

述评与讨论(战“疫”专栏)

## 城镇污水系统中病毒特性和规律相关研究分析

王连杰<sup>1</sup>, 李金河<sup>1</sup>, 郑兴灿<sup>2</sup>, 尚巍<sup>2</sup>, 刘智晓<sup>3</sup>, 姜威<sup>1</sup>, 李殿海<sup>1</sup>,  
张麟<sup>1</sup>

(1. 天津创业环保集团股份有限公司, 天津 300381; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 3. 北京首创股份有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 根据新型冠状病毒的生物学特征,研究了病毒在水体中的赋存状态,分析总结了国内外污水处理中病毒的相关研究,认为污水处理厂只要保持正常稳定运行,就能够有效降低污水中病毒的浓度,可阻断肠道病毒和呼吸道病毒通过污水处理厂出水进行传播。对比分析了污水处理消毒过程中的臭氧消毒、氯消毒、紫外线消毒工艺,现有研究表明再生水处理过程的多级屏障作用可以有效去除病毒,结合工艺控制可以保障出水安全。此外,指出了污水处理工艺中可能产生气溶胶风险的位置,给出了相应的防护建议。这对新冠肺炎期间指导城镇污水处理厂安全稳定运行,防止新型冠状病毒进一步传播扩散有着重要参考意义。

**关键词:** 新型冠状病毒; 病毒; 污水处理; 去除病毒

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)06-0014-08

## Review and Analysis on the Characteristics and Rules of Virus in Urban Wastewater Treatment System

WANG Lian-jie<sup>1</sup>, LI Jin-he<sup>1</sup>, ZHENG Xing-can<sup>2</sup>, SHANG Wei<sup>2</sup>, LIU Zhi-xiao<sup>3</sup>,  
JIANG Wei<sup>1</sup>, LI Dian-hai<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>

(1. Tianjin Capital Environmental Protection Group Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China;  
3. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on the biological characteristics of the novel coronavirus (SARS-CoV-2), the state of the virus in the water body was studied, and the related research of the virus in the wastewater treatment plant at home and abroad was summarized. The results indicated that the concentration of virus in the wastewater can be effectively reduced as long as the urban wastewater treatment facilities operate properly, and the transmission of enterovirus and respiratory viruses through effluent of wastewater treatment plant could be blocked. The disinfection effects of several disinfection methods in wastewater treatment such as ozone, chlorine and ultraviolet radiation were analyzed. The research showed the viruses in effluent of reclaimed water plant will be removed by the multistage treatment protection, and the combined process control could ensure the safety of the effluent. In addition, the possible location of

aerosol risk in wastewater treatment process was pointed out, and corresponding protection suggestions were given. It has important reference significance for guiding the operation of urban wastewater treatment plants and preventing the further spread of novel coronavirus.

**Key words:** SARS-CoV-2; virus; wastewater treatment; virus removal

2019年12月,武汉暴发了一种以肺炎为特征的新型呼吸系统疾病,经分离鉴定,确认病原体为一种新型冠状病毒,疫情发展迅速。2020年2月1日我国研究人员在新冠肺炎确诊患者的粪便中检测出新型冠状病毒核酸阳性,2月13日中国疾控中心在患者排泄物中检测到了活体病毒。这一重大发现引起了污水处理行业的极大关注,生态环境部紧急发布了《关于做好新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗污水和城镇污水监管工作的通知》,明确要求各地必须加强医疗污水和城镇污水的监管工作,避免新型冠状病毒通过污水传播扩散。

## 1 病毒在污水中的赋存状态

### 1.1 污水中的病毒

根据流行病学研究,人和动物的排泄物中往往含有大量的病毒颗粒,这些病毒颗粒可能通过污水排放、化粪池系统渗滤液和农业区径流进入水环境。国内外科研工作者针对污水处理过程中致病菌的研究较多,对病毒的研究相对较少,而病毒的发生、存活和衰变与致病菌有很大不同<sup>[1]</sup>。目前在生活污水中已经发现了150多种肠道病毒<sup>[2]</sup>,当人类通过受污染的水或食物接触到这些病毒时,理论上就存在一定的被感染风险。绝大多数关于城市水循环中病毒赋存状态的研究主要集中在肠道病毒上,而包膜病毒在结构上不同于肠病毒,因此一般认为包膜病毒在水中表现出的特性也有所不同。近年来,污水中的病毒宏基因组显示了人类病毒的多样性,这其中就包括一些包膜病毒<sup>[3]</sup>。

目前已知人类可以感染的冠状病毒粒子主要有7种,分别是HCoV-229E、HCoV-OC43、HCoV-NL63、HCoV-KU1、SARS-CoV、MERS-CoV和新型冠状病毒SARS-CoV-2,这些病毒在人体排泄物中都被检测到,综合国内外研究结论,可以认为人类冠状病毒不太可能对城市水循环卫生系统构成重大威胁<sup>[4]</sup>。

病毒感染人类需要同时具备4个必要条件:①病毒的存在;②一定量的病毒浓度;③易感染人员接触病毒;④病毒与易感染体表面受体结合。目前尚

未见到污水厂进水中检测出新冠病毒的报道,排泄物存在病毒不能简单推断为市政综合污水一定会感染人,污水的净化处理仍然是人类控制疫情传播不可替代的有效手段之一,但是从业人员的暴露风险确实增大。

关于SARS-CoV-2在污水系统中生命周期特征、规律的研究还很有限,但作为病毒的一种,其在污水中表现出的特征应与其他病毒,尤其是冠状病毒有一定的相似性。因此,综合分析已有研究成果对于指导本次疫情期间污水厂的安全稳定运行,防止新型冠状病毒传播扩散有着重要参考价值。

### 1.2 污水中的病毒浓度

污水中的病毒浓度取决于受感染人数和受感染个人传播病毒的速度。大多数污水中病毒数据是关于肠道病毒和qPCR法测量的,污水厂进水中基因组浓度高达 $10^8 \sim 10^9$  拷贝/L,受限于细胞培养技术和病毒提取方法,污水中病毒粒子数量的报道很少,只能由人体粪便或尿液样本中的病毒量大致推测。比如,Norovirus病毒在人类粪便样本中的基因组浓度可以达到 $10^{10}$  拷贝/L<sup>[5-6]</sup>,而在非疫情期间,该数值为 $10^9$  拷贝/L<sup>[7]</sup>。JCPyV病毒和BKPyV病毒在人类尿液中的基因组浓度为 $10^{10}$  拷贝/L,在污水中的浓度为 $10^8$  拷贝/L<sup>[8]</sup>。SARS病毒在患者腹泻排泄物中的基因组浓度为 $10^{10}$  拷贝/L,而患者尿液中的基因组浓度为 $2.5 \times 10^7$  拷贝/L<sup>[9]</sup>。综合分析已有研究信息,疫情期间人类排泄物中病毒浓度可能提高1个数量级,而污水中病毒浓度比排泄物中约低1~2个数量级。

### 1.3 病毒在污水中的存活时间

病毒离开宿主细胞后能够存活一定时间,具体存活时间的长短跟病毒种类和环境条件有关,包括温度、有机物和微生物,其中温度是病毒存活的关键影响因素。病毒在污水中一般会吸附在泥砂、黏土、矿物等悬浮固体表面,这些物质可以为病毒提供保护,使病毒具有一定的逆境抗性从而延长其存活时间<sup>[10]</sup>。如果这些固体沉淀下来,也可以成为去除病毒的一种机制<sup>[11]</sup>。需要注意的是,当病毒颗粒以聚

集状态存在时,可以提高其在不利环境因素下的存活几率,这也同时提醒污水厂要高度重视污水处理工程中的污泥无害化处理环节。

病毒在生物体外表现出一系列对环境因素的敏感性,其中 T90 值(即病毒在水环境中达到 90% 失活的时间)从几分钟到几年不等。污水管网水力停留时间一般少于半天,因此污水处理厂进水中有可能存在病毒。通常认为带有脂膜的病毒在水环境中很容易丧失感染性,但并不是所有的包膜病毒都能迅速失去传染性。病毒失活率受温度和基质影响较大,温度和盐度越高,病毒的失活率也越高<sup>[12-13]</sup>。在两项有关水中人类冠状病毒的研究中发现,温度对病毒的活性有显著影响,室温条件下病毒样本的失活率比 4 ℃ 条件下高出一个数量级<sup>[14]</sup>。研究表明,病毒存活率随着温度的升高而降低,这主要是由病毒外壳蛋白变性和环境中降解蛋白质的胞外酶活性增加引起的<sup>[10]</sup>。

污水的成分和处理过程对病毒的生存影响较大,经过灭菌的污水中病毒的失活速率大于未灭菌的污水,污水中悬浮物和有机物提高了病毒在水环境中的生存能力。但是污水中的某些物质也能导致病毒加速失活,如在巴氏消毒污水中冠状病毒的

T90 值远低于蒸馏水培养基<sup>[12]</sup>。

冠状病毒在未经过滤的初级污水中的存活时间比在过滤的初级污水中更长<sup>[14]</sup>。一项关于冠状病毒在水中存活时间的研究表明,TGEV 和 MHV 两种冠状病毒在水(试剂纯)、地表水和巴氏杀菌的污水中可以长期存活,但传染性都很低,而且温度越高病毒的活性越低<sup>[11]</sup>。另外,有研究表明冠状病毒在水环境中的传播要比肠道病毒少,因为冠状病毒在废水中会更快地失活,病毒粒子可在 2 ~ 3 天内减少 99.9%,这与 SARS-CoV 存活数据相当<sup>[14-15]</sup>。可见,污水组分对病毒失活的影响是复杂的,并且不同的病毒和环境样本之间的关系存在显著差异,但污水处理过程对病毒去除作用无疑是正向的。

## 2 污水处理对病毒的去除作用

一旦病毒从宿主细胞中释放出来,它们就会暴露在各种物理、化学和生物等环境因素中,如同生物大分子一样存在,在这些环境因素中,物理、化学和生物因素均起到了重要的作用,随着市政污水处理厂处理流程的推进,病毒数量呈显著的降低趋势,最终出水中病毒的分布呈现对数正态关系<sup>[16]</sup>。表 1 列举了一些市政污水处理系统的进水和出水中病毒的分布情况<sup>[17-20]</sup>。

表 1 病毒在市政污水处理系统中的分布

Tab. 1 Distribution of viruses in municipal sewage treatment system

拷贝 · L<sup>-1</sup>

病毒种类	进水基因组浓度	深度处理出水基因组浓度	MBR 出水基因组浓度
Enteroviruses	$2.2 \times 10^3 \sim 7.9 \times 10^3$	6.8 ~ 250	1.5 ~ 53
Adenoviruses	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$		$10^3 \sim 10^4$
Rotavirus	$1 \times 10^6 \sim 8.9 \times 10^6$	$9.3 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$	1.9 ~ 49
Noroviruses	$5.6 \times 10^2 \sim 8.3 \times 10^3$	6.9 ~ 250	
Astroviruses	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8$	$10^5$	

### 2.1 污水常规处理

研究中常用“对数去除率”(简称“去除率”)评价病毒去除效果,“去除率”指的是处理前后浓度比值的对数值。研究表明,常规活性污泥法处理市政污水过程中病毒的去除率为 0.65 lg ~ 2.85 lg<sup>[21]</sup>。一些病毒经过超细格栅就可以实现 0.1 lg ~ 1.0 lg 的去除率,经过生物段处理后病毒浓度可进一步降低 1.4 lg ~ 1.7 lg<sup>[17]</sup>。有研究表明,砂滤通常可以去除 10% ~ 98% 的病毒,如果在砂滤之前加入混凝工艺,病毒的去除率可提高到 3 lg<sup>[22]</sup>。

活性污泥可以去除很大一部分病毒,这个过程主要发生在生物池和二沉池中,生物池中的活性污泥有较大的比表面积,生物池中的病毒粒子可以吸

附活性污泥的表面,最后和活性污泥一起进入二沉池,通过固液分离富集到二沉池底部污泥中,吸附在剩余污泥上的病毒逐渐失去活性。不同规模和处理工艺的污水处理过程可使感染性肠道病毒减少 0 ~ 2 lg,使感染性腺病毒减少 2 lg ~ 3 lg。一项针对 5 座市政污水处理厂的调查发现,污水处理厂从进水到消毒后的病毒浓度降低幅度可以达到 1.9 lg ~ 5.0 lg<sup>[23]</sup>。另外也有研究表明,较长水力停留时间和较低 MLSS 可以提高病毒的去除效果<sup>[24]</sup>。由于活性污泥的吸附作用也是物理过程,对病毒没有杀灭作用,后续的消毒工艺对于减少出水中病毒的数量至关重要。

MBR 法是活性污泥法和膜过滤的集成。MBR



法去除病毒的原理可归因于四种机制,即病毒附着在混合固体颗粒上被拦截、病毒粒子被膜截留、病毒粒子被膜上附着层截留以及活性污泥细菌对病毒的捕食和酶分解失活<sup>[25]</sup>。仅从安全和消毒效果角度看 MBR 工艺优势明显,经过膜截留后降低了水的浊度,可以大幅度提升消毒效果,降低了出水暴露风险。据报道,单一 MBR 法(出水未做进一步消毒处理)去除污水中的病毒效率在 3.0 lg ~ 6.0 lg 之间<sup>[1]</sup>。MBR 工艺的运行参数也会影响病毒的去除率。有报道表明,较长的水力停留时间和较短的污泥龄可以提高病毒的去除效果<sup>[26]</sup>,分析认为可能与污泥吸附病毒并快速排除有关。

不同处理工艺生物池混合液中病毒含量以及病毒在液相和固相中的分布未见相关研究,但是,由于存在剩余污泥的排放过程,MBR 工艺不会无限浓缩富集病毒,水处理系统很快就可以达到稳态。另外,从活性污泥的吸附作用以及病毒在污泥中宜于存活来看,固相浓度理论上应该高于液相,由于相同进水条件下不同工艺生物池污泥总量基本相同,在完全混合的状态下,只要控制好气体和污泥处理环节,不同工艺病毒暴露风险应该差别不大。尽管如此,即使 MBR 工艺滤液中仍然可以检测到病毒的存在<sup>[1]</sup>,为了保证出水病毒的去除率,疫情期间需要高度重视污水消毒工作,建议采用紫外消毒的污水处理厂补充次氯酸钠消毒。

## 2.2 消毒处理

### 2.2.1 臭氧消毒

与氯相比,臭氧消毒效率更高,但是需要更高的运行成本。杀灭病毒时臭氧初始剂量一般为 3 ~ 10 mg/L,接触时间约为 10 min。有研究表明,臭氧和紫外线协同杀灭 SARS-CoV 的速度比有效氯快数百倍,而且可杀死对氯消毒剂有高度抵抗力的微生物<sup>[27]</sup>。水中臭氧含量为 27.73 mg/L,作用 4 min 可完全灭活 SARS 病毒;臭氧含量为 17.82 mg/L 作用 4 min 和 4.86 mg/L 作用 10 min,均可使 SARS 病毒的灭活率达 100%<sup>[28]</sup>。这些参数可以为使用臭氧消毒的污水厂提供参考。

### 2.2.2 氯消毒

化学消毒剂如氯、二氧化氯、次氯酸钠和氯胺对病毒蛋白质外壳的损伤较大,足够高剂量的化学消毒剂还可以破坏病毒的核酸。王新为等<sup>[29]</sup>考察了次氯酸钠和二氧化氯对医院污水的消毒效果,结果

发现,SARS-CoV 在污水中对含氯消毒剂的抵抗力比大肠杆菌低,当污水中游离余氯量保持在 0.5 mg/L(以氯计)或 2.19 mg/L(以二氧化氯计)以上时可以保证完全灭活污水中的 SARS-CoV。

一般市政污水深度处理消毒氯的使用剂量为 5 ~ 20 mg/L,接触时间为 30 ~ 60 min。当氯的投加量 > 10 mg/L、接触时间为 60 min 时可以杀灭水体中的全部轮状病毒<sup>[8]</sup>。当氯剂量分别为 16 和 8 mg/L、接触时间为 30 min 时,可分别杀灭污水中 1.2 lg 和 0.35 lg 的肠病毒。增加氯剂量或延长接触时间,即提高 CT 值可以有效提高病毒的杀灭效果。二氧化氯、次氯酸钠和氯胺也是替代的消毒剂,高浓度的次氯酸钠溶液可用于去除设备和管道上附着的污泥<sup>[30]</sup>。含有效氯为 200、400、600 mg/L 的次氯酸钠溶液分别作用 20、20、10 min 对腺病毒灭活效果 > 4 lg,600 mg/L 的次氯酸钠作用 20 min 灭活效果达到 100%<sup>[31]</sup>。也有研究表明二氧化氯去除病毒的效果比氯更好,而氯胺杀灭病毒的效果较差。需要指出的是用含氯消毒剂消毒时各种水中氮形态和有机物的含量对消毒效果有比较大的影响<sup>[32]</sup>。

### 2.2.3 紫外线消毒

紫外线主要破坏病毒的核酸,也会对病毒的蛋白质外壳产生一定破坏。徐丽梅<sup>[33]</sup>研究了紫外线对 Poliovirus 病毒的杀灭作用,低剂量的紫外线能透过病毒蛋白质外壳导致病毒 RNA 的损伤。波长为 254 nm 的紫外线照射 5 min 时,病毒数量明显减少;254 nm 的紫外线照射 30 min 时,感染细胞内检测不到病毒粒子。波长为 254 nm 的紫外线比 365 nm 的紫外线照射灭活腺病毒气溶胶的效果更显著,254 nm 紫外线和 65 °C 高温对一些病毒有不同程度的灭活作用,紫外线照射可作为室内空间整体消毒的一种方法。不同病毒需要的紫外线消毒剂量见表 2。

表 2 不同病毒需要的紫外线消毒剂量

Tab. 2 Ultraviolet rays irradiation dose for different viruses

mJ · cm<sup>-2</sup>

病毒种类	紫外线剂量
Coxsackievirus	20 ~ 27
Hepatitis A virus	12 ~ 20
Echovirus	16 ~ 25
Poliovirus	14 ~ 24
Adenovirus	125 ~ 167
Calicivirus	16 ~ 31
Rotavirus	23 ~ 44

Ansaldi 等<sup>[34]</sup>研究了紫外线对 SARS-CoV、甲型流感病毒与呼吸道合胞病毒的灭活效果。结果表明,在 40 mW/cm<sup>2</sup> 的紫外线下,分别作用 2 min 即可破坏病毒的核酸,使病毒失去全部活性。

### 2.3 膜过滤

膜过滤工艺处理可以进一步减少水中病毒的数量,膜过滤法去除病毒是一个单纯的物理过程,即利用膜孔隙通道截留水中的病毒粒子。由于大多数病毒颗粒(10~300 nm)通常比微滤膜的孔径(100~1 000 nm)小,因此过滤起始阶段病毒去除率较低,微滤膜的去除效果不到 1 lg,但随着膜上污染物的积累过滤效率有所增加,即使膜上污染物在水力反冲洗时微滤膜仍能保持较高的病毒去除率。另外,根据报道混凝—微滤系统可以减少 4 lg 的病毒,长期过滤过程中膜的不可逆污染会改善混凝—微滤系统中病毒的去除,即使没有混凝预处理,膜也可以有效过滤病毒颗粒<sup>[35]</sup>。

超滤膜孔径约为 2~50 nm,能彻底滤除水中的细菌、铁锈、胶体等有害物质,而且可以物理消除大多数病毒,并且随着膜表面形成滤饼层的加厚可以进一步提高病毒的去除效率<sup>[36]</sup>。此外,通过调整跨膜压差(TMP)也可以实现更高的病毒去除率。带微量负电荷的超滤膜比带中性电荷的超滤膜更有利于病毒的清除<sup>[36]</sup>。

反渗透膜可以看作一种离子级的过滤器,可以过滤掉几乎所有冠状病毒和其他绝大多数病毒,这一点已经在 2003 年 SARS 疫情期间国内再生水厂运行结果中得到充分证明。各种市政污水深度处理工艺对病毒的去除能力不同,总结见表 3。

表 3 市政污水深度处理对病毒的去除效果

Tab.3 Effects of advanced treatment on viruses in wastewater

处理工艺	去除效果/lg	备注
絮凝	1~2.86	投加铝盐、铁盐
微滤	0.2~5.1	混凝—微滤处理效果提升
超滤	>3.0	再生水主流工艺
纳滤	>5.4	
反渗透	>6.5	

但是,需要注意的是膜组件的断丝率是影响病毒去除率的关键因素,疫情期间应切实加强膜完整性检测。

### 2.4 市政污水处理厂出水中的病毒

从公共健康角度来看,可以认为污水厂进、出水

中可能带有病毒,所以上述病毒感染人的四个条件中满足了第一个条件,但这只是说明污水处理厂出水有病毒存在的可能性。美国进行的大量与污水回用有关的流行病学研究表明,再生水利用是安全的。2003 年 SARS 暴发高峰期间,天津市卫生防病中心对市内各污水处理厂进、出水进行了检测,也均未发现 SARS 病毒。原因可能是污水处理厂正常运行时出水中病毒浓度和活性已经很低,达不到病毒的检出条件,少数病毒随着污水处理厂出水排放到地表水中,环境中的化学物质氧化、阳光中的紫外线等也会迅速使病毒失去活性<sup>[4]</sup>。

综合以上研究结论可知,现有城镇污水处理厂只要保持正常稳定运行,即可有效去除、杀灭污水中的 SARS-CoV-2,因此污水处理厂不会成为新冠肺炎的传播途径。

### 2.5 污泥处理对病毒的去除作用

污水处理过程中单纯的沉淀和过滤过程仅是将病毒转移和富集到污泥中,因此,污泥中病毒的灭活也是不可忽视的,在污泥处置时要充分考虑到相关病毒学安全性问题。而污泥的稳定化和无害化处理如脱水、堆肥、热处理和中温厌氧消化均可有效杀灭病毒,其中热处理是迄今为止病毒失活效率最高的污泥处置方法。需要指出的是,活性污泥吸附的病毒仍然具有感染风险,处置过程中操作人员需要采取更为有效的防护手段。另外,已经有证据表明,剩余污泥中的水分在处置过程中有可能形成气溶胶,由于气溶胶中的病毒附着于其他物质而处于结合状态,可免受生物学(酶作用)和理化(温度、pH 值和紫外线等)因素的灭活作用,从而可以长期保持其感染性,这些气溶胶如果不加处理则可能产生一定风险<sup>[37]</sup>。

### 2.6 污水处理过程中的气溶胶

气溶胶是指悬浮在气体介质中由固态或液态颗粒组成的气态分散系统,在自然环境中普遍存在,气溶胶颗粒粒径一般在 1~5 μm。污水中气泡在外力作用下从污水中快速逸出产生爆裂,散落出许多大量细微固液颗粒即形成气溶胶,这个过程将会同时携带污水中的微生物,变成生物气溶胶。病毒比细菌更容易被气溶胶携带,有研究发现包膜病毒比非包膜病毒更容易附着在颗粒上。

目前,对污水处理中气溶胶携带病毒的研究较少,且主要针对肠道病毒的研究。研究表明,水力跌

落大、湍动剧烈的污水处理单元形成的气溶胶就越多。污水提升、格栅、除渣、曝气沉砂、污泥浓缩池和污泥脱水机房等预处理过程形成的气溶胶浓度高于其他处理区域。不同处理工艺气溶胶风险的影响因素较多,传统市政污水处理工艺池体表面积大,工艺相对复杂,潜在产生气溶胶的点位相对较多;MBR工艺虽然曝气量大,但由于工艺相对较易封闭,在控制气溶胶风险上有一定优势<sup>[38]</sup>。也有监测发现,预处理过程气溶胶的浓度与处理厂的规模相关,规模越大,气溶胶浓度越高。对于近几年兴起的地下或半地下污水处理厂而言,由于其相对封闭、湿度较大,更加需要严格控制气溶胶的产生,切实做好全厂气流的组织和调控,各区域操作空间换气量一定要小于除臭排气量,封闭池体远离抽气口的一端应该适当打开,使操作空间和池体密闭空间真正形成气体的有序负压流动,避免形成空气流通死区。如果简单封闭池体、加大地下操作空间的换气次数,反而可能会增大气溶胶在操作空间的扩散风险。另外,研究表明生物除臭反应器在处理臭味气体的同时还可以有效削减微生物气溶胶<sup>[39]</sup>。

研究表明,污水系统工作人员更容易感染肠道病毒引起的疾病<sup>[40]</sup>。2003年SARS疫情期间,WHO认为感染SARS的危险职业包括污水处理厂工人和食品及动物管理者。目前SARS-CoV-2气溶胶传播途径尚待明确,出于安全考虑,污水处理操作人员要加强个人防护工作,佩戴手套、面罩或护目镜和防护服,尽量避免接触容易产生气溶胶的区域。疫情期间排水管渠维护和清疏作业应以机械、水力为主,非特殊情况下不建议组织下井作业。对于清理出来的固体废物必须及时用密闭运输车辆运送到符合规定的场所最终处置。污水处理厂应立足于“以人为本”,坚持“底线思维”,充分利用在线仪表的优势,尽量减少人工化验检测频次,保障从业人员安全,保障污水处理厂的正常运行。

### 3 总结和展望

① 新冠肺炎受感染者的排泄物中可能存在活性SARS-CoV-2,但并不意味着病毒的主要传播途径发生变化,消化道(粪-口)传播在全部传播中的作用和意义仍需进一步研究。

② 病毒感染人类需要同时具备四个条件,不能从排泄物中检测到活体病毒,就简单推断出污水处理厂也会成为SARS-CoV-2病毒的传播途径。

③ 污水处理过程能够有效降低病毒浓度,降低幅度可以达到 $1.9\lg \sim 5.0\lg$ 。污水处理厂只要保持正常稳定运行,即可彻底阻断肠道病毒和呼吸道病毒通过污水厂出水进行传播。

④ 污水处理过程必须高度重视消毒处理,消毒效果排序:臭氧>二氧化氯>液氯、次氯酸盐>紫外线。

⑤ 必须高度重视污泥处理过程。污泥处理中脱水、堆肥、石灰处理对病毒均有杀灭作用,杀灭效果有差异。

⑥ 再生水处理过程可以有效去除病毒,结合工艺控制可以保障出水安全。

⑦ 为避免气溶胶暴露风险,应加强防护,减少人工取样和检测频次,加强除臭处理,地下污水处理厂需重视气流和系统调控。

⑧ 污水处理厂要充分利用在线监测仪表优势,保障从业人员安全的同时保障污水处理厂的正常运行。

⑨ 目前污水处理过程中病毒的相关研究还有很多空白,近期建议可以围绕生物池混合液中病毒在液相和固相中的分布比例以及病毒扩散、吸附规律等开展。

### 参考文献:

- [1] Zhang C M, Xu L M, Xu P C, *et al.* Elimination of viruses from domestic wastewater: Requirements and technologies[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2016, 32(4):69.
- [2] Wong K, Fong T, Bibby K, *et al.* Application of enteric viruses for fecal pollution source tracking in environmental waters[J]. *Environ Int*, 2012, 45:151 - 164.
- [3] Cantalupo P G, Calgua B, Zhao G, *et al.* Raw sewage harbors diverse viral populations[J]. *mBio*, 2011, 2(5):e111 - e180.
- [4] Wigginton K R, Ye Y Y, Ellenberg R M. Emerging investigators series: The source and fate of pandemic viruses in the urban water cycle[J]. *Environ Sci: Water Res Technol*, 2015, 1(6):735 - 746.
- [5] Lai C C, Wang Y H, Wu C Y, *et al.* A norovirus outbreak in a nursing home: Norovirus shedding time associated with age[J]. *J Clin Virol*, 2013, 56(2):96 - 101.
- [6] Chan M C, Sung J J Y, Lam R K Y, *et al.* Fecal viral



- load and norovirus-associated gastroenteritis[J]. *Emerg Infect Dis*, 2006, 12: 1278 – 1280.
- [7] Da Silva A, Claude L S, Parnaudeau S, *et al.* Evaluation of removal of noroviruses during wastewater treatment, using real-time reverse transcription – PCR: Different behaviors of genogroups I and II [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2008, 73(24): 7891 – 7897.
- [8] Hamza I A, Jurzik L, Überla K, *et al.* Evaluation of pepper mild mottle virus, human picobirnavirus and Torque teno virus as indicators of fecal contamination in river water[J]. *Water Res*, 2011, 45(3): 1358 – 1368.
- [9] Poon L L M, Chan K H, Wong O K, *et al.* Detection of SARS coronavirus in patients with severe acute respiratory syndrome by conventional and real-time quantitative reverse transcription – PCR assays[J]. *Clin Chem*, 2004, 50(1): 67 – 72.
- [10] 吉铮. 城市污水及再生水中典型病毒的赋存及分布特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
- Ji Zheng. The Characteristic Analysis of Occurrences and Distribution of Typical Viruses in Domestic Sewage and Reclaimed Wastewater [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [11] Casanova L, Rutala W A, Weber D J, *et al.* Survival of surrogate coronaviruses in water[J]. *Water Res*, 2009, 43(7): 1893 – 1898.
- [12] Justin D B, David E S, Robert J C, *et al.* Persistence of H5 and H7 avian influenza viruses in water[J]. *Avian Dis*, 2007, 51(S1): 285 – 289.
- [13] Lebarbenchon C, Sreevatsan S, Lefevre T, *et al.* Reassortant influenza A viruses in wild duck populations: Effects on viral shedding and persistence in water[J]. *Proc Biol Sci*, 2012, 279: 3967 – 3975.
- [14] Gundy P M, Gerba C P, Pepper I L. Survival of coronaviruses in water and wastewater[J]. *Food Environ Virol*, 2008, 1(1): 10 – 14.
- [15] Wang X, Li J, Jin M, *et al.* Study on the resistance of severe acute respiratory syndrome-associated coronavirus [J]. *J Virol Methods*, 2005, 126(1): 171 – 177.
- [16] Zhang C M, Wang X C. Health risk assessment of urban surface waters based on real-time PCR detection of typical pathogens[J]. *Hum Ecol Risk Assess: An Int J*, 2012, 18(2): 329 – 337.
- [17] Zhou J H, Wang X C, Ji Z, *et al.* Source identification of bacterial and viral pathogens and their survival/fading in the process of wastewater treatment, reclamation, and environmental reuse[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2015, 31(1): 109 – 120.
- [18] Francy D S, Stelzer E A, Bushon R N, *et al.* Comparative effectiveness of membrane bioreactors, conventional secondary treatment, and chlorine and UV disinfection to remove microorganisms from municipal wastewaters[J]. *Water Res*, 2012, 46(13): 4164 – 4178.
- [19] Kuo D H W, Simmons F J, Blair S, *et al.* Assessment of human adenovirus removal in a full-scale membrane bioreactor treating municipal wastewater [J]. *Water Res*, 2010, 44(5): 1520 – 1530.
- [20] Nordgren J, Matussek A, Mattsson A, *et al.* Prevalence of norovirus and factors influencing virus concentrations during one year in a full-scale wastewater treatment plant [J]. *Water Res*, 2009, 43(4): 1117 – 1125.
- [21] Kitajima M, Iker B C, Pepper I L, *et al.* Relative abundance and treatment reduction of viruses during wastewater treatment processes—Identification of potential viral indicators[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 488/489: 290 – 296.
- [22] Shirasaki N, Matsushita T, Matsui Y, *et al.* Estimation of norovirus removal performance in a coagulation-rapid sand filtration process by using recombinant norovirus VLPs[J]. *Water Res*, 2010, 44(5): 1307 – 1316.
- [23] Simmons F J, Xagorarakis I. Release of infectious human enteric viruses by full-scale wastewater utilities [J]. *Water Res*, 2011, 45(12): 3590 – 3598.
- [24] Shang C, Wong H M, Chen G. Bacteriophage MS – 2 removal by submerged membrane bioreactor[J]. *Water Res*, 2005, 39(17): 4211 – 4219.
- [25] Chaudhry R M, Nelson K L, Drewes J E. Mechanisms of pathogenic virus removal in a full-scale membrane bioreactor [J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(5): 2815 – 2822.
- [26] Wu J L, Li H T, Huang X. Indigenous somatic coliphage removal from a real municipal wastewater by a submerged membrane bioreactor[J]. *Water Res*, 2010, 44(6): 1853 – 1862.
- [27] 邱国臻, 杨东蓝, 文才, 等. SARS患者用后医疗设备的消毒方式与实践[J]. *医疗卫生装备*, 2003, 24(7): 22 – 24.
- Qiu Guozhen, Yang Donglan, Wen Cai, *et al.* Disinfection methods and practice of medical equipment for SARS patients [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2003, 24(7): 22 – 24 (in Chinese).
- [28] 张珈敏, 郑从义, 肖庚, 等. 臭氧水对 SARS 病毒的灭

- 活效果观察[J]. 中国消毒学杂志,2004,21(1):27-28.
- Zhang Jiamin, Zheng Congyi, Xiao Geng, *et al.* Examination of the efficacy of ozone solution disinfectant in inactivating SARS virus [J]. Chinese Journal of Disinfection,2004,21(1):27-28(in Chinese).
- [29] 王新为,李劲松,金敏甄,等. SARS 冠状病毒的抵抗力研究[J]. 环境与健康杂志,2004,21(2):67-71.
- Wang Xinwei, Li Jinsong, Jin Minzhen, *et al.* Study on resistance of SARS-conaravirus [J]. Journal of Environment and Health, 2004, 21(2): 67-71(in Chinese).
- [30] 赵琳. 紫外与次氯酸钠消毒效果及影响因素研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
- Zhao Lin. Study on Performance and Influencing Factors of UV Disinfection and Sodium Hypochlorite Disinfection [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014(in Chinese).
- [31] 李杰,魏秋华,饶林,等. 常用消毒剂对新发现腺病毒55型灭活效果研究[J]. 中国消毒学杂志,2016,33(5):405-407,410.
- Li Jie, Wei Qiu Hua, Rao Lin, *et al.* Study on inactivation efficacy of common disinfectants against new human adenovirus type 55 strain [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2016, 33(5): 405-407, 410(in Chinese).
- [32] 曹艳丹,李莹,冯萃敏,等. 氯消毒对再生水中溶解性有机物特性的影响[J]. 环境工程,2018,36(12):59-63.
- Cao Yandan, Li Ying, Feng Cuimin, *et al.* Effect of chlorine disinfection on characteristics of dissolved organic matter in reclaimed water [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12): 59-63(in Chinese).
- [33] 徐丽梅. 水中病原微生物的紫外线和氯消毒灭活作用机制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- Xu Limei. Mechanisms of Waterborne Pathogens Inactivation under Ultraviolet Disinfection and Chlorination [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017(in Chinese).
- [34] Ansaldi F, Banfi F, Morelli P, *et al.* SARS - CoV, influenza A and syncitial respiratory virus resistance against common disinfectants and ultraviolet irradiation [J]. J Prev Med and Hygiene, 2004, 45(1/2): 5-8.
- [35] Shirasaki N, Matsushita T, Matsui Y, *et al.* Effects of reversible and irreversible membrane fouling on virus removal by a coagulation - microfiltration system [J]. J Water Supply: Res Technol - Aqua, 2008, 57(7): 501-506.
- [36] Antony A, Blackbeard J, Leslie G. Removal efficiency and integrity monitoring techniques for virus removal by membrane processes [J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 2012, 42(9): 891-933.
- [37] Viau E, Bibby K, Paez-Rubio T, *et al.* Toward a consensus view on the infectious risks associated with land application of sewage sludge [J]. Environ Sci Technol, 2011, 45(13): 5459-5469.
- [38] Upadhyay N, Sun Q, Allen J O, *et al.* Characterization of aerosol emissions from wastewater aeration basins [J]. J Air Waste Manage, 2013, 63(1): 20-26.
- [39] 杨凯雄,侯红勋,王颖哲,等. SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征[J]. 环境科学,2018,39(11):4909-4914.
- Yang Kaixiong, Hou Hongxun, Wang Yingzhe, *et al.* Characteristics of bioaerosols emitted from WWTP with SBR treatment process [J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 4909-4914(in Chinese).
- [40] Brisebois E, Veillette M, Dion-Dupont V, *et al.* Human viral pathogens are pervasive in wastewater treatment center aerosols [J]. J Environ Sci, 2018, 67(5): 45-53.



作者简介:王连杰(1988-),男,河北魏县人,硕士,中级工程师,主要从事污水处理、固废处置、环境新技术及环境微生物的研究工作。

E-mail: lianjiewang\_hebut@163.com

收稿日期:2020-02-18