

常规工艺给水厂中芽孢杆菌及其芽孢时空分布规律

蒋旗军, 黄 慧, 王长平, 陈庆辉, 易利翔, 王梅芳

(深圳市深水宝安水务集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要: 国内芽孢杆菌及其芽孢在实际生产中的时空分布调查数据不足,无法制定科学的去除措施。为此,针对典型常规工艺给水厂,以蜡样芽孢杆菌作为芽孢杆菌的指示菌体,使用蜡样芽孢显色培养基进行定量检测;以好氧芽孢作为芽孢的指示菌体,使用巴斯德法消毒后培养的方法进行定量检测。以年为周期,分析两者空间分布规律,然后评价各工艺段的去除效能,提出针对工艺特性的去除措施和建议。结果表明,两者浓度较低时(<40 CFU/mL),常规工艺有能力保障出水水质安全性;砂滤池中芽孢杆菌滋生明显;混凝沉淀、砂滤、氯消毒单元对芽孢的去除率基本持平,在 $1.20\text{-lg} \sim 1.50\text{-lg}$ 之间。因此,建议进一步研究去除措施时,针对进水至砂滤池之间工艺段,直接灭活菌体或促进菌体形成芽孢,可有效提高综合去除率。

关键词: 给水厂; 芽孢杆菌; 芽孢; 时空分布

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0010-05

Spatial and Temporal Distribution of *Bacillus* sp. and Its Spores in Conventional Process Waterworks

JIANG Qi-jun, HUANG Hui, WANG Chang-ping, CHEN Qing-hui, YI Li-xiang,
WANG Mei-fang

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

Abstract: In actual production, due to the lack of spatial and temporal distribution survey data of *Bacillus* sp. and its spores, it is impossible to formulate scientific removal measures. Therefore, taking *Bacillus cereus* and aerobic *Bacillus* spore as the representation of *Bacillus* sp. and its spores respectively, their spatial and temporal distribution in a waterworks using conventional process was investigated. The purpose of this study was to evaluate the removal efficiency of each unit, and then to propose measures and suggestions for the removal of *Bacillus* sp. The result showed that when *Bacillus* sp. and its spores were at low-level concentration(<40 CFU/mL), the conventional process could assure the safety of treated water quality. In contrast, coagulation sedimentation and sand filtration unit was less effective in the removal of *Bacillus* sp., and *Bacillus* sp. bred significantly in the sand filter; coagulation sedimentation, sand filtration and chlorine disinfection had the same ability to remove *Bacillus* spores, and the removal rate was between 1.20-lg and 1.50-lg . In order to improve the overall removal rate, it was recommended to directly inactivate bacteria or to promote the formation of *Bacillus* spores before the filter.

Key words: waterworks; *Bacillus* sp.; *Bacillus* spore; spatial and temporal distribution

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

芽孢杆菌能形成芽孢(内生孢子),包括芽孢杆菌属、芽孢乳杆菌属、梭菌属、脱硫肠状菌属和芽孢八叠球菌属等。它们对外界有害因子抵抗力强,分布广,存在于土壤、水、空气以及动物肠道等处,是一类重要的资源微生物^[1],可用于分解原油,防治植物病害,降解土壤中难溶的含磷、含钾化合物等^[2]。但芽孢杆菌也有一些负面效应,如蜡样芽孢杆菌与少数食物中毒有关(约2%~5%),包括一些严重的恶心、呕吐以及腹痛等^[3]。其在一定条件下会形成芽孢,此为抗逆性强的休眠体构造。由于芽孢在结构和化学成分上均有别于营养细胞,因此也就具有了许多不同于营养细胞的特性。芽孢最主要的特点就是抗性强,对高温、紫外线、干燥、电离辐射和很多有毒的化学物质都有很强的抗性。因此,一旦芽孢杆菌形成芽孢,其耐消毒特性进一步增强^[4]。笔者针对典型常规工艺水厂,以蜡样芽孢杆菌作为芽孢杆菌的指示菌体,以好氧芽孢作为芽孢的指示菌体^[5],对水库水、原水、沉后、滤后和出水的芽孢杆菌及其芽孢的分布进行长期监测。该研究旨在明确芽孢杆菌与芽孢在给水厂常规工艺段的时空分布规律及各工艺单元对其的去除效果,为芽孢杆菌的控制技术研究提供方向,全面保障饮用水供水安全。

1 试验方法

试验中选取的常规工艺给水厂分四期建设,其中一期为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,1998年建成投产;二期为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,1999年建成投产;三期为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,2003年建成投产;四期为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,2004年建成投产。取样点设置在三期和四期。原水来自A和B两个水库,其中A水库为主水源,B水库为备用水源,只在紧急缺水或调度时启用,且与A水库水以3:10的比例混合。主水源比备用水源水量充足,库容更大,有机物及藻类等水质指标更优。

分别在B水库取水口、A水库进入水厂的进水口、沉后、滤后和出水处设置取样点(依次记作水库水、原水、沉后水、滤后水、出厂水),每周检测蜡样芽孢杆菌和好氧芽孢浓度各一次,并观察菌体、菌落形态,在此基础上进行各工艺段的去除效能分析。

2 结果与讨论

2.1 芽孢杆菌的菌落形态及时空分布规律

采用蜡样芽孢杆菌显色培养基,可获取典型的蓝绿色菌落形态,根据这一特征可定性并定量检测蜡样芽孢杆菌,在水库水及原水、沉后水、滤后水和

出厂水中均有检出,其菌落形态如图1所示。

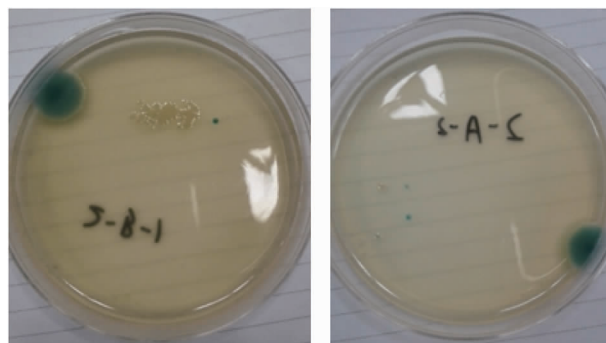


图1 蜡样芽孢杆菌典型菌落形态

Fig. 1 Typical colony morphology of *Bacillus cereus*

挑取典型蓝色菌落进行革兰氏染色,结果表明该细菌为革兰氏阳性菌,菌体形状为杆状,末端方,如图2所示。

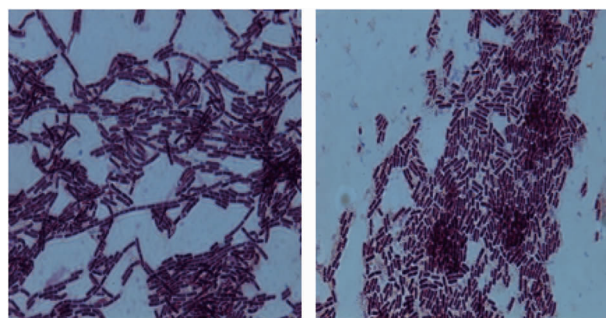


图2 革兰氏染色显微镜照片($\times 400$)

Fig. 2 Micro-photos of Gram stained *Bacillus cereus*

2015年6月3日—2016年5月6日,对给水厂各工艺单元芽孢杆菌进行了持续约一年的取样分析,结果如图3所示。

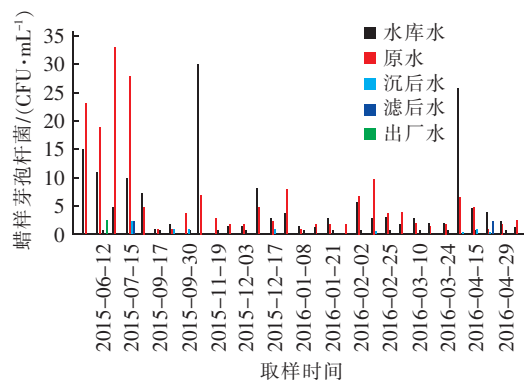


图3 给水厂各工艺单元芽孢杆菌分布

Fig. 3 Distribution of *Bacillus* sp. in waterworks

检测结果显示,B水库取水口处蜡样芽孢杆菌浓度在0~35 CFU/mL之间波动,检出率约为76%;A水库水蜡样芽孢杆菌浓度在0~40 CFU/mL之

间,检出率接近 100%;经过混凝沉淀后蜡样芽孢杆菌几乎无法检出,其浓度在 0~5 CFU/mL 之间,检出率仅为 5%;滤后水中的浓度与沉后水相比略微增加,浓度在 0~10 CFU/mL,检出率为 15%;经过消毒处理后芽孢杆菌的浓度再次降低,浓度在 0~5 CFU/mL 之间,检出率为 5%。由以上变化可知,当原水中芽孢杆菌的浓度处于较低水平时,常规工艺水厂可有效控制出水中芽孢杆菌浓度。从芽孢杆菌分布随时间变化的角度来讲,进水中芽孢杆菌浓度在 10 月到第二年 5 月处于较低水平,这可能是由于温度、光照等条件的改变影响了芽孢杆菌的生长。

各工艺单元出水芽孢杆菌浓度的箱形图见图 4,箱形图可以更直观地反映各工艺单元出水芽孢杆菌的变化规律并识别异常值。可见,水厂原水中芽孢杆菌的浓度明显高于 B 水库水,分析可能有两个原因,第一是 A 水库水中芽孢杆菌的浓度高于 B 水库水,第二是原水在从 A 水库取水口到水厂的管道输送过程中发生了细菌生长。为此,在 A 水库取水口处取样进行分析,结果表明 A 水库水中芽孢杆菌浓度和 B 水库水浓度相当(15 CFU/mL),因此水厂原水中芽孢杆菌浓度高于水库水的原因可能是原水在管道输送过程中,芽孢杆菌出现了分裂增殖。

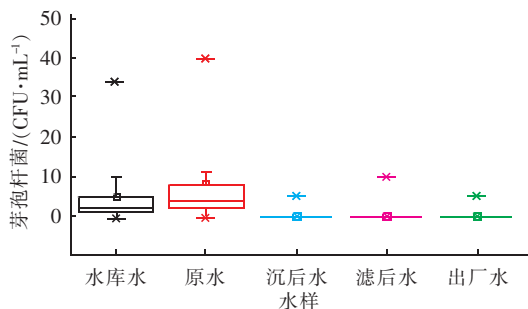


图4 给水厂各工艺单元出水芽孢杆菌的箱形图

Fig. 4 Box-plot of *Bacillus* sp. in effluent of different unit during water treatment

原水经过混凝沉淀后,芽孢杆菌的浓度得到有效降低,表明混凝沉淀对芽孢杆菌具有显著的去除效果,同时还可能与预氧化有关。由于沉后水中芽孢杆菌的浓度已处于较低水平,平均仅为 0.25 CFU/mL,因此对于后续过滤而言负荷较低。滤后水芽孢杆菌浓度平均为 1 CFU/mL,相比沉后水而言有所增加,这很可能是由于芽孢杆菌在砂滤池中的生长繁殖所致。消毒出水中芽孢杆菌的浓度降低为 0.25 CFU/mL,出水无风险。

2.2 芽孢的检出形态及时空分布规律

采用巴斯德法消毒后培养的方法检测了给水厂各工艺单元出水中芽孢的分布。原水和滤后水的典型菌落照片如图 5 所示。相比于滤后水而言,原水中好氧芽孢种类较多,主要有三种菌落形态,即乳白色片状菌落(1 号菌落)、乳白色圆形菌落(2 号菌落)和淡黄色圆形菌落(3 号菌落),而滤后水中菌落形态单一,只有乳白色圆形菌落(4 号菌落)。B 水库水中好氧芽孢菌落形态和水厂原水接近,沉后水和出厂水中芽孢菌落形态与滤后水接近。

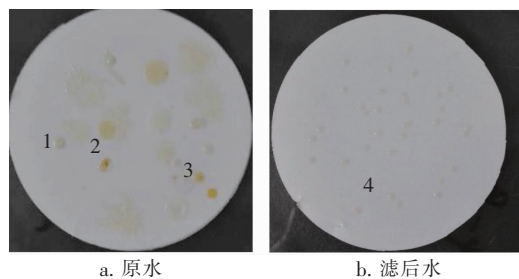


图5 给水厂原水和滤后水芽孢典型菌落形态照片

Fig. 5 Typical colony morphology of detected *Bacillus* spore

分别对上述菌落进行革兰氏染色,其显微镜照片如图 6 所示。对于原水而言,乳白色片状菌落和淡黄色圆形菌落为革兰氏阴性菌,细菌同为杆状,但与之前所述的蜡样芽孢杆菌形态有较大差别。原水中的乳白色圆形菌落和滤后水中的菌落均为革兰氏阳性菌,且其形状特征与之前所述的蜡样芽孢杆菌形态接近,推测其可能是蜡样芽孢杆菌。

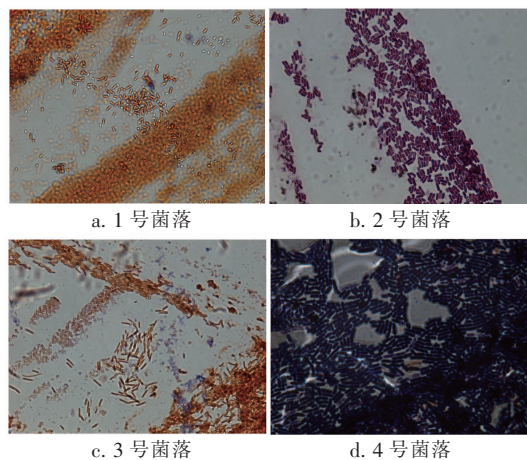


图6 典型菌落革兰氏染色显微镜照片(×400)

Fig. 6 Micro-photos of Gram stained *Bacillus* spore

2015 年 5 月 21 日—2016 年 5 月 6 日,对给水厂各工艺单元出水中的芽孢进行了持续取样分析,

结果如图7所示。从结果看,水库取水口处和水厂原水的好氧芽孢检出率均为100%;经过混凝沉淀后好氧芽孢浓度明显降低;在滤池单元好氧芽孢检测过程中分别采集了二期和四期的滤后水,实际检测并无显著性差异($p > 0.05$),故数据展示时视为相同水样。滤后水中的好氧芽孢浓度与沉后水相比进一步降低,检出率为68%;经过消毒处理后芽孢杆菌的浓度再次降低,检出率为40%。由以上变化可知,常规工艺水厂可有效去除好氧芽孢。

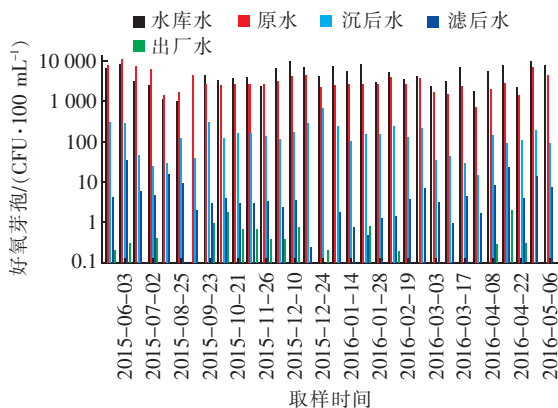


图7 给水厂各工艺单元出水芽孢浓度随时间的变化

Fig.7 Distribution of *Bacillus* spore in different unit

从好氧芽孢分布随时间变化的角度来讲,原水中好氧芽孢的浓度在5月—7月之间略高于其他月份,但沉后水、滤后水及出厂水并无明显的区别。各工艺单元出水好氧芽孢浓度的箱形图见图8。可以看出,水厂原水中的好氧芽孢略少于水库水,经过混凝沉淀后好氧芽孢的浓度得到有效降低,经过滤和消毒后好氧芽孢浓度继续降低。表明常规工艺的混凝沉淀、过滤、消毒过程对芽孢有明显去除效果。

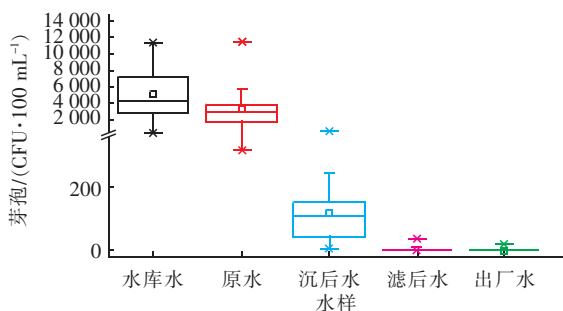


图8 给水厂各工艺单元出水芽孢的箱形图

Fig.8 Box-plot of *Bacillus* spore in effluent of different unit

2.3 各工艺段去除效能分析

常规工艺对芽孢杆菌的去除效果不理想,特别是在砂滤池中芽孢杆菌滋生明显(见表1)。对于芽

孢,原水中好氧芽孢平均浓度为3 546.55 CFU/100 mL,沉淀出水中好氧芽孢浓度为144.48 CFU/100 mL,砂滤出水中好氧芽孢浓度为5.15 CFU/100 mL,氯消毒后好氧芽孢浓度为0.28 CFU/100 mL。就各单元工艺的去除率来说,沉淀、砂滤、消毒的对数去除率分别为1.39-lg、1.45-lg、1.26-lg;就累积去除率而言,原水到沉淀之后的去除率为1.39-lg,原水到砂滤之后的累积对数去除率为2.84-lg,原水到氯消毒之后的累积对数去除率为4.10-lg。由此可知,常规工艺对好氧芽孢的去除率较为理想。

表1 常规工艺对芽孢杆菌的对数去除率

Tab.1 Logarithmic removal rate of *Bacillus* sp. in different unit

项 目	水库	原水	沉后水	滤后水	消毒后
蜡样芽孢杆菌/ (CFU · 100 mL ⁻¹)	657	861	145	500	500
单元去除率	—	—	0.76-lg	-0.52-lg	0
累积去除率	—	—	0.76-lg	0.24-lg	0.24-lg

3 结论与建议

① 原水中的芽孢杆菌浓度在10月到第二年5月处于较低水平,原水中的芽孢随季节变化不明显。水厂各工艺出水中的芽孢杆菌和芽孢浓度随季节变化也不明显。

② 常规工艺正常运行时,可以有效控制原水中的芽孢杆菌和芽孢,出厂水浓度分别控制为0.25 CFU/mL和0.20 CFU/100 mL,远低于国标限值。

③ 对芽孢的累积去除率可达到4.10-lg,混凝沉淀和过滤单元对芽孢有显著的去除效果,去除率分别为1.39-lg和1.45-lg;但对芽孢杆菌的去除能力差,正常运行条件下在砂滤池中有滋生现象。

④ 为强化常规工艺对芽孢杆菌及芽孢的控制,建议重点研究:预氧化促进芽孢杆菌转化成芽孢、混凝沉淀强化对芽孢的去除以及抑制砂滤池中芽孢萌发及芽孢杆菌滋生繁殖。

参考文献:

- [1] 张新雄,彭锋,毛光平,等. 饲用芽孢杆菌研究与应用进展[J]. 应用与环境生物学报,2013,19(5):891-897.
Zhang Xinxiang, Peng Feng, Mao Guangping, et al. Advance in research and application of *Bacillus* Probiotics [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, 19(5): 891-897 (in Chinese).

- [2] 朱玥妍,刘皎,杜春梅. 芽孢杆菌生物防治植物病害研究进展[J]. 安徽农业科学,2012,34:112-115.
Zhu Yueyan,Liu Jiao,Du Chunmei. Research progress of biological control in plant diseases by *Bacillus* spp. [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,34:112-115(in Chinese).
- [3] 刘勇. 关于1564次旅客列车疑似食物中毒的调查分析[J]. 中国卫生产业,2015,(11):107-109.
Liu Yong. The analysis of 1564 passenger train suspected food poisoning investigation [J]. China Health Industry, 2015,(11):107-109(in Chinese).
- [4] 杨海东. 饮用水高级氧化处理技术的生物有效性研究[D]. 大连:大连海事大学,2014.
Yang Haidong. The Research of Biological Availability on Advanced Oxidation Technology of Drinking Water Treatment [D]. Dalian: Dalian Maritime University,2014(in Chinese).
- [5] Galofre B,Israel S,Dellunde J, *et al.* Aerobic bacterial spores as process indicators for protozoa cysts in water

treatment plants[J]. Water Sci Technol,2004,50(1):165-172.



作者简介:蒋旗军(1991-),女,河南商丘人,硕士,助理工程师,从事饮用水安全保障技术研究。

E-mail:13510138237@163.com

收稿日期:2017-09-24

(上接第9页)

参考文献:

- [1] 袁一星,常魁,高金良,等. 二氧化氯和氯联合消毒耦合机制试验研究[J]. 中国给水排水,2011,27(17):65-67.
Yuan Yixing,Chang Kui,Gao Jinliang, *et al.* Experimental study on combined disinfection mechanism of chloride dioxide and chlorine [J]. China Water & Wastewater, 2011,27(17):65-67(in Chinese).
- [2] 王春,蒋旗军,尤作亮,等. 混合消毒剂发生器运行条件对 ClO_2 收率的影响[J]. 中国给水排水,2014,30(13):61-63.
Wang Chun,Jiang Qijun,You Zuoliang, *et al.* Effects of operating conditions of ClO_2 - Cl_2 generator on yield of ClO_2 [J]. China Water & Wastewater,2014,30(13):61-63(in Chinese).
- [3] 穆丽,董燕. 水厂二氧化氯消毒面临的问题及解决措施[J]. 中国给水排水,2017,33(10):46-48.
Mu Li,Dong Yan. Facing problems and solutions in disinfection with chlorine dioxide in water purification plant [J]. China Water & Wastewater,2017,33(10):46-48(in Chinese).
- [4] 朱慧峰,童俊,叶秋明,等. 饮用水中二氧化氯消毒副产物的分布与控制对策[J]. 净水技术,2016,35(1):

107-110.

Zhu Huifeng,Tong Jun,Ye Qiuming, *et al.* Distribution and control countermeasure of disinfection byproducts (DBPs) in drinking water with chloride dioxide [J]. Water Purification Technology,2016,35(1):107-110(in Chinese).



作者简介:廖岚(1973-),女,湖南双牌人,学士,工程师,主要从事自来水生产技术管理工作。

E-mail:654700857@qq.com

收稿日期:2017-12-15