

# 人工环境下军团菌滋生与控制技术

郝晓地, 周 健, 曹达启

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室 可持续污水处理研发中心, 北京 100044)

**摘 要:** 军团菌伴随着城市现代文明而生,广泛滋生于建筑中央空调(循环冷却水)和热水系统之中,是一种潜在的传播性公共卫生隐患。为此,需要采取有效技术措施,消除这种潜在隐患。在描述军团菌危害、产生、生理/生化特征的基础上,重点介绍国内外现行军团菌控制技术,包括氯气( $\text{Cl}_2$ )、氯胺( $\text{NH}_2\text{Cl}$ )、二氧化氯( $\text{ClO}_2$ )、铜/银离子、 $\text{TiO}_2$ /光催化、紫外线(UV)、膜过滤等主流技术。根据军团菌生理、生化特征以及所需环境因子,提出从本源有效遏制军团菌滋生的技术策略及研发方向,如冷却塔气/液分离、去除循环冷却水中硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )与有机物(COD)、水质微酸化/微碱化并更换防腐管道/设备材料等措施。

**关键词:** 军团菌; 中央空调; 冷却塔; 氯消毒; 铜/银消毒; 气/液分离; 硫酸盐

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)06-0027-08

## Propagation and Controlling Technologies of *Legionellae* under Artificial Environments

HAO Xiao-di, ZHOU Jian, CAO Da-qi

(R and D Centre for Sustainable Wastewater Treatment, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** *Legionellae* occur along with the modern civilization of cities, and widely exist in central air-conditioning (circulating cooling water) and hot water systems of buildings, which are potential disseminated diseases for public health. For this reason, it is necessary to identify effective technical measures and to eliminate this potential healthy risk. Based on describing endangerment, propagation and physiological/biochemical characteristics of *legionellae*, major controlling technologies for *legionellae* are introduced, including chlorine ( $\text{Cl}_2$ ), chloramine ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ ), copper/silver ions,  $\text{TiO}_2$ /light catalysis, ultraviolet (UV), membrane filtration. According to the physiological and biochemical characteristics of *legionellae* and associated environmental factors, technical measures inhibiting *legionellae* at sources are proposed, such as separating liquid from gas of cooling towers, removing sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) and organic matter (COD) from cooling water, weak acidification or alkalinitation of cooling water associated with changing equipment/pipes' materials.

**Key words:** *legionellae*; central air-conditioning; cooling tower; chlorine disinfection; copper/silver disinfection; gas/liquid separation; sulfate

军团菌(*Legionella*)是一种通过呼吸道感染人体,进而诱发军团菌肺炎的一类病原体。军团病(Legionnaires' disease, LD)自1976年在美国费城确认以来,因其病情严重和死亡率高而受到高度重视。大量研究表明,军团菌是诱发微生物肺炎的三大病原体之一<sup>[1]</sup>。世界上许多国家或地区均有暴发军团病的报道,近年欧洲军团菌确诊病例频率呈上升趋势;意大利军团菌病例每年确诊数从2000年的192例激增至2010年的1235例和2011年的1008例<sup>[2]</sup>。在我国,北京、广州等地陆续在中央空调冷却塔中亦有检出军团菌的报道,军团菌检出率在34%~82%之间<sup>[3,4]</sup>。

军团菌多存活于热水环境之中,在其存在的热水环境周围,军团菌亦能以气溶胶形式存在<sup>[2]</sup>;气溶胶粒径一般低于10 μm,随波逐流,运动范围深达6~7 km,且仍具感染人群能力<sup>[5]</sup>;人体一旦吸入,可直达肺泡<sup>[2]</sup>。除高温外,军团菌的环境适应能力较强,可在较宽pH值、盐度范围内存在,广泛生存于天然水体(如河流、湖泊)和各种人工水系统(如热水系统、空调冷却塔等)之中<sup>[6]</sup>。有关研究表明,中央空调冷却塔和建筑热水系统已经成为军团菌最大的滋生地<sup>[7]</sup>。中央空调、冷却塔、热水器等现代文明产物在不断改善人们生活品质的同时,因疏于认识、缺乏设计、不当管理等也往往成为军团菌的传播工具。

作为一种“城市文明病”,军团菌已经成为城市现代化发展中不得不面对的一个重要公共卫生问题,若不加以有效防范则可能暴发严重流行疾病。在此方面,欧洲国家较早便开展了基础研究与实际应用工作;早在1986年,欧洲便成立了军团菌感染工作组(European Working Group for Legionella Infections, EWGLI);1987年还建立了欧洲军团菌感染监测网,采用统一病例定义和报告程序,对不同国家军团菌发病情况进行监测,是目前国际上比较完善的军团菌病监测网络。

此外,包括中国在内的其他国家学者也相继开展了对中央空调、冷却塔、热水器、温泉等人工水系统中军团菌控制技术的应用工作。目前,控制军团菌技术主要是化学与物理灭菌技术,其中化学消毒主要有氯气、氯胺、二氧化氯、臭氧、铜/银离子、TiO<sub>2</sub>/光催化等;物理消毒主要包括紫外线、超滤、热冲击等。这两类消毒方法中的某些技术在实

际运行中已取得较好的军团菌控制效果。

## 1 军团菌特性与人工环境下的滋生

军团菌类主要潜伏于中央空调、冷却塔、热水器、温泉等中高温水环境之中;系统一旦被军团菌感染,则很难彻底杀灭,二次暴发概率几乎100%<sup>[8]</sup>。军团菌的这种行为与其生理、生化特征存在直接关系,亦决定于其生存的环境。

### 1.1 生理、生化特性

军团菌为专性好氧、异养细菌,但需要一定浓度(2.5%~5.0%)的CO<sub>2</sub>存在。军团菌染色为革兰氏阴性,菌体呈多形性,视培养条件各异;常见的形状有杆状、两端钝圆、纺锤状等,大小一般长为2~20 μm、宽为0.3~0.9 μm。在活性炭酵母浸膏琼脂(BCYE)固体培养基上培养5~7 d,菌落直径可达3~4 mm,菌落结构凸而圆,边缘完整,整体呈灰色且带有光泽。在液体培养基培养过程中发现,一些军团菌存在较长的端生鞭毛,但没有观察到有荚膜、芽孢的形成。军团菌最适的生长温度为32~42℃,温度过低及过高均难以存活;不同温度下军团菌生存状态示于表1<sup>[9]</sup>。军团菌可适应的pH值为6.5~7.5,最佳值为6.9±0.05。

表1 不同温度下军团菌生存状态

Tab.1 Existing states of legionellae under different temperatures

项 目		菌体状态
温度/ ℃	<20	休眠状态(但未失活)
	25~32	生长速率缓慢
	32~42	快速生长(最佳适宜温度)
	42~45	生长速率缓慢
	48~50	可生存,但数量不多
	50	80~124 min 内 90% 军团菌失活
	60	2 min 内 90% 军团菌失活
	>70	军团菌即刻失活

培养过程发现,军团菌对半胱氨酸、胱氨酸(两者间可以相互转化)两类含硫氨基酸存在需求依赖;在缺乏半胱氨酸和胱氨酸条件下培养,发现军团菌无法正常生长。在自然环境中,半胱氨酸/胱氨酸这类含硫氨基酸可通过植物、藻类、真菌以及大部分细菌在体内通过硫酸盐同化过程合成<sup>[10]</sup>,经细菌胞外分泌物或死亡细胞而被军团菌在内的其他微生物所利用。因军团菌与其他细菌及原生动物存在紧密的共生关系,所以,军团菌暴发往往也伴随着其他微生物大量繁殖;特别是原生动物,它们是军团菌的天

然宿主,它们的存在为军团菌提供了抵御不良环境和增殖的良好场所;这些原生动物在军团菌生存、抗药性、感染、毒性、增殖等方面起着关键性作用。研究发现,能为军团菌提供胞内繁殖条件的原生动物达16种,包括纳氏属、哈氏虫属等。

## 1.2 人工环境下的军团菌

军团菌可在多种水环境中生存,特别是在上述几类人工环境下。军团菌通常以气溶胶为载体来感染附近人群,最常见于淋浴喷头和冷却塔产生的雾气。作为中央空调系统中的冷却塔,周围一旦出现含军团菌气溶胶,在很大程度上会被带入中央空调循环空气之中,往往带来传播范围更广的人群感染军团菌潜在风险。

开放式冷却塔目前使用最为广泛,大多数冷却塔只能建在室外,与大气相通。在冷却塔运行过程中,空气中的粉尘、有机物、细菌孢子、藻类等自然会落入冷却水中。循环冷却水温度长期处于32~37℃之间<sup>[11]</sup>,pH值又近于中性,而喷淋、凉水过程同时兼具充氧功能,这就为军团菌滋生创造了必要的生存环境。冷却塔中藻类存在,亦可以合成有机物,这也为异养菌生长提供了条件;冷却塔底部水槽中淤泥、藻类和生物膜在为军团菌提供营养的同时,也能成为军团菌躲避各种消毒剂攻击的庇护所。研究显示,军团菌难以彻底消灭、二次复发率高等与生物膜存在有着很大关系<sup>[9]</sup>,此外,在冬、夏间歇运行而未排空的冷却塔中会存在死水区,富含有机物的死水区易诱导军团菌滋生,因此,冷却塔在设计、管理不当的情况下易成为军团菌滋生、繁殖的温床<sup>[11]</sup>。

## 2 军团菌控制技术

军团菌具有抗逆性强、难以彻底去除、致死率高、易集中暴发的特点,需要特殊灭菌手段方能杀灭。美国环境保护署(EPA)、世界卫生组织(WHO)、欧洲军团菌工作组(EWGLI)等一些政府部门和卫生组织对杀灭军团菌均给予了一些指导性建议,但无外乎两类灭菌/消毒技术:①化学灭菌方法,主要以氯、二氧化氯、氯胺、铜/银离子、TiO<sub>2</sub>/光催化等为代表;②物理消毒方法,以紫外线、超滤膜等为主导。

### 2.1 化学灭菌技术

#### 2.1.1 氯气

氯气(Cl<sub>2</sub>)是目前使用最广泛的饮用水消毒剂,在一项Cl<sub>2</sub>灭活军团菌实验中发现,5株不同类型军

团菌中ATCC33152型表现出明显的抗氯性;在游离氯浓度为0.2 mg/L的条件下并不能灭活该株军团菌;在游离氯浓度达0.5 mg/L时,需要处理6 min才能对ATCC33152有效灭活<sup>[12]</sup>。实验结果显示,Cl<sub>2</sub>短期内对军团菌杀灭较为有效,且随余氯浓度升高以及处理时间延长杀灭效果会更好。但是,在实际消毒过程中有些军团菌会表现出较强的抗氯性或者随着消毒的进行而产生抗氯性,致消毒效果逐步下降。在Cl<sub>2</sub>实际运用过程中确实也发现了类似的结果;有人在某医院热水系统中利用Cl<sub>2</sub>控制军团菌时发现,在开始进行消毒的1周内军团菌数量开始下降,但在2周后军团菌数量开始回升,4周后军团菌浓度恢复至消毒前水平<sup>[8]</sup>。在循环冷却水系统中,一方面Cl<sub>2</sub>自身快速衰减,另一方面水体浊度大、有机物含量高,且在生物膜以及原生动物的保护下Cl<sub>2</sub>很难表现出持续消毒效果。有人对7个冷却塔采用Cl<sub>2</sub>控制军团菌生长,运行结果显示,Cl<sub>2</sub>对军团菌控制虽有一定的效果,但其消毒效果只能维持10~15 d的时间<sup>[13]</sup>。

Cl<sub>2</sub>在人工环境中军团菌长期消毒效果不佳的主要原因可归纳为:①Cl<sub>2</sub>在水中溶解度不高,导致其在水中的扩散效果不佳,无法有效穿透生物膜,难以彻底杀灭与其共生微生物,特别是存在于原生物体、生物膜等内部的军团菌。一旦余氯浓度下降,军团菌则立刻“卷土重来”,甚至恢复到消毒前水平。②某些种军团菌对氯具有一定抗药性,在持续余氯刺激下军团菌对氯的敏感性会降低,消毒效果随之下降。

此外,Cl<sub>2</sub>消毒会产生副作用,也会因其特性而增加运行成本。这主要体现在以下三方面:①Cl<sub>2</sub>会产生有毒副产物,如Cl<sub>2</sub>会与有机物形成可致癌的氯代物;②Cl<sub>2</sub>不抗衰减,在水的冷却过程中存在大量氯溢散现象,而Cl<sub>2</sub>逃逸则会带来环境风险和高额运行成本;③Cl<sub>2</sub>属于危险品,处理不当容易发生意外事故;④Cl<sub>2</sub>氧化还原电势较高,容易腐蚀管道及设备。

循环冷却水中易出现军团菌集中暴发状况。当军团菌集中暴发时,可以利用Cl<sub>2</sub>对军团菌进行瞬间(1~30 min)消毒<sup>[12]</sup>,以此作为应急处理措施,以在短时间内降低感染周围人群的风险。

#### 2.1.2 二氧化氯

二氧化氯(ClO<sub>2</sub>)因其有较强的氧化性而消毒



效果较好,且在消毒过程中不会产生有毒、有害副产物。早在20世纪40年代 $\text{ClO}_2$ 就被用作饮用水消毒剂,美国国家环境保护署(EPA)就将其列为饮用水中军团菌控制推荐消毒剂<sup>[14]</sup>。近年来,随着军团菌及军团病逐渐被重视,诸如医院等很多公共场所便利用 $\text{ClO}_2$ 对热饮用水系统中军团菌进行控制,实际运行数据显示 $\text{ClO}_2$ 能长期有效控制军团菌。例如,意大利某大学医院热水系统曾被军团菌高度感染,水样检测出87.5%的阳性率,军团菌数量分布在 $10^2 \sim 10^6$  CFU/L,其中有50%的样品浓度超过 $1 \times 10^4$  CFU/L<sup>[8]</sup>。为此,该医院采用 $\text{ClO}_2$ 对军团菌进行控制;结果显示,在 $\text{ClO}_2$ 处理30 d后军团菌数量便低于100 CFU/L,且在随后3年运行中军团菌浓度始终低于该值。 $\text{ClO}_2$ 消毒曲线表明, $\text{ClO}_2$ 浓度在0.3 mg/L时能将军团菌数量控制在100 CFU/L以下,当 $\text{ClO}_2$ 浓度达到0.6 mg/L时则能将其控制在25 CFU/L以下<sup>[8]</sup>。

然而,许多研究结果表明, $\text{ClO}_2$ 不存在 $\text{Cl}_2$ 那种瞬间灭活军团菌的效果。但因其消毒效果稳定,长期运行可使军团菌数量持续下降,所以比较适合于对军团菌的长期控制。 $\text{ClO}_2$ 控制军团菌优势归纳如下:①穿透性能好, $\text{ClO}_2$ 易溶于水,其溶解度为 $\text{Cl}_2$ 的5~8倍,其扩散性能优于 $\text{Cl}_2$ ,能有效穿透生物膜,消毒效果较为彻底;②消毒效果稳定,长期运行经验表明,系统并没有出现军团菌抗药性现象,亦没有出现军团菌数量回升现象;③适用环境广,在较大pH值、温度范围内均可保持一定的灭菌效果;④无有害副产物出现, $\text{ClO}_2$ 消毒副产物是亚氯酸盐或是氯酸盐,无毒且不致癌;⑤在消毒过程中对管道及设备的腐蚀程度低于 $\text{Cl}_2$ 消毒<sup>[14]</sup>。

$\text{ClO}_2$ 虽在建筑热水系统中对军团菌具有较好的控制效果,且不产生有毒、有害消毒副产物,但是用在循环冷却水中杀菌效果另当别论,因为冷却循环水中往往含有一定量的有机物,是否会削弱其消毒效果,在开放式环境中如何保持有效 $\text{ClO}_2$ 灭菌浓度等还有待进一步探究。

### 2.1.3 氯胺

氯胺消毒主要是利用一氯胺( $\text{NH}_2\text{Cl}$ )进行灭菌的,是目前较为广泛使用的一种饮用水消毒方式。研究表明,氯胺可从多个方面灭活细菌,作用于细菌细胞膜、影响细胞运输、亦可影响呼吸过程中底物脱氢等生物过程<sup>[15]</sup>。氯胺目前也广泛用于循环冷却

水、热水系统中对军团菌的控制。

在氯胺消毒过程中,氯胺可在较长时间内保持稳定的浓度,即其衰减慢、扩散性好,具有持续灭菌能力,效果比较稳定。2012年一项长达1年的氯胺消毒效果监测显示,在某建筑面积为8 500  $\text{m}^2$ 的医院热水系统中,某公司自动氯胺发生器可使加入热水系统的氯胺浓度维持在1.5~2.0 mg/L,管网末梢则可维持在0.15~0.5 mg/L;在开始消毒的第15天,热水中军团菌数量下降至原来的一半,运行1年后水体中军团菌数量持续下降至未检出水平<sup>[15]</sup>。

因军团菌和其他微生物存在共生关系,所以,消毒剂能否有效穿透生物膜将直接决定其消毒效果。尽管氯胺的氧化性低于 $\text{Cl}_2$ 和 $\text{ClO}_2$ ,但是氯胺对生物膜的穿透性优于 $\text{Cl}_2$ ,可在生物膜内部维持一个较高的灭菌浓度。有人对冷却塔中生物膜内军团菌消毒效果进行过对比实验,观察发现,相同投量的条件下 $\text{NH}_2\text{Cl}$ 对军团菌的杀灭效果优于 $\text{Cl}_2$ 。氯胺对军团菌的消毒效果优于 $\text{Cl}_2$ 在实际应用中也得到了印证,美国有人将加州某建筑原先的 $\text{Cl}_2$ 消毒热水系统更换为氯胺后,发现军团菌阳性率由之前的60%下降至4%<sup>[16]</sup>。这表明,氯胺抑制水体中军团菌效果优于 $\text{Cl}_2$ ,适合于对水体中军团菌的长期控制。此外,由于氯胺本身氧化性较弱,其对管道及设备腐蚀程度相对 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{ClO}_2$ 而言最小。

然而,氯胺消毒过程中对pH值有一定要求,pH值>7时水中主要以一氯胺(消毒有效成分)为主,在pH值<6和pH值<3的条件下氯胺则分别以二氯胺和三氯胺形式为主(二氯胺和三氯胺并无消毒效果,且具有异味)。因此,在实际运用过程中严格控制pH值才能保证氯胺的消毒效果。此外,在氯胺消毒系统中会出现氨氮,这会导致氯胺消毒管网系统中普遍出现硝化现象,而硝化产物——亚硝酸氮和硝酸氮可能在人胃中诱发可致癌的仲胺。对此,相关学者亦提出了解决方案,如采用折点加氯、根据环境条件实时优化 $\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ 比例等,以降低硝化风险<sup>[17]</sup>;若在循环冷却水系统中采用氯胺消毒则无需考虑这一问题。

### 2.1.4 铜、银离子

多领域研究成果已表明,铜、银离子消毒效果已被广泛认可<sup>[14]</sup>。通过铜、银离子控制军团菌亦效果较好,在很多国家都有运用实例。

铜、银离子灭活军团菌推荐浓度分别为0.2~

0.8 mg/L 和 0.01 ~ 0.08 mg/L,在该浓度范围可对军团菌进行较为彻底的消毒<sup>[14]</sup>。有人就铜、银离子对军团菌控制效果进行了监测研究,对象为某医院热水系统;在进行铜、银离子消毒前,该系统中军团菌检测阳性率为 70%,消毒时控制水中铜、银离子平均浓度分别为 0.394 mg/L 和 0.163 mg/L;水中军团菌阳性率在消毒开始后便快速下降,运行至 12 周后军团菌数量下降至未检出水平,且在持续运行过程中军团菌浓度始终保持在未检出的状态。为观察铜、银离子对军团菌的持续消毒效果,关闭电离设备并停止向水中注入铜、银离子,发现 8 周后军团菌阳性率逐步回升到 60%。铜、银离子控制军团菌的应用在美国匹兹堡某医院也有案例,将铜、银离子浓度分别控制在 0.4 mg/L 和 0.04 mg/L 下,4 个月内军团菌阳性率从 75% 降为零。

铜、银离子控制军团菌效果非常出色,主要优点为:①消毒效果稳定,在消毒设备运行期间,军团菌数量持续保持未检出状态;②抗衰减,因为是非气体消毒剂,不会出现挥发、逃逸的现象,比较容易维持在一个稳定的杀菌浓度范围之内,且具有一定持续性,可应对检修、故障等停车现象;③适用范围较广,在各种温度条件下铜、银离子均能保证有效的灭菌效果;④无有毒、有害消毒副产物,美国国家环保局(EPA)给出的饮用水中铜、银离子上限浓度分别为 1.3 mg/L 和 0.1 mg/L,而铜、银离子消毒浓度远低于这一标准;⑤装置简单,比较安全,不需要储药间。

当然,铜、银离子消毒液也存在一定的弊端,适用水体的碱度不能过高(pH 值 < 8.5)<sup>[14]</sup>。此外,在用于饮用水中军团菌控制时,若控制水体的前处理是采用氯系列消毒剂,在使用该技术消毒时水体中氯离子会消耗铜、银离子,致运行成本升高。若将铜、银离子用于空调循环冷却水中军团菌控制,这一问题可以得到有效解决。这主要体现在以下两方面:①冷却循环水总水量较少,氯离子所消耗的铜、银离子量十分有限;②因不是饮用水,对 pH 值过高问题可以向循环水中加酸来解决。

### 2.1.5 TiO<sub>2</sub>/光催化

TiO<sub>2</sub>/光催化消毒技术的核心是羟基磷灰石(HA)结合银(Ag)与 TiO<sub>2</sub> 形成的一种特殊陶瓷复合材料,主要有效成分为 TiO<sub>2</sub> 在光照条件下会被活化,并与水发生反应而生成自由基(羟基自由基和氧自由基)。氧化性极强但并不稳定的自由基会把

水中细菌体以及其他有机物分子无选择地氧化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sup>[18]</sup>。

有人采用日本某公司生产的陶瓷对家用雨水贮存罐中军团菌的去除效果进行了实验研究,向军团菌数量约为 1 × 10<sup>5</sup> CFU/mL 的 100 mL 水中加入不同质量陶瓷后定时取样检测军团菌数量;实验结果表明,0.1 g 以上质量的 TiO<sub>2</sub> 陶瓷均可有效降低军团菌浓度,且随着加入的陶瓷质量加大,军团菌数量降到未检出水平时所需时间便越短<sup>[18]</sup>。

上述实验条件下,TiO<sub>2</sub>/光催化效果虽然较好,但在实际运用中存在较大局限性。TiO<sub>2</sub>/光催化消毒中的有效成分是产生的自由基,而自由基在水中存在的时间极短(只有 10<sup>-9</sup> s);同时,两类自由基在水体中的扩散距离又十分有限,特别是当水中存在污染物的情况下扩散距离很难超过 1 μm。自由基存在时间和扩散距离决定了只有当细菌接触到光催化材料表面时才会被氧化灭活,而对于生长在生物膜内或与原生动物共生的军团菌,这种方法则很难奏效。由于光催化材料所形成的羟基自由基和氧自由基对有机物的氧化均不具选择性,所以对浊度较高、存在有机物的循环冷却水而言,水中有有机物便可能先于军团菌而消耗自由基,使军团菌逃过“劫难”。这种光催化材料无法贯穿于整个管网与设备系统,无法对管网末梢军团菌进行控制。此外,水的 pH 值也会对光催化消毒效果造成影响,pH 变化会改变光催化材料表面电性,进而影响其吸附性能而使消毒效果发生变化。

## 2.2 物理消毒技术

物理消毒技术借助通过物理作用将细菌灭活,常见的物理消毒技术有紫外线、热冲击、超滤膜等。

### 2.2.1 紫外线

紫外线(UV)应用于水体消毒时,水力停留时间(HRT)、浊度、生物膜存在等因素会影响其消毒效果。文献资料表明,单独使用 UV 控制军团菌的效果较差。Arago 等<sup>[19]</sup>对与阿米巴(*Acanthamoeba*,原生动物)共生的军团菌消毒中发现,UV 对这种和其他微生物共生的军团菌并没有什么消毒效果,即使延长 HRT 达 72 h 也没有表现出应有的消毒迹象。UV 消毒只是控制军团菌的一种辅助手段,一般需要与其他消毒方法配合使用,常见的有氯化/UV、超滤/UV 等组合方式。

利用氯化/UV 组合方式对某温泉配水管网中

军团菌控制实验表明,当消毒前水中军团菌数量在 $10^3 \sim 10^4$  CFU/L时,组合消毒(紫外线波长为254 nm、功率为40 mJ/cm<sup>2</sup>;余氯保持50 mg/L)时,军团菌数量迅速下降,直至未检出水平;在随后9个月运行中军团菌也一直处于未检出状态;当UV消毒停止后,军团菌数量在1个月内又回升至消毒前的水平。实验结果表明,氯化/UV组合方式对军团菌消毒效果虽好,但是也存在一定局限性;在本例实验中氯化/UV对象是地下温泉水,水质好、浊度较低,HClO和UV均能较好穿透水体;对冷却循环水等其他水质条件较差且长有生物膜的水体则运行效果可能就另当别论了。

UV消毒效果较差主要归结为:①UV穿透能力不强,存在大量军团菌的水中一般也有生物膜的存在,UV对生物膜内军团菌杀灭效果十分有限,且水的浊度也会影响消毒效果;②难以保证足够的HRT,UV消毒效果需要一定的HRT予以保证,而在持续流动的建筑热水系统或循环冷却水系统中无法保证足够的HRT。

### 2.2.2 其他物理消毒技术

物理消毒技术中还包括热冲击、膜过滤等,在高于70℃的温度条件下军团菌会被立即灭活,所以,利用高温对军团菌进行消毒是完全可行的。然而,高温消毒耗能巨大,对循环冷却水来说显然不是一种首选消毒方式。

超滤膜可对军团菌有效分离,膜过滤不仅可去除水中细菌等病原微生物,还能去除大分子有机物。然而,膜过滤需要压力,过高能耗带来的运行成本问题不可小觑。

除上述化学与物理消毒方法外,还有臭氧(O<sub>3</sub>)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)<sup>[9]</sup>等化学消毒技术。但这些消毒方法因能耗、成本、环境使用性等问题而未能成为军团菌控制的主流消毒技术,本文不再赘述。

## 3 军团菌预防技术展望

以上化学与物理方法控制军团菌的实质是当军团菌出现后的杀灭方法,即“防患于既成之后”的技术。如果能从军团菌生理、生化特征及其所需的环境条件角度入手,审视其滋生限制的控制因子,则有可能出现“防患于未然”的军团菌预防技术。在此方面,需要对上述有关军团菌的生理、生化特征及其生长环境条件逐一分析,首先从理论上及可行性方面予以阐述,以产生新的军团菌预防技术,彻底改变

军团菌定植于人工环境的被动去除思路。

### 3.1 气、液分离

在中央空调系统中,目前使用最为广泛的的就是如图1(a)所示的开放式冷却塔<sup>[9]</sup>。这种开放式冷却塔依靠水与空气充分接触而实现热交换。但是,如上所述,空气中的尘埃、有机物、藻类、细菌孢子等也会随空气进入循环冷却水中,形成军团菌滋生的环境条件<sup>[9]</sup>。着眼于“防患于未然”,可采用如图1(b)所示的封闭式冷却塔(Closed-circuit towers, CCT),冷却水与空气并不接触,只用少量水以喷淋方式帮助空气从冷却盘管中交换出管内冷却水的热,这在很大程度上可以避免军团菌等微生物滋生。

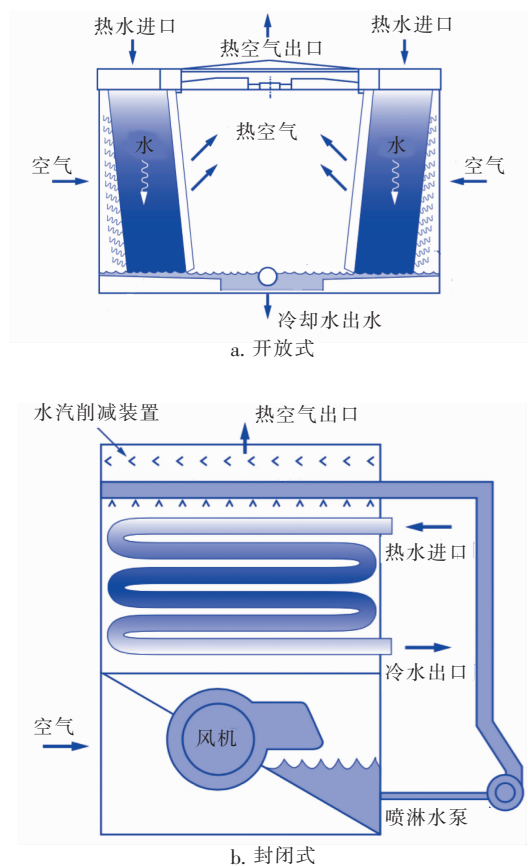


图1 冷却塔结构

Fig.1 Structures of cooling towers

### 3.2 去除循环冷却水中的硫酸盐

胱氨酸与半胱氨酸是军团菌生长所必需的两类含硫氨基酸,由藻类等微生物的硫酸盐同化作用而形成<sup>[10]</sup>。可见,如果能从源头上杜绝含硫氨基酸的形成,便可能有效抑制军团菌的生长。一般而言,循环冷却水对硫酸盐(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)浓度要求不高,如,2008年建设部发布的《工业循环冷却水处理设计规范》



(GB 50050—2007)中对 $\text{SO}_4^{2-}$ 控制浓度仅为2 500 mg/L。这就为军团菌在循环冷却水中滋生埋下了巨大隐患!如果能从循环冷却水中将 $\text{SO}_4^{2-}$ 去除殆尽或降低至其限制微生物硫酸盐同化作用之阈值,那军团菌预防则可能行之有效。

从循环冷却水中去除硫酸盐最省事的办法是使用去离子水,但这无疑会增加运行成本,需要经济比较。亦可以通过向冷却水中加入钡盐、石灰等方法去除水中硫酸盐,运行成本显然低于去离子水,但其抑制微生物硫酸盐同化作用的效果还有待验证。

### 3.3 去除循环冷却水中有机物

军团菌属异养菌,需要有机物底物(COD)存在。循环冷却水原水一般为自来水,水中COD浓度应该很低,至少应满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求,即 $\text{COD}_{\text{Mn}} \leq 5 \text{ mg/L}$ 。如上所述,一方面外源有机物随气、水热交换可以持续不断地进入循环冷却水;另一方面,藻类繁殖亦可形成有机质。因此,从抑制有机物进入循环冷却水入手从根本上遏制军团菌滋生不失一种“防患于未然”的技术手段。微量COD消除可以采取包括臭氧( $\text{O}_3$ )在内的高级氧化技术(AOPs)<sup>[20]</sup>,利用通过各种手段产生的自由基(羟基自由基或氧自由基)之极强氧化特性氧化水中COD。其实,上述 $\text{TiO}_2$ /光催化技术就是一种典型的AOPs,虽对军团菌的去除效果欠佳,但针对水中COD的氧化去除效果会很好。例如,水循环几次便进行一次高级氧化,可实现对水中COD的有效消除。

就系统内因藻类繁殖而产生的有机质问题,需要将冷却塔置于避光环境之中,例如,将其置于通风但不透光的暗室环境之下。

### 3.4 其他预防性措施

军团菌的生理、生化特征表明,其正常生长的pH值为6.5~7.5。因此,过酸(pH值<6.5)、过碱(pH值>7.5)便可以有效抑制军团菌在水中滋生。然而,过酸、过碱会腐蚀管道及设备。这就需要对循环冷却水管道系统以及冷却塔材料予以更换,如采用抗腐蚀性能较好的PVC管材、玻璃钢材料的冷却塔等。

## 4 结语

目前我国城市楼宇大都采用中央空调系统,军团菌在循环冷却水中滋生并传播的潜在风险日益增大。虽然国家还没有正式出台有关控制中央空调系

统以及热水系统军团菌出现的行业标准,但是,一些公共建筑中央空调系统频繁检出军团菌的案例已是不争的事实。对此,应及早行动,首先了解军团菌的危害、生理/生化特征以及滋生所需要的环境因素。其次,对现有国内军团菌控制技术需要全面分析和系统总结。在此基础上,提出“防患于未然”的军团菌预防策略,并指出相应技术研发方向。

军团菌有着独特的生存环境,而中温的循环冷却水恰恰成为军团菌滋生的最适宜环境温度。常规军团菌控制技术无外乎是“除患于既成之后”的化学与物理灭菌技术,且都存在各自的优势和适用范围。 $\text{Cl}_2$ 消毒在短期内虽有立竿见影的瞬间消毒效果,但其穿透能力较差,持续使用还会出现军团菌的抗氯性。 $\text{ClO}_2$ 和氯胺对军团菌的长期控制效果好于 $\text{Cl}_2$ ,但消毒效果需随时间的延长方能完全展现。铜、银离子消毒不会出现逃逸现象,其衰减速率较慢,可较好地维持一定的杀菌浓度,具有较好的长期消毒效果。 $\text{TiO}_2$ /光催化消毒中所产生的自由基存在时间短且扩散距离有限,使其消毒效果受到较大影响。UV消毒不产生副产物,但对生物膜穿透能力有限,很难单独完成对军团菌的有效控制,常作为一种辅助消毒手段。高温及膜过滤固然可以有效杀灭或隔离军团菌,但所需能耗又限制了这些技术的广泛应用。

传统军团菌控制技术几乎全是被动地去灭除,各种方法虽然不算复杂,但具体应用则存在各自的适用范围和条件,需要审时度势选择不同技术综合解决方为有效。因此,从应用角度迫切需要从源头上遏制军团菌滋生的“防患于未然”技术策略。在此方面,冷却塔气/液分离、去除循环冷却水中的硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )与有机物(COD)、水质微酸化/碱化并更换防腐管道/设备材料可能最具研发、应用潜力。

### 参考文献:

- [1] Barna Z, Kadar M, Kalman E, et al. Prevalence of Legionella in premise plumbing in Hungary[J]. Water Res, 2016, (90): 71–78.
- [2] Roat M C, Caporali M G, Bella A, et al. Legionnaires' disease in Italy: results of the epidemiological surveillance from 2000 to 2011[EB/OL]. <http://www.euro-surveillance.org/ViewArticle.aspx?ArticleID=20497>, 2013–07–03.
- [3] 沈凡,贾予平,张屹,等. 北京市公共建筑集中空调冷

- 却塔军团菌污染水平调查[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(12): 2013–2015.
- [4] 张健, 刘俊华, 邓志爱, 等. 2012–2014年广州市公共场所集中空调通风系统微生物污染状况调查[J]. 实用预防医学, 2016, 23(1): 43–45.
- [5] Nguyen T M, Ille D, Jarraud S, *et al.* A community-wide outbreak of Legionnaires disease linked to industrial cooling towers—How far can contaminated aerosols spread? [J]. J Infect Dis, 2006, 193(1): 102–111.
- [6] Völker S, Kistemann T. Field testing hot water temperature reduction as an energy-saving measure—does the Legionella presence change in a clinic's plumbing system? [J]. Environ Technol, 2016, 36(16): 2138–2147.
- [7] Maisa A, Brockmann A, Renken F, *et al.* Epidemiological investigation and case-control study: a Legionnaires' disease outbreak associated with cooling towers in Warstein, Germany, August–September 2013 [J]. Euro Surveill, 2015, doi:10.2807/1560–7917.ES.2015.20.46.30064.
- [8] 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.
- [9] World Health Organization. Legionella and the Prevention of Legionellosis [M]. Switzerland: WHO, 2007.
- [10] 宋超, 郑春丽, 王建英. 微生物硫酸盐的同化途径及其与重金属抗性的关系[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6368–6370.
- [11] 贾予平, 沈凡, 张屹, 等. 集中空调冷却塔运行管理中军团菌繁殖的主要影响因素初探[J]. 环境与健康, 2015, 32(11): 983–986.
- [12] Cervero-Aragó S, Rodríguez-Martínez S, Puertas-Bennasar A, *et al.* Effect of common drinking water disinfectants, chlorine and heat, on free Legionella and amoebae-associated Legionella [J]. Plos One, 2015, 10(8): 1–18.
- [13] Caducci A, Verani M, Battistini R. Legionella in industrial cooling towers: monitoring and control strategies [J]. Lett Appl Microbiol, 2010, 50(1): 24–29.
- [14] Lin Y E, Stout J E, Yu V L. Controlling Legionella in hospital drinking water: An evidence-based review of disinfection methods [J]. Infect Cont Hosp Ep, 2011, 32(2): 166–173.
- [15] Mancini B, Scurti M, Dormi A, *et al.* Effect of monochloramine treatment on colonization of a hospital water distribution system by *Legionella* spp.: A 1 year experience study [J]. Environ Sci Technol, 2015, 49(7): 4551–4558.
- [16] Flannery B, Gelling L B, Vugia D J, *et al.* Reducing Legionella colonization in water systems with monochloramine [J]. Emerg Infect Dis, 2006, 12(4): 588–596.
- [17] 张永吉, 周玲玲, 李伟英. 氯胺消毒给水管网中的硝化作用及其控制[J]. 中国给水排水, 2008, 24(2): 6–9.
- [18] Oana K, Kobayashi M, Dai Y, *et al.* Applicability assessment of ceramic microbeads coated with hydroxyapatite-binding silver/titanium dioxide ceramic composite earth-plus™ to the eradication of *Legionella* in rainwater storage tanks for household use [J]. Int J Nanomed, 2014, 10: 4971–4979.
- [19] Arago S C, Sommer R, Araujo R M. Effect of UV irradiation (253.7 nm) on free Legionella and Legionella associated with its amoebae hosts [J]. Water Res, 2014, 67: 299–309.
- [20] Rueda-Márquez J J, Levchuk I, Salcedo I, *et al.* Post-treatment of refinery wastewater effluent using a combination of AOPs ( $H_2O_2$  photolysis and catalytic wet peroxide oxidation) for possible water reuse. Comparison of low and medium pressure lamp performance [J]. Water Res, 2016, 91: 86–96.



作者简介: 郝晓地(1960–), 男, 山西柳林人, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术。现为国际水协期刊《Water Research》区域主编(Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2016–09–02