

鲍寻,袁聪,祖振权,等. 炭砂滤池水反冲洗参数优化中试[J]. 净水技术, 2025, 44(1): 74-80,108.

BAO X, YUAN C, ZU Z Q, et al. Pilot test of optimization of water backwash parameters in activated carbon-sand filter [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 74-80,108.

炭砂滤池水反冲洗参数优化中试

鲍 寻¹,袁 聪¹,祖振权¹,张家萱²,秦庆东^{2,*}

(1. 南京水务集团有限公司,江苏南京 210018;2. 东南大学土木工程学院,江苏南京 211189)

摘 要 【目的】进行炭砂滤池水反冲洗参数优化设计,减少水耗,保证冲洗效果,可为水厂炭砂滤池实际运行提供技术参考。【方法】以南京市某水厂沉后水为原水进行炭砂滤池中试研究,考察水反冲洗参数对滤料混层和滤后水浑浊度的影响,探究最佳水反冲洗参数组合下炭砂滤池运行效果和细菌群落结构。【结果】水反冲洗强度为 12~15 L/(m²·s) 能够较好地实现炭砂滤池分层效果;水反冲洗强度为 9 L/(m²·s),历时 7 min,分层冲洗强度为 12 L/(m²·s),历时 5 min,即可以保证滤池冲洗干净,滤后水浑浊度小于 0.7 NTU。运行期间炭砂滤池对浑浊度的平均去除率为 95.8%,对高锰酸盐指数的平均去除率为 11.1%,对氨的平均去除率为 45.9%,出水硝酸盐出现累积现象,但整体出水水质满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。细菌 16S rRNA 基因高通量测序分析表明,炭砂滤池优势菌群主要为变形菌门(Proteobacteria)、酸菌杆门(Acidobacteriota)和绿弯菌门(Chloroflexi),相对丰度占比超过 65%。【结论】采用小水冲和分层冲洗的反冲洗方式,可以改善炭砂滤料混层现象,降低水耗,并保证炭砂滤池的运行效果。

关键词 炭砂滤池 反冲洗 滤后水 浑浊度 参数优化

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)01-0074-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.01.009

Pilot Test of Optimization of Water Backwash Parameters in Activated Carbon-Sand Filter

BAO Xun¹, YUAN Cong¹, ZU Zhenquan¹, ZHANG Jiaxuan², QIN Qingdong^{2,*}

(1. Nanjing Water Group Co., Ltd., Nanjing 210018, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract [Objective] Conduct optimization design of water backwash parameters for the activated carbon-sand filter to reduce water consumption and ensure backwashing effectiveness, which can provide technical reference for the actual operation of the activated carbon-sand filter in the water plant. [Methods] A pilot test of an activated carbon-sand filter was conducted using sedimented water as the feedwater from a water treatment plant (WTP) in Nanjing. The impact of various water backwash parameters on the layering within the filter and the turbidity of filtered water was investigated, and the performance and bacterial community structure of the activated carbon-sand filter under the optimal combination of water backwash parameters were thoroughly examined. [Results] The findings of this study indicated that a water backwash intensity ranging from 12 L/(m²·s) to 15 L/(m²·s) led to optimal layering within the activated carbon-sand filter. Additionally, the combination of 7 minutes of backwash at an intensity of 9 L/(m²·s) followed by 5 minutes of layering backwash at 12 L/(m²·s) proved to be effective in ensuring thorough cleaning of the filter and reducing the turbidity of the filtered water to less than 0.7 NTU. Throughout the operational period, notable removal efficiencies were observed, with a 95.8% reduction in turbidity, an 11.1% decrease in permanganate index, and a 45.9% reduction in ammonia nitrogen. Notably, nitrate levels increased in effluent. Moreover, the effluent quality of the activated carbon-sand filter could meet our country's *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022). Furthermore, the bacterial 16S rRNA gene high-throughput sequencing results revealed that the dominant bacterial communities within the activated carbon-sand filter primarily consisted of Proteobacteria, Acidobacteriota,

[收稿日期] 2023-09-20

[基金项目] 南京水务集团有限公司科技创新项目(YF2022-011)

[作者简介] 鲍寻(1988—),男,工程师,硕士,研究方向为饮用水处理,E-mail:365887939@qq.com。

[通信作者] 秦庆东(1980—),男,副教授,E-mail:qinqingdong@seu.edu.cn。

and Chloroflexi, which accounted for over 65% of the total bacteria. [**Conclusion**] Small water backwashing and layering backwashing techniques can guarantee the activated carbon-sand filter's operational efficacy, minimize water consumption, and improve the phenomena of mixed layers in filter media.

Keywords activated carbon-sand filter backwash filtered water turbidity parameter optimization

随着我国社会经济的发展,水资源受到不同程度的污染,水源水质问题日趋严重^[1]。而常规给水处理工艺已难以满足我国卫生健康与环境事业发展的需求。因此,加强微污染水源水处理技术研究具有重要的现实意义。

炭砂滤池是一种上层为活性炭滤料,下层为石英砂滤料的新型滤池,能够同步实现活性炭吸附、生物降解以及石英砂的物理拦截作用^[2-3]。在常规给水处理工艺中,将砂滤池改造成炭砂滤池具有基建和运行费用低的优点,同时炭砂滤池在保证去除浑浊度的基础上,可以强化去除有机物和氨等污染物^[4]。因此,炭砂滤池在水厂常规处理工艺升级改造中具有较好的应用前景。

目前炭砂滤池在国内还没有大范围应用,许多研究仍处于试验阶段^[5-6]。由于炭砂滤池上层是活性炭,粒径较大,下层是石英砂,粒径较小,在反冲洗时,石英砂易混入活性炭中造成混层,降低滤料纳污能力,增大过滤阻力。另外,炭、砂2种滤料的比重相差较大。当反冲洗水强度较大时,容易出现跑炭现象;当反冲洗水强度小时,砂层膨胀率不够,滤料无法被充分清洗,表面形成泥膜,从而导致滤层板结,降低过滤周期。因此,亟须探究炭砂滤池的水反冲洗参数与运行效能之间的关系,为实际水厂的运行和改造提供借鉴。

南京市某水厂已将砂滤池升级改造成炭砂滤池,但在实际运行中发现,水反冲洗过程跑炭严重。运行2年,炭层厚度从70 cm减小到25 cm。为了降低跑炭几率,保证冲洗效果,研究搭建了中试装置对炭砂滤池水反冲洗参数进行优化,考察水反冲洗强度和反冲洗时间对炭砂滤池混层和滤后水浑浊度的影响。在此基础上,探究反冲洗参数优化后炭砂滤池的运行效果,以期对砂滤池升级改造和运行提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验采用有机玻璃炭砂滤柱模拟炭砂滤池,如图1所示。该装置由1根滤柱、1个清水箱、1台进水泵、1台反冲洗风机和1台反冲洗水泵组成。滤

柱高为340 cm,直径为50 cm,上部为配水排水渠,用于进水配水和反冲洗时排水,中下部有2个卸料孔,底部为十字形配水配气系统。采用穿孔管大阻力配水系统进行滤后水收集和反冲洗配水配气。参考南京市某水厂炭砂滤池设计参数,滤柱内承托层厚度为400 mm,石英砂厚度为700 mm,粒径 $d_{10} = 0.55$ mm,炭层厚度为700 mm,粒径为8~20目。试验进水为水厂沉后水,试验期间沉后水浑浊度为1.01~3.50 NTU。

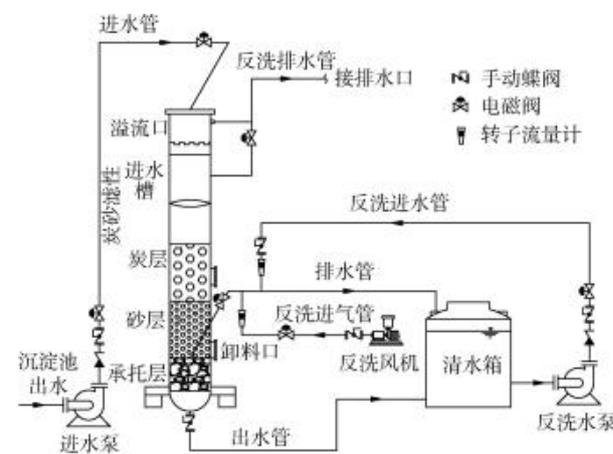


图1 中试装置

Fig. 1 Pilot Plant

1.2 试验方法

南京市某水厂采用长江水为原水,处理工艺流程为臭氧预氧化+混凝+网格絮凝池+斜板沉淀池+炭砂滤池+消毒。工艺主要参数:臭氧投加质量浓度为0.5 mg/L;炭砂滤池设计滤速为8 m/h;炭层设计厚度为70 cm,砂层设计厚度为70 cm;气冲强度为 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,历时5 min;水冲强度为 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,历时10 min。根据炭砂滤池运行现状,中试装置运行参数设定滤速为8 m/h,运行周期为48 h,气冲强度为 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,气冲时间为5 min。水反冲洗优化参数参考《炭砂滤池设计标准》(T/CUWA 20055—2022),水反冲洗强度为7~10 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,历时7~11 min,分层冲洗强度为12~15 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,历时5 min。试验装置在启用前,挂膜稳定运行1个月。

浊度采用散射浊度仪,高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾滴定法,氨采用纳氏试剂分光光度法,硝酸盐采用紫外分光光度法。炭砂滤料上生物量采用脂磷法测定。通过对 16S rRNA 基因进行高通量测序分析滤料上细菌群落组成^[7]。

2 结果与讨论

2.1 水反冲洗强度对滤层膨胀的影响

滤层膨胀不仅影响滤料反洗效果,也影响炭砂滤池的跑炭几率^[2]。图 2 表示水反冲洗强度对滤层膨胀的影响。如图 2 所示,活性炭和石英砂的膨胀高度随着反冲洗强度的增加而逐渐增加。当反冲洗强度为 $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,炭层膨胀高度为 5.2 cm ,砂层不膨胀,反冲洗强度无法满足冲洗要求。当反冲洗强度为 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,炭层膨胀高度为 45.3 cm ,砂层膨胀高度为 19.3 cm ,滤床总膨胀高度达到 64.6 cm 。此时,炭层膨胀率为 64.8% ,砂层膨胀率为 27.6% ,总膨胀率为 46.2% 。由于活性炭比重比石英砂小,炭层的膨胀高度远大于砂层的膨胀高度。另外,普通快滤池的滤层表面水深一般为 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ 。当普通快滤池升级改造成炭砂滤池时,较大的水反冲洗强度容易发生跑炭现象。因此,在实际生产运行过程中宜将水反冲洗强度控制在 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下,这不仅有利于降低跑炭几率,还可以减少水耗。

2.2 水反冲洗强度对滤料混层的影响

炭砂滤料混层可能加快过滤水头损失增长率,从而导致过滤周期缩短^[1]。图 3 表示水反冲洗强

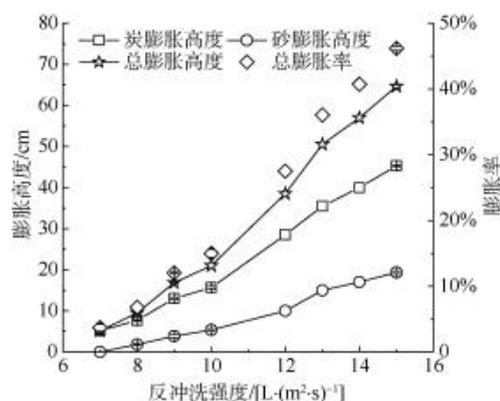


图 2 水反冲洗强度对滤层膨胀的影响

Fig. 2 Effect of Water Backwash Intensity on Filter Expansion

度对滤料混层的影响,冲洗历时均为 5 min 。如图 3 所示,当反冲洗强度为 $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,炭砂滤料基本不混层,这主要是由于砂层不膨胀。当反冲洗强度为 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,炭砂滤料混层现象严重,高度达到 6.5 cm 。这是因为炭砂滤料先经过气冲洗后,滤料混合严重,较小的水冲洗强度使得滤层膨胀率低(仅为 6.8%),从而造成水力分级效果不明显^[1]。当反冲洗强度为 $9 \sim 10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,炭砂滤料混层现象显著改善。当反冲洗强度为 $12 \sim 15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,炭砂滤料层的分界面明显。因此,采用 $12 \sim 15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的水冲洗强度可以较好实现炭砂滤池的分层效果。

2.3 水反冲洗强度对滤后水浊度的影响

图 4 表示水反冲洗强度对滤后水浊度的影



图 3 水反冲洗强度对滤料混层的影响

Fig. 3 Effect of Water Backwash Intensity on Mixing Layer Phenomenon of Filter

响。试验期间反冲洗历时均为 7 min,同时,为了防止炭砂滤料混层对试验的影响,最后采用 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的冲洗强度进行分层冲洗,历时 5 min。如图 4 所示,滤后水浑浊度随着运行时间的延长而逐渐减少,60 min 时的滤后水浑浊度接近 0.2 NTU,说明滤池对颗粒的截留效果逐渐增强。当反冲洗强度为 $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,滤后水浑浊度在 1 min 时达到 1.1 NTU,表明该冲洗强度对滤层冲洗不够彻底。当反冲洗强度增加到 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,滤后水浑浊度在 1 min 时为 0.9 NTU,说明增加反冲洗强度可以改善滤层冲洗效果。在反冲洗强度为 $9 \sim 10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,滤后水浑浊度变化相差不大,滤后水浑浊度在 1 min 时接近 0.6 NTU,表明 $9 \sim 10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的反冲洗强度对滤层冲洗较彻底。

2.4 水反冲洗时间对滤后水浑浊度的影响

图 5 表示水反冲洗时间对滤后水浑浊度的影响。如图 5(a) 所示,当反冲洗强度为 $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,随着反冲洗时间的增加,滤后水浑浊度明显改善。当反冲洗强度为 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,反冲洗时间为

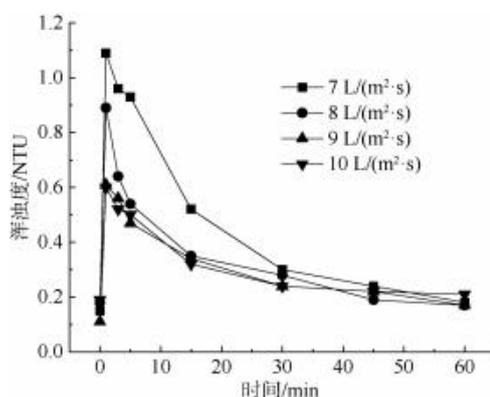


图 4 水反冲洗强度对滤后水浑浊度的影响

Fig. 4 Effect of Water Backwash Intensity on Filtered Water Turbidity

9 min 和 11 min 时,滤后水浑浊度变化不大[图 5(b)].当反冲洗强度为 $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时[图 5(c)和图 5(d)],反冲洗时间对滤后水浑浊度无明显影响,反冲洗结束后运行 60 min,出水浑浊度基本在 0.2 NTU 以下,表明在该反冲洗强度下,7 min 的反冲洗时间能够较彻底地清洗滤料。

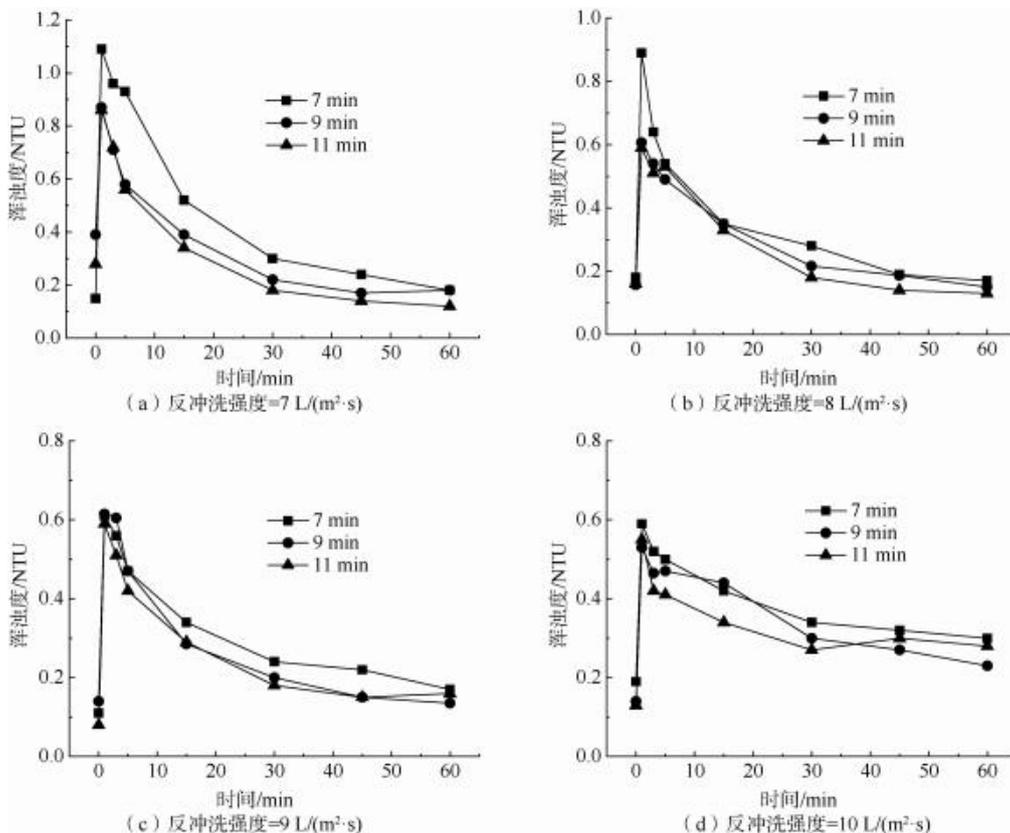


图 5 水反冲洗时间对滤后水浑浊度的影响

Fig. 5 Effect of Water Backwash Time on Filtered Water Turbidity

为了探究 7 min 的水反冲洗时间对滤层的清洗效果,考察了反冲洗排水浑浊度的变化,如图 6 所示。当水反冲洗强度为 $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,冲洗 7 min 后,反冲洗排水浑浊度高达 100 NTU,表明在该反冲洗强度下,7 min 的反冲洗时间对滤层冲洗不彻底。当最后采用 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的分层冲洗时,排水浑浊度逐渐降低,在 5 min 后低于 25 NTU。当水反冲洗强度为 $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,冲洗 7 min 后,反冲洗排水浑浊度为 20.7 NTU;分层冲洗结束后,排水浑浊度为 17.1 NTU,表明该冲洗方式对滤料能有效而充分的清洗。当水反冲洗强度为 $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗 7 min 后,反冲洗排水浑浊度为 22.4 NTU;分层冲洗结束后,反冲洗排水浑浊度为 19.0 NTU。结合图 5 的试验结果并考虑水耗,采用水反冲洗强度为 $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和反冲洗时间为 7 min 的冲洗方式,可以清除滤料层中的杂质。

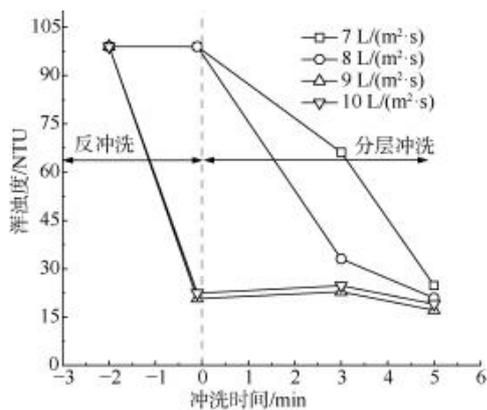


图 6 反冲洗排水浑浊度

Fig. 6 Turbidity of Backwash Effluent

2.5 分层冲洗强度对滤后水浑浊度的影响

图 7 表示分层冲洗强度对滤后水浑浊度的影响。如图 7 所示,在分层冲洗强度为 $12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,滤后水在 1 min 的浑浊度为 0.65 NTU,60 min 的浑浊度为 0.15 NTU。当分层冲洗强度增加到 $13 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,滤后水在 1 min 的浑浊度接近 0.6 NTU,在 60 min 的浑浊度均小于 0.2 NTU。上述结果表明,分层冲洗强度为 12 ~ $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时对滤后水浑浊度改善不明显。

为了探究分层冲洗强度对滤层的清洗效果,监测了分层冲洗时反冲洗排水浑浊度,如图 8 所示。当分层冲洗强度为 $12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,分层冲洗 3 min,反冲洗排水浑浊度略微上升,从 20.7 NTU 升

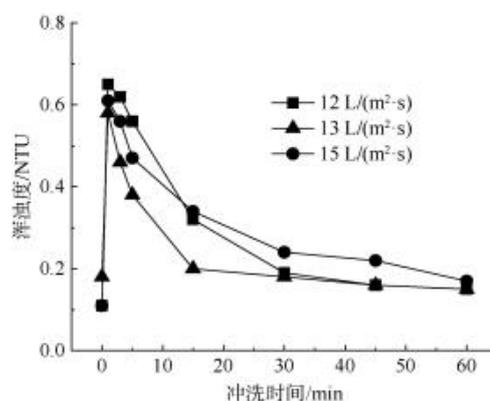


图 7 分层冲洗强度对滤后水浑浊度的影响

Fig. 7 Effect of Layering Backwash Intensity on Filtered Water Turbidity

高到 22.9 NTU,原因是滤层残余的颗粒物在高速水反冲洗时被携带出水^[6]。随着分层冲洗时间进一步增加,反冲洗排水浑浊度下降,分层冲洗 5 min,排水浑浊度为 17.1 NTU,表明滤层冲洗的较彻底。当分层冲洗强度为 $13 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,分层冲洗的排水浑浊度变化趋势与 $12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 一致。分层冲洗 5 min,反冲洗排水浑浊度接近 16 NTU。综上,分层冲洗强度确定为 $12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗时间为 5 min。

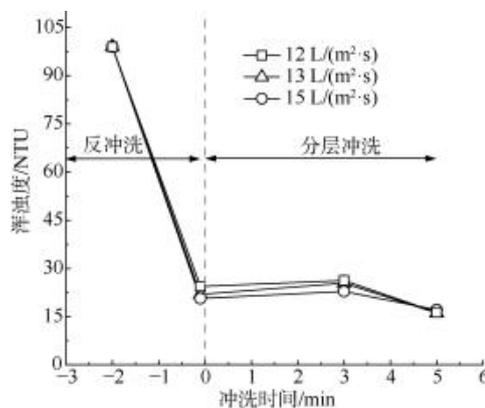


图 8 分层冲洗的反冲洗排水浑浊度

Fig. 8 Turbidity of Layering Backwash Effluent

2.6 运行效果

采用水反冲洗强度为 $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ + 历时 7 min 和分层冲洗强度为 $12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ + 历时 5 min 的冲洗方式,考察炭砂滤池的运行效果,如图 9 所示。在 48 h 运行过程中,沉后水浑浊度为 2.0 ~ 3.5 NTU,平均值为 2.9 NTU,滤后水浑浊度稳定在 0.2 NTU 以下,平均去除率达到 95.8%,表明炭砂滤池对浑

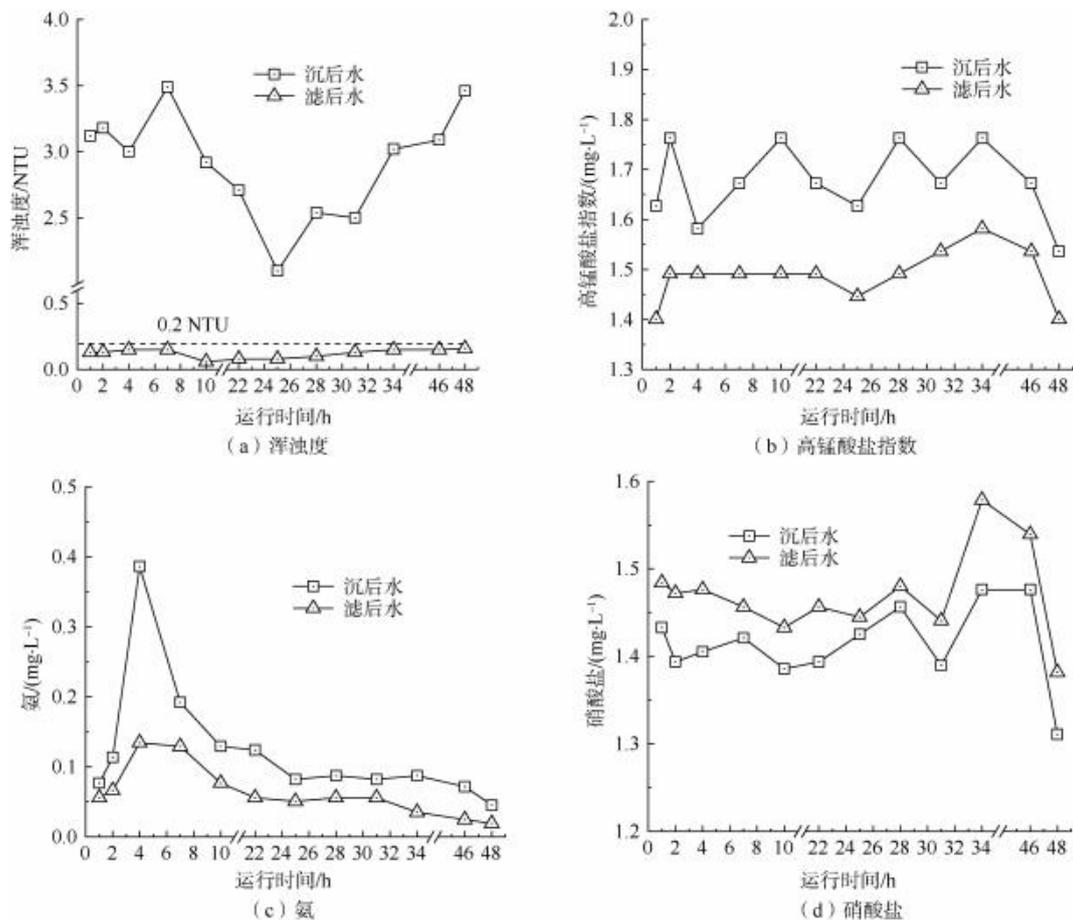


图9 炭砂滤池运行效果

Fig. 9 Operation Performance of Activated Carbon-Sand Filter

浊度的去除效果较好。图 9(b) 表示炭砂滤池对高锰酸盐指数的去除。沉后水高锰酸盐指数质量浓度为 1.54~1.76 mg/L, 平均质量浓度为 1.68 mg/L; 滤后水高锰酸盐指数质量浓度为 1.40~1.58 mg/L, 平均质量浓度为 1.49 mg/L, 平均去除率为 11.1%, 可以看出炭砂滤池对有机物有一定的去除效果。图 9(c) 表示炭砂滤池对氨的去除。沉后水氨的质量浓度为 0.05~0.39 mg/L, 平均质量浓度为 0.12 mg/L, 滤后水氨的质量浓度为 0.02~0.13 mg/L, 平均去除率达到 45.9%, 表明炭砂滤池对氨具有较好的去除效果。由于单纯的过滤机制无法达到对氨的去除, 表明炭砂滤池存在生物降解作用^[8]。在连续运行 4 h 后, 沉后水氨的质量浓度突然升高至 0.38 mg/L, 但滤后水中氨的质量浓度仍低于 0.15 mg/L, 说明炭砂滤池抗氨冲击较为稳定。同时, 整个过滤周期内滤后水硝酸盐浓度升高[图 9(d)]。沉后水硝酸盐的平均质量浓度为 1.41 mg/L, 滤后水平均

质量浓度为 1.47 mg/L。结合图 9(c) 的结果可以得出炭砂滤料表面存在硝化菌, 并发生了硝化反应^[9]。另外, 炭砂滤池出水浑浊度、高锰酸盐指数、氨和硝酸盐均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

炭砂滤池运行 48 h 后, 对滤料进行采集并分析滤料表面的生物量和细菌群落组成。活性炭上生物量为 78.8 nmol 磷(P)/g, 石英砂上生物量为 62.7 nmol P/g。活性炭上的生物量高于石英砂, 说明活性炭更有利于生物附着。炭砂滤料在细菌门水平上的组成如图 10(a) 所示。2 种滤料在门水平上的群落结构特征较为接近。优势细菌主要为变形菌门(Proteobacteria)、酸菌杆门(Acidobacteriota)和绿弯菌门(Chloroflexi)。3 种优势菌门在活性炭上的相对丰度分别为 26.1%、31.8%和 14.2%, 在石英砂上的相对丰度分别为 31.2%、25.2%和 9.6%, 总丰度占比超过 65%。另外, 在炭砂 2 种滤料上均发现了

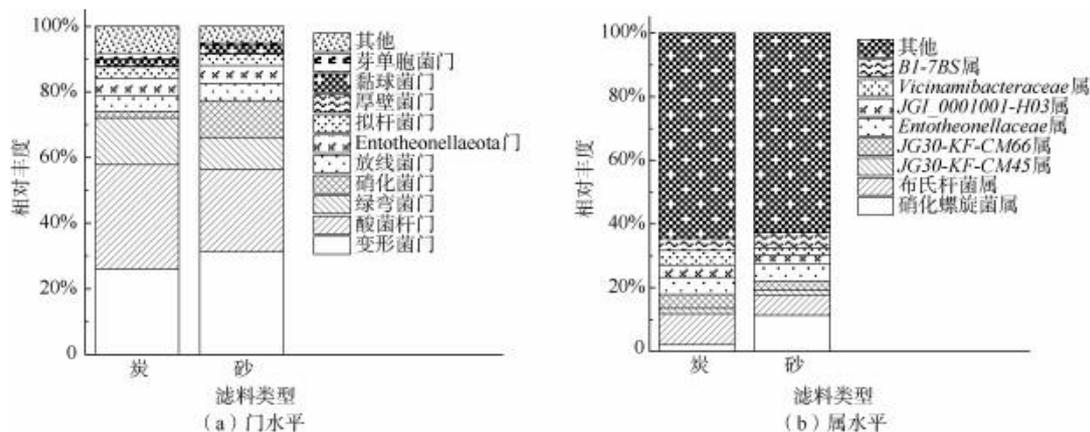


图 10 滤料层中细菌群落相对丰度

Fig. 10 Relative Abundance of Bacterial Community of Filter Layer

硝化菌门 (Nitrospirota), 表明炭砂滤池内存在硝化反应, 这与水质分析结果一致。进而考察 2 种滤料细菌在属水平的分布时 [图 10(b)], 发现 2 种滤料上细菌在属水平具有一定的差异, 其中硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*) 最为明显, 其在活性炭上的相对丰度为 2.1%, 而在石英砂上相对丰度更是高达 11.3%。由于 *Nitrospira* 被认为是硝化过程起主要作用的菌属, 丰富的 *Nitrospira* 佐证了炭砂滤池良好的生物除氮能力。

3 结论

(1) 水反冲洗强度为 $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 砂层不膨胀; 水反冲洗强度为 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 砂层发生微膨胀, 但是炭砂滤料混层现象严重; 水反冲洗强度为 $12 \sim 15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 炭砂滤料分层效果较好。

(2) 试验中炭砂滤池的水反冲洗参数最佳组合方式为: 水冲强度为 $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 历时 7 min; 分层冲洗强度为 $12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 历时 5 min。较小的水冲强度对滤层清洗不彻底, 较大的水冲强度对滤后水浑浊度改善不明显, 同时增加水耗和跑炭几率。

(3) 在 48 h 运行周期内, 炭砂滤池对浑浊度的平均去除率达 95.8%, 对高锰酸盐指数的平均去除率达 11.1%, 对氨的平均去除率达 45.9%, 出水硝酸盐出现积累现象, 但出水水质均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

(4) 炭砂滤池的优势菌群主要为 Proteobacteria、Acidobacteriota 和 Chloroflexi。

参考文献

[1] 陈如勇, 徐华明, 王益军, 等. 基于强化去除水厂臭味物质

的炭砂滤池升级改造 [J]. 净水技术, 2022, 41(s2): 13-22.

CHEN R Y, XU H M, WANG Y J, et al. Upgrading of carbon-sand filter based on enhanced removal of odorous substances in WTP [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s2): 13-22.

[2] 冯硕, 张晓健, 陈超, 等. 炭砂滤池在饮用水处理中的研究现状及前景 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(4): 16-19.

FENG S, ZHANG X J, CHEN C, et al. Research status and prospect of GAC-sand dual media filters used in drinking water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(4): 16-19.

[3] BABLON G P, VENTRESQUE C, BENAÏM R. Developing a sand-GAC filter to achieve high-rate biological filtration [J]. Journal American Water Works Association, 1988, 80(12): 47-53.

[4] 黄孟斌, 王长平, 张毅, 等. 老旧水厂炭砂滤池改造及运行效果 [J]. 净水技术, 2019, 38(4): 31-34, 53.

HUANG M B, WANG C P, ZHANG Y, et al. Performance of reconstruction and operation for carbon and sand filters in old and aging water treatment plants [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(4): 31-34, 53.

[5] 冯令艳, 袁一星, 吕炳南. 炭砂滤池去除硝基苯等微污染有机物的研究 [J]. 中国给水排水, 2010, 26(15): 58-60, 63.

FENG L Y, YUAN Y X, LÜ B N. Study on removal of nitrobenzene and other organic micropollutants in carbon-sand filter [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(15): 58-60, 63.

[6] 冯硕, 张晓健, 陈超, 等. 炭砂滤池反冲洗及初滤水浊度控制方式研究 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(1): 52-54, 57.

FENG S, ZHANG X J, CHEN C, et al. Study on backwash methods and initial filtered water turbidity control of GAC-sand filters [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(1): 52-54, 57.

(下转第 108 页)

- 2023, 49(3): 102–108.
- [13] DU R, PENG Y, CAO S, et al. Mechanisms and microbial structure of partial denitrification with high nitrite accumulation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(4): 2011–2021.
- [14] RODRIGUEZ-SANCHEZ A, MARGARETO A, ROBLEDO-MAHON T, et al. Performance and bacterial community structure of a granular autotrophic nitrogen removal bioreactor amended with high antibiotic concentrations [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 325: 257–269. DOI:10.1016/j.cej.2017.05.078.
- [15] ZHOU Q, SUN H, JIA L, et al. Enhanced pollutant removal from rural non-point source wastewater using a two-stage multi-soil-layering system with blended carbon sources: insights into functional genes, microbial community structure and metabolic function [J]. *Chemosphere*, 2021, 275: 130007. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130007.
- [16] PARK M, KIM J, LEE T, et al. Correlation of microbial community with salinity and nitrogen removal in an Anammox-based denitrification system [J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128340. DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.128340.
- [17] TIAN R, NING D, HE Z, et al. Small and mighty: Adaptation of superphylum *Patescibacteria* to groundwater environment drives their genome simplicity [J]. *Microbiome*, 2020, 8(1): 51. DOI:10.1186/s40168-020-00825-w.
- [18] HOSOKAWA S, KURODA K, NARIHIRO T, et al. Cometabolism of the superphylum *Patescibacteria* with Anammox bacteria in a long-term freshwater anammox column reactor [J]. *Water*, 2021, 13(2): 208. DOI:10.3390/w13020208.
- [19] 姚雪薇, 邵贤明, 王康舟, 等. 不同基质条件下厌氧氨氧化 SMBBR 启动特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 4049–4055.
- YAO X W, SHAO X M, WANG K Z, et al. Anammox SMBBR fast start-up with different substrates [J]. *Journal of Environmental Science*, 2021, 41(10): 4049–4055.
- [20] SCHULZE R, SPRING S, AMANN R, et al. Genotypic diversity of *Acidovorax* strains isolated from activated sludge and description of *Acidovorax defluvii* sp. nov. [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, 22(2): 205–214.
- [21] WANG D P, LI T, HUANG K, et al. Roles and correlations of functional bacteria and genes in the start-up of simultaneous anammox and denitrification system for enhanced nitrogen removal [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1355–1363. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.11.321.
- [22] ZHANG M, GAO J, LIU Q, et al. Nitrite accumulation and microbial behavior by seeding denitrifying phosphorus removal sludge for partial denitrification (Pd): The effect of COD/NO₃⁻ ratio [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 323: 124524. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124524.
- [23] XU Z S, DAI X H, CHAI X L. Effect of different carbon sources on denitrification performance, microbial community structure and denitrification genes [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 195–204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.348.
- [24] HEINZ K G H, ZANONI P R S, OLIVEIRA R R, et al. Recycled paper sludge microbial community as a potential source of cellulase and xylanase enzymes [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, 8(6): 1907–1917.
- [25] XIN X D, SHE Y C, HONG J M. Insights into microbial interaction profiles contributing to volatile fatty acids production via acidogenic fermentation of waste activated sludge assisted by calcium oxide pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124287. DOI:10.1016/j.biortech.2020.124287.
- [26] NALCACI O O, BÖKE N, OVEZ B. Potential of the bacterial strain *Acidovorax avenae* subsp. *avenae* LMG 17238 and macro algae *Gracilaria verrucosa* for denitrification [J]. *Desalination*, 2011, 274(1/2/3): 44–53. DOI:10.1016/j.desal.2011.01.067.
- [27] 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 等. 不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 [J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2007–2017.
- WANG F P, HUANG Y L, ZHANG R R, et al. Effects of different aeration treatments on bacterial diversity, metabolic activity, and function in constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2007–2017.

(上接第 80 页)

- [7] QI W Q, LI W Y, ZHANG J P, et al. Effect of biological activated carbon filter depth and backwashing process on transformation of biofilm community [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(1): 15. DOI: 10.1007/s11783-019-1100-0.
- [8] GU Q, Ma J, ZHANG J, et al. Nitrogen-metabolising microorganism analysis in rapid sand filters from drinking water treatment plant [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(11): 29458–29475.
- [9] 丁卫, 盛德洋, 张晓健, 等. 活性碳-石英砂双层滤池去除氨氮和亚硝酸盐氮的特性 [J]. *净水技术*, 2012, 31(5): 20–24.
- DING W, SHENG D Y, ZHANG X J, et al. Characteristics of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen removal with GAC-sand dual media filter processes [J]. *Water Purification Technology*, 2012, 31(5): 20–24.