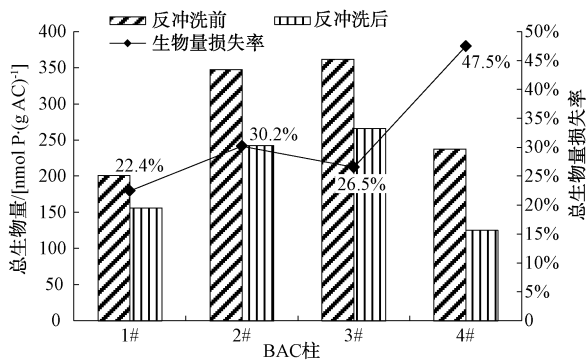


图 3 生产运行中的 BAC 池在反冲洗前后炭表面的总生物量变化和损失率比较

Fig. 3 Comparison of Total Biomass Change and Loss Rate of BAC Tank before and after Backwashing in Production Operation

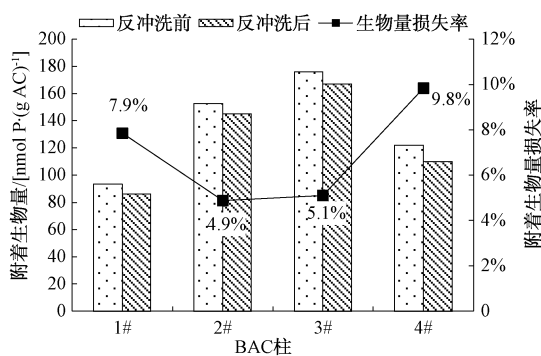


图 4 生产运行中 BAC 池反冲洗前后 BAC 表面附着生物量变化以及损失率比较

Fig. 4 Comparison of Attached Biomass Change and Lose Rate on Surface of BAC Tank before and after Backwashing in Production Operation

生产运行炭池气水反冲洗前后总生物量的损失率比单独水冲炭柱的反冲洗前后总生物量的损失大,同时运行的 2#和 3#炭池的生物量和生物损失率相近,4#炭池的生物量损失率最大。这说明由于生产运行的炭池中生物量承受了气冲的冲刷力,4#炭柱上的生物量比 3#炭柱更低。

活性炭表面附着的生物量在反冲洗前后变化较小,损失率都在 10% 以下。这说明适当的反冲洗方式以及反冲洗强度,对活性炭层上稳定的生态系统影响很小,这也说明 BAC 池可尝试采用单独水冲洗的方式。反冲洗损失的大多数为悬浮态微生物,附着微生物不仅完好保存在生物载体上,而且由于反

冲洗将老化的生物膜和悬浮生物冲洗去除,使活性炭上留存的微生物得到了更高质量的基质浓度,提高了其活性。

2.3 BAC 反冲洗前后主要水质指标的变化

试验进行了 4 根炭柱的相关水质指标测定,各指标在反冲洗前后的变化曲线如图 5~图 11 所示。这种变化主要是反映反冲洗前 30 min 和后 20 min 炭层出水水质的变化,一般在反冲洗后 2 h 趋于稳定运行^[11]。

(1) 浊度

反冲洗前后各 BAC 柱水中浊度的变化如图 5 所示。

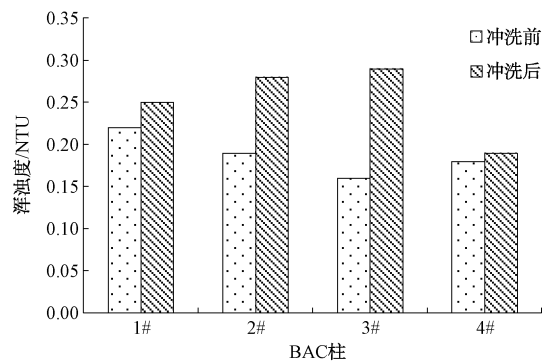


图 5 反冲洗前后各 BAC 柱水中浊度变化

Fig. 5 Variation of Turbidity in Water of Each BAC Column before and after Backwashing

从图 5 可知,4 根活性炭柱反冲洗前后的浊度虽均有不同程度的上升,但是均保持在 0.30 NTU 以下,变化幅度不大。其均出现上升的现象,分析可能是反冲洗过程中老化的生物膜剥落,且并未被反冲水流带出炭柱,而从取样口泄漏造成浊度上升的现象。

(2) COD_{Mn}

与前述常规指标反冲洗前后存在差异不同,COD_{Mn} 却没有很大变化,4 根炭柱在反冲洗前后的去除率波动较小(图 6)。反冲洗后活性炭有效的吸附部位得到恢复,吸附能力增强,同时生物的活性也得到加强,使 COD_{Mn} 的去除率维持在一个较高的水平上。一般,反冲洗前后活性炭柱出水中 COD_{Mn} 与进出水浓度相关。

(3) UV₂₅₄

反冲洗后 UV₂₅₄ 的去除率较反冲洗前均有一定上升(图 7),这是由于反冲洗将老化的生物膜剥落之后,原有活性炭上有效的吸附部位空出来,可再次

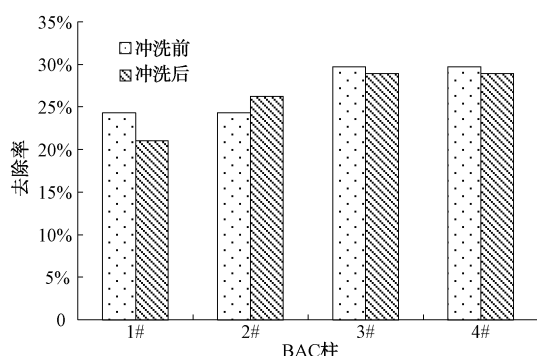


图6 反冲洗前后 BAC 柱出水中 COD_{Mn} 去除率比较

Fig. 6 Removal Efficiency Comparison of COD_{Mn} in

Outflow of Each BAC Column before and after Backwashing

进行吸附作用,加上降解有机物的生物数量并未明显减少,所以 UV₂₅₄ 体现出了更高的去除率。一般,反冲洗前后活性炭柱出水中 UV₂₅₄ 与进出水浓度相关。

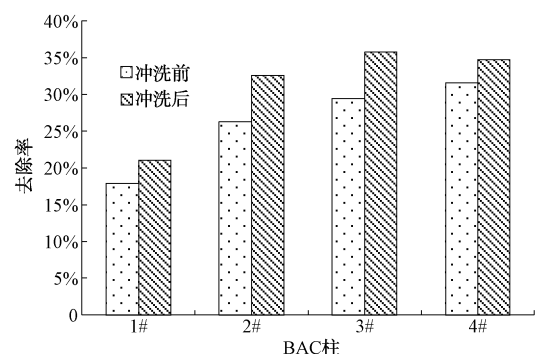


图7 反冲洗前后 BAC 柱出水中 UV₂₅₄ 去除率比较

Fig. 7 Removal Efficiency Comparison of UV₂₅₄ in Outflow of Each BAC Column before and after Backwashing

(4) DOC

DOC 的情况(图 8)和 UV₂₅₄ 类似,空出的有效吸附部位和异养菌的生物活动,保证了反冲洗后 DOC 的去除率均有所上升。

另一个现象是,反冲洗前 3#炭柱对 DOC 的去除率略高于 4#炭柱,但是反冲洗后,4#炭柱的去除率大幅上升,为 4 根炭柱中最高。对反冲洗前后的生物量分析也表明,4#炭柱的生物量在反冲洗前后的损失率最高。由此可见,虽然反冲洗减少了生物量,但生物膜的脱落腾出了更多的吸附位置。因此,4#炭柱老化的易剥落的生物数量最多,在反冲洗后,吸附作用恢复最大。一般,反冲洗前后活性炭柱出水中 DOC 与进出水浓度相关。

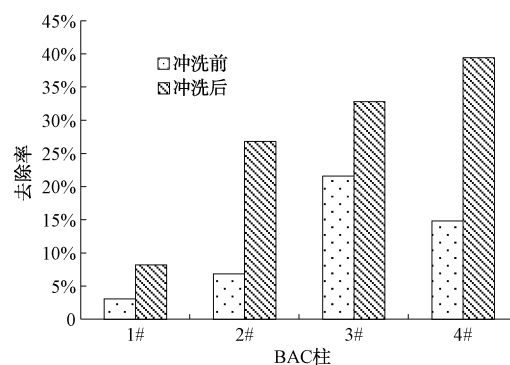


图8 反冲洗前后 BAC 柱出水中 DOC 去除率比较

Fig. 8 Removal Efficiency Comparison of DOC in Outflow of Each BAC Column before and after Backwashing

由此可见,反冲洗有利有弊。它既能冲刷掉部分附着在活性炭上的生物膜,导致生物降解的去除效果降低(反冲洗后运行 20 min 时),但同时又能使活性炭的吸附能力得到恢复,老化生物膜脱落也提高了微生物获得营养物质的传质效率,增强后续去除效果。

(5) BDOC 以及 NBDOC 变化

从 COD_{Mn} 反冲洗前后的变化可以推断,4 根活性炭柱上异养菌的数量没有明显降低,而反冲洗后 BDOC(图 9)去除率均升高的现象,则说明总生物量虽然减少,但是生物活性反而加强,生物降解作用更为明显,这与参考文献^[11,9]研究结果一致。这再次表明反冲洗能使老化的生物膜脱落,提高了微生物获得营养物质的传质效率,增强去除效果。

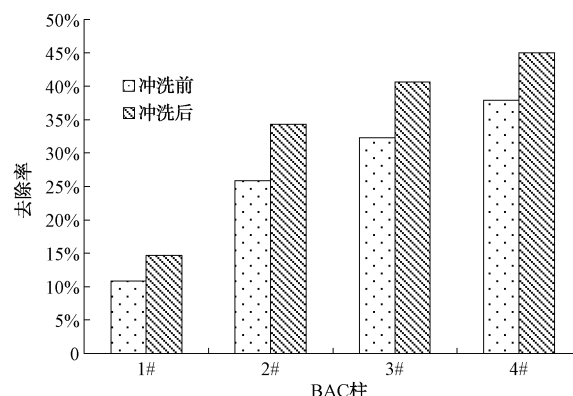


图9 反冲洗前后 BAC 柱出水中 BDOC 去除率比较

Fig. 9 Removal Efficiency Comparison of BDOC in Outflow of Each BAC Column before and after Backwashing

NBDOC(依靠吸附去除的 DOC)在反冲洗前后变化明显(图 10)。反冲洗前,1#、2#和 3#炭柱分别按照旧炭比例的多少呈现相同的趋势。1#炭柱的旧

炭比例最高,所以有效的吸附位最低,反冲前已基本上没有吸附作用。2#和 3#炭柱在反冲前虽然还具有吸附作用,但是也比较微弱,这是因为 BAC 柱都已进入以生物降解作用为主的运行后期。但是反冲洗后,4 根炭柱的 NBD0C 的去除率均大幅度上升,活性炭柱的吸附作用均有很大程度的恢复,再次证明了,反冲洗会将老化脆弱的生物膜冲刷下来,使得有效的吸附位被腾出,使得活性炭的吸附作用得到恢复。

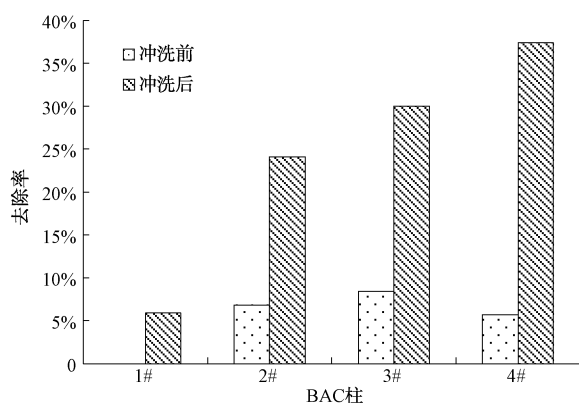


图 10 反冲洗前后 BAC 柱出水中 NBD0C 去除率比较

Fig. 10 Removal Efficiency Comparison of NBD0C in Outflow of Each BAC Column before and after Backwashing

此外,反冲前 4#炭的吸附能力略差于 3#。而反冲后,4#的吸附能力恢复情况更好,之后对 NBD0C 的去除效果最好。说明 4#炭上的生物系统相对 3#脆弱,在反冲洗时会有更多老化的生物膜剥落,反冲后活性炭上则会空出更多可用于吸附的部位,使其吸附能力得到较大的恢复^[12]。

(6) THMFP

反冲洗对 THMFP 去除率的提高也有较大作用(图 11),随着活性炭有效吸附位的增加,THMFP 的去除也随之提高。下一个运行周期到来前,活性炭的有效吸附位又被老化、脆弱的生物膜系统所覆盖,THMFP 的去除率又会恢复到正常的状态。

3 结论

通过对 4 种活性炭装填工况下,反冲洗对活性炭层中生物量以及出水指标的影响,明确了不同工况下,活性炭层中生物量以及出水水质的变化规律,得到以下结论。

(1) 试验模型炭柱反冲洗前后总生物量均出现下降,但有效降解有机物的异养菌数量没有降低,

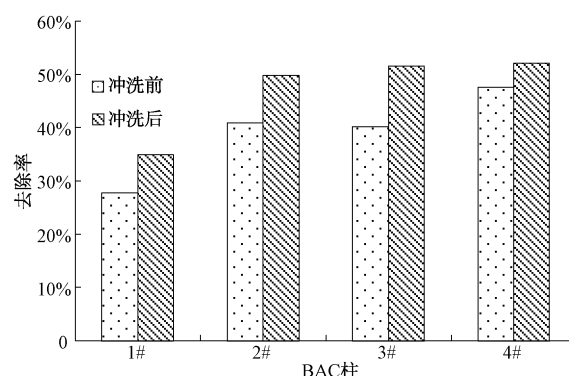


图 11 反冲洗前后 BAC 柱出水中 THMFP 去除率比较

Fig. 11 Removal Efficiency Comparison of THMFP in Outflow of Each BAC Column before and after Backwashing
COD_{Mn} 在反冲洗前后的去除率差别不大。

(2) 气水反冲洗前后的生物量虽然比单独水反冲洗损失更多,但附着生物量基本不变,说明适当的反冲洗方式和反冲洗强度,对活性炭上稳定的生态系统几乎没有影响,同时也说明 BAC 池可尝试使用单独水冲洗。

(3) 反冲洗对恢复 4#炭柱(填装精制新炭)的吸附容量效果最明显,但生物量的损失率却最大,说明相对于 3#炭柱(填装粗制新炭),4#炭柱上的生物系统抵抗水力冲刷能力相对较弱,水厂 BAC 池选炭可作为参考。

(4) 反冲洗既能冲刷掉部分附着在活性炭上的生物膜,导致生物降解去除效果短暂降低,但同时又能恢复活性炭的吸附能力,老化生物膜脱落也提高了微生物获得营养物质的传质效率,提高其活性,增强对有机物的去除效果。

参考文献

- [1] 黄敏. 南京城北水厂扩建及深度处理工程设计[J]. 市政技术, 2021, 39(12): 84-89.
HUANG M. Design of expansion and advanced treatment project of north water plant in Nanjing [J]. Journal of Municipal Technology, 2021, 39(12): 84-89.
- [2] 黄勇均,何自翔,王彦,等. 反冲洗方式对升流式生物活性炭滤池运行影响研究[J]. 市政技术, 2022, 40(12): 137-142.
HUANG Y J, HE Z X, WANG Y, et al. Influence of backwashing on the operation of up-flow biological activated carbon tank [J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(12): 137-142.
- [3] 吴瑾好,石鲁娜,焦洁,等. 水厂活性炭滤池换炭方式对生

- 产运行的影响[J]. 给水排水, 2021, 47(4): 21-27.
- WU J S, SHI L N, JIAO J, et al. Effect of carbon substitution ways on the performance of activated carbon filter in water treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(4): 21-27.
- [4] 李海泉, 安娜, 张金松. 生物活性炭滤池换炭方式与效能评价[J]. 广东化工, 2014, 41(7): 41-43, 33.
- LI H Q, AN N, ZHANG J S. Research on performance of biological activated carbon filter with different replacement ratios [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(7): 41-43, 33.
- [5] 滕颖. 采用不同换炭方式后水厂活性炭滤池的运行性能[J]. 净水技术, 2020, 39(s1): 74-78.
- TENG Y. Operation performance of activated carbon filter in water treatment plant with different carbon exchange methods [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(s1): 74-78.
- [6] 姜应和, 鄢恒珍, 刘剑华. 滤池反冲洗技术评析[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 31-33.
- JIANG Y H, YAN H Z, LIU J H. Discussion and analysis of backwashing technique for filter pool[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(10): 31-33.
- [7] CRITTENDEN J C, REDDY P S, ARORA H. et al. Predicting GAC performance with rapid small-scale column tests [J]. American Water Works Association, 1991, 83(1): 77-87.
- [8] KIM W H, NISHIJIMA W, SHOTO E, et al. Competitive removal of dissolved organic carbon by adsorption and biodegradation on biological activated carbon[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(7): 147-153.
- [9] 于鑫, 张晓健, 王占生. 饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定[J]. 给水排水, 2002, 28(5): 1-5.
- YU X, ZHANG X J, WANG Z S. Biomass examination by lipid-P method for drinking water bio-treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(5): 1-5.
- [10] 魏谷, 于鑫, 叶林, 等. 脂磷生物量作为活性生物量指标的研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(9): 1-4.
- WEI G, YU X, YE L, et al. Study on lipid-P as viable biomass indicator[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(9): 1-4.
- [11] 乔铁军, 张晓健, 于鑫. 反冲洗对饮用水生物活性滤池生物量的影响[J]. 给水排水, 2002, 28(11): 16-20.
- QIAO T J, ZHANG X J, YU X. Effect of backwashing on biomass in biological active filter of drinking water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(11): 16-20.
- [12] ZHANG X J, WANG Z S, GU X S. Simple combination of biodegradation and carbon adsorption - The mechanism of the biological activated carbon process[J]. Water Research, 1991, 25(2): 165-172.
-
- (上接第 161 页)
- WANG Y. Preparation and properties of Lanthanum-modified adsorbents for phosphorus removal [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [27] 张海婷, 张永敏, 王天慧, 等. 镧改性介孔材料对砷、磷的吸附[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8): 1791-1799.
- ZHANG H T, ZHANG Y M, WANG T H, et al. Adsorption of phosphorus and arsenic on La-modified mesoporous materials[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1791-1799.
- [28] 闫兵刚, 胡家玮, 姜晓谦, 等. 载镁生物炭对水体中磷酸盐和植酸的吸附性能及机理分析[J]. 环境工程, 2020, 38(6): 94-101.
- YAN B G, HU J W, JIANG X Q, et al. Adsorption performance and mechanism of phosphate and phytic acid on magnesium-laden biochar in water[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(6): 94-101.
- [29] LIU S, FAN F Q, NI Z K, et al. Sustainable lanthanum-attapulgite/alginate hydrogels with enhanced mechanical strength for selective phosphate scavenging [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 385: 135649. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135649.
- [30] EVERAERT M, BERGMANS J, BROOS K, et al. Granulation and calcination of alum sludge for the development of a phosphorus adsorbent: From lab scale to pilot scale[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279: 111525. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111525.
- [31] 王波, 唐勇, 杨景龙, 等. 镧-钙双金属凝胶微球对水中低磷含量的去除性能[J]. 水处理技术, 2021, 47(4): 86-90, 105.
- WANG B, TANG Y, YANG J L, et al. Removal performance of low content phosphorus in water by Lanthanum-Calcium bimetallic gel microspheres[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(4): 86-90, 105.
- [32] 江欣. 改性纤维素小球的制备及其吸附性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- JIANG X. Preparation and adsorption properties of modified cellulose beads [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.