

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.005

# 针对低温期有机物去除率低的生物活性炭更换探究

陶 辉<sup>1,2</sup>, 厉彦辉<sup>1,2</sup>, 周伟青<sup>3</sup>, 赵 云<sup>3</sup>

(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; 3. 徐州首创水务有限责任公司, 江苏 徐州  
221003)

**摘 要:** 江苏某水厂生物活性炭投运至今已达6年,出水水质指标能够稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。但对照新实施的《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)要求,在其投产第三年的低温期即出现了 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 不能稳定达标的问题,即生物活性炭寿命不足3年。研究显示主要是低温期炭上微生物活性较差且活性炭运行年限较长吸附能力不足所致。为保证出水水质,亟需进行活性炭更换。对活性炭更换方式的研究表明:新炭填充比例越高,对有机物的去除效果越好。但更换成本较高,且浪费了原有活性炭的吸附能力。中试研究表明,更换20%新炭的换炭方式能保证低温期出厂水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 值达到DB 32/T 3701—2019湖库水源不高于2.2 mg/L的要求,因此建议水厂于每年低温期到来之前(10月中旬)更换活性炭,更换比例为20%。与一次性全部更换相比,能够减少20%~40%的更换成本。

**关键词:** 给水处理; 低温期; 生物活性炭; 换炭方式; 有机物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0033-06

## Research on the Replacement of Biological Activated Carbon for Low Organic Matter Removal Rate during Low Temperature Period

TAO Hui<sup>1,2</sup>, LI Yan-hui<sup>1,2</sup>, ZHOU Wei-qing<sup>3</sup>, ZHAO Yun<sup>3</sup>

(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; 3. Xuzhou Capital Water Co. Ltd., Xuzhou 221003,  
China)

**Abstract:** The biological activated carbon (BAC) of a water treatment plant in Jiangsu Province has been put into operation for 6 years, and the effluent quality can stably meet the requirements of the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006). However, according to the requirements of the newly implemented *The Control Standards of the Key Water Quality Parameters for Urban Water Treatment Plants in Jiangsu Province* (DB 32/T 3701-2019), in the low temperature period of the third year of BAC being put into use,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  can not reach the standard stably, that is, the life of biological activated carbon is less than 3 years. The analysis showed that it was mainly due to the poor microbial activity of BAC at low temperature period and the insufficient adsorption capacity of BAC with a long

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508704); 江苏省建设科技计划项目(2018JH012); 苏州市科技发展计划项目(SS201846); 首创股份科技项目

通信作者: 陶辉 E-mail: taohui@hhu.edu.cn

running life. In order to ensure the effluent quality, it is urgent to replace the BAC. The study on the replacement method of BAC showed that the higher the proportion of new BAC filling, the better the removal effect of organic matter. However, the replacement cost was high and the adsorption capacity of the original BAC was wasted. Pilot study showed that the carbon replacement method with 20% new BAC could ensure the  $COD_{Mn}$  of the effluent at low temperature period to meet the requirements of DB 32/T 3701-2019, which required  $COD_{Mn}$  was not higher than 2.2 mg/L using the lake and reservoir as water source. Therefore, it is recommended that the water treatment plant replace the BAC before the low temperature period (mid-October) every year, and the replacement ratio is 20%. Compared with the one-time replacement, the replacement cost can be reduced by 20%–40%.

**Key words:** drinking water treatment; low temperature period; biological activated carbon; method of replacing activated carbon; organic matter

生物活性炭深度处理工艺通过活性炭吸附和微生物降解两种作用协同去除水中污染物<sup>[1-2]</sup>。但进入低温期后,炭上微生物的代谢作用受到抑制,生物活性炭工艺对水中有机物的去除主要依靠活性炭的物理吸附作用。当生物活性炭运行年限较长时,其吸附性能下降较多<sup>[3]</sup>,低温期时对水中污染物的去除能力有限,从而导致有机物去除效果不佳。江苏某水厂生物活性炭投运至今已有6年,出水水质可以稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求,但在低温期时难以稳定达到2020年实施的《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)中湖库水源 $COD_{Mn}$ 值不高于2.2 mg/L的要求。通过投加粉末活性炭和强化混凝可以保证低温期出水 $COD_{Mn}$ 达标,但从长远来看,随着活性炭使用年限的延长,其吸附性能不断下降,粉末活性炭等预处理技术的使用时间和使用量势必也要逐年增加,而最终炭池颗粒活性炭仍需进行更换,从而增加水厂的生产运行成本。为此,根据该水厂实际生产工况,立足其生物活性炭工艺处理效能评估结果,开展了生物活性炭部分更换方式的研究。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验装置

生物活性炭中试装置如图1所示。炭柱直径为200 mm,填充200 mm石英砂作为承托层。T1柱填充水厂炭池内旧炭作为对照,T2柱填充全新柱状破碎炭,T3柱填充50%旧炭+50%全新柱状破碎炭,T4柱填充30%旧炭+70%全新柱状破碎炭,炭层填充高度均为1 000 mm。水厂生产炭层厚度为2 000

mm,为模拟实际工况,T5柱填充80%旧炭+20%全新柱状破碎炭,高度为2 000 mm。新旧炭充分混合后装填入炭柱,待运行30 d进入低温期后开展生物活性炭更换方式研究。

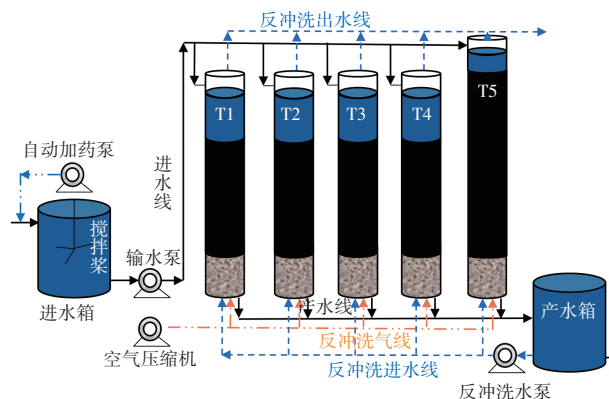


图1 中试装置流程示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot plant

中试装置由工艺单元系统、自动控制系统等组成,进水接水厂主臭氧出水,恒水位自动控制。中试装置运行参数参考水厂运行参数确定:EBCT=10~12 min,反冲洗周期为7 d。采用气水反冲洗方式,气冲强度为14~16 L/(m<sup>2</sup>·s),反洗时间为5 min,水冲强度为8~10 L/(m<sup>2</sup>·s),反洗时间为5 min。

### 1.2 分析项目及方法

活性炭碘值、亚甲基蓝值、强度指标按《煤质颗粒活性炭实验方法》(GB/T 7702)相关规定检测;炭上生物量采用脂磷法测定;微生物DNA提取采用EZNA® Soil DNA (Omega Bio-Tek, USA)试剂盒;微生物种群采用16S rRNA高通量测序分析,测序步骤及扩增子分析流程参考文献[4]。

浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、溴酸盐( $\text{BrO}_3^-$ )等指标按《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)检测;三卤甲烷生成势的测定:在水样中加氯 20 mg/L,用聚四氟乙烯螺旋盖密封充分混合后置于暗处,( $25\pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ 恒温反应 72 h 后中止反应,测定样品中三卤甲烷生成量<sup>[5]</sup>。

## 2 结果和讨论

### 2.1 现有生物活性炭工艺处理效能评估

该水厂生物活性炭于 2015 年投产使用,2017 年起炭池进水及出厂水水质指标连续监测结果如图 2 所示。监测周期内出厂水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  值能稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)不高于 3.0 mg/L 的要求,但是从 2020 年 3 月起实施的《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)对出厂水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  值做出湖库水源不高于 2.2 mg/L 的规定,该厂出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  值不高于 2.2 mg/L 的保证率为 89.47%,最高值达 2.84 mg/L,问题主要出现在每年低温期(水温 $<10\text{ }^\circ\text{C}$ ),即每年的 11 月、12 月和次年的 1 月。当水温升高后出厂水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  值可以达到 DB 32/T 3701—2019 的要求。从全年统计来看,水温高于  $10\text{ }^\circ\text{C}$  的天数达 270 d,此时生物活性炭工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的平均去除率为 25%~35%, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  平均值为 1.79 mg/L,与标准要求的 2.2 mg/L 相比仍有较大余量。

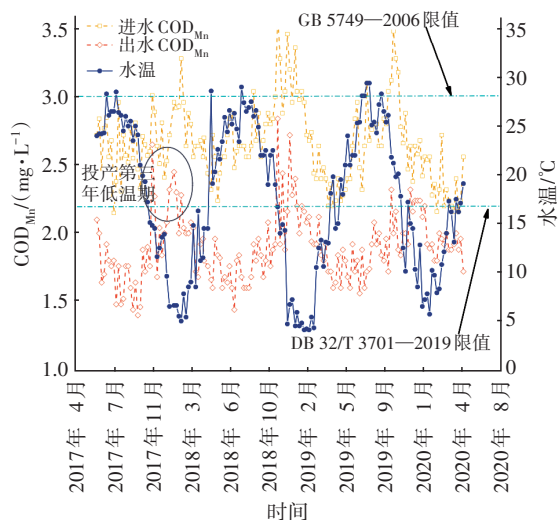


图 2 2017 年—2020 年进出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  变化情况

Fig.2 Changes of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  in influent and effluent during 2017-2020

对该厂生物活性炭上微生物的分析显示,低温期时炭上生物量为  $(80\pm 8)\text{ nmol/g}$ ,较常温期的

$(131\pm 12)\text{ nmol/g}$  降低近 40%;同时,低温期炭上生物活性 SOUR 值为  $(0.014\pm 0.001)\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ,较常温期炭上生物活性 SOUR 值  $(0.022\pm 0.003)\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$  降低了约 35%,表明低温期时炭上微生物代谢活性较差,因此对水中污染物的生物降解能力大幅下降<sup>[6]</sup>。而随着活性炭运行年限的延长,活性炭吸附性能也逐渐下降(如图 3 所示)。运行至 2020 年时,活性炭碘值由 1 025 mg/g 降至 225 mg/g,亚甲基蓝值由 187 mg/g 降至 79 mg/g,表明活性炭已基本失去吸附性能<sup>[7]</sup>。由于低温期时炭上微生物降解能力大幅下降,加之活性炭基本失去吸附性能,导致生物活性炭工艺净水效果不佳。值得注意的是,该水厂生物活性炭投产使用第三年的低温期即出现上述问题(活性炭寿命不足 3 年),若仅因低温期的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除效果较差就进行全部换炭,会由于较短的换炭周期导致运行成本大幅增加;而对于常温和高温季节而言,也未能有效利用炭上微生物的降解能力,从而造成浪费。

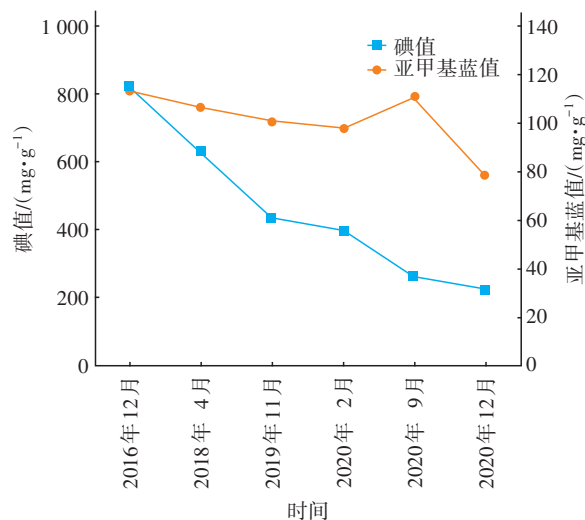


图 3 2016 年—2020 年活性炭吸附指标变化情况

Fig.3 Change of BAC adsorption index from 2016 to 2020

2020 年的检测结果表明该水厂活性炭在运行 5 年后强度仍保持在 98%,尚不至于由于强度下降造成严重的活性炭颗粒破碎<sup>[8]</sup>。因此,考虑在每年低温期到来前更换部分活性炭方式以提升生物活性炭池的吸附性能,并充分利用炭上微生物的降解能力。

### 2.2 换炭比例的影响

将水厂主臭氧池出水作为中试装置进水,考察了不同换炭比例时生物活性炭对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除情

况,结果如图4所示。

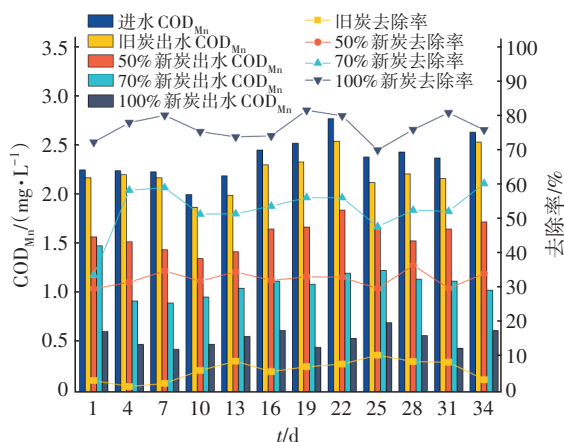


图4 常规进水阶段不同换炭比例时对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除效果

Fig.4  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  removal under different BAC replacement ratio at conventional stage

试验阶段水厂为保证出水水质采取了粉末活性炭预处理措施,故进水水质较好( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均值为 $2.38 \text{ mg/L}$ )。旧炭对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的平均去除率仅为 $6.50\%$ ,当进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 值高于 $2.35 \text{ mg/L}$ 时,出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 值就会超过 $2.2 \text{ mg/L}$ 。 $50\%$ 、 $70\%$ 、 $100\%$ 换炭比例时的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均去除率依次为 $33.00\%$ 、 $53.07\%$ 、 $76.75\%$ ,较旧炭的去除效果均有明显提高,且新炭填充比例越高 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除效果越好,此时出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均值分别为 $1.60$ 、 $1.11$ 、 $0.55 \text{ mg/L}$ 。即使此时炭上微生物量较少且代谢活性较差,但由于新炭吸附性能较好(碘值达 $1025 \text{ mg/g}$ ),仍能保证对有机物的有效去除。

为进一步考察进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 较高时各换炭比例的去除效果,常规进水 $34 \text{ d}$ 后,向进水中补充一定量的腐殖酸使 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 值达到 $3.49\sim 4.28 \text{ mg/L}$ ,试验结果如图5所示。在强化进水阶段 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均值为 $3.96 \text{ mg/L}$ ,旧炭对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的平均去除率为 $25.65\%$ ,而换炭比例为 $50\%$ 、 $70\%$ 、 $100\%$ 的炭柱对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的平均去除率依次为 $44.88\%$ 、 $48.82\%$ 、 $56.75\%$ ,较旧炭分别提高了 $19.23\%$ 、 $23.17\%$ 、 $31.10\%$ ,尽管依然表现为随着新炭填充比例的增加,有机物的去除率提高的趋势,但与较低的进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 水平相比,新炭比例的增加对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除的强化效果有限。

从去除率水平来看, $50\%$ 换炭比例时常规进水阶段和强化进水阶段的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率已经能达到 $33.00\%\sim 44.88\%$ ,由于生产条件下炭池进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 值为 $2.2\sim 3.4 \text{ mg/L}$ ,因而此时炭池出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 值应

为 $1.69\sim 1.87 \text{ mg/L}$ ,该范围距标准要求仍有较大余量,且实际生产炭层厚度为 $2 \text{ m}$ (为试验炭柱的 $2$ 倍)。因此秉承适用性与经济性原则,开展了模拟实际工况 $2 \text{ m}$ 炭层+更换 $20\%$ 新炭换炭方式的研究。

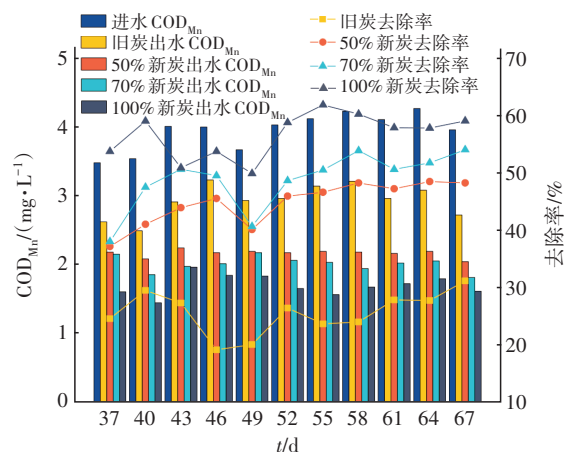


图5 强化进水阶段不同换炭比例时 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除情况

Fig.5  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  removal under different BAC replacement ratio at strengthening stage

### 2.3 模拟生产换炭比例的效果

模拟生产工况 $2 \text{ m}$ 炭层+ $20\%$ 新炭换炭方式对有机物的去除效果如图6所示。

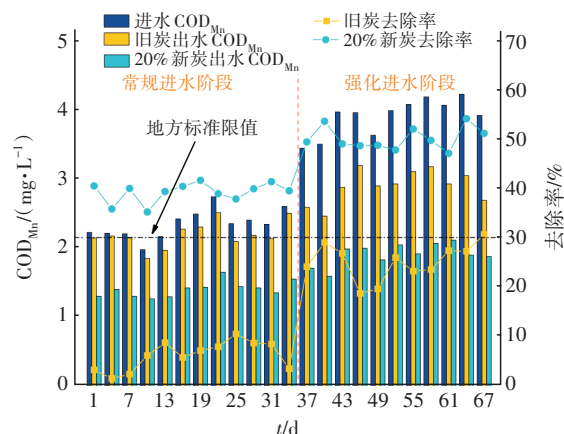


图6 模拟生产时对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除效果

Fig.6  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  removal of simulated production

在常规进水阶段,该换炭方式对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的平均去除率达到 $39.85\%$ ,出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 最大为 $1.68 \text{ mg/L}$ ,远低于DB 32/T 3701—2019中 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的限值。在强化进水阶段(进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均值为 $3.96 \text{ mg/L}$ ,较该时间段生产炭池进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均值高约 $1 \text{ mg/L}$ ),该换炭方式对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的平均去除率达到 $50.86\%$ ,出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均值为 $1.94 \text{ mg/L}$ 、最大值为 $2.15 \text{ mg/L}$ ,亦可满足地方标准要求。



前已述及,活性炭的吸附性能和炭上微生物降解能力均会影响污染物的去除,试验中期测定炭上生物量与生物活性,旧炭上的生物量为 $(80\pm 8)$  nmol/g,20%新旧混合炭上生物量为 $(65\pm 5)$  nmol/g,旧炭的SOUR值为 $(0.014\pm 0.001)$  mg/(g·h),20%新旧混合炭为 $(0.012\pm 0.001)$  mg/(g·h),整体上表现为炭上生物量低19%左右,生物活性低14%左右,20%新旧混合炭上生物代谢活性稍弱,但由于更换的新炭具有较强的吸附能力,总体仍表现为有机物的去除率升高。

采用高通量测序法对活性炭上的生物菌群进行检测,通过对97%相似水平下的OTU进行生物信息统计,微生物群落物种丰度及多样性评估结果如表1所示。

表1 微生物群落物种丰度及多样性评估结果  
Tab.1 Species abundance and diversity assessment results of microbial communities

换炭方式	序列数	OTU	Coverage	Chao1	Ace
旧炭	42 039	1 152	0.993 6	1 367.29	1 373.94
模拟生产	40 245	1 087	0.992 5	1 344.71	1 358.27

Coverage指数表示测序结果能否代表样本真实情况,其值越大则结果越可信,样本的Coverage指数均大于0.99,表明本次试验数据结果可信。OTU是微生物聚类分析的结果,20%新炭的填充使得OTU数目略微减少。Chao1指数和Ace指数可以用来估计生态学统计中的物种总数,其值与OTU反映的活性炭上微生物物种趋势相似,微生物多样性因新炭的填充而降低了1.5%左右。

图7进一步列举了在门水平上所有样品丰度占比大于0.005的微生物菌群丰度分布,其中变形杆菌门占比约为47%,拟杆菌门占比约为33%,优势菌群变形杆菌门、拟杆菌门、酸杆菌门、蓝藻门没有发生显著变化。结合炭上生物量分析,20%新炭的填充主要是影响了炭上生物量的多寡,对炭上微生物多样性的影响较小,不会破坏后续炭上微生物群落结构丰富度的变化潜力。当水温升高进入常温期后,炭上微生物生长代谢重新活跃,生物量逐步增加,微生物对有机物的降解作用开始占据优势地位,即使此时20%新炭的吸附容量达到饱和,由于炭上微生物群落结构可以恢复到与旧炭相似的水平,仍能保证常温期与高温期出水COD<sub>Mn</sub>值达到相关标准要求。

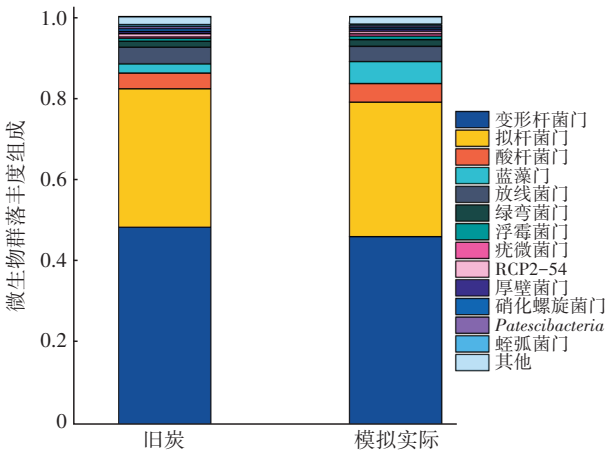


图7 门水平上的微生物菌群丰度组成  
Fig.7 Abundance composition of microbial communities at phylum level

结合上述分析,低温期模拟实际工况2 m炭层+20%新炭的换炭方式可保证出水COD<sub>Mn</sub>达到《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)的规定,同时出水浊度为0.067~0.361 NTU、氨氮为0.014~0.028 mg/L、溴酸盐<0.005 mg/L、三卤甲烷生成势为0.26~0.31,即其他受生物活性炭工艺影响的水质指标如氨氮、三卤甲烷<sup>[9]</sup>等也均达到标准要求。

2.4 综合生产建议

该水厂出水COD<sub>Mn</sub>一般在低温期不能稳定达标,依据前述研究成果,建议该水厂于每年10月中旬更换活性炭,更换比例为20%。该方式可保证冬季低温期出水水质指标达到《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)要求。同时反冲洗会将新旧炭混合,经过5~6年可基本完成炭池内旧炭的更换,且随着换炭工作的继续进行旧炭会进一步减少。经济费用简算见表2(滤池共16格,单格面积为109.5 m<sup>2</sup>,活性炭单价按6 500元/m<sup>3</sup>计,不可预见费用按活性炭费用5%计),与一次性更换相比,年均成本可降低20%~40%。

表2 不同换炭方式的经济费用简算  
Tab.2 Economic costs for different BAC replacement methods

项 目	100%新炭	20%新炭+80%旧炭
活性炭费用/万元	2 277.6	455.52
不可预见费用/万元	113.88	22.78
寿命/年	3~4	1
年均成本/万元	597.87~797.16	478.3

### 3 结论

① 江苏某水厂生物活性炭投运至今已达6年,出水水质指标能够稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。但对照新实施的《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)要求,在其投产第三年的低温期即出现了 $COD_{Mn}$ 值不能稳定达标的问题,即生物活性炭寿命不足3年。研究显示主要是活性炭吸附能力不足、低温期炭上微生物活性较差所致。

② 新炭填充比例越高,对有机物的去除效果越好,但更换成本较高,且浪费了原有活性炭的吸附能力。

③ 中试表明,更换20%新炭的换炭方式能够保证低温期的出厂水 $COD_{Mn}$ 值达到《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)湖库水源不高于2.2 mg/L的要求,因此建议水厂于每年低温期到来之前(10月中旬)更换活性炭,更换比例为20%。

### 参考文献:

- [1] 陈皓坤,吴俊业,沈恺乐,等. 不同流向臭氧生物活性炭工艺对比分析[J]. 净水技术,2020,39(2):57-65.  
CHEN Haokun, WU Junye, SHEN Kaile, *et al.* Comparative analysis of ozone biological activated carbon processes with different flow directions [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(2): 57-65 (in Chinese).
- [2] 张瀚中,韩梅,赵志伟,等. 炭龄对活性炭工艺去除南水北调水中有机物的影响[J]. 中国给水排水,2021,37(3):32-37.  
ZHANG Hanzhong, HAN Mei, ZHAO Zhiwei, *et al.* Effect of carbon age on removal of organics in water from South-to-North Water Diversion Project by activated carbon process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(3):32-37 (in Chinese).
- [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.  
CHEN Shiqi, LIU Cheng, SHEN Haijun, *et al.* Discussion on replacement strategy of invalid biological activated carbon in drinking water plants [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (17): 49-56 (in Chinese).
- [4] LI C P, LING F Q, ZHANG M L, *et al.* Characterization of bacterial community dynamics in a full-scale drinking water treatment plant [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 51(1): 21-30.
- [5] 袁展,吉红军,余冉,等. 饮用水处理工艺中臭氧剂量控制消毒副产物生成势研究[J]. 化工学报,2018,69(6):2697-2707.  
YUAN Zhan, JI Hongjun, YU Ran, *et al.* Study on the generation potential of disinfection by-products of ozone dose control in drinking water treatment process [J]. CIESC Journal, 2018, 69(6): 2697-2707 (in Chinese).
- [6] 廖晓斌,赵雷,陈超,等. 升降流式生物活性炭滤池处理微污染湖泊水比较[J]. 中国给水排水,2017,33(19):1-5.  
LIAO Xiaobin, ZHAO Lei, CHEN Chao, *et al.* Comparison of up-flow and down-flow BAC for micro-polluted lake water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 1-5 (in Chinese).
- [7] 胡淑圆,石鲁娜,笪跃武,等. 水厂活性炭池长期运行的跟踪分析[J]. 给水排水,2019,45(11):13-17.  
HU Shuyuan, SHI Luna, DA Yuewu, *et al.* Tracking analysis of long-term operation of the activated carbon pool of water plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (11): 13-17 (in Chinese).
- [8] 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 long-term performance changes and replacement cycle of carbon filter material of biological activated carbon filter in water plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (5): 39-41 (in Chinese).
- [9] 任峰. 水处理工艺对消毒副产物生成及其前体物控制[J]. 净水技术,2020,39(12):87-93.  
REN Feng. Water treatment process for the production of disinfection by-products and their precursor control [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (12): 87-93 (in Chinese).

作者简介:陶辉(1981—),男,安徽寿县人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为饮用水处理理论与技术、膜科学与技术。

E-mail:taohui@hhu.edu.cn

收稿日期:2021-08-06

修回日期:2021-09-05

(编辑:李德强)