

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.09.018

常规工艺给水厂芽孢杆菌防控措施应用研究

蒋旗军, 徐维发, 刘岳峰, 黄远东, 范小燕, 陈洪霞, 郑贺宏
(深圳市深水宝安水务集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 采用常规处理工艺的给水厂,以芽孢杆菌为代表的耐氯菌在原水、生产、输配全流程中多有检出,存在出厂水菌落总数超标等管理风险,对用户也存在健康风险,需通过针对性的强化措施实现风险防控。基于常规工艺水厂中芽孢杆菌及其芽孢的时空分布规律,通过量化风险预警、打破滤池富集、限制滤池内繁殖三大针对性策略,保证了全流程降浊效果,以实现工程项目中的有效风险防控。结合具体工程条件,防控措施包括调整滤池反冲洗周期、双水泵加大水冲强度、调整“气冲-气水合冲-水冲”时长;滤池前加氯1.0 mg/L以上,使出水余氯大于0.3 mg/L;优化碱铝投加,加强排泥,减少回收,必要时在滤池前增投碱铝,降低沉后、滤后及出厂水浊度,保证除浊效果不低于常态化运行状态。数据结果显示,系列策略可有效保障常规工艺给水厂中出厂水芽孢杆菌不检出,符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值要求。

关键词: 芽孢杆菌; 芽孢; 常规工艺; 给水厂; 风险防控; 量化措施

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)09-0116-06

Application of *Bacillus* Prevention and Control Measures in Drinking Water Plant with Conventional Treatment Process

JIANG Qi-jun, XU Wei-fa, LIU Yue-feng, HUANG Yuan-dong, FAN Xiao-yan,
CHEN Hong-xia, ZHENG He-hong

(Shenshui Baoan Water Group Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In drinking water plants with conventional treatment process, chlorine-resistant bacteria represented by *Bacillus* are often detected in the whole process of raw water, purification, transmission and distribution. There are management risks such as the total number of bacterial colonies in the product water exceeding the standard, and there are also health risks to users. Therefore, drinking water plants with conventional treatment process need to achieve risk prevention and control through specific enhanced measures. Based on the temporal and spatial distribution of *Bacillus* and its spores in drinking water plants with conventional treatment process, this project ensured turbidity removing performance in the whole process by three specific strategies, namely quantifying risk early warning, avoiding bacterial enrichment in filter and limiting the growth of *Bacillus* in filter, so as to achieve effective risk prevention and control in engineering projects. According to the specific conditions of the project, the prevention and control measures included adjusting the backwashing cycle of the filter, increasing the intensity of water flushing with dual pumps and adjusting the duration of “air wash-air and water wash-water wash”. The dosage of chlorine was above 1.0 mg/L before the filter, and the residual chlorine in the effluent was

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07406-004)

greater than 0.3 mg/L. The dosage of basic aluminium chloride was optimized, the sludge discharge was strengthened, and the recycling was reduced. When necessary, basic aluminium chloride was added in front of the filter to reduce turbidity after sedimentation, filtration and purification to ensure that the turbidity removal performance was not lower than the normal operation state. The operational data showed that the series of strategies effectively guaranteed the non-detection of *Bacillus* in the product water from drinking water plants with conventional treatment process, and the water quality met the limit specified in the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022).

Key words: *Bacillus*; spore; conventional treatment process; drinking water plant; risk prevention and control; quantitative measure

芽孢杆菌抗逆性强,分支种属会对人体健康产生危害,是城市水循环中耐氯菌的常见优势菌种。其在高温、辐射、化学药物等条件的刺激下可形成芽孢,孢子含水量低、壁厚而致密、通透性差、不易着色、折光性强。芽孢内新陈代谢几乎停止,处于休眠状态,但保持潜在萌发力,同时菌体繁殖能力强且周期短。乔森等人^[1]分析一起生活饮用水污染的原因时发现,蜡样芽孢杆菌为条件致病菌,可污染水源,引起一系列食物中毒事件,其孢子对含氯消毒剂表现出显著的耐受性。祝泽兵^[2]研究了供水管网的耐氯菌,在已鉴定的17种中有11种为条件致病菌。在不同净水工艺中,耐氯菌的优势菌种有所不同。周常^[3]的研究结果显示,常规工艺给水厂的出厂水中,芽孢杆菌及其芽孢是耐氯菌的优势菌,且是抗逆性最强的一类。另外,在供水管网^[4]和再生水^[5]中,芽孢杆菌同样被证实是耐氯菌的优势菌种,也常被用于耐氯菌灭活或培养实验中的代表菌^[6]。

在常规工艺给水厂中,芽孢杆菌易造成出厂水菌落总数超标等管理风险。具体是由于菌体在滤池中短时间内富集并快速繁殖,含氯消毒剂的使用很难实现菌体和芽孢的灭活。芽孢杆菌及其芽孢在常规工艺水厂中的时空分布结果显示,芽孢杆菌容易在砂滤池中富集,6月—9月增殖较其他月份明显^[7]。供水管网要求保有一定浓度的余氯以保证输配过程中的消毒效果,但0.6和1.0 mg/L的余氯是刺激芽孢杆菌形成芽孢的适宜剂量^[2],无法对芽孢杆菌及其芽孢实现灭活。《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定,产气荚膜梭状芽孢杆菌参考限值为不得检出。使用常规工艺的水厂,其给水全流程均存在芽孢杆菌检出风险。

综上所述,在城市水循环过程中,因含氯消毒剂大规模使用,芽孢杆菌已被筛选为耐氯菌的优势菌种,对给水厂管理和用户健康产生的风险都日益增加。常规工艺给水厂需明确专项强化措施,才能有效防控超标风险。笔者基于常规工艺对芽孢杆菌及其芽孢的去除特性,使用三大针对性策略,分别为量化风险预警、打破滤池富集、限制滤池内繁殖,保障了混凝沉淀效果。并结合实际工程条件,提出了操作性较强的措施,旨在为常规工艺给水厂有效防控生产过程中芽孢杆菌的暴发和出厂水检出风险提供科学依据。

1 项目概况

1.1 水厂情况

该水厂位于深圳市宝安区,设计规模为 50×10^4 m³/d。水厂分三期建设,其中一、二、三期分别于1994年4月、1999年8月、2004年5月投产运行,设计规模分别为 10×10^4 、 10×10^4 、 30×10^4 m³/d,均采用“高锰酸钾+次氯酸钠预氧化→机械搅拌+水力混合→折板絮凝→平流沉淀→V型石英砂滤池过滤→次氯酸钠消毒”常规净水工艺,次氯酸钠作为预氧化药剂及主消毒剂。具体工艺流程见图1。

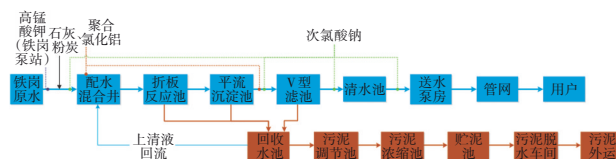


图1 水厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart of drinking water plant

1.2 现状及问题

水厂出水水质能达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,但出厂水中微生物含量仍存在超标风险,具体表现为:①进厂水中,2022年

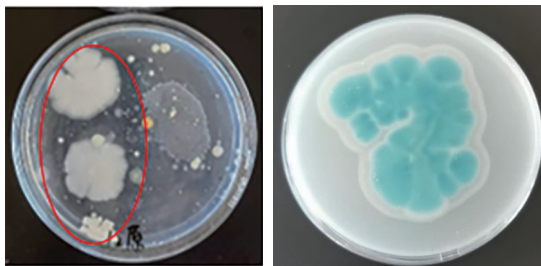
每日监测芽孢杆菌,整体检出率为72.70%,属于较高状态;②在进厂水检出浓度不高的情况下,滤后水的季节性富集和增殖情况明显;③常规处理工艺对耐氯菌的去除效果有限,耐氯菌一旦在水厂中富集暴发,极易导致出厂水菌落总数超标。

《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定,产气荚膜梭状芽孢杆菌为参考指标,限值为不得检出。针对新国标实施,芽孢杆菌在常规工艺水厂的防控措施需明确并趋严实施。

1.3 菌落总数和芽孢杆菌检测方法

使用玻璃容器采集水样并保存,确保容器经纯净蒸馏水彻底清洗和干热法灭菌后使用。预处理采用干热法,160℃以上保持2 min后在48 h内使用。使用玻璃容器保存时,密封后使用金属箔搭配玻璃塞,水样即取即检。

菌落总数及芽孢杆菌的检测方法均为《生活饮用水标准检验方法 微生物指标》(GB/T 5750.12—2006)平皿计数法,采用营养琼脂培养基。不同之处在于,芽孢杆菌按照菌落形态识别,典型的芽孢杆菌菌落形态呈片状,面积较大,边缘不规则,无真菌的丝状突出。为排除杂菌和真菌的干扰,可使用蜡样芽孢杆菌显色培养基进行显色计数,菌落呈蓝绿色,如图2所示,检测原理为孔雀绿染色。



a. 芽孢杆菌典型菌落形态 b. 显色培养基典型菌落形态

图2 芽孢杆菌和显色培养基的典型菌落形态

Fig.2 Typical colony morphology of chromogenic medium and *Bacillus*

原水每日至少检测一次,在进水管处使用长流龙头的形式进行取样。沉后水采用抽检的方式,全厂共计8个取样点位,随机每日抽取一个点位进行检测。滤后水采用抽检的方式,全厂共计40个滤池,每日抽样3个以上,轮流进行全部检测,以所有无差别随机取样结果的平均值作为当日滤后芽孢杆菌数量。取样点为滤后出水未投加主加氯的位置。每次采集瞬时混合水样,同一点位同一时间取

两次,随机选择其中一个作为平行样。

2 常规水厂芽孢杆菌防控策略及工程措施

芽孢杆菌及其芽孢在常规工艺给水厂的时空分布规律显示,滤池内芽孢杆菌明显富集,且滤后主消毒无法将其完全灭活。因此防控需围绕三大针对性策略,分别为滤后设置定量化风险预警点位、打破滤池内富集、限制滤池内繁殖,同时保证防控期间全流程降浊效果不低于常态化状态。

滤后设置定量化风险预警点位:在连续监测不同滤后主消毒条件下,芽孢杆菌去除率以出厂水检出不高于1 CFU/mL反推出风险预警限值;当超出风险预警限值时,启动针对性防控措施。

打破滤池内富集:原微生物平衡状态下将滤池反冲周期由48 h调整为24 h。反冲时气冲和水冲强度无法变频调整,因此采用双水泵取代单水泵进行水冲;气冲、气水合冲、水冲时长从3、5、4 min调整为5、10、4 min。

限制滤池内增殖:滤池前投加1.0 mg/L以上次氯酸钠,滤后菌体数量明显减少。

全流程降浊:高锰酸钾作为预氧化剂,投加量为0.30 mg/L,以强化混凝效果;滤池前投加碱铝0.15~0.30 mg/L;加强排泥,减少回收。保证沉后水浊度不高于1.0 NTU、滤后水浊度不高于0.15 NTU、出厂水浊度不高于0.15 NTU。

本研究第一阶段为2019年8月1日—10月17日,在无专项强化措施情况下,监测沉后水和滤后水中芽孢杆菌的数量;第二阶段为2019年10月18日—30日,为评估滤池反冲洗调整对富集的打破效果,反冲洗周期由48 h调整为24 h,适当延长气冲和气水合冲时长,水冲采用双水泵;第三阶段为2020年8月8日—15日,单独评估滤前加氯对滤池内芽孢杆菌增殖抑制的效果,滤池前次氯酸钠实际投加量为1.0~3.8 mg/L;第四阶段为2020年8月16日—9月15日,确定滤后风险预警限值,以出厂水检出芽孢杆菌不高于1 CFU/mL为标准,主消毒前为风险预警点位;第五阶段为2022年1月—10月,基于定量化风险预警限值,启动系列防控措施,验证综合防控效果,7月—8月滤后水芽孢杆菌超过风险预警值,启动专项防控系列措施,监控全流程防控效果。

3 结果与分析

因芽孢杆菌在原水中的检出率较高,但浓度普

遍不高,经滤池富集和增殖后显著增多。以上措施实施过程中,先采取滤池强化反冲和滤前加氯的单一措施,观察效果,然后叠加多项措施,逐步推进并对比分析防控效果。2022年同步实施系列措施,并将滤后芽孢杆菌检出数量高于定量化风险预警值作为启动依据。

3.1 滤池富集及强化反冲效果

2019年该水厂未采取针对性的强化措施,每日对沉后水和滤后水中芽孢杆菌数量进行连续监测。第一阶段数据显示,芽孢杆菌在沉后水中的检出率为23.08%,在滤后水中的检出率为89.74%。沉后水中芽孢杆菌的平均值为2.6 CFU/mL,滤后水中平均值为8.6 CFU/mL。可见,无强化措施时,滤池对芽孢杆菌有明显富集和增殖作用。其他月份数据较为离散,因此视为无显著富集。此结果与其他水厂时空分布规律一致^[8]。

滤池启动强化反冲后,反冲周期由48 h缩短为24 h,采用双水泵进行反冲洗,同时将气水合冲时长由5 min延长为10 min。滤后芽孢杆菌数量的变化情况如图3所示。可知,未采取强化措施前,芽孢杆菌在滤后水中的检出率为89.74%,平均值为8.6 CFU/mL;采取强化措施后,在滤后水中的检出率为84.62%,平均值为3.4 CFU/mL。采取措施后芽孢杆菌呈下降的趋势,但仍高于沉后水的检出情况。

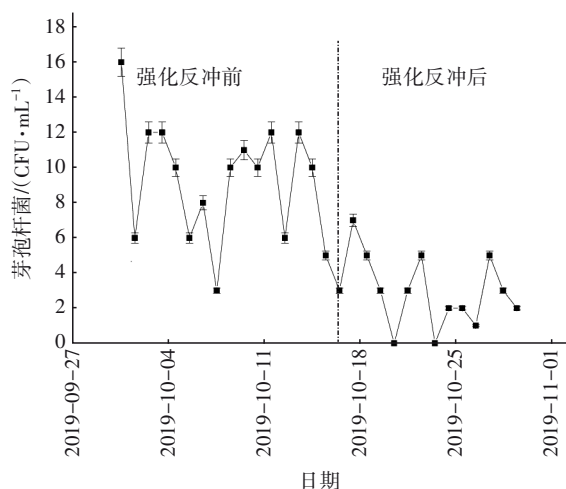


图3 强化反冲前后芽孢杆菌的检出差异

Fig.3 Differences in the detection of *Bacillus* before and after intensive backwashing

对于生物滤池,反冲洗强度和时长可影响滤池含泥率、反冲前后溶解氧含量、菌落平衡,短时间内滤池反冲参数的大幅调整能够打破原有优势菌的

富集平衡^[8]。石英砂滤池内的芽孢杆菌作为优势菌种之一,反冲洗参数调整后,其也出现了富集平衡改变的情况。

3.2 限制滤池内菌体增殖效果

滤池内芽孢杆菌有明显的富集和增殖。滤前投加不低于1.0 mg/L的次氯酸钠,目的是减缓芽孢杆菌的增殖。8月8日开始启动滤池强化反冲,同期启动滤前加氯,次氯酸钠实际投加量为2.0~3.0 mg/L,滤后无余氯检出,因此投加量较大,简称为“强滤前加氯”阶段;18日之后滤后余氯逐渐稳定至0.3 mg/L以上,次氯酸钠投加量逐渐降低至1.0 mg/L,简称为“稳定滤前加氯”阶段。此过程中,每日检测滤后水中芽孢杆菌的数量以评估效果,同时检测滤后水中余氯含量以调整次氯酸钠投加量,具体结果如图4所示。

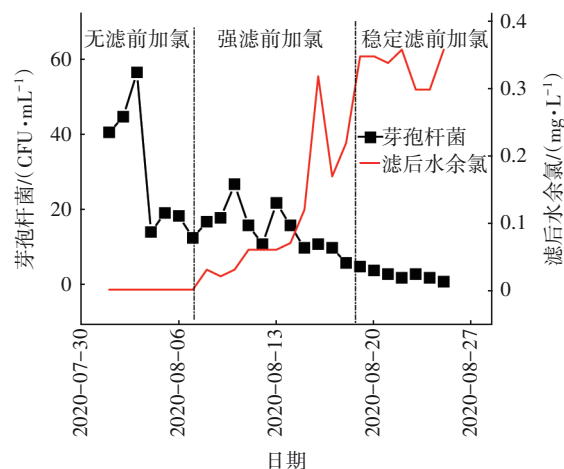


图4 滤前加氯对芽孢杆菌增殖的影响

Fig.4 Effect of chlorination before filtration on proliferation of *Bacillus*

从图4可以看出,8月8日—18日,尽管大剂量投加了次氯酸钠,但滤后水的余氯较低,芽孢杆菌数量有所下降,但仍高于10 CFU/mL。18日以后,滤后水余氯有检出并高于0.3 mg/L时,当滤前次氯酸钠实际投加浓度约为1.0 mg/L时,芽孢杆菌数量稳定低于10 CFU/mL,检出率开始出现低于100%的情况。8月23日以后,检出率稳定低于50%。供水管网相关研究发现^[2],0.6和1.0 mg/L的余氯是产生芽孢的最佳浓度,与本研究观察到的芽孢杆菌检出率一致。王华然^[5]的研究表明,0.3、1.0 mg/L的有效氯对芽孢杆菌有明显的抑制效果。总而言之,采取滤前加氯限制芽孢杆菌增殖时,因滤池本身截留污染物等原因,初始投加量应高于1.0 mg/L,以保证对

芽孢杆菌菌体有足够的刺激。10 d左右,滤池可形成新的过滤平衡,滤后水余氯逐渐高于检出限;20 d左右,芽孢杆菌检出率低于50%。

3.3 风险预警值量化

滤后主消毒是芽孢杆菌防控的最后一道防线,因此将滤后水作为风险预警点位,出厂水检出1 CFU/mL的芽孢杆菌视为有风险。2020年8月滤后水中芽孢杆菌数量明显增多,此段时间内启动了滤前加氯和强化反冲措施进行防控。主消毒也提高了次氯酸钠投加量,出厂水余氯为1.0~1.2 mg/L,是水厂运营经济且安全的上限。8月8日—22日,当出厂水中连续检出芽孢杆菌时,主消毒工艺单元去除率分布情况如图5所示,其中去除率= $\lg(\text{去除前数量}/\text{去除后数量})$ 。此段时间滤后水中芽孢杆菌数量处于历史较高状态,针对滤池强化反冲和滤前加氯措施,综合去除率为1.4-lg,反推滤后水芽孢杆菌数量为27 CFU/mL,将此数值作为该水厂的定量风险预警值。在此后的运行中,每日检测滤后水中芽孢杆菌数量,出现超过预警值的情况时,启动系列专项防控措施。

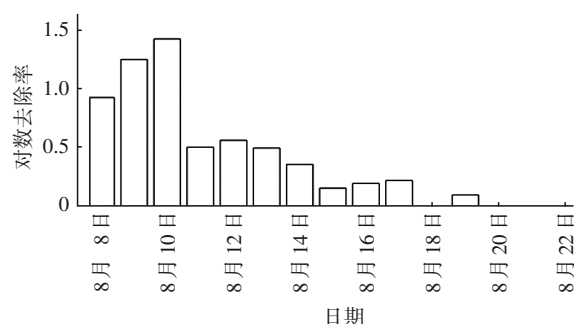


图5 主消毒工艺单元对芽孢杆菌的去除效果

Fig.5 Removal effect of *Bacillus* by main disinfection process

3.4 量化预警及综合防控效果

2022年1月—10月,以滤后芽孢杆菌数量>27 CFU/mL作为风险预警值,采用强化反冲减少滤池富集、滤前加氯限制增殖的针对性措施,同时保证混凝沉降效果不低于常态化运营情况。具体实施过程中8月—10月启动综合防控措施,其他月份无强化措施。2022年和2021年出厂水、原水、滤后水中芽孢杆菌的检出情况如图6所示。从图6(a)可以看出,与2021年相比,2022年出厂水的月检出率整体较低,2022年的全年综合检出率为5.33%,2021年为8.77%,可见2022年检出率显著下降。除防控

措施不同外,原水检出率可反映污染物来源。

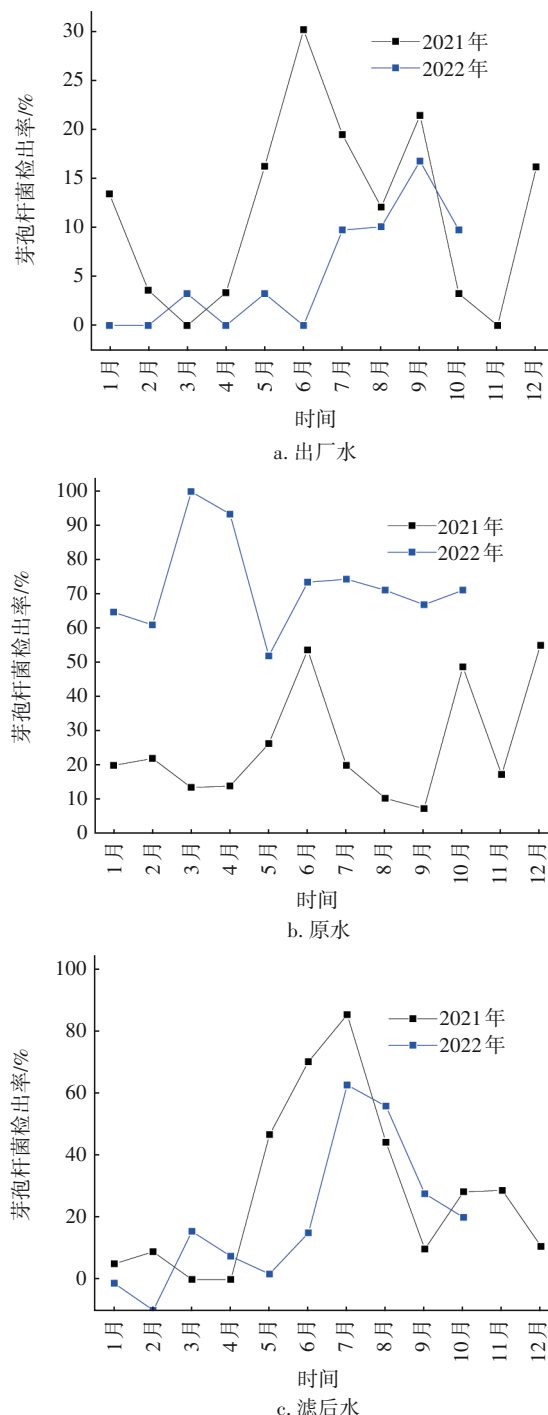


图6 2021年和2022年出厂水、原水、滤后水中芽孢杆菌的检出率

Fig.6 Detection rate of *Bacillus* in influent, effluent and filtered water in 2021 and 2022

由图6(b)可知,2022年原水中芽孢杆菌检出率同比更高,全年综合检出率为72.70%,2021年为25.21%,增加明显。由图6(c)可知,2022年滤后水

中芽孢杆菌的月均检出率比2021年有所下降。综上所述,定量化预警及综合防控措施效果明显,在原文检出率升高的情况下,滤后水和出厂水中芽孢杆菌的检出率明显下降。

4 结论

① 采用针对性防控措施时,宜根据历史检出情况明确风险预警定量限值,建议风险预警点位设置在滤后位置。将出厂水检出芽孢杆菌为1 CFU/mL视为出现风险,按照芽孢杆菌去除率反推滤后水的检出浓度,作为风险预警限值。

② 滤后水中芽孢杆菌超过预警值时,可强化滤池反冲洗,具体包括缩短反冲周期、提高气冲时长、加强反冲强度等措施,但单一措施无法保证风险稳定控制在预警值以内。

③ 采用滤池前投加次氯酸钠限制芽孢杆菌增殖时,投加量应大于1.0 mg/L,以滤后水中余氯大于0.3 mg/L作为调控到位的信号;因滤砂含泥,在滤池前投加次氯酸钠时建议初始投加量应远大于1.0 mg/L,根据滤后水余氯适当调整投加量。

④ 综合防控措施可以显著降低滤后水及出厂水中芽孢杆菌检出率,实施措施主要包括滤池的强化反冲和滤前加氯,同时应保证混凝效果不低于常态化运营时的情况。

参考文献:

- [1] 乔森,陆桥君.一起生活饮用水污染蜡样芽孢杆菌的检测与分析[J].江苏预防医学,2019,30(6):679-680.
QIAO Miao, LU Qiaojun. Detection and analysis of *Bacillus cereus* in drinking water[J]. Jiangsu Journal of Preventive Medicine, 2019, 30(6): 679-680 (in Chinese).
- [2] 祝泽兵.供水管网中的耐氯菌群及其耐氯机制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
ZHU Zebing. Research on Chlorine-resistant Bacteria Community and Chlorine Resistance Mechanism in Drinking Water Distribution System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese).
- [3] 周常.净水工艺过程中微生物风险评估与控制技术研究[D].广州:广州大学,2018.

- ZHOU Chang. Study on Microbial Risk Assessment and Control Technology in Water Purification Process [D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2018(in Chinese).
- [4] 周子仪.解析供水管网中耐氯菌对消毒剂和抗生素抗性关系[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
ZHOU Ziyi. Analysis of the Relationship between the Resistance to Disinfectant and Antibiotics in Drinking Water Distribution System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021(in Chinese).
- [5] 王华然.再生水中耐氯菌的消毒效果评价及其抗性机理初探[D].天津:天津医科大学,2016.
WANG Huaran. Study on the Disinfected Effect and Resistant Mechanism of Chlorine-resistant Bacteria in Reclaimed Water [D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2016(in Chinese).
- [6] 张国鹏,蒋旗军,王梅芳,等.水厂蜡样芽孢杆菌的灭活工艺研究[J].给水排水,2018,44(2):39-43.
ZHANG Guopeng, JIANG Qijun, WANG Meifang, et al. Study on process for *Bacillus cereus* inactivation in waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(2):39-43(in Chinese).
- [7] 蒋旗军,黄慧,王长平,等.常规工艺给水厂中芽孢杆菌及其芽孢时空分布规律[J].中国给水排水,2018,34(5):10-14.
JIANG Qijun, HUANG Hui, WANG Changping, et al. Spatial and temporal distribution of *Bacillus* sp. and its spores in conventional process waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 10-14 (in Chinese).
- [8] 江肖良,李孟,张少辉,等.4种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析[J].环境科学,2018,39(12):5503-5513.
JIANG Xiaoliang, LI Meng, ZHANG Shaohui, et al. Purification efficiency and microbial characteristics of four biofilters operated under different conditions [J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5503-5513 (in Chinese).

作者简介:蒋旗军(1991-),女,河南商丘人,硕士,工程师,主要研究方向为饮用水消毒。

E-mail:13510138237@163.com

收稿日期:2022-11-19

修回日期:2023-02-09

(编辑:任莹莹)