

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.009

水厂失效生物活性炭的更换策略探讨

陈诗琦¹, 刘成¹, 沈海军², 庄星宇³, 陈卫¹

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 无锡市水务集团有限公司, 江苏 无锡 214031; 3. 无锡市政公用环境检测研究院公司, 江苏 无锡 214031)

摘要: 利用现场调研、中试等方法对水厂失效生物活性炭更换中的一些典型问题进行了分析和探讨。针对目前活性炭更换过程中重点关注的旧活性炭的合理使用问题,中试结果表明:较高的更换比例有利于控制活性炭单元的出水水质,延长活性炭使用时间,因此生物活性炭池宜采用较大的更换比例,并通过控制更换炭池的比例来保障生物降解能力的相对稳定;活性炭更换的时间节点需要结合其应用功能定位和活性炭作用规律来确定,宜控制在每年的5月左右;活性炭更换过程需要考虑采用机械化操作的方式。总之,生物活性炭的更换需要结合水厂实际需求,选择适合的更换策略,保障出水水质安全。

关键词: 饮用水; 生物活性炭; 失效; 更换策略

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0049-08

Discussion on Replacement Strategy of Invalidated Biological Activated Carbon in Drinking Water Plants

CHEN Shi-qi¹, LIU Cheng¹, SHEN Hai-jun², ZHUANG Xing-yu³, CHEN Wei¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Wuxi Water Group Co. Ltd., Wuxi 214031, China; 3. Wuxi Municipal Public Environment Inspection and Research Institute, Wuxi 214031, China)

Abstract: Some typical problems during replacement of invalidated biological activated carbon (BAC) in drinking water plants were analyzed and discussed by means of on-site survey and pilot test. At present, the rational use of the invalidated BAC is mainly concerned in the process of activated carbon replacement. Pilot test results showed that higher replacement ratio favored the treatment performance of the BAC filter and extended the service time of BAC. Therefore, a large replacement ratio should be adopted for the BAC filter, and the biodegradation capacity should be relatively stable by controlling the replacement ratio. Replacement time of BAC needs to be determined in combination with its application function and working mechanism, which should be controlled around May of each year. The BAC replacement process needs to consider the use of mechanical methods. In all, suitable replacement strategy should be optimized to guarantee the drinking water safety based on the practical need of the drinking water plants.

Key words: drinking water; biological activated carbon; invalidation; replacement strategy

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201002)
通信作者: 刘成 E-mail:107489860@qq.com

作为典型的饮用水深度处理工艺之一,臭氧-生物活性炭近年来在国内水厂中得到广泛应用,对出厂水水质安全起到了较好的保障作用^[1-4]。然而随着使用时间的增加,生物活性炭单元的处理效能整体呈现下降的趋势,至特定时间点将无法满足水厂的处理需求,需要进行更换或再生^[5-8]。针对生物活性炭的更换目前在更换比例、更换方式等方面尚存在一些不同的意见^[9-10]。笔者在前期生物活性炭失效判定依据研究基础上,结合(生物)活性炭作用机理以及出水水质保障等针对生物活性炭更换

过程中的关键问题进行研究、探讨。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新活性炭和失效生物活性炭(以下简称旧炭)直接取自水厂,为煤质破碎炭,其中失效生物活性炭为水厂使用了9 a的活性炭。使用2 a和5 a的活性炭为在相应时间点取样测定的数值,其基本性能参数见表1。试验所用原水为水厂臭氧接触池出水,直接用潜水泵提升至各炭柱内,通过流量计控制流量和滤速。

表1 活性炭在使用过程中主要参数的变化情况

Tab.1 Variation of the main indexes in the application of activated carbon

项 目	碘吸附值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	亚甲基蓝值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔容积/ ($\text{m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	装填密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	生物量/ ($\text{nmolP} \cdot \text{g}^{-1}$)	机械强度/%
新活性炭	980	185	1 010	0.46	0.41	0	96.5
使用2 a炭	630	110	760	0.31	0.45	318.25	95
使用5 a炭	410	85	420	0.22	0.49	376.47	93
使用9 a炭	130	70	177	0.097	0.56	381.38	89

1.2 研究方法

1.2.1 现场调研

针对太湖流域某市3个以太湖为水源的水厂,对实际运行水厂炭池的进出水以及炭样进行定期取样,分别进行相应指标的测定、分析。

1.2.2 中试系统

采用直径200 mm、高度3 500 mm的5根炭柱,以使用9 a的生物活性炭作为旧炭,分别填充75%旧炭+25%新炭(1#)、50%旧炭+50%新炭(2#)、75%新炭+25%旧炭(3#)、100%新炭(4#),考察更换体积比对生物活性炭池净化效能的影响,并以全部用旧炭填充的1根柱子作为对比(5#),活性炭层填充高度统一按照1 800 mm确定。连续运行360 d,于不同时间取样测定相关数据。运行中过滤速度控制在10 m/h,反冲洗周期控制在7~10 d,采用气水联合反冲洗方式,其中水冲强度 $5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、冲洗3 min,气冲洗强度 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、冲洗5 min。

中试研究自2015年5月开始启动运行,连续运行360 d,其间进水水质变化见表2。

表2 试验期间活性炭池进水水质

Tab.2 Raw water quality of BAC filter during test

项目	$\text{COD}_{\text{Mn}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH值	水温/ $^{\circ}\text{C}$	浊度/ NTU
数值	2.35~3.28	0.08~0.65	7.6~8.3	4~32	0.08~0.21

1.2.3 检测指标

针对研究过程中活性炭、水样进行相应指标的测定,各指标的测定方法见表3。

表3 研究中的检测指标及相关检测方法

Tab.3 Determination indexes and methods

项目	检测仪器或方法
氨氮	《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006),纳氏试剂分光光度法
COD_{Mn}	《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006),酸性高锰酸钾法
碘吸附值	《煤质颗粒活性炭试验方法 碘吸附值的测定》(GB/T 7702.7—2008)
亚甲基蓝值	《煤质颗粒活性炭试验方法 亚甲基蓝吸附值的测定》(GB/T 7702.6—2008)
生物量	脂磷法 ^[11]
比表面积	日本BEL公司BELSORP-MAX
强度	《煤质颗粒活性炭试验方法 强度的测定》(GB/T 7702.3—2008)
装填密度	《煤质颗粒活性炭试验方法 装填密度的测定》(GB/T 7702.4—1997)
阿特拉津	日本岛津高效液相色谱 ^[12]
二甲基异莰醇	气相色谱联用仪(HS-SPME-GC/MS) ^[13]

1.2.4 生物活性炭对微量有机物的去除效能研究

选择阿特拉津、二甲基异莰醇(2-MIB)作为典型的微量有机物,利用加标试验来研究生物活性炭对微量有机物的去除效能。考虑到实际进水中含量较低且不稳定,而长期加标所需药剂量过高,分别在

不同时间节点进行加标去除试验(其中2-MIB采用藻类提取液作为物质来源),每次试验持续2 d,测定针对两类物质的去除效能[阿特拉津、二甲基异茨醇(2-MIB)初始浓度分别控制在10 $\mu\text{g/L}$ 、100 ng/L 左右]。

2 结果与讨论

2.1 生物活性炭更换需求及目标分析

2.1.1 生物活性炭的更换需求

生物活性炭工艺对于保障水厂出水水质具有重要意义,并且在不同水厂中的功能定位存在一定的差异。生物活性炭的净化效能及生物指标见图1。

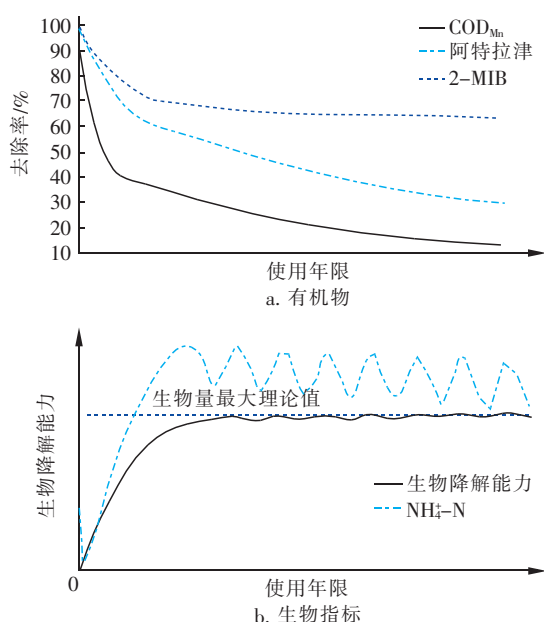


图1 生物活性炭净化效能随使用时间的变化

Fig.1 Variation of the BAC's treatment performance with usage time

由图1可见,随着使用年限的增加,生物活性炭的整体净化效能呈现降低趋势,尤其是针对阿特拉津等典型难降解微量有机物的去除;生物降解能力则在炭附生物膜成熟后呈现相对稳定的状况,其数值的变化更多地是因为水温等外在因素所产生的影响(针对氨氮的去除能力)。此外,由于活性炭吸附能力的降低以及生物群落结构的变化,生物活性炭工艺对水质突变的应对能力随着使用年限增加呈现一定的降低趋势^[14]。当生物活性炭无法有效保障水厂出水水质安全时,就需要考虑进行生物活性炭的更换或再生。

2.1.2 生物活性炭更换过程的控制目标

作为保障生物活性炭处理效能的关键性操作措

施,活性炭更换最根本的目标无疑是提升其处理效能、保障水厂出水水质。考虑到更换过程具有成本高、操作复杂、对水厂运行影响大等特点,尚需进一步考虑降低活性炭更换频率、稳定更换过程中生物降解效能以及降低更换成本等具体的目标。

更换频率的控制:鉴于较高的更换成本和相对复杂的操作,实际应用中应尽量减少活性炭的更换频率,这就需要充分优化、改进更换的方式或策略,特别注意活性炭更换后的处理效能、后续使用情况及可能的使用年限。

生物降解效能的稳定:新活性炭具有较好的吸附效能,但不具备生物降解能力,需要一定时间来完成生物膜的培养。因此,在活性炭池更换初期对部分需要通过生物降解途径进行去除的指标的净化效能变差。实际应用过程中,应结合生物活性炭池更换比例或者炭池内新旧活性炭的比例来减小换炭对出水水质产生的影响。

成本的控制:活性炭更换成本是影响其在实际工程中应用的另一个重要因素,其成本的组成主要来自于所需更换活性炭的成本,因此活性炭的更换应在保障净化效果的同时,通过优化活性炭的更换比例来适当降低更换成本。

2.2 生物活性炭更换中需要考虑的细节问题

2.2.1 生物活性炭的更换节点

由于国内饮用水源水质存在一定的差异,导致生物活性炭的功能定位及其去除效能的变化规律也表现出一定的不同。因此针对特定水厂生物活性炭更换的时间节点,需在明确生物活性炭基本功能定位、基本性状和处理效能变化规律的基础上,结合水厂的具体出水水质要求予以确定。此外,考虑到更换过程所添加的新鲜活性炭需要一定时间来完成生物挂膜过程,从而在活性炭更换初期对诸如氨氮等主要依靠生物降解予以去除的指标的净化效能较难保证,需进一步结合原水水质变化规律及水温等因素来合理确定更换时间节点。

2.2.2 旧生物活性炭(旧炭)的合理使用

目前国内针对生物活性炭的更换实际案例中多采用部分或全部更换的方式,但均缺乏实际有效的理论支撑,其中最关键的是合理确定旧炭在更换过程中的基本作用。结合生物活性炭的基本应用方式及作用机理,旧炭在换炭过程中所能承担的主要作用包括净化效能、作为支撑层使用、作为微生物接种

使用。

① 净化效能

旧炭在经过较长时间使用后,虽然净化效能明显下降,但还存在一定的净化能力。保留部分旧炭的基本目的是充分利用旧炭残留的净化能力,以节省换炭成本。针对太湖流域某水厂的生物活性炭,考察了在其使用年限内的基本性能参数变化情况,结果见表1。

可以看出,活性炭的主要性能参数在使用过程中呈现明显的降低趋势,其与生物活性炭的处理效能具有较好的相关性^[14]。当需要进行生物活性炭更换或再生时,活性炭的性能参数普遍处于较低的水平,且对水中典型污染物的去除效能也较低。因此其对强化水中污染物去除、提升出水水质安全的贡献需要根据实际处理需求而确定。

② 作为支撑层使用

鉴于旧炭与新炭在密度上的差异(见表1),填充活性炭后的炭滤池经过反冲洗后会呈现一定的分层现象。旧炭由于具有相对较大的密度,通常处于炭滤池的底层,因此对其上部的活性炭起到一定的支撑作用。然而由表1可以看出,活性炭在使用一定年限后强度也呈现一定程度的下降,至9 a时机械强度为89%,明显低于初始阶段的96.5%,也低于《生活饮用水净水厂用煤质活性炭》(CJ/T 345—2010)中的限值要求(不低于90%),因此旧炭的使用有可能会使炭滤池出水颗粒物含量增加。

③ 作为微生物接种使用

旧炭附着有大量的微生物,且与水厂炭滤池进水质具有较好的适应性,因此可以作为更换活性炭生物膜培养“挂膜”的接种微生物使用,降低活性炭的挂膜过程所需时间,有利于保障出水水质的稳定性。

此外,由于旧炭的使用过程涉及到活性炭吸附、生物附着体系的平衡的重塑,因此需要重点考虑活性炭与水之间的相互作用。生物活性炭对水中污染物的去除过程实际上是特定污染物在水与活性炭颗粒之间转移的过程,因此存在着特定物质在水相与活性炭颗粒之间的动态平衡。针对部分更换活性炭的炭池来说,炭池内存在两种差异明显的活性炭,且旧炭通常在反冲洗后处于炭池的底部,由此会产生一个特定的问题:下向流活性炭在使用过程中,经过新活性炭处理的水中特定污染物的含量会显著下

降,在流经旧炭层时会导致旧炭上附着的物质及微生物发生脱附现象,导致水质在一定程度上变差,影响出水水质。此外,旧炭较低的活性炭强度也会对出水中的颗粒物及炭附着细菌含量产生负面影响。

2.3 活性炭更换比例对净化效能的影响

结合目前水厂活性炭更换过程中所关心的关键问题,针对不同更换比例条件下活性炭柱的净化效能进行了现场中试。

2.3.1 对 COD_{Mn} 的去除效果

不同更换比例条件下活性炭柱对 COD_{Mn} 的去除效能见图2。

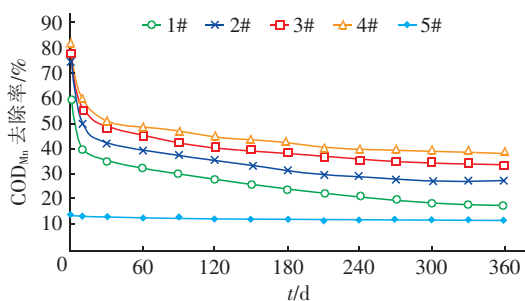


图2 活性炭更换比例对 COD_{Mn} 去除效能的影响

Fig. 2 Influence of the replacement ratio of activated carbon on the COD_{Mn} removal

由图2可以看出,活性炭的更换比例对生物活性炭去除水中 COD_{Mn} 的效能具有较明显的影响,且去除效能的差异存在于整个生物活性炭的使用过程中:运行初期,活性炭的更换比例对 COD_{Mn} 的去除效果具有较明显的影响,增大更换比例就显著增加对 COD_{Mn} 的去除效率;生物膜逐渐成熟以后,较高更换比例炭柱对 COD_{Mn} 的去除效能也明显优于低更换比例的效能。究其原因在于生物活性炭对水中有机物的去除依靠生物降解和物理吸附的共同作用,在运行初期主要依靠活性炭的吸附能力,而在生物膜成熟后则是生物降解和物理吸附共同起作用。在生物膜成熟后,生物降解作用对水中有机物的去除效能相对稳定,去除效果的差异则更多来源于吸附作用的强弱。更换比例较小的活性炭柱,其整体吸附能力较低,导致了其对以 COD_{Mn} 为代表的有机物去除效能较差。这与前期针对生物活性炭失效判定研究中所初步得出的活性炭吸附效能是影响其净化效果关键因素的结论相吻合^[14]。此外,应该注意的是,较低的更换比例导致了生物活性炭净化效能较低,针对以降低 COD_{Mn} 为主体功能定位的水厂,也会相

应地导致更换后的活性炭池使用年限缩短。

2.3.2 对氨氮的去除效能

去除氨氮是生物活性炭在实际应用中另一个重要功能,而水中氨氮的去除主要依靠微生物的降解作用,生物降解性能高低直接决定了对氨氮的去除效果。不同更换比例条件下活性炭柱对氨氮的降解效能见图3。可以看出,更换比例较低的活性炭对氨氮具有相对稳定的去除效果,而换炭比例较大的炭柱则需要一段时间的生物膜培养过程(45 d以上)才能显著提升其对氨氮的去除效率,至90 d以后氨氮去除效率相对稳定,150 d以后达到甚至超过旧炭炭柱对氨氮的去除效能。需要特别注意的是,与 COD_{Mn} 去除效果相比,在冬季低温季节炭柱对氨氮的降解效能均有明显下降,而 COD_{Mn} 则保持相对稳定的去除效果,原因主要在于 COD_{Mn} 主要通过活性炭的物理吸附和异养微生物的降解等途径去除,其受水温的影响较小。就活性炭更换比例而言,其对氨氮降解效能的降低程度有一定的影响,更换比例较高的炭柱表现出更好的适应性,这与炭上生物膜的厚度及生物活性有关。

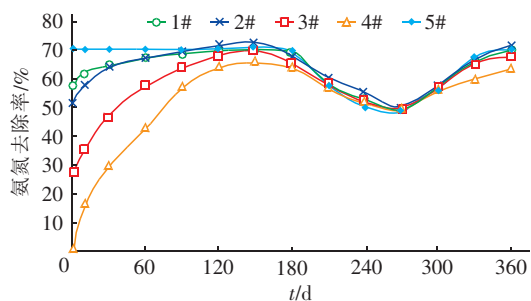


图3 活性炭更换比例对氨氮去除效能的影响

Fig.3 Influence of the replacement ratio of activated carbon on the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal

此外,对5根活性炭柱进出水中亚硝酸盐氮的检测结果表明,更换比例高于75%的2根炭柱在运行15~30 d时间段内有少量的亚硝酸盐累积(最大浓度 $<0.1 \text{ mg/L}$),30 d之后则趋于0;而更换比例为25%、50%及未更换的3根炭柱则没有出现明显的亚硝酸盐累积现象。这在一定程度上说明,旧炭的存在会加速新炭颗粒附着生物膜种群结构的成熟,而较高比例的旧炭则可以有效规避正常培养过程中部分时间段内亚硝酸盐的累积问题。

2.3.3 对消毒副产物的去除效果

臭氧-生物活性炭深度处理工艺应用的基本目

的之一是降低水中消毒副产物前体物的含量、控制消毒过程中副产物的生成量。不同更换比例的炭柱对三卤甲烷生成势(THMsFP)、卤乙酸生成势(HAAsFP)的去除情况如图4所示。

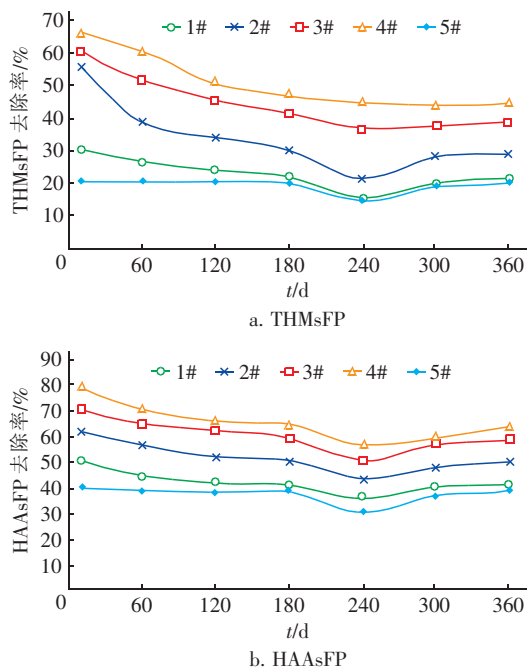


图4 活性炭更换比例对消毒副产物前体物去除效能的影响
Fig.4 Influence of the replacement ratio of activated carbon on the DBPs formation potential removal

可以看出,活性炭的更换比例在一定程度上影响着两类典型消毒副产物生成势的控制效果,较高的更换比例有利于对消毒副产物生成势的控制。而就两类消毒副产物而言,整个运行期间对卤乙酸生成势的去除效果要明显强于三卤甲烷生成势,且生物降解作用与活性炭吸附均能在一定程度上去除其前体物,说明生物活性炭对卤乙酸前体物具有较好的控制效果;针对三卤甲烷前体物的去除则主要依靠活性炭的吸附作用,在生物活性炭应用的大部分时间段内,要保障其去除效果需要结合其他处理工艺单元来进行有效控制。综合考虑两类消毒副产物的去除,更适合采用较高的更换比例。

2.3.4 典型微量有机物

微量有毒有害有机物是影响水质安全的重要指标,而致嗅物质会直接影响饮用水的感官指标,是目前生物活性炭工艺单元在水厂应用中需要考虑的功能定位之一。不同更换比例的活性炭柱对两类典型微量有机物(阿特拉津、2-MIB)的去除效能见图5。可以看出,两类微量有机物在各活性炭柱的去除

效能上呈现出一定的差别。阿特拉津的去除效能随着更换比例的增加而提升,且随着活性炭使用时间呈现下降的趋势,这主要是因为阿特拉津的去除主要依靠活性炭的吸附作用;2-MIB的去除效果随活性炭更换比例和运行时间的变化则相对平缓,且整体去除率较高,这主要是因为2-MIB可通过活性炭的吸附和微生物的生物降解两种途径实现去除。综合两类微量有机物的去除效果,较高的更换比例有利于控制出水中微量有机物的含量。

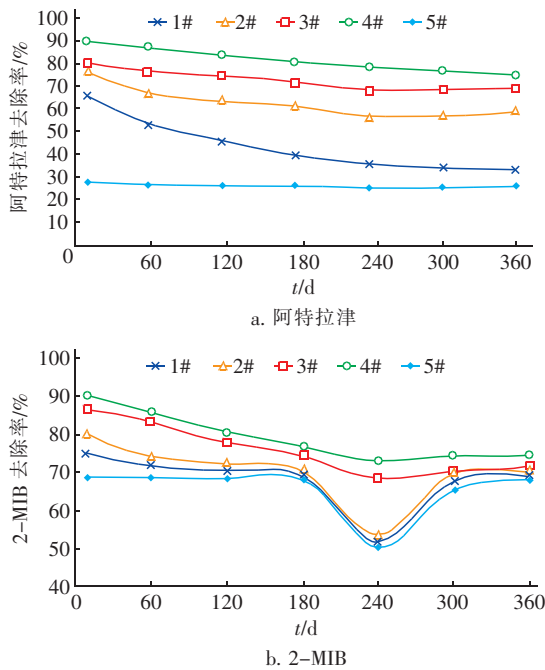


图5 活性炭更换比例对微量有机物去除效能的影响

Fig.5 Influence of the replacement ratio of activated carbon on the micro-pollutant removal

2.3.5 对新补充活性炭挂膜速度的影响

生物活性炭的微生物膜培养过程是影响生物活性炭作用效能的重要步骤,及时、快速的生物膜培养有利于生物活性炭净化效能的充分发挥,因此考察了不同更换比例条件下活性炭柱的“挂膜”过程。为充分利用旧炭上附着的生物膜,活性炭运行初期采用了新、旧炭按比例混合后直接填充、低流量运行(6 m/h)的方式,后续运行中反冲洗也采用了较低的反冲洗强度[水冲 $4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、2 min,气冲 $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、5 min],尽量避免活性炭充分膨胀后所造成的分层现象。不同运行时间下活性炭上附着生物量的变化情况见图6。可以看出,旧炭的掺混显著加速了活性炭的“挂膜”速度(以在运行初始阶段生物量数值基础上的增加部分表示),且旧炭比

例越高则活性炭的挂膜速度越快。图3中各活性炭柱对氨氮的去除效能曲线也从另一方面佐证了新更换活性炭上生物膜的生长情况。整体来看,活性炭上生物膜的成熟需要60~90 d的培养时间,而稳定的生物系统的构建则需要更长的时间,因此从生物降解能力角度来考虑应留出充足的时间(90 d以上)来完成更换活性炭上生物膜的培养。

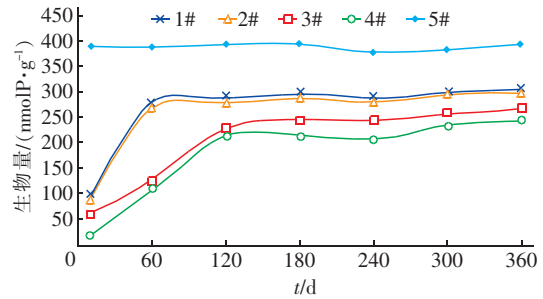


图6 活性炭更换比例对活性炭挂膜速度的影响

Fig.6 Influence of the replacement ratio of activated carbon on the biofilm formation rate

综合以上中试结果可以看出,较高的更换比例有利于保障生物活性炭工艺单元的净化效能,降低更换频率。更换过程中失效生物活性炭(旧炭)的净化作用相对有限,且有可能因为炭上吸附物质的脱附而导致整体处理出水水质的降低,而其在更换过程中的有利方面是可以在一定程度上促进新活性炭的挂膜。

2.4 生物活性炭更换策略讨论

结合上述试验结果以及生物活性炭在实际水厂中应用时的功能定位,生物活性炭的更换过程应以保障其出水水质为基本目标,结合更换成本降低的需求来确定其更换策略,涉及的主要内容包括更换节点、更换比例和更换方法等。

更换节点:生物活性炭的净化整体呈现降低的趋势,而各水厂由于水源水质、常规工艺处理效能以及处理出水水质需求等存在一定的差异,因此需结合各水厂的实际情况确定更换的时间节点。由于所补充的新活性炭需要一定时间来完成“挂膜”过程以及构建稳定的微生物群落结构,且较高的水温有利于缩短这个过程持续的时间;考虑到生物活性炭在运行初期(2~3 a)对水中有机物、氨氮等各类典型污染物均具有较显著的去除效能,且具有一定的抗冲击负荷能力,因此生物活性炭更换的时间节点宜控制在每年的5月左右,经过后续5个月左右

的时间来完成“挂膜”和微生物群落系统构建,从而为冬季低温条件下的处理提供条件。

更换比例:主要是针对旧炭及其生物降解效能的合理利用。旧炭与新炭按一定比例混合使用并无法实现旧炭剩余吸附能力和生物降解能力的利用,反而会因为旧炭上吸附物质的释放在一定程度上降低出水水质,但是少量的旧炭则可以促进活性炭的挂膜过程。因此,针对活性炭池内失效生物活性炭的更换宜采用全部更换为新活性炭的方式,或者与少量的活性炭池顶部的高微生物含量、小粒径、低密度的旧炭(宜控制在10%以内)混匀使用,以缩短活性炭的“挂膜”过程,并避免显著的新、旧炭分层。但是不建议采用较大比例的旧炭与新炭在同一炭池内混合使用。为保障生物降解效能的稳定、持续,生物活性炭的更换可以考虑结合炭池运行情况采用分年度逐批(个)更换的方式,从而实现生物降解效能的稳定和物理吸附能力的提升,平稳提升水厂出水水质。

更换方法:鉴于活性炭更换过程的工作量较大、劳动强度高,需采用机械化操作方式将失效生物活性炭由池内取出,并将待更换的新活性炭回填进入炭池,同时需做好通风工作,避免残留臭氧对人体产生危害。目前最常用的方法是泵输送法,大大降低了工人的工作强度。

3 结论

① 生物活性炭在使用一定年限后净化效能会显著降低,应根据其功能定位确定活性炭的更换时间点。

② 更换比例对更换后活性炭的净化效能具有显著的影响,较高的更换比例更有利于保障出水水质安全。

③ 活性炭更换的时间节点适合设置在每年的5月份左右,有利于活性炭上生物膜的快速生长;结合更换成本及生物降解效能稳定的需求,单个活性炭池的更换宜采用全部更换的方式,并通过逐年按比例更换不同的炭池来实现;活性炭更换过程中宜采用泵输送法等操作方法。

参考文献:

- [1] 兰亚琼,刘锐,马正杰,等. 臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果[J]. 环境科学,2018,39(12):5541-5549.
- [2] Lan Yaqiong, Liu Rui, Ma Zhengjie, *et al.* Ozone-biological activated carbon for advanced removal of typical persistent organic pollutants from micro-polluted source water in the Yangtze delta region [J]. *Environmental Science*,2018,39(12):5541-5549 (in Chinese).
- [3] Feng L, Watts M J, Yeh D H, *et al.* The efficacy of ozone/BAC treatment on non-steroidal anti-inflammatory drug removal from drinking water and surface water[J]. *Ozone Sci Eng*,2015,37(4):343-356.
- [4] 俞洋,凌源,朴庸健,等. O₃/BEAC工艺去除低温水中氨氮的中试研究[J]. 中国给水排水,2018,34(9):33-37.
- [5] Yu Yang, Ling Yuan, Piao Yongjian, *et al.* Ammonia nitrogen removal of drinking water at low temperature by O₃-BEAC process [J]. *China Water & Wastewater*,2018,34(9):33-37 (in Chinese).
- [6] 焦洁,陆纳新,王海湧,等. 太湖原水藻类代谢产物中臭味物质的去除技术研究[J]. 中国给水排水,2016,32(11):64-67.
- [7] Jiao Jie, Lu Naxin, Wang Haiyong, *et al.* Removal of odorous substances from algae metabolites in raw water of Taihu Lake [J]. *China Water & Wastewater*,2016,32(11):64-67 (in Chinese).
- [8] 刘辉,曹国华,许建华,等. 生物活性炭运行失效指标的确定[J]. 中国给水排水,2003,19(1):55-58.
- [9] Liu Hui, Cao Guohua, Xu Jianhua, *et al.* Determination of the failure index of bio-activated carbon [J]. *China Water & Wastewater*,2003,19(1):55-58 (in Chinese).
- [10] 高志鹏,刘成,陶辉,等. 生物活性炭的热再生效能及在水厂中的应用[J]. 中国给水排水,2019,35(15):48-53.
- [11] Gao Zhipeng, Liu Cheng, Tao Hui, *et al.* Thermal regeneration effect of biological activated carbon and its application in waterworks [J]. *China Water & Wastewater*,2019,35(15):48-53 (in Chinese).
- [12] 刘建广,张春阳,查人光,等. 饮用水深度处理工艺活性炭运行生命周期探讨[J]. 给水排水,2011,37(5):35-40.
- [13] Liu Jianguang, Zhang Chunyang, Zha Renguang, *et al.* Probe into the activated carbon operation lifecycle in advanced water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*,2011,37(5):35-40 (in Chinese).
- [14] 黄汗青,吴婉华,吴声达,等. 水厂生物活性炭滤池炭滤料长期运行的性能变化及更换周期探讨[J]. 给水

- 排水,2018,44(5):39-41.
- Huang Hanqing, Wu Wanhua, Wu Shengda, *et al.* Discussion on performance change and replacement period of long-term operation of biological activated carbon filter charcoal filter in water treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering,2018,44(5):39-41 (in Chinese).
- [9] 戚丰秒. 生物活性炭更换试验研究[D]. 济南:山东建筑大学,2017.
- Qi Yumiao. Research on Carbon Substitution Ways in Biological Activated Carbon Filter[D]. Jinan:Shandong Jianzhu University,2017(in Chinese).
- [10] 朱力平,张丽丽. 某水厂活性炭滤池性能及更换滤料策略[J]. 净水技术,2014,33(s1):54-56,71.
- Zhu Liping,Zhang Lili. Performance of activated carbon filter and solution of replacing filter material in a waterworks[J]. Water Purification Technology,2014,33(s1):54-56,71(in Chinese).
- [11] 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 Xin, Zhang Xiaojian, Wang Zhansheng. Biomass examination by lipid-P method for drinking water biotreatment[J]. Water & Wastewater Engineering,2002,28(5):1-5(in Chinese).
- [12] Liu C, Wang J, Cao Z, *et al.* Variation of dissolved organic nitrogen concentration during the ultrasonic pretreatment to *Microcystis aeruginosa* [J]. Ultrason Sonochem,2016,29:236-243.
- [13] Han L, Liu W, Chen M, *et al.* Comparison of NOM removal and microbial properties in up-flow/down-flow BAC filter[J]. Water Res,2013,47(14):4861-4868.
- [14] 刘成,杨瑾涛,李聪聪,等. 生物活性炭在应用过程中的变化规律及其失效判定探讨[J]. 给水排水,2019,45(2):9-16,21.
- Liu Cheng, Yang Jintao, Li Congcong, *et al.* The variation of the biological activated carbon during the application and the judgement criterion of its invalidation [J]. Water & Wastewater Engineering,2019,45(2):9-16,21(in Chinese).



作者简介:陈诗琦(1999-),女,江苏扬州人,本科在读,研究方向为饮用水处理技术及理论。

E-mail:1481622798@qq.com

收稿日期:2019-10-30

节约每一滴水,

回收每一滴水,

让每一滴水多循环一次