

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.10.004

# 自来水厂失效生物活性炭再生技术研究及应用分析

刘嘉琪<sup>1</sup>, 胡侃<sup>2</sup>, 庄星宇<sup>3</sup>, 刘成<sup>1</sup>, 王慕<sup>3</sup>, 张晶晶<sup>3</sup>

(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 214000; 3. 无锡市市政公用环境检测研究院有限公司, 江苏 无锡 214063)

**摘要:** 臭氧-生物活性炭( $O_3$ -BAC)工艺在我国水厂应用范围较广,部分水厂已进入活性炭更换或再生阶段,大量废弃活性炭的合理处置成为研究热点。对失效活性炭进行再生,可以有效恢复吸附性能、实现循环利用,具有显著的社会经济效益。总结了自来水厂失效生物活性炭(BAC)再生技术的研究及应用现状,包括再生周期、再生方法和再生应用成果。在此基础上,结合目前“碳达峰”的大背景,从经济性、环保性、针对性等角度探讨了现有活性炭再生工艺存在的问题,并对后续发展方向进行了展望。

**关键词:** 饮用水; 生物活性炭; 失效; 再生

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0025-07

## Research and Application Analysis of Regeneration Technology for Ineffective Biological Activated Carbon in Waterworks

LIU Jia-qi<sup>1</sup>, HU Kan<sup>2</sup>, ZHUANG Xing-yu<sup>3</sup>, LIU Cheng<sup>1</sup>, WANG Mu<sup>3</sup>,  
ZHANG Jing-jing<sup>3</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Wuxi Water Group Co. Ltd., Wuxi 214000, China; 3. Wuxi Municipal Public Environment Inspection and Research Institute Co. Ltd., Wuxi 214063, China)

**Abstract:** Ozone-biological activated carbon ( $O_3$ -BAC) process has been widely used in China. At this stage, the reasonable disposal of waste activated carbon has been focused on by the water treatment industry when facing a large amount of activated carbon replacement or regeneration. The regeneration of ineffective activated carbon can effectively recover the adsorption performance of BAC and realize recycling, which has significant social and economic benefits. The research and application status of the ineffective biological activated carbon (BAC) regeneration technology were summarized, including the regeneration cycle, regeneration methods and application results of BAC. In addition, the existing problems of the current regeneration process were discussed for the loss of economy, environmental protection and pertinence. The future direction was also be prospected combined with the current background of “carbon emission peak”.

**Key words:** drinking water; biological activated carbon; ineffective; regeneration

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

通信作者: 刘成 E-mail: 107489860@qq.com

目前臭氧-生物活性炭技术在我国应用广泛,截至2019年,我国增设深度处理单元的水厂有70%以上采用了臭氧-生物活性炭工艺<sup>[1]</sup>。臭氧-生物活性炭工艺明显提升了水厂处理出水水质,但随着使用年限的增加,生物活性炭(BAC)的净化效能呈现弱化趋势,到特定时间节点需要进行更换或再生。目前国内大部分水厂采用更换的方式,但更换下来的生物活性炭的安全处置及资源化利用已成为研究热点之一。由于国内水厂普遍采用了较长的更换周期,更换下的失效BAC在长期使用过程中吸附或附着了大量物质,具体包括微量有机污染物、微生物代谢产物、难降解有机物、重金属以及无机杂质等,导致其在常规的焚烧或填埋处理中会产生二噁英、呋喃类、氟废气、有毒金属等剧毒副产物,污染大气、土壤和天然水体<sup>[2]</sup>。此外,失效的BAC富集了大量微生物及原生动物,也存在致病微生物、抗生素抗性微生物以及抗性基因的累积,对生态环境和人类健康造成潜在威胁。目前,我国用于水处理领域的活性炭量高达 $17 \times 10^4 \text{ t}$ <sup>[3]</sup>,在“碳达峰”背景下,针对失效BAC进行合理的再生处置并资源化利用,可以节省大量的煤炭资源,为水处理行业的“碳中和”提供良好支撑。

## 1 水厂生物活性炭再生技术及其应用现状

活性炭在水处理领域应用具有较长的历史,针对吸附用活性炭的再生研究和应用也较为成熟。再生通常是通过物理、化学或生物的方法实现活性炭所吸附污染物的脱附、恢复活性炭吸附性能的过程。相对于吸附用活性炭,由于使用年限普遍较长,失效BAC在污染物含量(尤其是无机物质)、自身性状等方面具有较明显的特点,再生方法优化及评估方面具有一定差异。以下从生物活性炭再生周期、再生方法以及再生效能合理评价等方面分别予以论述。

### 1.1 再生周期的确定及影响因素

BAC的再生周期是影响水厂处理成本和出水水质的关键因素,并会对BAC的再生效能产生影响。目前,在再生周期确定方面尚没有完全一致的结论。由于BAC通过物理吸附和生物降解来去除污染物,显著延长了使用年限,因此部分水厂以炭池或水厂出水水质作为确定BAC是否需要更换/再生的依据。考虑到各水厂针对 $\text{O}_3$ -BAC设计的功能

定位和运行条件存在差异,在再生周期的选择上存在一定的差别:多数水厂根据运行经验,以3~4年(活性炭碘值降至600 mg/g左右)为一般再生周期,以保障水厂出水水质<sup>[4]</sup>;少数水厂考虑到炭池的整体抗冲击负荷能力,在投入使用3年内就对BAC进行再生<sup>[5]</sup>;其他水厂则采用了更长的更换或再生周期。上海市某水厂运行7年的BAC仍能保持稳定的有机物去除率,尚未考虑活性炭再生<sup>[6]</sup>。澳大利亚Bendigo水厂BAC在10年内未进行再生,但对MIB的去除率仍能稳定在80%<sup>[7]</sup>。需要注意的是,使用年限过长会增加BAC的再生难度,降低再生效率,而较短的再生周期有利于活性炭性能的恢复,且再生得率也相对较高<sup>[7]</sup>。有研究表明,从保持再生炭质量的角度考虑,BAC的最佳再生周期宜控制在一年半以内,最长不超过两年。因此,BAC再生周期应综合考虑净水效能、处理成本、再生炭性能恢复及质量损失等因素来统筹确定。

### 1.2 失效BAC的典型再生方法

活性炭再生方法主要可分为脱附再生和分解再生两类。脱附再生即通过破坏活性炭、吸附质和溶剂三者之间的吸附平衡来实现物质脱附,包括温度、压力的调节(变温变压脱附再生),更强吸附剂的直接置换,吸附质化学性质的调整(溶剂再生、超临界流体再生)等。分解再生即通过高温分解、化学反应、生物降解等方法实现活性炭上吸附污染物的分解或脱附,从而达到恢复吸附性能的目的,包括热再生、电热再生、电化学再生、物理波再生(超声再生、微波再生)、氧化再生(臭氧、湿式催化氧化、光催化氧化)等。考虑到失效BAC的特殊性,目前应用和研究的主体再生方法主要有热再生、电热再生、电化学再生、微波再生、超声波再生等5种。

#### ① 热再生

热再生法是目前水厂实际工程实践中应用最普遍的方法,可以显著恢复活性炭的碘值、亚甲基蓝值等吸附性指标(一般在80%以上),但也会导致活性炭机械强度的降低,再生活性炭的灰分含量也较新炭明显增加<sup>[8]</sup>。果园桥水厂利用热再生工艺,将使用年限为3~4年的生物活性炭恢复至新活性炭的90%以上,而再生费用只有新炭的1/3左右<sup>[9]</sup>。然而,对于使用年限较长的生物活性炭,热再生对碘值等指标的恢复率降低至80%左右,且多次(2次以上)热再生后,活性炭的机械强度下降至80%以

下,难以满足《生活饮用水净水厂用煤质活性炭》(CJ/T 345—2010)对净水用煤制活性炭的强度要求(90%)<sup>[10]</sup>。此外,热再生还存在活性炭损耗大、再生成本高、再生后活性炭价值低等问题,尤其是针对使用年限较长的BAC,因此需要开发新的BAC再生技术。

### ② 电热再生

电热再生本质上属于热再生方式,其利用活性炭的导电性产生焦耳热,进行加热再生。电热再生对活性炭吸附指标的恢复效果较好,恢复率在90%以上<sup>[11]</sup>。但对于失效BAC而言,电热再生对BAC再生的效果不稳定、炭损耗量波动较大,主要受BAC表面生物膜的影响(形成绝缘层)。钟俊锋<sup>[2]</sup>对实际水厂的BAC进行电热再生,在300℃动态干燥预处理后低压引弧再生,再生后BAC碘吸附值、亚甲基蓝值可分别恢复至91.3%、93.5%。目前,针对BAC的电热再生主要集中在实验室研究阶段。

### ③ 电化学再生

电化学再生本质为氧化还原反应,其对活性炭的吸附能力具有较好的恢复效果(一般可达90%以上),且多次再生仍能保持较高效率。但电化学再生技术存在能耗较高、再生时间较长的问题<sup>[12]</sup>。Ferrández-Gómez等<sup>[13]</sup>对西班牙某水厂使用三年的废弃活性炭进行电化学再生,活性炭比表面积BET值恢复率可达到96%。需要注意的是,电化学再生过程中易形成有毒有害副产物,在对吸附污染物成分复杂的失效BAC进行电化学再生实际运用时,需考虑二次污染控制问题。

### ④ 微波再生

微波再生是一种新型的热再生方法,通过微波将极性吸附质极化、磁化,使之出现扰动并摩擦形成热能,从而使吸附物受热分解和脱附。微波再生对活性炭的再生率可达90%以上<sup>[14]</sup>。鹊华水厂对使用一年的BAC进行“溶剂-微波”联合再生处理后,碘吸附值恢复至97.2%<sup>[15]</sup>。微波再生升温迅速、所需设备体积小,但微波选择性加热的特性使其更适于极性吸附物的再生,因此需要提前界定失效BAC吸附污染物种类。此外,受微波穿透深度的限制,其实际工程运用模式尚需进一步优化。

### ⑤ 超声波再生

作为一种新型再生方式,超声波再生近年来针对失效BAC的再生研究和应用受到广泛关注。相

关研究表明,超声波所产生的空化和氧化作用不仅可以有效分解吸附物质、恢复活性炭吸附性能,还可以在在一定程度上降低生物膜厚度、提高微生物降解活性<sup>[16]</sup>。超声波再生处理可将使用7.5年的BAC的碘吸附值由300 mg/g恢复至600 mg/g,且生物活性明显增强(脱氢酶活性由4.50 mgTF/gBAC增加到9.13 mgTF/gBAC)<sup>[17]</sup>。实际水厂BAC超声波再生结果表明,低频超声波(40 kHz、115 μW/cm<sup>3</sup>)对BAC的吸附性能和生物活性均有一定的提高,生物活性在超声处理5 min后达到最大值,碘值、亚甲基蓝值分别由480、100 mg/g增加到680、133 mg/g,活性炭损耗量可控制在0.7%以内<sup>[18]</sup>。

可以看出,相较于其他再生方法,超声波再生具有同步恢复BAC吸附性能和强化生物降解效能的优势,且具有再生过程能耗低、作用时间短、炭质量损失小等优势。目前,刘成等已开发适用于实际水厂炭池构造的3类再生方法和装置<sup>[19-21]</sup>,后续经过进一步的实际应用验证和优化,即可在实际工程中应用推广。

## 1.3 失效BAC实际再生效果及评价

近年来已有针对BAC再生的研究和应用,但大部分集中于实验室或小试研究,目前水厂主要采用热再生方法来再生失效BAC。已报道的水厂BAC再生案例(见表1)主要集中于我国东部地区较早采用臭氧-生物活性炭工艺的水厂,并得出了部分相对确定的结果:

① 热再生可以较好地恢复BAC的吸附效能,恢复率随使用年限增加呈现降低的趋势。热再生能使BAC吸附的有机物挥发或炭化,形成新的孔隙和活化点,恢复BAC的吸附性能。但难以去除吸附在炭孔内的无机成分,微孔内灰分的累积是恢复率随使用时间延长而降低的主要原因。

② 热再生明显降低了活性炭的机械强度,且使用年限和再生次数均对活性炭强度降低产生负面影响。热再生过程中炭粒间剧烈摩擦、碰撞,造成机械强度的下降,使用年限长、再生次数多的活性炭耐磨性差,其再生后强度下降也更明显。

③ 热再生活性炭的得率较低,介于50%~80%之间。由于BAC使用年限相对较长,长期反洗和臭氧氧化过程导致滤料强度下降,且BAC附着生物膜及灰分物质的存在也在一定程度上导致再生质量损失,因此BAC热再生损耗量远高于吸附用活



性炭。

④ 热再生活性炭再利用效能较新活性炭明显降低,使用年限也明显缩短。再生炭对有机物的控制优势仅能维持一段时间,且吸附指标下降速率明显快于新活性炭。即使吸附能力恢复至新炭同等水平,再生炭的使用寿命及抗冲击负荷能力也远不及新活性炭。

可以看出,目前针对失效生物活性炭在实际工程中应用的热再生方法存在的问题,需要探讨新型的再生方法以及完整的再生评价方法。

表 1 自来水厂生物活性炭再生案例

Tab.1 Regeneration cases of ineffective biological activated carbon in waterworks

| BAC 性质                  |        |       | BAC 性能指标                   |                               |                      |                     | 炭损失率/% | 再生炭池运行情况               |
|-------------------------|--------|-------|----------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|--------|------------------------|
| 来源                      | 使用年限/a | 类型    | 碘吸附值/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 亚甲基蓝吸附值/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 强度/%                 | 灰分/%                |        |                        |
| 桐乡市果园桥水厂 <sup>[5]</sup> | 3.5    | 柱状炭   | 再生后:920                    | 再生后:180                       | 再生前:95.2<br>再生后:93   | 再生后:14.9            | 20     | 半年内有效去除有机物             |
| 苏州市某水厂 <sup>[22]</sup>  | 3      | 柱破炭   | 再生前:483<br>再生后:838         | 再生前:130<br>再生后:212            | 再生前:92<br>再生后:90     |                     | 30     | 两年内碘吸附值迅速下降            |
| 太湖流域某水厂 <sup>[23]</sup> | 3.5    | 柱状炭   | 再生前:410<br>再生后:885         | 再生前:98<br>再生后:217             | 再生前:93.8<br>再生后:90.5 | 再生前:13.2<br>再生后:8.1 |        | 两年内有效去除有机物,氨氮去除效果无明显提高 |
| 上海市某水厂 <sup>[24]</sup>  | 5      | 酸洗破碎炭 | 再生前:250<br>再生后:550         |                               |                      |                     | 50     | 过水量降低,水头损失增加           |
| 太湖流域某水厂 <sup>[10]</sup> | 3      | 柱状炭   | 再生前:400<br>再生后:900         | 再生前:100<br>再生后:220            | 再生前:93.9<br>再生后:90.8 | 再生前:13.1<br>再生后:8.3 |        | 有效去除有机物、消毒副产物          |
|                         | 5      | 柱状炭   | 再生前:380<br>再生后:810         | 再生前:80<br>再生后:200             | 再生前:89.5<br>再生后:87.9 | 再生前:15.3<br>再生后:9.5 |        |                        |

2 BAC 再生应用及研究中的典型问题分析

失效 BAC 的安全处置及资源化利用已经开始受到关注,但在其实际应用及研究中尚存在的问题,需要进一步完善。

2.1 BAC 再生性能评价指标

再生性能评价指标是指评价 BAC 再生后效能恢复程度的指标。目前常用的评价方法主要包括韦伯穿透曲线法、吸附等温线法和吸附试验法,这三种方法皆是以吸附指标作为评价标准。然而,现有研究表明吸附性指标与 BAC 处理效能之间的相关性较差。BAC 作为一种吸附-生物降解协同作用的处理工艺,其失效的根本原因在于吸附能力的饱和以及 BAC 微生物活性的降低,仅以吸附指标的恢复率判定再生效果不全面。此外,活性炭的强度也是再生性能评价时要考虑的指标。再生炭强度不达标会导致后续使用中炭粒的破碎及滤池跑炭、水头损失增大、BAC 使用寿命缩短等问题。目前尚缺少对失效 BAC 再生性能评价的合理指标,应综合考量活性炭吸附性能、微生物指标、机械强度等,在此基础上参考美标(AWWB 605—2013)和欧标(BS EN 12915—2—2009)中对再生活性炭技术指标的

规定,构建合理的再生评判指标。

2.2 BAC 再生方法

如前所述,失效 BAC 与吸附用活性炭在使用年限、应用方式、失效判定及再生目标上都存在着明显差异,不宜直接采用常规的活性炭再生方法。失效 BAC 上附着的物质主要包括难生物降解小分子有机成分、金属氧化物等无机成分以及凋亡生物膜系统,高效脱附上述物质即可实现 BAC 的再生。不同类型的物质可通过不同类型的手段进行脱附:对于物理吸附物质,通过改变温度、压力、浓差、离子浓度等简单方式即可实现物质脱附。林明利<sup>[25]</sup>研究表明在去离子水环境中(浓差驱动),活性炭上氯苯的脱附率高于 40%。而针对化学吸附物质,需要输入较高的能量来打破形成的离子和共价键,如 Smolin 等<sup>[26]</sup>以溶剂(碱性溶液)、低温再生联合的方法提高活性炭上物质脱附效率。此外,BAC 生物膜是失效 BAC 区别于吸附用活性炭的关键,其在再生过程中值得重点关注:生物膜的绝缘特性和孔隙堵塞效应,都是影响脱附再生效率的重要因素;另一方面,对 BAC 微生物进行“改造”,强化 BAC 的生物降解能力,也是对 BAC 实现再生的一种方式,而近

年来被关注的超声波再生技术则从增强BAC生物活性的角度有效实现BAC的再生。因此,结合BAC颗粒上的污染物种类,开发针对性强、低成本的再生技术或者组合再生技术,有利于实现BAC的高效再生和资源化利用。

### 2.3 再生过程的二次污染控制问题

BAC再生过程中产生的二次污染主要包括废液、废气及有毒有害中间产物三个方面。废液主要在溶剂再生及电化学再生中产生,包括酸性、碱性、无机废液以及有机废液等,需要进行后续中和、蒸馏或生化处理;废气主要在热再生、微波再生过程中产生。热再生尾气中主要包括二氧化碳、氮硫氧化物以及氯化氢等,需要在废气喷淋净化塔进行稀碱性溶液喷淋净化处理;而微波再生尾气中主要有未经反应的吸附物质以及完全反应的酸性气体,需要先进行尾气的分离和后续处理<sup>[27]</sup>。总之,针对BAC再生过程副产物进行安全处置,是再生技术的重要组成部分,需要充分重视。

### 2.4 再生方法及过程的技术经济分析

再生技术用于实际工程中需要预先进行合理的技术经济分析。BAC再生技术经济分析可以从再生过程成本计算和再生炭回用价值评估两个角度展开。

再生成本计算除考虑能耗外,因BAC再生损失而补充新炭的费用同样需要考虑,这部分费用通常占再生总成本的20%~40%<sup>[28]</sup>。此外,再生过程中的采集、运输、回填等步骤也需要额外的花费。英国、日本的大型水厂多采用再生炉进行饱和炭厂内再生,此时再生设备的建设及运维费用也需纳入单次再生成本进行计算。

再生炭回用价值评估,可以从净水效能和使用寿命两方面进行经济折算。再生炭虽吸附能力得到一定程度的恢复,但其后续使用优势多体现在对有机物和消毒副产物的控制上,而不同水厂对生物活性炭单元的定位有所区别,应建立目标污染物去除效能与再生成本之间的关联,合理评判再生技术的经济性。此外,再生炭因强度损失相比于新活性炭而言使用寿命缩短,需根据再生炭性能衰减趋势对其使用年限进行预测,在使用周期内进行年均成本折算,以判定再生价值。

### 2.5 无机离子的影响

BAC吸附的无机离子对其再生产生一定程度

的负面影响,主要包括:①再生炭灰分含量显著增加;②炭损耗质量增加。无机离子是灰分的主要成分,使用2~6年的活性炭,其灰分含量达到10%~14%,明显高于新炭(4.8%)<sup>[29]</sup>。BAC上累积的无机金属离子包括钙、铝、铁、锰、镁等,其含量及种类与原水水质和净水工艺直接相关,且会随使用年限而累积<sup>[30]</sup>。此外,无机金属离子的存在是导致BAC再生质量损失的重要因素。金属离子在高温条件下能催化活化反应,从而导致活性炭过度活化带来质量损失。其催化作用具体包括:降低临界温度、加速反应进程以及促进氧传输<sup>[31]</sup>。因此,可以考虑在再生前增设去除无机离子的预处理步骤。采用酸性溶液预处理,即溶剂-热再生法能有效减小无机离子对BAC再生的不利影响。

### 3 生物活性炭再生技术的发展方向和展望

结合自来水厂失效BAC的特点以及现有再生技术存在的问题,参考国内外最新研究进展,生物活性炭再生技术尚需在以下几个方面开展进一步研究:

① 再生炭功能及后续利用的合理定位:再生炭作为一种吸附剂,可用于污水处理、尾气控制、土壤修复等多个领域,其后续使用途径决定了前期再生目标和再生工艺,实现“再生”与“使用”的有效衔接有利于经济、安全、高效地进行失效BAC的资源化利用。

② 针对BAC再生进行技术创新:失效BAC具有一定的特殊性,目前国内外关于吸附用活性炭的再生技术难以直接套用或引进,结合失效BAC特性开发系列再生利用技术、优化再生技术应用模式,有利于失效BAC的资源化利用、推动饮用水处理安全保障。

③ 针对BAC使用和更换、再生过程进行碳排放计算:按照江苏省生态环境厅最新发布的《关于将排污单位活性炭使用更换纳入排污许可管理的通知》要求,自来水厂应从生产制造、交通运输、设施运营电耗与发电过程以及再生能耗等途径对BAC在整个运行周期内的碳排放量进行计算,并据此做出相应调整,以满足碳的达标排放。

### 参考文献:

- [1] 中国城镇供水排水协会. 中国城镇水务行业发展报告[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.

- China Urban Water Association. China Urban Water Industry Development Report [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [2] 钟俊锋. 水处理饱和生物活性炭低压电弧再生及其热解特性研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2019.  
ZHONG Junfeng. Experimental Study on Low Voltage Pilot Arc Regeneration and Its Pyrolysis Characteristics of Saturated Biological Activated Carbon in Water Treatment [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019( in Chinese).
- [3] 解炜. 我国煤基活性炭的应用现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 16-23.  
XIE Wei. Application status and development trend of coal-based activated carbon in China[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 16-23( in Chinese).
- [4] 黄铸, 周婷. 自来水厂用颗粒活性炭再生的有关问题探讨[J]. 中国给水排水, 2013, 29(24):20-22.  
HUANG Zhu, ZHOU Ting. Discussion on issues related to regeneration of granular activated carbon in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(24): 20-22( in Chinese).
- [5] 张捷, 沈利清, 朱慧, 等. 再生颗粒活性炭在果园桥水厂的应用实践[J]. 给水排水, 2008, 34(1): 50-53.  
ZHANG Jie, SHEN Liqing, ZHU Hui, *et al.* Practical application of reactivated granule activated carbon in Guoyuanqiao Waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(1): 50-53( in Chinese).
- [6] 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(增刊):74-78.  
TENG Ying. Operation performance of activated carbon filter in water treatment plant with different carbon exchange methods [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(S1): 74-78( in Chinese).
- [7] 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(增刊):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).
- [8] LIU C, LI C C, SHAN Y W, *et al.* Comparison of two typical regeneration methods to the spent biological activated carbon in drinking water [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(14): 16404-16414.
- [9] 崔洪, 齐嘉豪, 张重杰. 对失效活性炭热再生过程的思考[J]. 工业水处理, 2020, 40(9):19-22, 29.
- CUI Hong, QI Jiahao, ZHANG Zhongjie. Insights into the thermal regeneration of used activated carbons [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(9): 19-22, 29 (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.  
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).
- [11] 余银明. 活性炭电热再生技术机理性研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2015.  
YU Yinming. Mechanism Study on Electro-thermal Regeneration of Activated Carbon [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015(in Chinese).
- [12] MCQUILLAN R V, STEVENS G W, MUMFORD K A. The electrochemical regeneration of granular activated carbons: a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 355: 34-49.
- [13] FERRÁNDEZ-GÓMEZ B, RUIZ-ROSAS R, BEAUMONT S, *et al.* Electrochemical regeneration of spent activated carbon from drinking water treatment plant at different scale reactors [J]. Chemosphere, 2021, 264: 128399.
- [14] WU D J, LI S J, WANG N. Microwave regeneration of biological activated carbon [J]. Journal of Advanced Oxidation Technologies, 2017, 20(1): 20160174.
- [15] 李淑杰. 水厂饱和生物活性炭再生试验研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2016.  
LI Shujie. Recycling of Biological Activated Carbon Which is Saturated in Water Plant's Biological Activated Carbon Filter [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016(in Chinese).
- [16] MA Y Z, ZHANG X X, WEN J Y. Study on the harm of waste activated carbon and novel regeneration technology of it [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 769(2):134-154.
- [17] LIU C, SUN Z H, CHEN W. Variation in the biological characteristics of BAC during ultrasonic regeneration [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 61: 104689.
- [18] 刘成, 赵美琦, 孙哲豪, 等. 低频超声对生物活性炭的再生效能[J]. 中国给水排水, 2018, 34(1): 36-41.  
LIU Cheng, ZHAO Meiqi, SUN Zhehao, *et al.* Regeneration of biological activated carbon by low-frequency ultrasound [J]. China Water & Wastewater,

- 2018, 34(1): 36-41( in Chinese).
- [19] 刘成, 陈卫, 王东赢, 等. 一种用于失效生物活性炭的原位再生装置: 201310358557.8[P]. 2013-11-20.  
LIU Cheng, CHEN Wei, WANG Dongying, *et al.* In Situ Regeneration Device for Deactivated Biological Activated Carbon: 201310358557.8[P]. 2013-11-20( in Chinese).
- [20] 刘成, 陈卫, 王东赢, 等. 一种用于失效生物活性炭的原位再生方法: 201310358576.0[P]. 2013-12-25.  
LIU Cheng, CHEN Wei, WANG Dongying, *et al.* A Method for *in Situ* Regeneration of Deactivated Biological Activated Carbon: 201310358576.0[P]. 2013-12-25( in Chinese).
- [21] 刘成, 陈卫, 王东赢, 等. 一种用于失效生物活性炭的移动版式原位再生装置: 201310358607.2[P]. 2013-11-20.  
LIU Cheng, CHEN Wei, WANG Dongying, *et al.* A Mobile Vehicle Type *in situ* Regeneration Device for Deactivated Biological Activated Carbon: 201310358607.2[P]. 2013-11-20( in Chinese).
- [22] 刘奔逸, 张兰芳, 陈健. 苏州某水厂活性炭运行现状[J]. 给水排水, 2015, 41(12): 19-21.  
LIU Benyi, ZHANG Lanfang, CHEN Jian. Current operation situation of active carbon adsorption process in a water plant, Suzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(12): 19-21(in Chinese).
- [23] 蒋福春, 董坚, 华伟, 等. 再生活性炭在太湖流域某水厂中的应用实践[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9): 35-38.  
JIANG Fuchun, DONG Jian, HUA Wei, *et al.* Application of regenerated activated carbon in a waterworks in Taihu basin [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(9): 35-38(in Chinese).
- [24] 王盛. 上海某水厂净水工艺中活性炭应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
WANG Sheng. Application Research of Activated Carbon in Water Treatment Process in a Water Plant in Shanghai[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [25] 林明利. 给水处理中氯苯在活性炭上脱附规律研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(2): 46-50.  
LIN Mingli. The law of chlorobenzene desorption from activated carbon [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(2): 46-50( in Chinese).
- [26] SMOLIN S K, VASENKO L V, ZABNIEVA O V. Low-temperature alkaline desorption of 2-nitrophenol from activated carbon under static conditions [J]. Journal of Water Chemistry and Technology, 2021, 43(1): 24-40.
- [27] 王勋跃. 活性炭再生技术在环境保护中的应用研究[J]. 资源节约与环保, 2020(12): 26-27.  
WANG Xunye. Application of activated carbon regeneration technology in environmental protection [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2020(12): 26-27(in Chinese).
- [28] 杜尔登, 张玉先, 沈亚辉. 自来水厂活性炭再生技术与成本分析[J]. 净水技术, 2008, 27(6): 54-57.  
DU Erdeng, ZHANG Yuxian, SHEN Yahui. Methods and cost analysis of regenerating activated carbon in waterworks [J]. Water Purification Technology, 2008, 27(6): 54-57( in Chinese).
- [29] GUO Y Q, DU E D. The effects of thermal regeneration conditions and inorganic compounds on the characteristics of activated carbon used in power plant [J]. Energy Procedia, 2012, 17: 444-449.
- [30] 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.  
XIAO Qian. The Performance Variation and Failure Factors Analysis of Long Term Running Biological Activated Carbon [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese).
- [31] 牟小林, 邱爱华, 丁秋华, 等. 净水用再生活性炭的现状分析[J]. 净水技术, 2017, 36(9): 4-7.  
MOU Xiaolin, QIU Aihua, DING Qiuhua, *et al.* Present situation analysis of activated carbon for water purification [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(9): 4-7( in Chinese).

作者简介: 刘嘉琪(1996- ), 女, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向为饮用水深度处理。

E-mail: 634492596@qq.com

收稿日期: 2021-08-04

修回日期: 2021-08-11

(编辑: 丁彩娟)