

饮用水输配系统中条件致病菌的健康风险和生长因素

李 欢, 赵建夫, 王 虹

(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 一类新型的饮用水致病菌——条件致病菌, 已成为饮用水相关介水传播疾病暴发的重要病原之一。条件致病菌能在管道系统贫营养饮用水环境中再生长, 具备耐热、抗消毒剂能力, 并可通过呼吸吸入、皮肤接触等方式侵入人体。饮用水系统是条件致病菌感染人体的主要途径。简要介绍了饮用水输配水系统中条件致病菌的检出情况和致病风险, 并对影响饮用水系统中条件致病菌再生长的关键因素(例如水温、消毒剂、管材、生物因素)进行了深入讨论, 并分析了控制条件致病菌风险的相关措施。

关键词: 条件致病菌; 饮用水输配水系统; 再生长

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)10-0041-05

Opportunistic Pathogens in Drinking Water Distribution Systems: Health Risks and Growth Factors

LI Huan, ZHAO Jian-fu, WANG Hong

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new type of pathogenic bacteria in drinking water, e. g. opportunistic pathogens (OPs), represent an emerging drinking water related waterborne disease problem worldwide. These microorganisms can naturally reestablish in drinking water systems featured with poor nutritious environment, and have capabilities of heat and disinfectant resistances. Inhalation of aerosols and direct contact are the primary transmission routes for OPs, which can occur during drinking water consumption. The current knowledge of OPs detection and potential health risks in drinking water distribution systems were introduced. The key factors affecting OPs regrowth in drinking water systems, such as temperature, disinfectants, pipe materials, and biofilms were thoroughly discussed. Finally, measures for controlling OPs were critically evaluated.

Key words: opportunistic pathogens; drinking water distribution system; regrowth

随着生活水平的提高,人们对饮用水的质量和
安全要求也日趋严格。饮用水质量不仅受水源、处
理工艺的影响,其在供水管网的输配过程也是影响
用户端水质的关键环节。随着停留时间的增加,配

水中余氯降解,微生物可在配水系统中迅速繁殖,形
成管道生物膜,造成二次污染。

近些年来,一类新型的饮用水致病菌——条件
致病菌(Opportunistic pathogens,以下简称“OPs”)已

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508397)

通信作者: 王虹 E-mail: hongwang@tongji.edu.cn

成为饮用水相关介水传播疾病暴发的重要病原之一,受到国际社会广泛的关注^[1]。饮用水中 OPs 包括细菌性病原,如军团菌、非结核分枝杆菌(Non-tuberculosis mycobacteria,以下简称“NTM”)、铜绿假单胞菌,以及可作为它们宿主的原生动阿米巴原虫,如棘阿米巴原虫、福氏纳格里变形虫。这类 OPs 属非粪源性病原,它们能在贫营养的饮用水环境中再生长,具备较强的耐热(耐热水温 $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$)、抗消毒能力^[1,2]。饮用水系统不仅是 OPs 生长的重要“孵化器”,也是人们接触致病菌的关键暴露场所。OPs 传播途径特殊,可通过呼吸吸入、皮肤接触等方式侵入人体^[1,3]。随着潜在易感人群数目的增加(老龄人口膨胀、免疫系统疾病患者增多),OPs 对公众健康的威胁日益严峻。

1 条件致病菌在配水系统中的检出情况

1.1 军团菌属

1976年,美国退伍军人协会成员中暴发肺炎,军团菌首次得到报道并受重视。军团菌感染主要有两种形式:庞蒂亚克热和军团病,目前已发现的54种军团菌中有25种具致病性,但90%的病例与嗜肺军团菌相关。

饮用水系统是军团菌的一个重要来源。据报道,2011年—2012年美国发生32起与饮用水有关的疫情,由建筑物内饮用水管道中军团菌污染引起的占总暴发疫情数的66%^[3]。2001年亚洲首次报道的社区获得性军团病案例中,研究者从患者痰中和患者家中分离出相同的嗜肺军团菌,再次验证了军团病与饮用水之间的潜在联系。陶黎黎等对上海市8所医院供水系统进行了军团菌污染调查,结果表明上海市医院供水系统中军团菌检出率高达43.0%,且污染浓度高,存在发生院内军团菌肺炎甚至暴发流行的严重隐患^[4]。除了医院供水体系,军团菌在普通建筑供水管网中也时常检出。现有研究列举以家庭为单位的嗜肺军团菌的检出情况如下:1992年美国218户家庭检出14户;2008年德国400户家庭检出48户;1991年加拿大211户家庭检出69户。

1.2 非结核分枝杆菌属

与不通过水传播的结核分枝杆菌不同,非结核分枝杆菌(NTM)则是天然存在于多种水环境中的一类革兰氏阳性菌。NTM在饮用水配水系统的水相和生物膜中可大量存在,从而进入家庭管道系统,

接触并感染人类。

NTM相关的肺病主要发生在免疫力低下群体,主要病原包括鸟分枝杆菌、堪萨斯分枝杆菌、胞内分枝杆菌、脓肿分枝杆菌等。美国多数NTM感染由鸟分枝杆菌引起^[5]。目前,鸟分枝杆菌已被列入美国EPA饮用水备选污染物指标清单(CCL-3)。

近几十年来,尽管水处理技术不断提高,但分枝杆菌的感染病例并没有减少。在加拿大安大略省,1997年—2003年间每十万人口中NTM疾病的发病率从9.1人增长到14.1人。在美国,NTM患病率约为2.7人/10万人。早期对NTM的环境病源调查集中在环境水体和土壤上,而随着饮用水配水系统中NTM频繁检出,研究者们将更多的注意力转向饮用水配水系统。大量研究表明,饮用水配水系统、医院和家庭管道系统均存在人类NTM感染源^[1]。Briancesco等^[6]收集了意大利中部和南部的私人大楼、医院、学校和公共建筑水表等不同管道系统及游泳池共55份水样,调查发现尽管大多数饮用水样品符合欧洲饮用水微生物标准,但72%的分析样品中分离出了NTM,菌落密度为1~600 CFU/L。Falkingham等^[7]在2007年—2009年期间从NTM患者的家中采集饮用水样品,37户家庭中有22户检出了NTM,占总户数的59%,其中17户检出了不止一种NTM。

1.3 铜绿假单胞菌

铜绿假单胞菌是一种革兰氏阴性杆菌,在包括自来水在内的各种水环境中均有检出。铜绿假单胞菌对抗生素具有抗性,加重了感染患者的死亡风险。铜绿假单胞菌院内感染主要与患者使用的受污染的水、溶液和医疗器械相关。Crivaro等^[8]通过分子分型发现医院ICU水槽内自来水样本中的铜绿假单胞菌株与感染患者的菌株具有同源性。Cholley等^[9]通过对住院患者跟踪研究发现部分患者菌株和自来水样品中的菌株具有同源性。这些均表明饮用水系统是铜绿假单胞菌感染的重要传播途径。

1.4 阿米巴虫属

自由生活阿米巴虫(free-living amoeba,以下简称FLA)是一种单细胞真核微生物,广泛存在于水和土壤中。FLA是一个广泛多元的群体,在水中发现的种类主要有棘阿米巴虫、哈门阿米巴属、福氏纳格里变形虫、简便虫属等。

饮用水是阿米巴虫感染的重要来源之一。

Wang 等^[2]对美国弗吉尼亚州家庭自来水进行 OPs 检测,其中哈门阿米巴属和棘阿米巴虫的检出率分别为 27.6% 和 13.7%。Thomas 等^[10]总结了 19 项来自 14 个不同国家的研究,部分国家自来水中 FLA 检出率如下:西班牙为 60%,英国为 89%,加拿大为 100%,美国亚特兰大为 70%,巴西为 35%,中国香港为 10%,韩国为 27%。

2 影响条件致病菌再生长的因素

自来水中 OPs 的存在,是一个重要的公共健康问题。影响 OPs 在配水系统生存的因素众多且复杂,为此重点论述目前研究较多的包括温度、消毒剂、管网材质、生物膜在内的若干非生物因素和生物因素。

2.1 非生物因素

2.1.1 温度

军团病通常与受污染的自来水有关,多涉及热水系统。目前认为热水存储设备是滋生军团菌的温床,较低的热热水温与军团菌的出现密切相关。值得指出的是不管是家庭、医院还是公共浴室的水龙头或淋浴喷头等的出水水温一般是 30~55℃,均低于军团菌 60℃ 的控制温度,利于其生长繁殖。

NTM 也容易在温度较低的热热水中繁殖。Falkinham 等^[7]在一项调查中发现住户热水器水温 <50℃ 时,NTM 的检出率为水温 >55℃ 的 2 倍。温度影响实验表明,水温为 50℃ 时杀死 90% 的鸟分枝杆菌细胞所需的时间为 1 000 min,但在 55℃ 高温下只需 54 min 便可杀死 90% 的鸟分枝杆菌细胞。

2.1.2 消毒剂

OPs 具有抗消毒剂能力,不同消毒剂对水相或生物膜中的 OPs 灭菌效果存在差异。

氯是目前使用最广泛的消毒剂,其对于水相中的细菌灭菌效果较强,但由于其穿透生物膜能力有限,灭活生物膜中微生物较难。美国给水工程协会推荐的控制生物膜形成的余氯量为 0.5 mg/L。但有研究表明,此余氯浓度仅能控制水相中的细菌,不足以防止管道内微生物生物膜的形成。而 OPs 比一般细菌更为耐氯,更易生长于生物膜中。据报道,对于鸟分枝杆菌和胞内分枝杆菌的有效氯消毒需要将氯维持在 1 mg/L 以上持续时间超过 2 h^[11]。

和氯相比,氯胺活性较弱,但具有较强的穿透生物膜的能力。氯胺对军团菌的控制效果较氯佳,采

用氯胺控制医院内军团菌污染,相比于氯可降低约 10 倍的风险^[12]。在医院热水配水系统中采用氯胺消毒 1 年,嗜肺军团菌的污染明显减少,受军团菌污染的地点数量由 97% 下降至 13%^[13]。然而氯胺消毒也存在一些缺点,例如温度的升高会加速含氯消毒剂的损失,管道生物膜中的硝化反应也会加速氯胺的衰减。一些 OPs 对氯胺的耐受性也存在差异,有报道显示,当采用氯胺替代氯消毒时,军团菌检出率降低,分枝杆菌检出率却增高^[14]。

与氯气相比,二氧化氯余量持续时间长,在死水区灭菌效果较强^[15]。然而,二氧化氯对 OPs 的控制效果存在争议。Zhang 等^[16]用浓度为 0.09~0.11 mg/L 的二氧化氯对美国医院热水系统进行消毒,军团菌检出率从 60% 下降到 8%~10%。而 Marchesi 等^[13]发现二氧化氯军团菌控制效果有限,二氧化氯浓度为 0.3~1.0 mg/L 时消毒前后水样中的军团菌属的检出率分别为 97% 和 53.7%,且嗜肺军团菌检出率提高。二氧化氯的处理效果差异,可能与除消毒剂外其他重要因素的相互作用有关。

铜-银离子常用于用户端军团菌控制。热水系统中,铜、银离子浓度分别在 0.4 mg/L 和 0.04 mg/L 以上时会显著减少军团菌检出。但长期使用可导致军团菌具有银离子耐受性。另外,铜-银离子消毒受 pH 值影响大,当 pH 值 >6 时,容易络合沉淀从而形成污泥,pH 值 >7.6 时 90% 的铜作为不溶性络合物而沉淀^[15]。这也可以解释铜-银离子与其他消毒剂相比其消毒性能较弱的原因。

2.1.3 管材

由于材质的孔隙率、化学性质不同,微生物在不同管材表面附着生长能力存在差异。模拟配水系统实验研究发现,鸟分枝杆菌在铸铁管和镀锌管的表面数量较铜管或 CPVC 表面高^[17]。在另一模拟配水系统实验中,研究者发现分枝杆菌、铜绿假单胞菌以及棘阿米巴虫在铸铁管表面生物膜中数量较水泥管和 PVC 管低^[18]。

管材对 OPs 的影响可能通过溶出的金属离子产生。目前的研究多集中在铜离子对军团菌的影响上。然而,不同的研究得出的结论不尽一致。若干研究报道了铜离子浓度和军团菌数呈负相关性,在铜离子浓度 >0.05 mg/L 的铜管系统中,军团菌生长受到抑制。相反,有研究发现在热水系统中铜离子的浓度和军团菌的生长呈正相关性,铜离子浓度

>0.5 mg/L 时热水中军团菌检出率更高。管材对 OPs 的影响可能是由温度、水中离子等因素的共同作用而产生的,如在热水系统(水温 <46 ℃)中铜离子的抑制作用可能会消失。钙、硫酸盐和硝酸盐离子也可能会进一步刺激军团菌的生长。

2.2 生物因素

2.2.1 生物膜

管网中的微生物膜不仅会引起饮用水臭味问题,加速管材的腐蚀,还为条件致病菌提供了有利的生长条件。生物膜增加了消毒剂穿透的难度,同时从生物膜中释放出细胞与消毒剂接触,消耗管网余氯。这些都间接增强了 OPs 对消毒剂的抵抗能力。另一方面,生物膜为阿米巴虫等原虫提供食物,使自由生活阿米巴虫的数量增加,从而间接地为阿米巴滋养体中包藏抗阿米巴细菌提供了生长条件^[19]。

2.2.2 FLA 与 ARM 相互作用

FLA 是多种 OPs 的宿主,对它们的生长起到重要的保护、传播和促进作用。迄今为止包括军团菌、分枝杆菌和铜绿假单胞菌在内的 14 种不同介水传播致病菌已在自来水环境生长的 FLA 菌株中检测出。研究表明,从饮用水中分离的阿米巴原虫有 87.6% 携带了大量的 NTM。因此,FLA 被称为是众多细菌的“特洛伊木马”^[10]。

OPs 存在于阿米巴内,可免于被消毒剂杀灭,生存能力得到提高^[15]。研究表明,嗜肺军团菌在氯消毒后可进入不可培养的状态,但若体系中与棘阿米巴虫共存,即使在浓度高达 1 024 mg/L 的 NaClO 中,仍可恢复到可培养状态。因此用消毒剂反复处理,对水生系统中的嗜肺军团菌长期控制效果有限^[20]。

另外,棘阿米巴虫的抗氯性能也可能因为被嗜肺军团菌感染而提高。有数据表明,256 mg/L 的 NaClO 可去除 80% 以上未感染的棘阿米巴虫,而对已感染嗜肺军团菌的棘阿米巴虫的灭活效果仅有 7% ~ 40%^[20]。另外,有学者认为,嗜肺军团菌与 FLA 的专性共生关系是其在饮用水环境生长繁殖的前提^[19]。

除以上论述的若干因素外,影响 OPs 在配水系统生存的因素还包括水化学性质(如微量元素)、管网水力运输条件以及不同非生物、生物因子间的相互作用。进一步探明饮用水系统条件致病菌的再生长机制,将利于提出控制其在饮用水体系繁殖的有

效措施。

3 结语

鉴于饮用水中 OPs 独特的生长特点和传播途径,目前尚无有效的 OPs 控制方法。虽然提高热水器水温可有效控制 OPs 的污染,但该措施可能造成能源浪费并带来烫伤风险。有学者提出提高净水厂水处理标准,降低浊度和有机碳含量可控制 OPs 再生长,但其有效性尚待考证。对于一些免疫力低下群体,可考虑在用户端安装过滤装置以降低致病菌暴露风险。但该举措成本较高,对过滤装置维护管理也有一定要求。因此,实现饮用水系统中 OPs 的有效控制仍是国际社会面临的挑战之一。目前国内对 OPs 的认识和研究仍处于起步阶段,结合我国供水系统的特点,弄清 OPs 在我国输配水系统中的分布和再生长特点,正确评价 OPs 健康风险,并探索适合的防治措施,具有科学紧迫性和实践意义。

参考文献:

- [1] Falkinham J O III, Hilborn E D, Arduino M J, et al. Epidemiology and ecology of opportunistic premise plumbing pathogens: *Legionella pneumophila*, *Mycobacterium avium*, and *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Environ Health Perspect, 2015, 123(8): 749–758.
- [2] Wang H, Edwards M, Falkinham J O III, et al. Molecular survey of the occurrence of *Legionella* spp., *Mycobacterium* spp., *Pseudomonas aeruginosa*, and amoeba hosts in two chloraminated drinking water distribution systems [J]. Appl Environ Microbiol, 2012, 78(17): 6285–6294.
- [3] 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]. Morb Mortal Wkly Rep, 2015, 64(31): 842–848.
- [4] 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.
- [5] Falkinham J O III, Norton C D, Lechevallier M W. Factors influencing numbers of *Mycobacterium avium*, *Mycobacterium intracellulare*, and other mycobacteria in drinking water distribution systems [J]. Appl Environ Microbiol, 2001, 67(3): 1225–1231.
- [6] Briancesco R, Semproni M, Paradiso R, et al. Nontuberculous mycobacteria: an emerging risk in engineered environmental habitats [J]. Ann Microbiol, 2013, 64(2):

- 735 – 740.
- [7] Falkinham J O III. Nontuberculous mycobacteria from household plumbing of patients with nontuberculous mycobacteria disease[J]. *Emerg Infect Dis*,2011,17(3): 419 – 424.
- [8] Crivaro V, Popolo A D, Caprio A, *et al.* *Pseudomonas aeruginosa* in a neonatal intensive care unit: Molecular epidemiology and infection control measures[J]. *BMC Infect Dis*,2009,doi:10. 1186/1471 – 2334 – 9 – 70.
- [9] Cholley P, Thouverez M, Floret N, *et al.* The role of water fittings in intensive care rooms as reservoirs for the colonization of patients with *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Intens Care Med*,2008,34(8):1428 – 1433.
- [10] Thomas J M, Ashbolt N J. Do free-living amoebae in treated drinking water systems present an emerging health risk? [J]. *Environ Sci Technol*,2011,45(3): 860 – 869.
- [11] Taylor R H, Falkinham J O III, Norton C D, *et al.* Chlorine, chloramine, chlorine dioxide, and ozone susceptibility of *Mycobacterium avium*[J]. *Appl Environ Microbiol*,2000,66(4):1702 – 1705.
- [12] Kool J L, Carpenter J C, Fields B S. Monochloramine and Legionnaires' disease [J]. *J AWWA*, 2000, 92 (9):88 – 96.
- [13] 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]. *J Hosp Infect*,2011,77(1):47 – 51.
- [14] Moore M R, Pryor M, Fields B, *et al.* Introduction of monochloramine into a municipal water system: Impact on colonization of buildings by *Legionella* spp. [J]. *Appl Environ Microbiol*,2006,72(1):378 – 383.
- [15] Thomas V, Bouchez T, Nicolas V, *et al.* Amoebae in domestic water systems: Resistance to disinfection treatments and implication in *Legionella* persistence[J]. *J Appl Microbiol*,2004,97(5):950 – 963.
- [16] Zhang Z, Vidic R D. *Legionella* control by chlorine dioxide in hospital water systems[J]. *J AWWA*,2009,101 (5):117 – 127.
- [17] Norton C D, LeChevallier M W, Falkinham J O III. Survival of *Mycobacterium avium* in a model distribution system[J]. *Water Res*,2004,38(6):1457 – 1466.
- [18] Wang H, Masters S, Hong Y, *et al.* Effect of disinfectant, water age, and pipe material on occurrence and persistence of *Legionella*, *mycobacteria*, *Pseudomonas aeruginosa*, and two amoebae[J]. *Environ Sci Technol*,2012, 46(21):11566 – 11574.
- [19] Declerck P, Behets J, Margineanu A, *et al.* Replication of *Legionella pneumophila* in biofilms of water distribution pipes [J]. *Microbiol Res*, 2009, 164 (6): 593 – 603.
- [20] Garcia M T, Jones S, Pelaz C, *et al.* *Acanthamoeba polyphaga* resuscitates viable non-culturable *Legionella pneumophila* after disinfection[J]. *Environ Microbiol*, 2007,9(5):1267 – 1277.



作者简介:李欢(1991 –), 女, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为二次供水系统条件致病菌的分布特征和再生长机制。

E – mail:lihuanya84@126. com

收稿日期:2016 – 10 – 18