

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.006

给水管网管壁生物膜脱落的影响因素研究现状

信常春, 张颖, 邱顺添

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 城市给水管网系统是将饮用水从处理厂输送到用户端的关键基础设施,但饮用水在输送过程中会出现水质下降的问题,而管壁生物膜的脱落是影响水质的重要原因之一。总结了生物膜的形成和脱落过程,生物膜物理结构以及引起生物膜脱落进入管网水的影响因素。结果表明,消毒作用、营养物质的浓度、水力条件的变化都会导致生物膜脱落进入管网水,进而影响水质。因此,为保证给水系统中饮用水的安全必须关注管壁生物膜的脱落问题。

关键词: 给水管网; 生物膜; 脱落; 管网水

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0038-06

Research Progress on the Influence Factors of Biofilm Detached in Drinking Water Distribution System

XIN Chang-chun, ZHANG Ying, KHU Soon Thiam

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The drinking water distribution system is a critical infrastructure that transports drinking water from the water treatment plant to end-users. However, during the distribution process, there would be a problem of water quality degradation. The growth and detachment of biofilms on pipe walls were the important reasons which affecting water quality. This article presents a critical review of research on the growth and detachment process of biofilms, the structure of biofilms, and the reasons why they detach into the bulk water. The results indicate that disinfection, nutrient concentration, and changes in hydraulic conditions can cause the biofilm to detach into the bulk water, which affects water quality. Therefore, care must be taken with the detachment of biofilm to ensure the safety of drinking water in the drinking water distribution system.

Key words: drinking water distribution system; biofilm; detached; bulk water

给水管网系统承担着将处理后的饮用水安全输送至用户端的重要任务,但是水源水经过水处理厂相关工艺处理后仍有少量细菌和有机物存在,并直接进入管网系统。进入管网系统的细菌可以利用残留在管网水中的有机物作为营养物质继续增殖,分泌胞外聚合物(EPS),并且附着在管壁上形成

生物膜。生物膜中的细菌被胞外聚合物包裹形成了一个相对稳定的微环境,降低了消毒剂的渗透性,导致消毒剂灭活效率的下降,而生物膜中细菌会继续生长增殖进而影响水质^[1]。

当管网水质条件和水力条件发生变化时,生物膜可能会从管壁上脱落进入管网水,并导致管网水

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(19JCYBJC23200)

通信作者: 邱顺添 E-mail: soon.thiam.khu@tju.edu.cn

质的恶化^[2-3],如引起饮用水的感官问题,包括色度升高以及气味的改变^[4],还会导致管网水中细菌总数和铁离子浓度的增加^[4],生物膜中的军团菌等条件致病菌也会随着生物膜的脱落进入管网水,构成严重的健康风险^[5-6]。由此可见,生物膜的脱落直接影响了管网水的水质,必须予以关注。

虽然当前对给水管网生物膜的研究不断取得新成果,但其研究重点一般集中于管材、流速、余氯浓度、营养物质浓度等对生物膜形成、物理结构以及细菌群落组成的影响方面^[7],缺乏生物膜脱落影响因素的总结。对于此,介绍了给水管网管壁生物膜形成与脱落的过程以及生物膜结构,并且总结了生物膜脱落的影响因素,提出了生物膜与管网水质相互作用的研究展望。

1 给水管网管壁生物膜

1.1 生物膜的形成与脱落过程

给水管网中生物膜的形成与脱落过程^[8]见图1。

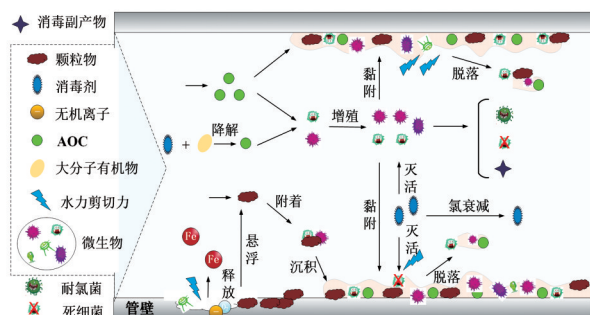


图1 给水管网中生物膜的形成与脱落过程

Fig.1 Growth and detached process of biofilm in drinking water distribution system

如图1所示,细菌进入给水管网后,可利用管网水中的有机营养物质进行增殖,并且通过分泌胞外聚合物(EPS)黏附于管壁形成生物膜,生物膜中的细菌会继续增殖,研究^[9]发现,给水管网中至少有95%的细菌生长在生物膜上。生物膜的生长周期主要分为四个阶段:阶段1为细菌可逆地附着在管壁表面上;阶段2为细菌不可逆转地附着,失去鞭毛驱动的动力;阶段3为达到成熟阶段;阶段4为进入脱落阶段^[10]。

细菌增殖利用的营养物质包括直接来源于水处理厂的生物可同化有机碳(AOC)以及管网水中的大分子有机物被降解产生的生物可同化有机碳^[11]。

氯消毒剂可以灭活管网水中的悬浮菌和生物膜中的细菌,在水力剪切力的作用下使生物膜脱落进入管网水,另外水力剪切力的变化也会直接导致管壁生物膜的脱落。管网水中附着细菌的颗粒物可以在低流速时沉积在管垢中,当水力条件变化时颗粒物会再次悬浮至管网水中,增加管网水中的细菌数^[8]。

1.2 生物膜结构

生物膜本身为不连续结构,呈现为黏稠状薄膜,在管道中分布不均匀,最大厚度约为300 μm。通过扫描电镜和原子力显微镜可以发现生物膜紧密黏附在管壁上。生物膜并不是光滑和均匀的,而是以多种结构形式呈现,包括片状、丝状、螺旋状菌落。采用激光共聚焦显微镜扫描管壁生物膜内部结构发现,生物膜表面呈现凹凸状,内部细菌呈非均匀分布,在生物膜顶端细菌分布较少,生物膜中存在空隙,营养物质可以通过这些空隙被细菌获取。

生物膜主要由细菌及胞外聚合物组成,细菌被其分泌的胞外聚合物包裹形成具有机械稳定性的三维结构^[12]。胞外聚合物主要成分为多糖和蛋白质,占总成分的75%~89%,另外还有核酸、脂质、磷脂和腐殖质等。胞外聚合物是使管网中的细菌相互吸附、细菌与管壁黏附形成生物膜的主要物质。胞外聚合物的存在使生物膜具有黏附力,并且减少了相邻细菌之间的空隙面积,减小了消毒剂向生物膜内部的迁移空间。但是胞外聚合物会与消毒剂发生氧化反应进而被分解,需要不断分泌补充。研究表明,氯消毒会导致胞外聚合物中蛋白质与多糖的体积比增加(见表1),即氯氧化反应会消耗更多的多糖类物质,进而导致生物膜内聚力降低^[13]。此外,属于多糖类的藻酸盐的产生可以增加细菌簇的尺寸,增强对氯消毒剂的抵抗力,藻酸盐含量高的生物膜具有更高的总生物量^[14]。因此,生物膜之所以能抵抗氯消毒剂对细菌的灭活作用,可能是多糖类物质与氯消毒剂反应降低了氯消毒剂与细菌的接触浓度。研究表明,多糖类物质和遗传物质相互作用有助于铜绿假单胞菌的生物膜结构稳定^[15]。因此,在胞外聚合物中对生物膜内聚力影响较大的主要为多糖类物质,其直接影响了生物膜的结构稳定性,以及对氯消毒剂的抵抗力等。

表1 生物膜中蛋白质与多糖的体积比例
Tab.1 Volume ratio of protein to polysaccharide
in biofilms

| 项 目 | 有剪切力 | 无剪切力 |
|---------------------|------------|------------|
| 蛋白质/ 多糖(体 积比) | | |
| 无消毒剂 | 0.74~1.66 | 0.58~1.26 |
| 氯消毒 | 3.1~9.48 | 3.08~10.04 |
| 氯胺消毒 | 11.2~14.98 | 5.81~10.75 |

2 生物膜脱落的影响因素

生物膜脱落的内部原因是细菌处于生长周期的脱落阶段,因自然凋亡而发生脱落,而且生物膜的脱落率随生物膜的生长而增加,即随着生物膜的质量或厚度的增加而增加。除这一内部原因外,消毒、营养物质浓度、水力条件改变等外部因素也可以影响生物膜生长周期的各个阶段,使生物膜脱落进入管网水^[16]。

2.1 消毒作用

氯消毒是当前给水管网中最常用的消毒方式,可以在长距离的管网中保持一定浓度,具有持续消毒的能力。为保证管网水质安全,给水管网末梢一般需保持0.05 mg/L的余氯^[17]。研究发现,氯消毒可以分别减少81.4%~83.5%的生物量和86.3%~95.6%生物膜的厚度^[18]。经过氯胺消毒处理后,管壁生物膜的厚度由 $(120 \pm 8) \mu\text{m}$ 先减小至 $(93 \pm 6) \mu\text{m}$,然后增加至 $(110 \pm 7) \sim (129 \pm 8) \mu\text{m}$,弹性模量先增加后减小^[13]。经过3.4 mg/L的游离氯处理60 min后,生物膜中细菌去除率达到75%左右,最大细菌团簇体积从 $300 \mu\text{m}^3$ 减少到 $100 \mu\text{m}^3$,细菌团簇的内聚力从15.4 kPa降低到13.1 kPa^[19]。

氯消毒使生物膜厚度减少可能是由于生物膜脱落所致。氯消毒剂可以直接氧化细菌的原生质,破坏细菌细胞膜的渗透性,或进入细菌体内使其灭活并分解。研究发现,消毒30 min后生物膜中细菌的数量和活性随着消毒剂浓度的增加而降低,当细菌活性降低或被灭活后生物膜出现脱落^[20]。氯消毒剂还会与胞外聚合物发生氧化反应,消耗胞外聚合物,导致生物膜内聚力降低而发生脱落^[21]。通过以上总结分析可知,氯消毒作用可以通过影响细菌的活性和生物膜内聚力进而导致生物膜脱落。

生物膜中还存在分枝杆菌、芽孢杆菌、假单胞菌和鞘氨醇单胞菌等对氯消毒剂有一定适应能力的耐氯菌^[22]。即使存在高浓度的氯消毒剂,耐氯菌也可以继续增殖并分泌胞外聚合物,生成新的生物

膜。因此,在余氯的作用下,生物膜表层细菌被灭活,胞外聚合物被氧化消耗,这直接导致生物膜内聚力降低而脱落,生物膜厚度及体积减小,弹性模量增加,随着消毒时间的持续,生物膜中的细菌会适应此条件下的氯浓度,细菌继续增殖并分泌胞外聚合物,管壁生物膜也再次生长发育,进入下一个生物膜周期(见图2)。

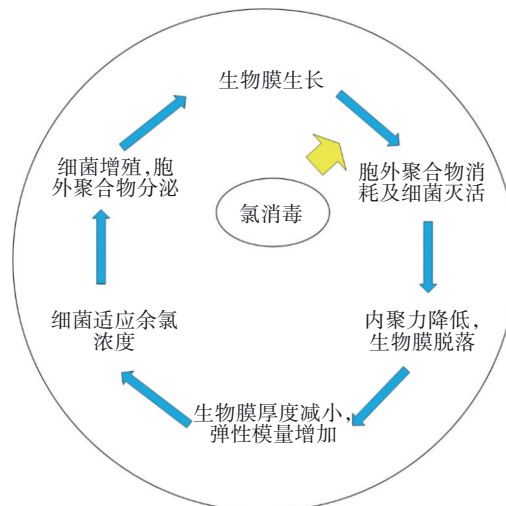


图2 氯消毒对给水管网生物膜物理结构及脱落的影响
Fig.2 Effect of chlorine disinfection on the physical structure and detached of biofilm in drinking water distribution system

2.2 营养物质浓度

生物膜中的细菌主要是以有机物为营养物质的异养菌,在给水管网中,生物可降解溶解性有机碳(BDOC)和生物可同化性有机碳(AOC)是管网细菌生长的主要营养物质,其中生物可降解溶解性有机碳是指存在于水中的有机物可被细菌分解成 CO_2 或合成细胞体的部分,是细菌生长的物质和能量来源。生物可同化有机碳是指生物可降解溶解性有机碳中最易被细菌吸收、直接同化成细菌体的部分。在保持一定余氯浓度的情况下,当生物可同化有机碳浓度低于 $50 \sim 100 \mu\text{g/L}$ 时,异养菌的生长受到抑制;当生物可同化有机碳浓度低于 $10 \mu\text{g/L}$ 时,异养菌几乎不能生长。对于生物可降解溶解性有机碳,当其含量低于 0.2 mg/L 时,异养菌的生长受到抑制^[23]。SANCHO模型计算结果表明,在生物可降解溶解性有机碳浓度低于 0.15 mg/L 时,异养细菌在水中不能再生。以上研究表明,较低的营养物浓度会直接抑制生物膜中异养菌的增殖,进而抑

制生物膜的生长。

由营养物质向生物膜内部的扩散能力差引起的生物膜脱落也是影响生物膜细菌数量的重要因素。管壁生物膜中细菌生长速率低于管网水中细菌的生长速率,说明营养物质在生物膜中的传输受到抑制。当生物膜较薄($<40\ \mu\text{m}$)时,营养物质的传输基本不会受到影响;当生物膜较厚($>80\ \mu\text{m}$)时,营养物质的传输过程会受到阻碍,说明营养物质在生物膜中的传输会受到生物膜厚度的影响。而生物膜中缺乏营养物质则会加速细菌的凋亡,从而导致生物膜脱落进入管网水^[10]。研究发现,含高浓度营养物质的管网水中生物膜的脱落率高于低营养物质管网水,这可能是因为营养物质浓度高,生物膜中细菌增殖速度快,胞外聚合物占生物膜的比例会较小,生物膜达到一定厚度后其内聚力降低从而导致脱落。

因此,在给水管网中,营养物质浓度越高越有利于生物膜中细菌增殖与生物膜的生长,但生物膜厚度达到一定限值后内聚力降低,并且营养物质向生物膜内部的传输受阻,进而导致生物膜脱落。营养物质的供应会直接影响细菌主导的生物膜的生长和脱落过程。

2.3 水力条件改变

在城市给水系统中,由于用水量的动态变化、管道阀门的启闭等原因,给水管网中水流流速以及水力停留时间也在不断变化。水力条件的变化直接影响生物膜的生长和脱落过程,管网水流速越高对生物膜产生的剪切力越大。

在生物膜形成期间,生物膜中的细菌总数与一定范围内的流速成正比^[24]。在低流速条件下,生物膜细菌比生长速率为 $0.000\ 25\ \text{h}^{-1}$;高流速条件下,生物膜细菌比生长速率为 $0.006\ \text{h}^{-1}$ 。可见,高流速的生物膜上细菌生长速率较高。其原因可能是流速增加,将更多的营养物质输送到生物膜中。与低流速下较多孔和较松散的生物膜相比,高流速和湍流的水力条件有利于形成较薄但是致密的生物膜^[16]。虽然高剪切力不利于细菌的附着,但是较高的剪切应力下形成的生物膜更难以分离,这是因为较高的剪切应力将增加生物膜的密度和内聚力^[25]。

分析不同流速下生长的生物膜的光学相干断层扫描(OCT)图像可以发现,当流速增加导致水力剪切力增大时,生物膜会出现脱落^[19,26],从而使管网

水中细菌数量增多。通过原子力显微镜检测表明,大约 $100\ \text{kPa}$ 的机械剪切力可以去除体积大于 $200\ \mu\text{m}^3$ 的生物膜^[27]。其主要原因是水流产生的剪切力大于生物膜的黏附力,进而导致生物膜脱落而进入管网水。在周期性的高流速($\text{HVF}=4.5\ \text{L/s}$)的冲洗条件下,生物膜可以周期性地“重置”,并去除顶层部分生物膜^[28]。因此,水力条件变化并没有完全使生物膜从管壁上脱落下来,而只是使部分生物膜脱落进入管网水。

一方面,水流可以给生物膜传输新的营养物质和氧气,促进生物膜的生长;另一方面,水流又会冲刷管壁,流速越大,剪切力就会越高,当剪切力超过生物膜黏附力时,生物膜脱落,其生长受到抑制,并且水流剪切作用远大于营养输送的作用,这也是导致生物膜脱落的主要原因。

虽然当前的技术无法抑制生物膜的生长,但是通过单向水冲洗、机械刮管、气水脉冲清洗、高压水射流冲洗等方法均可使生物膜从管壁上脱落下来^[29],集中去除生物膜,减小其对管网水质的影响。

3 结语

给水管网系统是由多种条件控制的反应器,消毒作用、营养物质浓度、水力条件共同影响了管壁生物膜的脱落,从而对管网水质造成影响。饮用水进入管网后,将细菌与微量有机物带入其中,为管壁生物膜持续输送赖以生存的营养物质,但是水力冲刷以及氯消毒剂的灭活又会抑制生物膜的生长,并且较高的水力剪切力会产生薄而致密的生物膜,这部分生物膜更耐剪切力的分离。余氯消毒可以灭活细菌,消耗胞外聚合物,但是持续的氯消毒会筛选出耐氯菌,而耐氯菌继续增殖并且分泌胞外聚合物,使生物膜能够再次生长。

虽然管网生物膜的形成过程、引发的水质安全问题、生长控制等方面已经引起了相关科研人员以及供水行业的关注。但是当前生物膜脱落与管网水相互作用的研究相对较少,生物膜脱落多以进入管网水的细菌数表示,无法确定生物膜脱落的体积以及定量化生物膜对水质的影响。为减小生物膜脱落对管网水质的影响,还应在如下方面开展深入研究:

① 更好地理解管壁与生物膜之间的黏附方式,通过调控胞外聚合物中各种物质的含量加强生

物膜的黏附性,量化生物膜脱落体积对水质的影响。

② 进一步了解氯消毒剂在生物膜中的迁移过程,明确不同消毒剂对生物膜脱落的影响程度,进而研究如何在有效灭活生物膜中细菌的前提下减少消毒剂的使用。

③ 明确水力条件影响生物膜脱落的机制,以及如何建立稳定的水力条件保证生物膜的稳定性。

参考文献:

- [1] PENG H X, SHAO Y, ZHANG Y F, *et al.* Optimization of ultrasonic parameters for effective detachment of biofilm cells in an actual drinking water distribution system[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2020, 21(3): 167-178.
- [2] VAN BEL N, HORNSTRA L M, VAN DER VEEN A, *et al.* Efficacy of flushing and chlorination in removing microorganisms from a pilot drinking water distribution system[J]. *Water*, 2019, 11(5):903.
- [3] MAKRISS K C, ANDRA S S, BOTSARIS G. Pipe scales and biofilms in drinking-water distribution systems: undermining finished water quality[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2014, 44(13): 1477-1523.
- [4] ZHOU X Y, ZHANG K J, ZHANG T Q, *et al.* An ignored and potential source of taste and odor (T&O) issues—biofilms in drinking water distribution system (DWDS)[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(9): 3537-3550.
- [5] SCHLEICH C, CHAN S, PULLERITS K, *et al.* Mapping dynamics of bacterial communities in a full-scale drinking water distribution system using flow cytometry[J]. *Water*, 2019, 11(10):2137.
- [6] WAAK M B, LAPARA T M, HALLE C, *et al.* Occurrence of *Legionella* spp. in water-main biofilms from two drinking water distribution systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(14): 7630-7639.
- [7] DIAS V C F, DURAND A A, CONSTANT P, *et al.* Identification of factors affecting bacterial abundance and community structures in a full-scale chlorinated drinking water distribution system[J]. *Water*, 2019, 11(3):627.
- [8] PREST E I, HAMMES F, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Biological stability of drinking water: controlling factors, methods, and challenges [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7:45.
- [9] EL-CHAKHTOURA J, PREST E, SAIKALY P, *et al.* Dynamics of bacterial communities before and after distribution in a full-scale drinking water network [J]. *Water Research*, 2015, 74: 180-190.
- [10] SRIVASTAVA S, BHARGAVA A. Biofilms and human health[J]. *Biotechnology Letters*, 2016, 38(1): 1-22.
- [11] 张新瑜, 李秀杰, 李欣, 等. 北方某城市给水管网水质生物稳定性研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(19): 95-98.
- [12] ZHANG Xinyu, LI Xiujie, LI Xin, *et al.* Study on biological stability of water in water distribution system in a northern city [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(19): 95-98(in Chinese).
- [13] REUBEN R C, ROY P C, SARKAR S L, *et al.* Multispecies interactions in biofilms and implications to safety of drinking water distribution system [J]. *Microbiology and Biotechnology Letters*, 2019, 47(4): 473-486.
- [14] SHEN Y, HUANG C H, MONROY G L, *et al.* Response of simulated drinking water biofilm mechanical and structural properties to long-term disinfectant exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(4): 1779-1787.
- [15] XUE Z, SEO Y. Impact of chlorine disinfection on redistribution of cell clusters from biofilms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(3): 1365-1372.
- [16] GHAFLOOR A, HAY I D, REHM B H A. Role of exopolysaccharides in *Pseudomonas aeruginosa* biofilm formation and architecture [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(15): 5238-5246.
- [17] LIU S, GUNAWAN C, BARRAUD N, *et al.* Understanding, monitoring, and controlling biofilm growth in drinking water distribution systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 8954-8976.
- [18] 宋兰合, 由阳, 李宗来, 等. 饮用水水质标准体系研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(6): 1-6.
- [19] SONG Lanhe, YOU Yang, LI Zonglai, *et al.* Study on framework of drinking water quality standards[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(6): 1-6(in Chinese).
- [20] LING F Q, LIU W T. Impact of chloramination on the

- development of laboratory-grown biofilms fed with filter-pretreated groundwater [J]. *Microbes and Environments*, 2013, 28(1): 50–57.
- [19] MATHIEU L, BERTRAND I, ABE Y, *et al.* Drinking water biofilm cohesiveness changes under chlorination or hydrodynamic stress [J]. *Water Research*, 2014, 55: 175–184.
- [20] LIN H R, ZHU X, WANG Y X, *et al.* Effect of sodium hypochlorite on typical biofilms formed in drinking water distribution systems [J]. *Journal of Water and Health*, 2017, 15(2): 218–227.
- [21] ZHU Z B, SHAN L L, HU F P, *et al.* Biofilm formation potential and chlorine resistance of typical bacteria isolated from drinking water distribution systems [J]. *RSC Advances*, 2020, 52(10): 31295–31304.
- [22] LUO L W, WU Y H, YU T, *et al.* Evaluating method and potential risks of chlorine-resistant bacteria (CRB): a review [J]. *Water Research*, 2021, 188(4): 116474.
- [23] REN H X, WANG W, LIU Y, *et al.* Pyrosequencing analysis of bacterial communities in biofilms from different pipe materials in a city drinking water distribution system of east China [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99 (24) : 10713–10724.
- [24] TSVETANOVA Z. Quantification of the bacterial community of drinking water-associated biofilms under different flow velocities and changing chlorination regimes [J]. *Applied Water Science*, 2020, 10(1):3.
- [25] DOUTERELO I, SHARPE R L, HUSBAND S, *et al.* Understanding microbial ecology to improve management of drinking water distribution systems [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews–Water*, 2019, 6(1):e01325.
- [26] SHEN Y, MONROY G L, DERLON N, *et al.* Role of biofilm roughness and hydrodynamic conditions in *Legionella pneumophila* adhesion to and detachment from simulated drinking water biofilms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(7): 4274–4282.
- [27] ABE Y, SKALI-LAMI S, BLOCK J C, *et al.* Cohesiveness and hydrodynamic properties of young drinking water biofilms [J]. *Water Research*, 2012, 46 (4): 1155–1166.
- [28] FISH K, OSBORN A M, BOXALL J B. Biofilm structures (EPS and bacterial communities) in drinking water distribution systems are conditioned by hydraulics and influence discolouration [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593: 571–580.
- [29] 施凯,陈志伟,彭秀华,等. 冰浆清洗技术对小口径球墨铸铁给水管道的清洗效果 [J]. *中国给水排水*, 2021,37(3):69–73.
- SHI Kai, CHEN Zhiwei, PENG Xiuhua, *et al.* Cleaning effect of ice slurry cleaning technology on small diameter ductile iron water supply pipeline [J]. *China Water & Wastewater*, 2021,37(3):69–73(in Chinese).
- 作者简介:信常春(1993–),男,河北承德人,博士研究生,主要研究方向为给水管网生物膜控制与水质稳定性。
E-mail:969142576@qq.com
收稿日期:2021-08-01
修回日期:2021-09-15

(编辑:丁彩娟)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福