

李聪聪, 刘成, 刘嘉琪, 等. 水厂生物活性炭颗粒灰分的累积规律[J]. 净水技术, 2022, 41(12):65-70.

LI C C, LIU C, LIU J Q, et al. Accumulation rules for ash content of biological activated carbon granules in WTP[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(12):65-70.



扫我试试?

水厂生物活性炭颗粒灰分的累积规律

李聪聪^{1,2}, 刘成^{1,2}, 刘嘉琪², 许展鹏², 兰童², 陈卫²

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098)

摘要 文章采用典型水厂跟踪调查与水厂中试试验相结合的方式, 分析了水厂生物活性炭使用过程中灰分的累积规律, 并分析了其主要成分。研究表明, 生物活性炭颗粒上的灰分随着使用时间呈现增加的趋势, 至 10 年时可达 25% 左右, 生物活性炭的类型、炭池流向均会对灰分的累积产生相应的影响。灰分的主要成分包括 Al、Fe、Mn、Mg、Cu、硫酸盐、氯离子、磷酸盐等典型元素, 其中 Al 的质量分数最高可达 46.5 mg/(g BAC) 以上。灰分的累积对废旧生物活性炭的资源化利用会产生一定的负面影响, 后续生物活性炭失效判定过程中应予以充分的重视。

关键词 生物活性炭(BAC) 灰分 无机离子 饮用水 累积规律 水厂

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)12-0065-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.12.008

Accumulation Rules for Ash Content of Biological Activated Carbon Granules in WTP

LI Congcong^{1,2}, LIU Cheng^{1,2}, LIU Jiaqi², XU Zhanpeng², LAN Tong², CHEN Wei²

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The method combined with site survey of typical water treatment plant (WTP) and pilot test was used to analyze the accumulation rules of ash content in the application of biological activated carbon (BAC), the composition of ash was investigated in the meantime. Results showed that ash content of the BAC particles increased with their service time and reached about 25% at the end of 10 years. Both the type of activated carbon and the flow direction of BAC tank influenced the accumulation of ash content. The composition of ash was confirmed preliminary as the metal and nonmetal ion, including Al, Fe, Mn, Mg, sulfate, Cl⁻, phosphate, etc. Al was the highest content element in the BAC particle and the content got to above 46.5 mg/(g BAC). The accumulation of ash content can influence the reutilization of the spent BAC and should be considered as one of factors in the appraisal of the BAC's invalidation.

Keywords biological activated carbon (BAC) ash content inorganic ion drinking water accumulation rule water treatment plant (WTP)

臭氧-生物活性炭工艺近年来在水厂被广泛应用, 有效提升了水厂供水水质, 并保障了供水安

全^[1-2]。近年来我国大部分应用臭氧-生物活性炭工艺的水厂陆续进入到活性炭更换阶段, 更换下的活性炭的安全处置成为关注的热点之一^[3]。灰分作为活性炭化学性质检测的一个重要指标已被纳入活性炭的评价指标之一, 分为表面灰分和内在灰分两种, 一般所说的灰分为内在灰分。目前国内实行的《生活饮用水净水厂用煤质活性炭》(CJ/T 345—

[收稿日期] 2022-09-02

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07403-001)

[作者简介] 李聪聪(1992—), 女, 硕士, 研究方向为饮用水深度处理, E-mail: 1250394070@qq.com。

2010)对灰分没有明确要求,但其含量较高时可能会对处理出水产生一定的负面影响,通常水厂活性炭选择中要求其含量控制在10%以内。此外,灰分含量对于废旧活性炭的资源化利用也具有一定的影响^[4]。

一般而言,活性炭灰分的主要成分为SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、TiO₂、SO₃、K₂O、Na₂O和P₂O₅等^[5]。活性炭在使用过程中其灰分含量会呈现逐步增加的趋势,使用5年以后,灰分含量一般会达到10%~20%及以上^[6],然而,目前尚缺乏系统地针对活性炭在使用过程中灰分的变化规律及影响因素的研究。因此,本文选择国内应用臭氧-生物活性炭工艺的典型水厂,采用实际取样调研的方式,结合已有相关文献中报道的结果,系统分析活性炭在水厂应用过程中灰分的变化规律及典型成分累积,探讨影响其累积的关键因素,以期水厂生物活性炭

的优化运行及更换下活性炭的再生利用提供一定的参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用活性炭样品主要取自太湖流域XL、ZQ水厂生物活性炭池,两水厂的臭氧-生物活性炭工艺均采用下向流活性炭吸附池,分别建于2011年4月、2010年12月,所用活性炭为煤质活性炭的压块破碎炭、柱状破碎炭和煤质柱状炭。另外,采用长江水源水的LT、BHK水厂,分别采用上向流、下向流活性炭吸附池,分别建于2015年5月、2014年4月,采用煤质压块破碎炭。部分实际水厂初期缺失的数据采用在水厂建设的中试试验装置来补齐。各类活性炭的基本性能参数如表1所示。试验测定所用药剂除特别说明外均为分析纯及以上级别。

表1 活性炭的性能参数
Tab. 1 Performance Parameters of Activated Carbon

水厂	活性炭类型	碘值/ (mg·g ⁻¹)	亚甲基蓝值/ (mg·g ⁻¹)	粒度/目	pH值	灰分	强度	装填密度/ (g·cm ⁻³)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	孔容积/ (cm ³ ·g ⁻¹)
XL水厂	煤质柱状炭	960	195	8~30	8.35	4.8%	96.5%	0.42	1 050	0.46
ZQ水厂	压块破碎炭	985	196	8~30	8.42	4.36%	99.2%	0.51	1 129	0.47
XL水厂	柱状破碎炭	973	186	8~30	8.38	4.66%	98.8%	0.47	1 087	0.51
BHK水厂	压块破碎炭	974	191	8~30	8.28	4.78%	99.1%	0.48	1 103	0.47
LT水厂	压块破碎炭	1 010	198	12~40	8.31	5.02%	98.5%	0.55	1 201	0.49

1.2 研究方法

水厂所用新活性炭的性能参数由相应水厂提供。水厂使用过程中活性炭样品主要来源于在水厂的定期取样,在实验室完成测试,部分缺失时间点的活性炭样品通过设置于水厂内的中试装置来采集。活性炭样品取集后冷藏,运输到实验室进行相应指标的测定。

废旧活性炭颗粒上金属离子的浸出试验方法如下:取6组10 g废旧活性炭样品置于250 mL锥形瓶内,分别加入100 mL纯水,在磁力振荡器上振荡,分别于0.5、1.0、2.0、8.0、24.0、48.0 h各取一个样品瓶,对水中的金属元素进行测定。

1.3 测试指标与方法

活性炭灰分测定参照国标《煤质颗粒活性炭试验方法 灰分的测定》(GB/T 7702.15—2008)。

活性炭颗粒上金属元素的测定首先采用快速消

解法进行前处理^[7],之后采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对金属元素进行检测,具体方法参照文献^[6]。

活性炭颗粒上非金属离子的测定主要参考土壤中相应离子的测定,具体包括:氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮[《土壤 氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取-分光光度法》(HJ 634—2012)];磷酸盐[《土壤 有效磷的测定 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法》(HJ 704—2014)];硫酸盐、氯离子[《木质活性炭中氯化物和硫酸盐的测定 离子色谱法》(LY/T 3013—2018)]。

活性炭官能团测定采用Boehm滴定法。

2 结果与讨论

2.1 活性炭使用过程中灰分的变化情况

活性炭在12年的长期连续使用过程中灰分含量的变化情况如图1所示。可以看出,活性炭颗粒

上的灰分含量随使用年限呈现逐步增加的趋势,使用 10 年时从 4.8% 升高至 25% 左右,至 12 年时升高至 25% 以上。图 1 的结果还表明,灰分在不同使用时间段增加的速率存在一定的差别;活性炭投入使用初期增长速率较快,之后增长速率逐步变慢,这与活性炭吸附去除水中无机污染物的种类及途径直接相关。使用初期,活性炭主要通过化学吸附作用去除金属和非金属离子^[8],该过程反应速率较快;在生物膜基本成熟后则主要通过生物吸附、生物迁移、生物转化和化学吸附实现去除;在活性炭化学吸附基本饱和之后则主要通过生物吸附、生物迁移和生物转化等途径实现对无机离子的去除。近年来的研究^[9-10]结果表明,微生物可通过生物矿化作用实现对包括铅、砷等在内的多种金属成分的矿化,这可能是生物活性炭对金属类物质具有持续累积作用的关键因素之一。

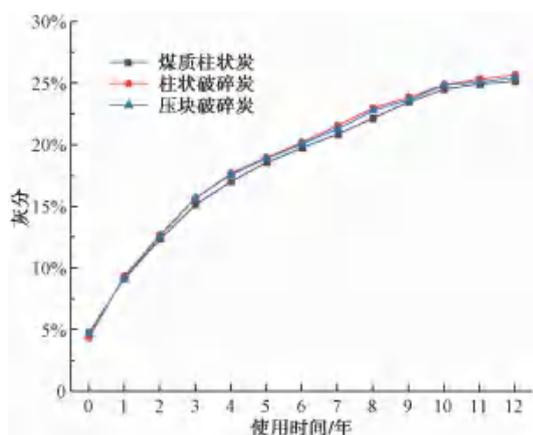


图 1 活性炭颗粒灰分随使用时间的累积

Fig. 1 Accumulation of Ash Content of Activated Carbon Granules with Service Time

由图 1 可知,活性炭的类型对其颗粒上灰分的累积规律具有一定的影响,柱状破碎炭颗粒上灰分的累积速率最快,累积量也最大。结合表 1 中 3 种活性炭的孔容积可知,柱状破碎炭具有较高的孔容积(0.51 cm³/g)和较大的比表面积(1 087 m²/g),可为灰分成分在活性炭上累积提供容纳的空间。进一步分析活性炭颗粒上的典型官能团种类及含量(图 2)可知,压块破碎炭具有更丰富的酸性官能团,其中羧基官能团的含量达到 0.38 mmol/g。而根据以往的研究工作^[8]可知,活性炭对重金属类物质的化学吸附主要通过羧基类酸性官能团之间的反应

进行。

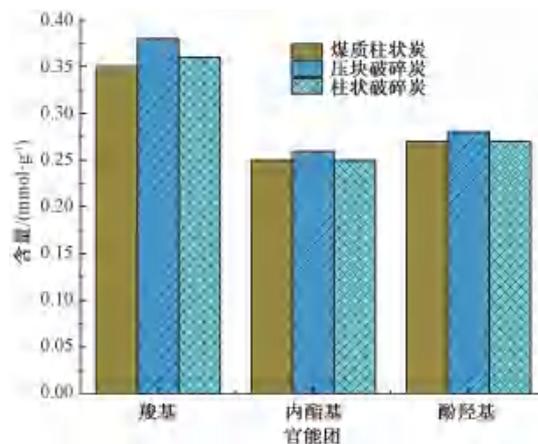


图 2 水厂所用活性炭颗粒的典型官能团种类及含量

Fig. 2 Typical Functional Group Types and Contents of Activated Carbon Granules in WTP

2.2 炭池流向及水源水质对活性炭灰分累积的影响

活性炭池的流向不仅影响着活性炭颗粒粒径,且下向流活性炭池一般置于砂滤池之后,而上向流活性炭池置于沉淀池之后、砂滤池之前,因此,其进水水质也存在一定程度的差别。针对相同水源(长江南京段水源地),分别考察了采用上向流和下向流活性炭池的两个水厂活性炭灰分累积情况,结果如图 3 所示。可以看出,上向流活性炭池内活性炭的灰分累积速率显著高于下向流活性炭池,且至第 7 年时的灰分累积量也高于下向流活性炭池(分别为 21.70% 和 20.35%)。原因主

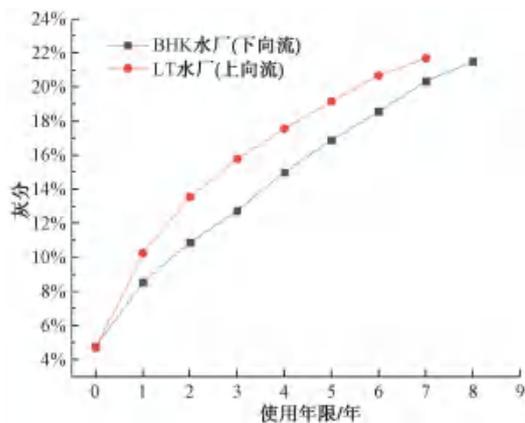


图 3 活性炭池流向对活性炭颗粒灰分累积的影响

Fig. 3 Effect of Flow Direction of Activated Carbon on Ash Accumulation of Activated Carbon Granules

要在于两个方面:1)上向流活性炭池一般采用较小粒径(12~40目)的活性炭,从而具有更大的比表面积以及与水中物质的接触机率,水中物质可以快速地活性炭孔隙内完成吸附、附着过程;2)活性炭池进水水质是影响灰分累积速率和累积量的重要因素。根据两个水厂一般运行条件下活性炭池的进水水质情况对比(表2)可以看出,上向流活性炭池进水中的浊度、Al等指标明显高于下向流活性炭,部分无机成分和铝离子会被活性炭颗粒吸附或附着,并在导致活性炭颗粒的灰分含量明显增加;沉后水中残留的微小絮体也会促进灰分在活性炭颗粒上的累积。

表2 上向流和下向流活性炭池进水典型水质参数对比
Tab. 2 Comparison of Typical Inflow Quality Parameters of Upflow and Downflow BAC Filter

水厂名称	炭池流向	浊度/ NTU	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	Al/ (mg·L ⁻¹)
LT 水厂	上向流	0.8~1.5	1.8~2.1	0.1~0.3
BHK 水厂	下向流	0.1~0.3	1.6~1.9	0.05~0.07

2.3 活性炭颗粒上典型无机离子含量

为确定活性炭颗粒上累积灰分的主要成分,针对XL水厂使用10年的生物活性炭颗粒上附着的典型金属离子和非金属离子的种类及含量进行了测定,结果如图4、图5所示。

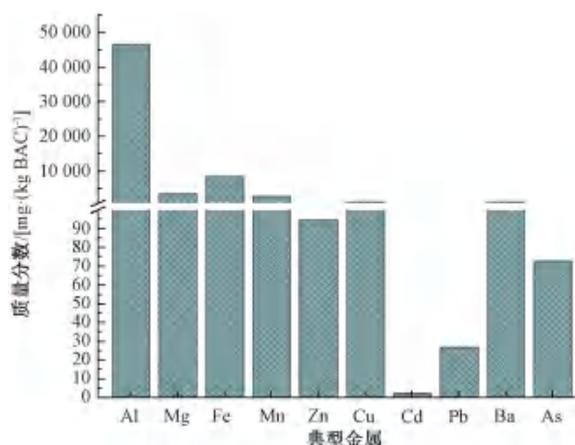


图4 10年活性炭颗粒典型金属的含量

Fig. 4 Content of Typical Metal of Activated Carbon in 10 Years

2.3.1 典型金属

图4的结果表明,活性炭颗粒上附着有以Al、Mg、Fe、Mn、Cu为典型代表的多种金属离子,其中

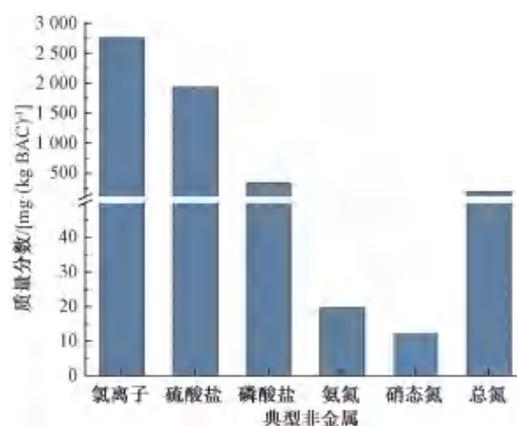


图5 10年活性炭颗粒典型非金属的含量

Fig. 5 Content of Typical Non-Metal of Activated Carbon in 10 Years

Al质量分数最高,达到了46.5 mg/(g BAC),重量占比为4.65%,这与水厂采用聚合氯化铝(PAC)作为混凝剂以及Al在炭池水中的残留有关。其他诸如Mg、Fe之类的元素含量也达到10 mg/(g BAC)左右,质量占比为1%左右。综合所测定的这些典型金属离子的含量,整体质量占比达到了10%左右。生物活性炭单元进水中上述元素含量均较低(含量最高的Al质量浓度也低于0.1 mg/L),说明生物活性炭对于金属元素具有一定的富集作用,后续安全处置和资源化利用中需要特别关注活性炭颗粒上所附着的有毒有害金属。

2.3.2 典型非金属

图5的结果表明,生物活性炭颗粒上也会集聚部分诸如氯离子、硫酸盐、磷酸盐之类的非金属离子,但其所占比例显著小于金属离子,这与活性炭颗粒与上述物质的相互作用较弱,结合位点较少有关。

综合对比生物活性炭颗粒上金属、非金属离子与灰分含量,可以看出活性炭颗粒上的灰分组成除了金属和非金属离子之外,还存在其他诸如SiO₂之类的惰性微细颗粒。

2.4 灰分含量对废旧活性炭再利用的影响

活性炭颗粒上灰分的累积导致活性炭的孔隙结构出现明显变化,影响其进一步的使用,以及更换下的废旧活性炭的资源化利用途径,具体表现在以下两个方面。

(1)对废旧活性炭再利用的影响

一般认为废旧活性炭虽然其碘值等吸附性指标相对较低(一般在200~300 mg/g以下),但其尚存

有一定的吸附能力,加之表面附着有大量的微生物,可以用于有机污染物含量较高时的净化处理。然而,根据图4、图5的典型无机元素分析结果,废旧活性炭颗粒上附着了大量的金属及非金属元素,其中附着能力较弱的部分元素在再利用过程可能会出现脱附,重新进入到水中,影响净化出水水质。纯水条件下,废旧活性炭颗粒上典型金属元素的脱附试验结果也证实了这类脱附现象的发生(图6)。

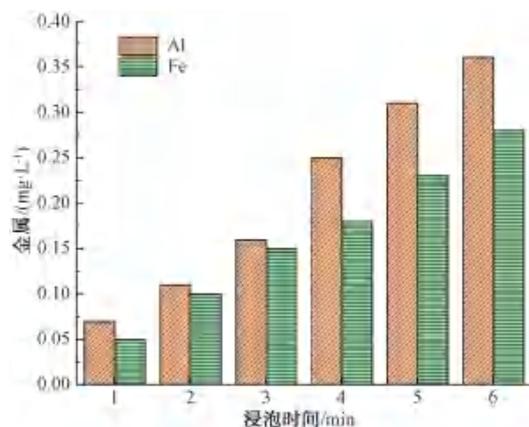


图6 10年活性炭在纯水中浸泡过程中金属释放

Fig. 6 Metal Release Activated Carbon in 10 years during Immersion in Pure Water

(2)对废旧活性炭热再生效益的影响

目前,针对水厂更换下废旧活性炭最常用的处置方式是通过活性炭厂进行热再生,而再生炭的质量直接决定着其经济效益和价值。结合热再生的基本过程及再生条件,活性炭颗粒上以灰分为典型代表的无机成分固结在活性炭孔隙内部无法通过热再生去除,导致再生炭的吸附效能恢复率明显下降^[4,11];而灰分成分中所含有的金属氧化物则可能在再生过程中起到催化氧化的作用,导致活性炭颗粒成分过度氧化分解和孔隙结构的破坏,对再生炭的性能和得率造成明显的负面影响。

(3)对水厂生物活性炭失效判定依据优化的参考

生物活性炭的净化效能也随着使用年限的呈现一定的下降趋势,并在某一时间节点无法满足水厂使用要求,需要进行更换或再生^[12]。目前,针对水厂生物活性炭的失效判别并没有完全统一的标准,河海大学与合作单位基于“十二五”水专项的研究成果先后编制了《江苏省城镇供水厂生物活性炭失效判别标准和更换导则》(苏建城[2016]493号)、

《城镇供水厂生物活性炭失效判别和更换标准》(DB 32/T 4245—2022),主要依据净化效能和强度等性能指标对活性炭失效判别方法进行了规范,但并没有充分考虑废旧活性炭再利用等方面的内容。由活性炭颗粒上灰分累积的过程可以看出,灰分含量与其使用时间呈现一定的相关关系,因此,后续实践中应进一步将更换下的废旧活性炭的再利用作为失效判定依据的关注点之一,将有利于推动我国的“双碳”目标和战略的实现。

3 结论

1)生物活性炭在使用过程中存在比较明显的灰分累积现象,使用10年可累积到25%左右;

2)活性炭类型对灰分的累积具有一定的影响,孔容较大、酸性官能团含量较高的炭型更利于灰分的累积;

3)活性炭池的流向影响灰分的累积,上向流活性炭使用过程灰分的累积速率较大,累积量较高;

4)灰分主要来源于水中存在的微量金属离子、非金属离子和无机惰性微细颗粒;

5)部分附着能力较弱的元素在活性炭再利用过程可能会出现脱附,影响净化效能。

参考文献

- [1] 陈文. 饮用水深度处理中生物活性炭失效判定标准及工况优化研究[D]. 南京:河海大学, 2015.
- [2] 于梦瑶. 生物活性炭工艺对水中锰的控制效能、强化途径及应用研究[D]. 南京:河海大学, 2021.
- [3] 陈诗琦, 刘成, 沈海军, 等. 水厂失效生物活性炭的更换策略探讨[J]. 中国给水排水, 2020, 36(17): 49-56.
- [4] 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.
- [5] 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, 55(2): 9-16.
- [6] 刘嘉琪. 水厂生物活性炭典型污染物附着规律研究及脱附方法优化[D]. 南京:河海大学, 2022.
- [7] 朱锋, 胡星云, 郭照冰, 等. 快速消解测定土壤中金属元素[J]. 分析实验室, 2019, 38(8): 906-911.
- [8] GUO H M, LIU Z Y, DING S S, et al. Arsenate reduction and mobilization in the presence of indigenous aerobic bacteria obtained from high arsenic aquifers of the Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. Environmental Pollution, 2015, 230: 50-59. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.03.034.
- [9] CHEN Z, PAN X H, CHEN H. Biomineralization of Pb(II) into Pb-hydroxyapatite induced by *Bacillus cereus* 12-2 isolated from

- Lead-Zinc mine tailings [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301: 531–537. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.023.
- [10] AHMED T, NOMAN M, IJAZ M et al. Current trends and future prospective in nanoremediation of heavy metals contaminated soils: A way forward towards sustainable agriculture[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 227: 112888. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112888.
- [11] 聂欣,陈祁,郑世元,等. 煤基失效生物活性炭热再生过程行为特性研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(s2): 1050–1057.
- [12] 刘嘉琪,胡侃,庄星宇,等. 自来水厂失效生物活性炭再生技术研究及应用分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(10): 25–31.
-
- (上接第 64 页)
- [7] 肖倩. 长期运行生物活性炭滤池滤料性能变化与失效因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] 王昊宇. 臭氧氧化工艺对饮用水中溴代消毒副产物生成的影响[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [9] MORENO-CASTILLA C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials [J]. *Carbon*, 2004, 42(1): 83–94. DOI: 10.1016/j.carbon.2003.09.022.
- [10] MOONA N, MURPHY K R, BONDELIND M, et al. Partial renewal of granular activated carbon biofilters for improved drinking water treatment [J]. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2018, 4(4): 529–538. DOI: 10.1039/C7EW00413C.
- [11] CORWIN C J, SUMMERS R S. Adsorption and desorption of trace organic contaminants from granular activated carbon adsorbents after intermittent loading and throughout backwash cycles [J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 417–426. DOI: 10.1016/j.watres.2010.08.039.
- [12] 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.
- [13] 江苏省市场监督管理局. 城镇供水厂生物活性炭失效判别和更换标准: DB 32/T 4245—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [14] 上海市市场监督管理局. 净水厂用煤质颗粒活性炭选择、使用及更换技术规范: DB 31/T 451—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [15] 张雪,蒋福春,林涛. 南方某水厂活性炭滤池滤料更换评价及管理应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(7): 89–95, 120.
- [16] 马仁杰,倪佳豪,王盛,等. 青草沙水源水厂生物活性炭滤池滤料更换的思考[J]. *净水技术*, 2021, 40(s1): 57–59, 264.
- [17] STEDMON C A, BRO R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial; Fluorescence-PARAFAC analysis of DOM [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, 6(11): 572–579. DOI: 10.4319/lom.2008.6.572.
- [18] COBLE P G. Marine optical biogeochemistry: The chemistry of ocean color [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(2): 402–418. DOI: 10.1021/cr050350+.
- [19] 王姝,秦纪洪,谢冰心,等. 川西高寒土壤 DOM 荧光特征研究[J]. *四川农业大学学报*, 2020, 38(3): 280–289, 298.
- [20] 高连敬,杜尔登,崔旭峰,等. 三维荧光结合荧光区域积分法评估净水厂有机物去除效果[J]. *给水排水*, 2012, 48(10): 51–56.
- [21] KOROTTA-GAMAGE S M, SATHASIVAN A. Potential of a biologically activated carbon treatment to remove organic carbon from surface waters [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 82–90. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.05.025.
- [22] ZHANG W, LI L, WANG D, et al. Characterizing dissolved organic matter in aquatic environments by size exclusion chromatography coupled with multiple detectors [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 1191: 339358. DOI: 10.1016/j.aca.2021.339358.
- [23] 郭建宁,陈磊,张锡辉,等. 臭氧/陶瓷膜对生物活性炭工艺性能和微生物群落结构影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(3): 697–704.
- [24] GERRITY D, ARNOLD M, DICKENSON E, et al. Microbial community characterization of ozone-biofiltration systems in drinking water and potable reuse applications [J]. *Water Research*, 2018, 135: 207–219. DOI: 10.1016/j.watres.2018.02.023.
- [25] 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, 54(5): 39–41.
- [26] 戚聿秒. 生物活性炭更换试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
- [27] 陶辉,厉彦辉,周伟青,等. 针对低温期有机物去除率低的生物活性炭更换探究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(9): 33–38.
- [28] VERA G A D, LAUDERDALE C, ALITO C L, et al. Using upstream oxidants to minimize surface biofouling and improve hydraulic performance in GAC biofilters [J]. *Water Research*, 2019, 148: 526–534. DOI: 10.1016/j.watres.2018.10.085.
- [29] 刘世婷. 消毒剂反冲洗对活性炭滤池有机物降解及微生物影响[D]. 北京: 清华大学, 2019.