

“高校优秀论文奖学金暨研发机构人才储备计划”专栏

盛东方, 李伟英, 李悦, 等. 建筑供水系统典型条件致病菌存在水平及影响因素[J]. 净水技术, 2019, 38(12): 46-54.

SHENG D, LI W, LI Y, et al. Existing level and influencing factors of typical opportunistic pathogens in building water supply system[J].

Water Purification Technology, 2019, 38(12): 46-54.



扫我试试?

建筑供水系统典型条件致病菌存在水平及影响因素

盛东方¹, 李伟英¹, 李悦¹, 黄圣洁¹, 秦升益²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 北京仁创科技集团有限公司, 北京 100085)

摘要 建筑供水系统的功能是对市政供水管网水进行存储、加压并输送至水龙头处, 其具有余氯量低、水温较稳定、水流停留时间长等特点, 为微生物提供了适宜的生长环境。相较于出厂水与市政管网水, 龙头水中的菌落总数及条件致病菌浓度均呈上升趋势, 其中, 典型的条件致病菌(如军团菌和铜绿假单胞菌)因具有耐热、耐含氯消毒剂等特性, 易在建筑供水系统中再生长与繁殖, 致使龙头水微生物污染风险加剧, 威胁人类健康。基于国内外研究成果, 文中阐述建筑供水系统中的微生物污染状况, 探讨军团菌、铜绿假单胞菌的存在水平与主要影响因素, 提出通过定期清洗与加强维护来降低建筑供水系统微生物污染风险, 保障龙头水水质安全。

关键词 建筑供水系统 条件致病菌 军团菌 铜绿假单胞菌

中图分类号: TU991.33 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2019)12-0046-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2019.12.010

Existing Level and Influencing Factors of Typical Opportunistic Pathogens in Building Water Supply System

SHENG Dongfang¹, LI Weiyang¹, LI Yue¹, HUANG Shengjie¹, QIN Shengyi²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Rechsand Science and Technology Group, Beijing 100085, China)

Abstract The function of building water supply system (BWSS) is to storage, pump and transport the water from distribution water supply system (DWSS). Due to the feature of low chlorine residual concentration, appropriate temperature and long residence time, an appropriate condition is provided for bacterial regrowth. Comparing with finished water and water in the DWSS, microbial numbers in tap water increase. Among microorganisms, typical opportunistic pathogens have capabilities of heat and chlorine resistances, so they are easy to regrow and colonize in the BWSS. Microbial contamination risk of tap water is higher, and it brings potential risk to human being. The paper summarizes research all over the world, expounds microbial contamination status in the BWSS, discusses existing levels and factors of *Legionella* and *Pseudomonas aeruginosa*, put forwards that timely clean and maintenance can reduce microbial contamination risk.

Keywords building water supply system (BWSS) opportunistic pathogens *Legionella* *Pseudomonas aeruginosa*

[收稿日期] 2019-04-03

[基金项目] 国家自然科学基金(51979194); 中国工程院院地合作项目 重庆市饮用水源污染防治与饮水安全保障措施发展战略研究(2019-CQ-ZD-1)

[作者简介] 盛东方(1994—), 女, 硕士, 研究方向为建筑供水系统水质生物安全性及影响因素。

[通信作者] 李伟英, 电话: 021-65981470; E-mail: 1231wyktz@tongji.edu.cn。

[本文编辑] 魏雨晴

安全优质的饮用水是人类健康生存的前提,城市供水系统的任务是通过市政供水管网与建筑供水系统将达到饮用水水质卫生标准的净水厂出水输送至用户龙头。饮用水在供水系统运输过程中发生了物理化学变化与微生物再生长,致使龙头水水质及生物安全性相较于出厂水有所下降^[1],因此龙头水水质安全问题一直是国内外学者的研究重点。

建筑供水系统包括热水系统及冷水系统,具有管道面积体积比较大、水流间歇性停滞、消毒剂余量低和温度适宜微生物繁殖等特点,这为微生物的再生长创造了良好的条件^[2]。研究发现,市政管网出水在建筑供水系统分配过程中,微生物总量明显增加,且条件致病菌在建筑供水系统中的检出率高于市政管网和净水厂出水^[3-4]。Hammes等^[5]研究发现,龙头水生物稳定性显著低于净水厂出水,说明龙头水具有更高的微生物再生长风险,这种龙头水水质恶化现象在全球都普遍存在,其中条件致病菌在建筑供水系统中的存在水平更是研究热点。

建筑供水系统条件致病菌(*opportunistic premise plumbing pathogens*, OPPPs)是水生微生物,免疫力低下的人群易被感染。供水系统中常见的 OPPPs 包括军团菌(*Legionella*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)、分枝杆菌,以及原生动阿米巴原虫等^[6]。军团菌是一种革兰氏阴性杆菌,广泛存在于湖泊河流等淡水水源、人工水域和蓄水池中。常见的可引起人类感染的军团菌种有嗜肺军团菌、麦氏军团菌、博氏军团菌等,军团菌感染表现形式为军团菌肺炎(*legionnaires disease*, LD)和庞蒂亚克热。过去10年,由军团菌引起的呼吸系统感染是美国最主要的介水疾病^[7]。Springston等^[8]的统计结果表明,自2002年以来,美国军团菌发病率呈逐年增长趋势,军团菌感染病例达13 000例/年,用于控制军团菌感染的费用达4.3亿美元/年^[9],生活饮用水是军团菌传播的重要途径。铜绿假单胞菌是一种常见的条件致病菌,它是一种异养型革兰氏阴性杆菌,广泛存在于水体、土壤以及活体宿主中。铜绿假单胞菌的感染途径主要为社区获得性感染和医院获得性感染,感染源通常为含有铜绿假单胞菌的水体^[2],其引起的感染类型十分广泛,可表现为菌血症、肺炎、肠胃感染、皮肤感染等。在1996年—2001年,美国每年因发生铜绿假单胞菌感染而死亡的病例约1 400人^[10]。

与传统的外源水生致病菌(如:沙门氏菌、志贺氏杆菌等)不同,OPPPs是供水系统的原生细菌^[11],具有耐氯、耐温的特点,且建筑供水系统为OPPPs的再生长与繁殖提供了有利条件,因此相较于供水管网,建筑供水系统中的OPPPs数量明显增加。此外,由于OPPPs生长缓慢、培养周期长,常规的异养菌平板计数检测无法正确检出OPPPs,从而不能准确评估其带来的风险。目前,我国饮用水卫生标准GB 5749—2006未对OPPPs的含量做出限定,因此,建筑供水系统中的条件致病菌存在水平及其带来的生物污染风险应当引起重视。

1 建筑供水系统微生物污染状况

异养菌平板计数(*heterotrophic plate counts*, HPC)是表征饮用水中微生物量的常用指标,美国环保局(USEPA)颁布的《美国饮用水水质标准》中HPC的限值为500 CFU/mL。Pepper等^[12]对美国某地区从水源到龙头全过程的微生物量进行检测分析,发现出厂水、供水管网水、龙头水的HPC平均值分别为22、47、3 072 CFU/mL;可见,在净水厂出水、供水管网水水质达标的情况下,龙头端仍存在HPC超标现象,说明建筑供水系统的存储输送造成了龙头水水质劣变。

一些生物学家提出平板上的菌落数量并不能真实反映水样中的微生物总量,由于某种因素诱导而进入的活着但不可培养(*viable but not cultivable*, VBNC)的细菌无法通过培养法检测^[13]。有别于传统培养法的检测技术,通过流式细胞计数(*flow cytometry*, FCM)、显微镜计数来测定总细胞数(*total cell concentration*, TCC)和活细胞数(*intact cell concentration*, ICC)^[13]的方法被广泛使用。Lipphaus等^[14]通过流式细胞计数对实验室、厨房、洗浴间龙头出水的微生物总量进行检测,龙头水中活细胞数在 $6.29 \times 10^3 \sim 7.74 \times 10^5$ cells/mL,且不同使用功能的龙头出水微生物总量相差较大。Zacheus等^[15]对芬兰地区建筑冷水系统和热水系统的龙头水进行水质分析,冷水系统中常温异养菌数均值为 5.3×10^4 CFU/mL,总细胞数均值为 1.4×10^8 cells/L;热水系统中的常温异养菌数、总细胞数均低于冷水系统,但嗜热异养菌数较高,表明建筑热水系统及冷水系统中的微生物总量及组成存在差异。因此,微生物群体易于在建筑供水系统提供的环境条件中进行再生长与繁殖,使得龙头水微生物含量超标的现象时有发生。全面评价龙头水微生物污染现状,探讨由

此引发的健康风险具有实践意义。

2 建筑供水系统条件致病菌存在水平

生活饮用水微生物污染程度常用 HPC、菌落总数等指标来表征,但其并不能完全反映龙头水微生物污染带来的健康风险。典型的 OPPPs 如军团菌和铜绿假单胞菌在国内外检出水平较高且健康风险大,它们可通过呼吸吸入、皮肤接触等方式侵入人体,对易感人群的身体健康造成威胁。Barna 等^[16]的研究表明,具有较高健康风险的军团菌与 HPC 不具有相关性,因此,亟需对 OPPPs 在龙头水中的检出状况及存在水平进行研究。常用的 OPPPs 检测方法有培养法、聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction, PCR)、荧光定量 PCR 和高通量 DNA 测序技术等。传统的培养法测试周期长,且只能检测可培养状态的细菌;PCR 技术和电泳技术联合使用能定性检测目的基因的存在状况;荧光定量 PCR 特异性强、灵敏度高、定量准确、速度快,但不能区分死细胞与活细胞,只能检测细菌总量;高通量 DNA 测序技术可揭示样品中微生物群落的多样性,但测试费用高且不能进行定量分析。基于现有检测手段,OPPPs 存在水平在世界各国被广泛研究。

2.1 军团菌

军团菌病首次爆发于 1976 年美国费城的退伍军人大会,182 例感染者中有 28 例死亡,传染源为受军团菌污染的水体^[17]。2014 年,美国弗林特市军团菌病爆发,疾病爆发前弗林特市进行了水源切换,其后当地居民军团菌病发病率增加了 6.3 倍。疾病爆发期间,发病率随饮用水中的游离氯浓度降低而升高,且当居民将龙头水煮沸使用后,军团菌病逐渐平息^[18],表明军团菌病传染源为生活饮用水。英国传染病监控中心报道,在 1982 年—1990 年,208 例医院内获得性军团菌感染病例中死亡人数达 68 例,感染源头为医院内的建筑供水系统^[19]。龙头水被军团菌污染的现象在全球各国普遍存在,德国 Volke 等^[20]对 419 座建筑的 108 288 个龙头水采样分析,发现军团菌数量为合格率最低的一项指标 [当地标准为 100 CFU/(100 mL)]。Barna 等^[16]对匈牙利地区 168 栋建筑内部给水系统的水箱、龙头、淋浴器出水进行采样分析,军团菌检出率为 61%。表 1 对近 15 年军团菌在世界各地、不同类型建筑供水系统中的检出情况进行了总结。

表 1 世界各地建筑供水系统军团菌存在状况一览
Tab.1 Existing Status of *Legionella* in BWSS around the World

地区(时间)	建筑类型	检测方法	样本数量	检出率		说明
				军团菌属	嗜肺军团菌	
中国上海 (2009) ^[21]	医院	培养法 ^d	193	43%	17.1%	75.9%的阳性水样军团菌属浓度 > 1 000 CFU/L;军团菌污染与阿米巴虫检出情况与采用水箱供水、管材等因素有关
中国广州 (2011) ^[22]	宾馆 (淋浴水)	培养法	108	9.3%	9.3%	分离出的 11 株军团菌均为嗜肺军团菌,其中 LP1 血清型占 45.5%;军团菌阳性率与酒店级别无统计学差异
中国上海 (2016–2017) ^[23]	公共建筑 住宅	qPCR	39(公共建筑) 44(住宅)	100%(公共建筑) 100%(住宅)	56.4%(公共建筑) 15.9%(住宅)	公共建筑中军团菌平均浓度为 2.2×10^2 copies/mL,嗜肺军团菌平均浓度为 11 copies/mL;住宅中军团菌平均浓度为 3.9×10^2 copies/mL,嗜肺军团菌平均浓度为 13 copies/mL
美国 (2017) ^[24]	建筑水箱	qPCR ^f	8(水) 8(底泥)	50%(水) 50%(底泥)	水(13%) 底泥(25%)	水箱水体中军团菌平均浓度为 1.27×10^4 copies/L,LP 平均浓度为 10 copies/L;底泥中军团菌平均浓度为 9.19×10^3 copies/g,LP 平均浓度为 41 copies/g
意大利 (2014–2017) ^[25]	住宅	培养法	440	23%(总); 18%(IB ^a); 38%(CB ^b); 34%(TB ^c)	11%(总); 13%(IB); 27%(CB); 29%(TB)	与独立加热热水系统相比,集中加热热水系统与太阳能加热热水系统军团菌检出率更高;军团菌数量与余氯及水温具有相关性
伊朗 (2012) ^[26]	医院 (热水)	PCR ^e ; 培养法	140	5.7%(培养法); 7.1%(PCR)	2.85%	—
德国 (2000–2003) ^[27]	小型住宅 (热水)	培养法	400	12%	11.3%	具有储水罐的热水加热系统军团菌阳性率更高;检出点军团菌数量最高达到 10^5 CFU/(100 mL)

(续表 1)

日本 (2007) ^[28]	宾馆、写字楼、学校	培养法; PCR	130	3.8% (培养法); 18.5%(PCR)	—	浊度、余氯、铁离子等指标 与军团菌污染具有相关性
------------------------------	-----------	-------------	-----	---------------------------	---	-----------------------------

注: ^a 为独立加热热水系统(building with an independent hot water production ,IB); ^b 为集中加热热水系统(building with a central hot water production ,CB); ^c 为太阳能热水系统(building with a solar thermal system for hot water production ,TB); ^d 为军团菌培养法,利用 GVPC 培养基,于 37 ℃ 条件下培养 10 d,再用 BCYE 平板与不含半胱氨酸的 BCYE 平板于 37 ℃ 下培养 2 d,在 BCYE 平板上生长而在不含半胱氨酸的 BCYE 平板不生长的则为军团菌菌落,生化培养和血清学试验可进一步鉴定嗜肺军团菌,培养法只能检测样品中可培养的军团菌数量,计量单位为 CFU/mL; ^e 为 PCR 法,PCR 技术和电泳联用可定性分析军团菌目的基因存在状况,检测样品中军团菌检出率; ^f 为 qPCR 法,荧光定量 PCR 技术能够定量军团菌目的基因浓度,可检测样品中军团菌总量,计量单位为 copies/mL 或 copies/L

2.2 铜绿假单胞菌

2001 年—2010 年,美国和欧洲 8%~11% 的医院内感染都与铜绿假单胞菌相关^[29-30],且研究发现约有 9.7%~68.1% 的 ICU 病房龙头水铜绿假单胞菌检测为阳性^[31]。英国 Garvey 等^[32]发现,病房龙头水中分离出的菌株与从感染者中分离出的菌株具有同源性,说明龙头水是铜绿假单胞菌医院内获得性感染的源头。Peter 等^[33]对欧洲地区 15 个冷水

水箱中的水进行检测,其中 13 个水箱均分离出铜绿假单胞菌,且研究表明水箱进水口远端致病菌数量明显高于进水口处。Lu 等^[34]研究发现,在水箱底的沉积物中,铜绿假单胞菌的检出率为 22.2%,平均数量为 250 cells/g。以上研究说明,水箱增加了饮用水被铜绿假单胞菌污染的风险。表 2 总结了世界各地铜绿假单胞菌在建筑供水系统中的存在状况。

表 2 世界各地建筑供水系统铜绿假单胞菌存在状况一览
Tab.2 Existing Status of *Pseudomonas Aeruginosa* in BWSS around the World

地区(时间)	采样对象	检测方法	样本数	检出率	说明
中国成都 (2012) ^[35]	市政管网 二次供水系统	培养法 ^a	460(管网) 296(二供)	0.4%(管网) 6.4%(二供)	二次供水系统中铜绿假单胞菌检出率显著高于管网水;二次供水中检出率随季节变化表现为:夏季>春季>秋季>冬季;管网中检出率随季节变化无明显差异
中国南部 (2015-2016) ^[36]	龙头水	qPCR	44	79.54%	检出点铜绿假单胞菌平均浓度达 11 copies/mL
美国(2017) ^[24]	建筑水箱	qPCR	8(水) 8(底泥)	50%(水) 0%(底泥)	检出点铜绿假单胞菌平均浓度达 412 copies/L
伊朗(2010) ^[37]	龙头水	PCR	72	13.8%	铜绿假单胞菌炎热季节(7月-9月)的检出率明显高于寒冷季节(10月-12月)
德国(2001) ^[38]	医院龙头水	培养法	143	43%	检出点铜绿假单胞菌的数量在 1~>100 CFU/(100 mL),分离出 8 种基因型;50%从感染者中分离的铜绿假单胞菌与龙头水中的菌株具有同源性
澳大利亚 (2000) ^[39]	医院龙头水	培养法	23(无控温) 15(有控温)	74%(无控温) 7%(有控温)	无控温装置的自动出水龙头铜绿假单胞菌检出率显著高于有控温装置的自动出水龙头
加拿大 (2013) ^[40]	医院龙头水	培养法 酶检测法 ^b	105(自动龙头) 90(手动龙头)	5%(自动) 2%(手动) 16%(自动) 14%(手动)	手动龙头铜绿假单胞菌数量最高达 >300 CFU/(100 mL),自动龙头铜绿假单胞菌数量最高为 98 CFU/(100 mL);龙头及管道材质、流速、水质参数会影响龙头水受铜绿假单胞菌的污染程度

注: ^a 为铜绿假单胞菌培养法,利用铜绿假单胞菌选择性培养基,于 37 ℃ 培养 48 h,挑取可疑菌落进一步鉴定,计量单位为 CFU/mL; ^b 为酶检测法,铜绿假单胞菌可产生一种能够水解 Pseudalert 试剂的酶,水解产物可在紫外灯下显蓝色荧光,通过 Pseudalert 试剂盒可实现铜绿假单胞菌的检测

3 影响条件致病菌存在水平的主要因素

3.1 水温

温度对微生物生长有显著影响。水温升至 15

℃ 时,水中的细菌总量显著升高^[41];当水温 > 18 ℃ 时,HPC > 100 CFU/mL 的概率更高^[42]。王松松等^[4]对烟台市末梢水进行为期 1 年的采样分析,研究表明秋季的菌落总数合格率显著低于其他季节。

但康利民等^[43]在对不同类型建筑的龙头水水质研究中发现,冬季酒店龙头水存在菌落总数超标现象;这说明即使室外气温较低,建筑供水系统仍可以为微生物生长提供合适的温度与生存环境。

军团菌在 20~50 °C 的水温中可以存活,最适生长温度为 35~46 °C^[44]。当水温为 46 °C 时,龙头水中军团菌检出率最高^[27]。建筑热水系统的水温一般在 40~60 °C, Barna 等^[16]的研究表明,当水温>50 °C 时,军团菌检出率出现明显下降的趋势; Bargellini 等发现^[45],当温度>55 °C 时,水中军团菌的数量与温度呈现负相关。军团菌可进入 VBNC 状态,而 VBNC 状态的军团菌不具有繁殖和感染能力, Meier 等^[46]的研究显示,11 °C 时,生物膜中的军团菌均处于 VBNC 状态;但在 37 °C 时,可培养的军团菌仍能在生物膜中得以生存。综上,增加热水的温度有利于控制军团菌的繁殖,而降低冷水系统的水温也可以减少军团菌污染的风险。

铜绿假单胞菌存活温度为 25~42 °C。在李涛等^[35]的研究中,夏季龙头水铜绿假单胞菌的检出率为 10.2%,明显高于冬季检出率 1.9%。世界卫生组织提出,保持建筑热水系统的温度在 60 °C 以上,是控制铜绿假单胞菌污染的一项策略^[47]。Cuttelod 等^[48]对瑞士某医院 ICU 龙头水进行了为期 10 年(1998 年—2007 年)的检测,发现将热水系统水温从 50 °C 提升到 65 °C,龙头水中铜绿假单胞菌的检出率有所下降。可见,控制建筑热水系统的温度是防止铜绿假单胞菌繁殖的一项有效措施。

3.2 氯浓度

氯投加是饮用水处理中常用的消毒手段,但建筑供水系统管网采用非环状布置造成水体停留时间长、流速缓慢,且沉积物易聚集,这种环境条件使得余氯在建筑给水管道中衰减迅速。区嘉明^[49]的研究结果显示,市政管网出水在水箱中的停留时间达 8~40 h 后,余氯降至 0.05 mg/L 以下,且余氯浓度与菌落总数存在显著负相关性。张浩等^[50]对某高层建筑水箱中水质变化进行检测,发现进水余氯为 0.1 mg/L 时,8~10 h 后余氯量衰减至 0.03 mg/L,此时菌落总数开始>100 CFU/mL。说明,随着余氯浓度的衰减,建筑供水系统中微生物再生长的风险增加。

军团菌对氯具有耐受性,龙头水中的嗜肺军团

菌氯消毒 CT99.9% 值(杀灭 99.9% 的细胞所需时间和浓度的乘积)是大肠杆菌的 580 倍^[51],且从贫营养的环境中分离出的嗜肺军团菌耐氯性高于在富营养培养基中生存的菌株^[52]。Marchesi 等^[53]分别对未经氯消毒处理和经过氯消毒处理的热水系统水箱水、龙头水进行检测,发现氯消毒前后采样点军团菌检出率分别为 87% 和 53%;但氯消毒后嗜肺军团菌在检出点中所占比例更高,表明氯消毒并不能完全杀灭军团菌,且具有致病性的嗜肺军团菌耐氯性更强。因此,在建筑供水系统管道末端、贮水池和热水水箱中,由于余氯衰减和长时间滞留,未被杀灭的军团菌具有进行再生长的可能^[54]。

铜绿假单胞菌的氯消毒 CT99.9% 值约是大肠杆菌的 21 倍^[51],部分铜绿假单胞菌可以分泌含有藻朊酸盐的胞外黏液来增强其对氯的耐受性^[55]。因此,经过氯消毒的龙头水亦存在被铜绿假单胞菌污染的风险。Mao 等^[56]的研究显示,在贫营养(LB 培养基稀释 10 000 倍)低氯浓度(0.3 mg/L)条件下,铜绿假单胞菌的灭活分为 3 个阶段,最初的 16 h 细菌被大量灭活;16~76 h 铜绿假单胞菌浓度保持稳定;76 h 后细菌继续被灭活,但当余氯浓度<0.3 mg/L 时,则存在铜绿假单胞菌再生长风险。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)对末梢水余氯浓度的限定为>0.05 mg/L,在这种余氯浓度较低的环境条件下,铜绿假单胞菌可能会进行再生长。

3.3 停留时间

相较于市政供水管网,建筑供水系统用户用水存在间歇性,致使建筑供水系统中的水具有一定的停留时间,停留时间的长短受龙头使用时段及使用频率的影响,而饮用水在建筑供水系统中的长时间停留会促进微生物的生长繁殖。Lautenschlager 等^[57]对 10 座民用建筑的隔夜水及放水冲洗后的龙头水进行检测,研究结果显示,与新鲜的自来水相比,经过 8~20 h 停留的龙头水细菌总数增加 2~3 倍,三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)增加 2~18 倍, HPC 增加 4~580 倍,且 HPC 与细胞总数的比值由 0.02% 增加至 0.62%,这说明具有代谢活性的可培养细菌在水体停留期间再生长尤为显著。但 Zlatanovic 等^[58]的研究却发现,在使用铜管的建筑供水系统中,冬季水温较低时隔夜水中的细胞总

数、HPC 和 ATP 显著升高;在夏季水温较高时,隔夜水中的微生物总量反而降低,这可能是由于微生物的再生长受到了水中营养物质的限制。Ling 等^[59]的研究发现,5~6 d 的停留使龙头水的生物量从 1 000 cells/mL 增加到 7.8×10^5 cells/mL,且龙头水中微生物群落的丰富度和均匀度下降。上述研究结果表明,水在建筑供水系统中的停留时间影响龙头水中微生物的数量。

不同建筑类型,水龙头的使用频率亦不相同。公共建筑的水龙头使用人数多,使用频率高;民用建筑的龙头使用频率则相对较低。Liu 等^[36]检测了高使用频率和低使用频率龙头的出水,发现军团菌与铜绿假单胞菌在使用频率较低的龙头出水中检出率较高,这与龙头使用频率较低导致的长时间停留有关。但迄今为止,水在建筑供水系统中停留时间对 OPPPs 再生长的影响鲜见报道,军团菌、铜绿假单胞菌等 OPPPs 随停留时间增长的浓度变化趋势值得进一步研究。

3.4 建筑供水系统形式

建筑中常见的给水系统形式有市政管网直接供水、气压罐供水、变频水泵供水、水箱供水等,水箱供水在二次供水系统中应用广泛。根据水箱位置不同,二次供水形式包括单设屋顶水箱的供水方式、单设地下水池的供水方式以及高低位水箱联合供水方式。不同的建筑供水系统形式对 OPPPs 存在水平的影响受到一些研究者的关注。Li 等^[23]对建筑给水形式与军团菌存在水平的相关性进行了研究,结果表明单设地下水池给水系统的军团菌浓度[平均值为 $(1.95 \times 10^3 \pm 2.49 \times 10^3)$ copies/mL]高于单设屋顶水箱给水系统中的军团菌浓度[平均值为 $(7.8 \times 10^2 \pm 1.4 \times 10^3)$ copies/mL],这说明建筑供水系统形式会影响军团菌在建筑管道中的存在水平。康利民等^[60]研究了无负压供水与高位水箱供水系统水质安全性的差异,发现定期维护和科学管理可保障供水水质的安全。

目前,国内外关于建筑供水系统形式、供水分区、建筑楼层高度等因素对龙头水中 OPPPs 存在水平影响的相关研究仍然较少。因此,探明 OPPPs 再生长机制与影响因素,提出贮水容器结构改进措施与建筑供水系统优化方案可为建筑供水系统水质安全保障提供理论基础。

3.5 生物膜

生物膜是由微生物群体互相黏附并附着在管壁上形成的,通常被胞外聚合物包围,胞外聚合物主要由多聚物、蛋白质、核糖类物质组成,它们保证了生物膜结构和功能的完整性。建筑供水系统管道的比表面积大,有益于生物膜的形成,而水在管道中长时间的停留亦会促进生物膜的形成。

军团菌可在管道管壁生物膜中存活,生物膜中的军团菌大部分以 VBNC 状态存在^[61]。军团菌在生物膜中的存在水平高于管道中的水。荷兰 Van 等^[62]对 3 座医疗机构、2 座宾馆共计 10 个采样点的龙头水及生物膜进行检测,生物膜中军团菌检出率为 70%,水中军团菌检出率为 50%。Waak 等^[63]认为,龙头水军团菌污染源为市政管网的生物膜,当市政管网壁生物膜中的军团菌脱落释放到水中,并随着管网输送进入建筑供水系统,在温度升高,且消毒剂余量低的环境条件下,军团菌可能会进行再生长,从而增加感染风险^[63-64]。具有致病性的嗜肺军团菌有很强的形成生物膜能力,温度为 32~42 °C 时生物膜中细菌的繁殖速度快于在 25 °C 时的繁殖速度^[65],因此,附着于建筑热水管道生物膜中的嗜肺军团菌存在更高的再生长风险。

在市政管网的生物膜中,铜绿假单胞菌的检出率很低^[61,66],但在建筑供水系统管壁生物膜中的铜绿假单胞菌检出频率却升高,说明建筑供水系统为其提供了更适宜的环境,致使其可在生物膜中再生长与繁殖,与浮游细菌相比,生物膜中的铜绿假单胞菌对消毒剂及抗生素的耐受性更强^[51,61]。

综上所述,建筑供水系统中的生物膜为 OPPPs 的生存与繁殖提供了生存环境以及与其他微生物等污染物相互作用的机会。管壁生物膜和水箱壁生物膜中的 OPPPs 可能是龙头水的污染来源。通过优选管道材料、对建筑供水系统各部分进行定期清洗等方法来控制生物膜的形成,对保障龙头水水质安全具有实践性意义。

除以上论述的因素外,影响建筑供水系统中 OPPPs 存在水平的因素还包括水中的营养物质、水的化学性质、建筑供水系统管道材料、微生物间的相互作用和管道中的水力条件等。探明 OPPPs 在建筑供水系统中的再生长机制对控制龙头水 OPPPs 污染具有指导意义。

4 结论与展望

由军团菌、铜绿假单胞菌等 OPPPs 在建筑供水系统中再生长造成的微生物污染在全球各国普遍存在。随着城市老龄人口和免疫系统疾病患者的增多, OPPPs 污染带来的健康风险不容忽视。根据我国供水系统建设现状, 加强建筑供水系统运行维护管理, 如二次加氯、定期进行水箱清洗、对龙头水水质进行定期检测等方法可实现对龙头水生物污染的监管以及对 OPPPs 感染的预警。但目前尚无有效措施完全控制建筑供水系统中的 OPPPs, 因此, 开发先进高效的微生物检测手段, 探明 OPPPs 在建筑供水系统全流程的变化规律与存在机制, 对研究 OPPPs 控制措施具有实践意义。

参考文献

- [1] LIU G, ZHANG Y, KNIBBE W J, et al. Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review [J]. *Water Research*, 2017, 51(6): 135-148.
- [2] FALKINHAM J O, HILBORN E D, ARDUINO M J, et al. Epidemiology and ecology of opportunistic premise plumbing pathogens: *Legionella pneumophila*, *Mycobacterium avium*, and *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015(8): 749-758.
- [3] PAUL W J J, VAN DER WIELEN D V D K. Nontuberculous mycobacteria, fungi, and opportunistic pathogens in unchlorinated drinking water in the Netherlands [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 79(3): 825-834.
- [4] 王松松, 刘磊, 徐建军, 等. 烟台市 2014 年-2016 年市政供水水质状况分析 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2018, 28(9): 1108-1110.
- [5] HAMMES F, BERGER C, KSTER O, et al. Assessing biological stability of drinking water without disinfectant residuals in a full-scale water supply system [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2010, 59(1): 31-40.
- [6] 李欢, 赵建夫, 王虹. 饮用水输配系统中条件致病菌的健康风险和生长因素 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(10): 41-45.
- [7] BEER K D, GARGANO J W, ROBERTS V A, et al. Surveillance for waterborne disease outbreaks associated with drinking water—United States, 2011–2012 [J]. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2015, 64(31): 842-848.
- [8] SPRINGSTON J P, YOCAVITCH L. Existence and control of legionella bacteria in building water systems: A review [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2017, 14(2): 124-134.
- [9] COLLIER S A, STOCKMAN L J, HICKS L A, et al. Direct healthcare costs of selected diseases primarily or partially transmitted by water [J]. *Epidemiol Infect*, 2012(11): 2003-2013.

- [10] ANAÏSSIE E J, PENZAK S R, DIGNANI M C. The hospital water supply as a source of nosocomial infections [J]. *Archives of Internal Medicine*, 2002(13): 1483-1492.
- [11] FALKINHAM J O, PRUDEN A, EDWARDS M. Opportunistic premise plumbing pathogens: Increasingly important pathogens in drinking water [J]. *Pathogens*, 2015, 4(2): 373-386.
- [12] PEPPER I L, RUSIN P, QUINTANAR D R, et al. Tracking the concentration of heterotrophic plate count bacteria from the source to the consumer's tap [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2004, 92(3): 289-295.
- [13] VAN NEVEL S, KOETZSCH S, PROCTOR C R, et al. Flow cytometric bacterial cell counts challenge conventional heterotrophic plate counts for routine microbiological drinking water monitoring [J]. *Water Research*, 2017, 51(8): 191-206.
- [14] LIPPHAUS P, HAMMES F, K TZSCH S, et al. Microbiological tap water profile of a medium-sized building and effect of water stagnation [J]. *Environmental Technology*, 2013, 35(5): 620-628.
- [15] ZACHEUS O M, MARTIKAINEN P J. Occurrence of heterotrophic bacteria and fungi in cold and hot water distribution systems using water of different quality [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1995, 41(12): 1088-1094.
- [16] BARNA Z, KADAR M, KALMAN E, et al. Prevalence of *Legionella* in premise plumbing in Hungary [J]. *Water Research*, 2016(5): 71-78.
- [17] FRASER D W, TSAI T R, ORENSTEIN W, et al. Legionnaires' disease: Description of an epidemic of pneumonia [J]. *The New England Journal of Medicine*, 1977(22): 1189-1197.
- [18] ZAHARAN S, MCELMURRY S P, KILGORE P E. Assessment of the Legionnaires' disease outbreak in Flint, Michigan [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018(25): 1730-1739.
- [19] JOSEPH C A, WATSON J M, HARRISON T G, et al. Nosocomial Legionnaires' disease in England and Wales, 1980 - 92 [J]. *Epidemiology and Infection*, 2009(2): 329-346.
- [20] VOLKER S, SCHREIBER C, KISTEMANN T. Drinking water quality in household supply infrastructure—A survey of the current situation in Germany [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2010(3): 204-209.
- [21] 陶黎黎, 胡必杰, 周昭彦, 等. 上海市 8 所医院供水系统军团菌属污染调查及危险因素分析 [J]. *中华医院感染学杂志*, 2010, 20(12): 1710-1712.
- [22] 杨轶戩, 王志伟, 郭重山, 等. 广州市亚运接待宾馆酒店淋浴热水军团菌污染状况分析 [J]. *热带医学杂志*, 2011, 11(6): 706-707.
- [23] LI H, LI S, TANG W, et al. Influence of secondary water supply systems on microbial community structure and opportunistic pathogen gene markers [J]. *Water Research*, 2018, 52(4): 160-168.
- [24] QIN K, STRUEWING I, DOMINGO J, et al. Opportunistic patho-

- gens and microbial communities and their associations with sediment physical parameters in drinking water storage tank sediments [J]. *Pathogens* , 2017 , 6(4) : 54–67.
- [25] TOTARO M , VALENTINI P , COSTA A L , et al. Presence of *Legionella* spp. in hot water networks of different Italian residential buildings: A three-year survey [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health* , 2017 , 14(11) : 1296.
- [26] GHOTASLOU R , YEGANEH SEFIDAN F , AKHI M T , et al. Detection of *legionella* contamination in tabriz hospitals by PCR assay [J]. *Advanced Pharmaceutical Bulletin* , 2013(1) : 131–134.
- [27] MATHYS W , STANKE J , HARMUTH M , et al. Occurrence of *Legionella* in hot water systems of single-family residences in suburbs of two German cities with special reference to solar and district heating [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* , 2008(1–2) : 179–185.
- [28] EDAGAWA A , KIMURA A , DOI H , et al. Detection of culturable and nonculturable *Legionella* species from hot water systems of public buildings in Japan [J]. *Journal of Applied Microbiology* , 2008(6) : 2104–2114.
- [29] HIDRON A I , EDWARDS J R , PATEL J , et al. Antimicrobial-resistant pathogens associated with healthcare-associated infections: Annual summary of data reported to the national healthcare safety network at the centers for disease control and prevention , 2006–2007 [J]. *Infection Control and Hospital Epidemiology* , 2008 , 29(11) : 996–1011.
- [30] ZARB P , COIGNARD B , GRISKEVICIENE J , et al. The European centre for disease prevention and control (ECDC) pilot point prevalence survey of healthcare-associated infections and antimicrobial use [J]. *Eurosurveillance* , 2012 , 17(46) : 4–19.
- [31] TRAUTMANN M , LEPPER P M , HALLER M. Ecology of *Pseudomonas aeruginosa* in the intensive care unit and the evolving role of water outlets as a reservoir of the organism [J]. *American Journal of Infection Control* , 2005 , 33(5) : 41–49.
- [32] GARVEY M I , BRADLEY C W , TRACEY J , et al. Continued transmission of *Pseudomonas aeruginosa* from a wash hand basin tap in a critical care unit [J]. *The Journal of Hospital Infection* , 2016(1) : 8–12.
- [33] PETER A , ROUTLEDGE E. Present-day monitoring underestimates the risk of exposure to pathogenic bacteria from cold water storage tanks [J]. *PLoS One* , 2018 , 13(4) : e0195635.
- [34] LU J , STRUEWING I , YELTON S , et al. Molecular survey of occurrence and quantity of *Legionella* spp. , *Mycobacterium* spp. , *Pseudomonas aeruginosa* and amoeba hosts in municipal drinking water storage tank sediments [J]. *Journal of Applied Microbiology* , 2015(1) : 278–288.
- [35] 李涛 , 李佳. 成都市生活饮用水中铜绿假单胞菌的污染调查 [J]. *环境与健康杂志* , 2014 , 31(4) : 349–350.
- [36] LIU L , XING X , HU C , et al. One-year survey of opportunistic premise plumbing pathogens and free-living amoebae in the tap-water of one northern city of China [J]. *Journal of Environmental Sciences* , 2019 , 77(3) : 20–31.
- [37] MOMTAZ H , RAHIMI E , MOSHKELANI S. Detection of *Pseudomonas aeruginosa* by PCR in tap-water and bottled mineral water in the Isfahan province of Iran [J]. *Water Science and Technology: Water Supply* , 2011 , 11(5) : 642–646.
- [38] TRAUTMANN M , BAUER C , SCHUMANN C , et al. Common RAPD pattern of *Pseudomonas aeruginosa* from patients and tap water in a medical intensive care unit [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* , 2006(4) : 325–331.
- [39] HALABI M , WIESHOLZER-PITTL M , SCHOBERL J , et al. Non-touch fittings in hospitals: A possible source of *Pseudomonas aeruginosa* and *Legionella* spp [J]. *Journal of Hospital Infection* , 2001 , 49(2) : 117–121.
- [40] CHARRON D , BEDARD E , LALANCETTE C , et al. Impact of electronic faucets and water quality on the occurrence of *Pseudomonas aeruginosa* in water: A multi-hospital study [J]. *Infection Control and Hospital Epidemiology* , 2015 , 36(3) : 311–319.
- [41] KHAN M A , ALMADANI A M A A. Assessment of microbial quality in household water tanks in Dubai , United Arab Emirates [J]. *Environmental Engineering Research* , 2016 , 22(1) : 55–60.
- [42] FRANCISQUE A , RODRIGUEZ M J , MIRANDA-MORENO L F , et al. Modeling of heterotrophic bacteria counts in a water distribution system [J]. *Water Research* , 2009 , 43(4) : 1075–1087.
- [43] 康利民 , 吴俊奇. 不同季节的二次供水水质调查及分析 [J]. *给水排水* , 2018 , 54(2) : 48–52.
- [44] BUSE H Y , ASHBOLT N J. Differential growth of *Legionella pneumophila* strains within a range of amoebae at various temperatures associated with in-premise plumbing [J]. *Letters in Applied Microbiology* , 2011 , 53(2) : 217–224.
- [45] BARGELLINI A , MARCHESI I , RIGHI E , et al. Parameters predictive of *Legionella* contamination in hot water systems: association with trace elements and heterotrophic plate counts [J]. *Water Research* , 2011 , 45(6) : 2315–2321.
- [46] MEIER T , BENDINGER B. Survival of pathogens in drinking water plumbing systems: Impact factors and sanitation options [J]. *Water Science and Technology: Water Supply* , 2016 , 16(4) : 931–941.
- [47] BEDARD E , PREVOST M , DEZIEL E. *Pseudomonas aeruginosa* in premise plumbing of large buildings [J]. *Microbiology Open* , 2016 , 5(6) : 937–956.
- [48] CUTTELOD M , SENN L , TERLETSKIY V , et al. Molecular epidemiology of *Pseudomonas aeruginosa* in intensive care units over a 10-year period (1998–2007) [J]. *Clinical Microbiology and Infection: The Official Publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases* , 2011 , 17(1) : 57–62.
- [49] 区嘉明. 停留时间对二次供水中余氯的影响研究 [J]. *科技创新导报* , 2016 , 13(11) : 31–32.

- [50] 张浩,杨艳玲,李星,等. 高层建筑转输供水系统余氯衰减规律与补氯特点研究 [J]. 给水排水, 2018, 54(1): 115-121.
- [51] FALKINHAM J O 3RD. Common features of opportunistic premise plumbing pathogens [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(5): 4533-4545.
- [52] KUČHTA J M, STATES S J, MCGLAUGHLIN J E, et al. Enhanced chlorine resistance of tap water-adapted legionella-pneumophila as compared with agar medium passaged strains [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1985, 50(1): 21-26.
- [53] MARCHESI I, MARCHEGIANO P, BARGELLINI A, et al. Effectiveness of different methods to control legionella in the water supply: Ten-year experience in an Italian university hospital [J]. Journal of Hospital Infection, 2011, 77(1): 47-51.
- [54] BUSE H Y, SCHOEN M E, ASHBOLT N J. Legionellae in engineered systems and use of quantitative microbial risk assessment to predict exposure [J]. Water Research, 2012, 46(4): 921-933.
- [55] GROBE S, WINGENDER J, FLEMMING H C. Capability of mucoid *Pseudomonas aeruginosa* to survive in chlorinated water [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2001 (2-3): 139-142.
- [56] MAO G, SONG Y, BARTLAM M, et al. Long-term effects of residual chlorine on *Pseudomonas aeruginosa* in simulated drinking water fed with low AOC medium [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 879-888.
- [57] LAUTENSCHLAGER K, BOON N, WANG Y, et al. Overnight stagnation of drinking water in household taps induces microbial growth and changes in community composition [J]. Water Research, 2010, 44(17): 4868-4877.
- [58] ZLATANOVIC L, VAN DER HOEK J P, VREEBURG J H G. An experimental study on the influence of water stagnation and temperature change on water quality in a full-scale domestic drinking water system [J]. Water Research, 2017, 51(20): 761-772.
- [59] LING F, WHITAKER R, LECHEVALLIER M W, et al. Drinking water microbiome assembly induced by water stagnation [J]. The ISME Journal, 2018, 12(6): 1520-1531.
- [60] 康利民,吴俊奇. 两种二次供水系统水质安全性对比分析 [J]. 环境工程, 2018, 36(8): 14-19.
- [61] WINGENDER J. Hygienically relevant microorganisms in biofilms of man-made water systems [M]//FLEMMING H C, WINGENDER J, SZEZYK U. Biofilm highlights. New York: Springer, 2011: 189-238.
- [62] VAN HOOFF J, HORNSTRA L M, VAN DER BLOM E, et al. The presence and growth of Legionella species in thermostatic shower mixer taps: An exploratory field study [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2014, 35(6): 600-612.
- [63] 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.
- [64] LESNIK R, BRETTAR I, HOFLE M G. Legionella species diversity and dynamics from surface reservoir to tap water: From cold adaptation to thermophily [J]. The ISME Journal, 2016, 10(5): 1064-1080.
- [65] PIAO Z, SZE C C, BARYSHEVA O, et al. Temperature-regulated formation of mycelial mat-like biofilms by Legionella pneumophila [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(2): 1613-1622.
- [66] SEPTEMBER S M, ELS F A, VENTER S N, et al. Prevalence of bacterial pathogens in biofilms of drinking water distribution systems [J]. Journal of Water and Health, 2007, 5(2): 219-227.

【专家点评】建筑给水系统龙头水的水质安全,是广泛关注的重点之一。论文基于国内外研究成果,阐述建筑供水系统中的微生物污染状况,探讨供水系统中常见的致病菌(OPPPs)军团菌、铜绿假单胞菌的存在水平与主要影响因素,提出通过定期清洗与加强维护来降低建筑供水系统微生物污染风险,保障龙头水水质安全。论文参阅了60余篇文献,分析了不同国家、时间跨度较长的相关研究资料,信息较丰富,分析思路正确、方法合理可行,结论可为同类研究提供一定的参考。

(上接第40页)

- [3] 杨建辉,周庆华. 陕北传统雨水场地的生态智慧对现代海绵城市建设的启示 [J]. 中国园林, 2018(7): 64-68.
- [4] 金云峰,彭茜,沈洁. 海绵城市中绿色基础设施建设与人的审美认识研究 [J]. 中国城市林业, 2018(4): 16-20.
- [5] 曾彦钦,张耀煌,胡继峥,等. 谈沈阳建筑大学海绵校园改造方案及应用 [J]. 山西建筑, 2016, 42(13): 129-131.
- [6] 王玮,王浩,田晓冬,等. 基于海绵校园背景下校园景观设计研究——以南京林业大学景观设计为例 [J]. 中国园林, 2018(6): 65-69.
- [7] 李力,丁琨,范卓越,等. 海绵城市下的高校“海绵校园”建设 [J]. 长江大学学报(自科版), 2017(17): 32-38.
- [8] 马竞一,王锦. 基于LID开发模式的云南工商学院海绵校园规划设计 [J]. 林业调查规划, 2016, 41(2): 124-127.
- [9] 李亚光,范弘熙,葛俊,等. 某绿地雨水收集利用设计方案 [J]. 净水技术, 2018, 37(s1): 210-212, 216.