

陈江峰, 詹咏, 钱康, 等. 污水处理厂中典型肠道病毒的分布与检测方法及其风险评估[J]. 净水技术, 2024, 43(2): 27-38, 118.

CHEN J F, ZHAN Y, QIAN K, et al. Distribution and determination method and risk assessment of typical enteroviruses in WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2): 27-38, 118.

污水处理厂中典型肠道病毒的分布与检测方法及其风险评估

陈江峰¹, 詹咏¹, 钱康¹, 陈祥², 李锟², 董滨^{3,*}

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 新冠肺炎威胁了全球经济和公众健康, 其在粪便和污水中的检出表明了存在粪口传播的可能性。污水在城市污水处理系统中来源广泛, 是水传播病毒的重要途径。为进一步开展污水处理设施中病毒的相关研究工作, 文中分析了污水处理系统中典型肠道病毒的定量分布现状, 总结了污水处理流程中病毒的灭活机制, 并对国内外污水处理厂的肠道病毒研究进展进行归纳。此外, 梳理了污水处理厂样本中典型肠道病毒的浓缩及检测方法, 最后结合定量微生物风险评估 (quantitative microbial risk assessment, QMRA) 分析方法, 讨论了病毒的浓度、感染概率及其潜在的健康风险。研究对国内病毒排放标准和风险评估体系的建立进行了探讨, 为实现污水处理厂肠道病毒全过程风险管理和后续处理处置相关规范的制定提供参考和理论支撑。

关键词 肠道病毒 分布特征 检测方法 风险评估 污水处理厂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)02-0027-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.004

Distribution and Determination Method and Risk Assessment of Typical Enteroviruses in WWTPs

CHEN Jiangfeng¹, ZHAN Yong¹, QIAN Kang¹, CHEN Xiang², LI Kun², DONG Bin^{3,*}

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The determination of the COVID-19 in feces and wastewater threatens the global economy and public health, indicating the possibility of fecal-oral transmission. The wastewater in the urban wastewater treatment plants (WWTPs) comes from a wide range of sources and is an important way for water to transmit viruses. In order to further carry out relevant research work on viruses in wastewater treatment facilities, the quantitative distribution status of typical enteroviruses in WWTPs is analyzed, the inactivation mechanism of viruses in wastewater treatment processes and the research progress of enteroviruses in WWTPs at home and abroad is summarized. In addition, the concentration and determination methods of typical enteroviruses in WWTPs samples are combed, and the concentration of viruses in wastewater, infection probability and potential health risks are discussed by combining with quantitative microorganisms risk assessment (QMRA). It provides reference and theoretical support for the realization of the whole-process risk management of enterovirus in WWTPs and the formulation of subsequent treatment and disposal specifications.

Keywords entericviruses distribution characteristics determination method risk assessment wastewater treatment plant (WWTP)

[收稿日期] 2023-03-06

[基金项目] 国家自然科学基金重大项目(52192683;52270136)

[作者简介] 陈江峰(1998—),男,硕士,研究方向为城市污水及污泥资源化与能源化,E-mail:864299804@qq.com。

[通信作者] 董滨(1978—),男,教授,研究方向为城市污水及污泥资源化与能源化,E-mail:dongbin@tongji.edu.cn。

SARS-CoV-2 新型冠状病毒已在 215 个国家导致过疫情暴发,感染人数超 5 亿,死亡人数超 640 万^[1]。研究报告^[2]指出,SARS-CoV-2 的 RNA 在患者粪便和生活污水中检出,与诺如病毒(norovirus)、腺病毒(adenovirus)、轮状病毒(rotavirus)、星状病毒(astrovirus)等^[3]典型肠道病毒一样,可能通过患者的粪便进入排水系统,存在粪口传播风险,若处置不当会导致病原体进入受纳水体。城镇污水处理厂作为生活污水的主要接纳和处理场所,其病原体暴露风险得到了污水处理行业的普遍重视。

污水处理厂进水来源广泛,现已检测出 1 400 余种病原体^[4],包含病毒、细菌、真菌等。相关研究^[5]报道表明,病原体能够以无生命的生物大分子状态在污水中稳定存在,并长时间维持其感染活性,存活时间长达几天甚至数月。同时,随着城市管网升级改造,污水短时间即可汇入污水处理厂,使污水处理厂的进水中存在大量尚未失活的病原体。因此,污水处理厂的工作人员接触这些病原体并感染的几率较高。研究数据^[6]表示,污水处理厂人员更容易感染由肠道病毒所引起的疾病,疾病的主要传播途径可归因于病毒气溶胶的吸入和手部接触携带病毒的污水、污泥而导致的手口摄入。此外,若出水中含有病原体,其用于城市绿化和道路清洁时也会对公众造成一定的健康风险。

目前,我国对于污水处理厂出水标准中仅对于寄生虫卵及粪大肠菌群进行限值控制,对病毒的控制限值以及去除策略并无明确的规定,使污水处理厂的运行过程以及出水排放都存在着难以量化的风险。本文归纳总结了国内外关于污水处理厂中病毒的分布、检测方法及其风险评估等方面的研究进展,为建立污水处理厂出水病毒控制标准、加强污水处理厂病毒防控、降低工作人员健康风险提供科学参考。

1 污水处理厂中病毒的分布与去除特征

1.1 水相中病毒的分布

污水中存在大量细菌、真菌、病毒等病原微生物。病原微生物的种类众多,目前在污水中发现的 600 余种病毒中,肠道病毒就存在 140 余种^[7],不同的肠道病毒引起的健康危害以及不同工艺对其去除效果存在差异,因此,明晰污水中肠道病毒的种类、危害和不同工艺对病毒的去除效果尤为重要。表 1

汇总了国内外不同污水处理厂污水中较为典型的肠道病毒种类,以及在不同处理工艺下进出水单元的浓度水平^[8-19]。各国污水处理厂污水中检测出的病毒种类及浓度各不相同,但在各工艺的进出水中均有病毒检出。张德友^[10]在北京高碑店等污水处理厂出水中均检出轮状病毒,通过计算得出各污水处理厂出水健康风险均高于美国环保局(USEPA)规定的标准值,说明将污水处理厂出水用于绿化和景观用水时,对人群存在健康隐患。不同污水处理流程对水中部分病毒的去除效果各不相同, Ouardani 等^[16]的研究表明氧化沟工艺对甲型肝炎病毒的去除效果约为 1.31lg, Schlindwein 等^[20]和 Villar 等^[14]的研究表明传统活性污泥法对甲型肝炎病毒的去除效率为 0.09lg~0.24lg,表明污水处理工艺和污水处理厂规模等都会影响对病毒的去除效果。

1.2 固相(主要指污泥)中病毒的分布

据统计,至 2020 年我国污水处理厂脱水污泥产量已达 7 285 万 t(含水率 80%计),污泥产量增速为每年 5%~8%,预计 2025 年底我国污泥产量将达到 9 000 万 t^[21]。污水处理厂进水中含有大量的病毒,剩余污泥作为病毒的重要载体,其带来的健康风险也越来越受到国内外的重视。Yang 等^[22]研究发现病毒在进入污水处理系统后,会逐渐富集吸附在污泥中,并且部分肠道病毒能在污泥中存活几天甚至数月。美国等发达国家已逐渐将病毒列入污泥排放指标中。但我国现行标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)和《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)中,对污泥的病原体排放指标仅涉及粪大肠菌群、细菌总数和蛔虫卵死亡率,尚未涉及对病毒的关注。由表 2 可知^[23-33],出水污泥中仍存在较高浓度肠道病毒, Bofill-Mas 等^[23]的报告表明污水和污泥中多瘤病毒的浓度相似,但由于污泥对病毒的保存作用要高于污水中,污泥中的高浓度病毒更应该引起重视。Reynolds^[24]和 Sidhu 等^[25]的研究表明,由于活性污泥对病毒的吸附与保护作用,污泥中病毒含量通常会高于进水,部分病毒(如腺病毒)可达到进水的 10 倍。因此,关于污泥后续处理处置过程中所造成的健康风险不容忽视。

1.3 气相中病毒的分布特征

气溶胶是由小体积液滴或一些结构简单的生物分散并悬浮在空气中的一种胶体体系。在污水处理

表1 典型的肠道病毒的类型、进出水单元分布浓度水平及其处理工艺

Tab. 1 Typical Enterovirus Types, Concentration Levels in Influent and Effluent Units and Treatment Processes

处理工艺	国家或地区	病毒类型	进水/(个·L ⁻¹)	出水/(个·L ⁻¹)	去除效果
传统活性污泥法	坎帕尼亚	腺病毒	5.4 × 10 ⁶	3.9 × 10 ³	3.14lg
	坎帕尼亚	爱知病毒	3.40 × 10 ⁶	1.60 × 10 ⁴	2.32lg
	坎帕尼亚	札如病毒	1 × 10 ⁶	6.50 × 10 ²	3.18lg
	坎帕尼亚	星状病毒	7.40 × 10 ⁶	3 × 10 ⁴	2.39lg
	加拿大	轮状病毒	6.25 × 10 ⁶	7.12 × 10 ⁵	0.94lg
	澳大利亚	脊髓灰质炎病毒	1.09 × 10 ⁶	4.47 × 10 ²	3.39lg
	巴西	甲型肝炎病毒	3.70 × 10 ⁶	未检出 (ND)	/
	巴西	甲型肝炎病毒	5.07 × 10 ⁵	2.95 × 10 ⁵	0.24lg
	中国	轮状病毒	55.2	4.68 × 10 ⁻²	3.07lg
	美国	腺病毒	7 × 10 ⁴	4 × 10 ³	1.24lg
膜生物反应器(MBR)工艺	突尼斯	甲型肝炎病毒	1.50 × 10 ⁶	7.2 × 10 ⁴	1.31lg
	巴西	肠道病毒	2.64 × 10 ⁶	1.13 × 10 ⁵	1.37lg
	巴西	爱知病毒	3.16 × 10 ⁶	1 × 10 ⁶	0.50lg
	巴西	肠道病毒	6.31 × 10 ⁴	1 × 10 ⁴	0.80lg
	巴西	柯萨奇病毒	1 × 10 ⁷	1.99 × 10 ⁶	0.70lg
AAO 生物处理工艺	中国	肠道病毒	7.51 × 10 ⁶	4.22 × 10 ⁵	1.25lg
	中国	轮状病毒	3.34 × 10 ⁶	2.25 × 10 ⁵	1.17lg
	中国	星状病毒	1.47 × 10 ⁷	1.03 × 10 ⁶	1.15lg
	中国	诺如病毒	3.27 × 10 ⁶	4.14 × 10 ⁵	0.89lg
AO 生物处理工艺	中国	肠道病毒	1.72 × 10 ⁷	8.61 × 10 ⁵	1.3lg

表2 污泥中典型肠道病毒类型、处理方法及其浓度水平

Tab. 2 Typical Enterovirus Species, Treatment Methods and Concentration Levels in Sludge

污泥类型	病毒类型	浓缩方法	浓度/(个·g ⁻¹)
活性污泥	腺病毒	牛肉膏洗脱-膜过滤法	1.8 × 10 ⁴ ~ 1.1 × 10 ⁵
	腺病毒	/	1.7 × 10 ⁵ ~ 1.4 × 10 ⁶
	轮状病毒		8 × 10 ³ ~ 8 × 10 ⁵
	诺如病毒	牛肉膏洗脱-磁珠搅拌	1.6 × 10 ⁴ ~ 4.9 × 10 ⁵
	甲型肝炎病毒		8.6 × 10 ⁶
	诺如病毒		1.4 × 10 ⁴
	腺病毒	/	4.4 × 10 ³
	肠道病毒		1.6 × 10 ³
	腺病毒	牛肉膏洗脱-聚乙二醇(PEG)沉淀法	4.6 × 10 ⁴ ~ 1.2 × 10 ⁶
	甲型肝炎病毒		3.1 × 10 ² ~ 5.4 × 10 ²
浓缩污泥	腺病毒	脱脂牛奶絮凝法	1.2 × 10 ⁵ ~ 1.6 × 10 ⁵
脱水污泥	肠道病毒		1.9 × 10 ⁴
	腺病毒	牛肉膏洗脱-膜过滤法	7.5 × 10 ⁵
消化污泥	人多乳头瘤病毒		7.4 × 10 ⁴
	腺病毒	牛肉提取物	2.5 × 10 ³
	肠道病毒	/	2 × 10 ² ~ 2.1 × 10 ⁵
稳定污泥	诺如病毒	牛肉膏洗脱-膜过滤法	5 × 10 ⁷
	诺如病毒	甘氨酸洗脱-真空离心	19 ~ 1.4 × 10 ⁵
初沉污泥	新型冠状病毒	牛肉膏洗脱-PEG 沉淀法	3.2 × 10 ³ ~ 1.4 × 10 ⁴

过程中,如曝气装置会在曝气单元产生气泡,在气泡上升至水面破裂后,会使携带肠道病毒的小液滴逸散到空气中^[34]。此外,在机械搅拌或者液体湍流剧烈的处理单元,也存在水相与气相的接触^[35],导致气溶胶的产生并使水中所含有的肠道病毒进入空气中。有研究^[36]表明污水处理厂职业人员更容易产生过敏性鼻炎、慢性支气管炎、哮喘等呼吸系统疾病的问题。由表3^[37-43]可知,进水与曝气池等湍流程度较大的单元均有病毒的检出。

表3 污水处理厂气溶胶中典型肠道病毒的种类、单元及其浓度水平

Tab. 3 Types, Units and Concentration Levels of Typical Enteroviruses in WWTPs

采集方式(流速,时间)	病毒类型	处理单元	病原体浓度/(个·m ⁻³)
液体-冲击采样器(4 L/min,1 h)	腺病毒	进水	2×10 ²
		曝气池	1.8×10 ²
液体-冲击式采样器(100 L/min,30 min)	腺病毒	进水	9.3×10 ²
		曝气池	1.6×10 ³
液体-冲击式采样器(4 L/min,5 h)	诺如病毒	曝气池	5.3×10 ³
	轮状病毒		4.8×10 ²
液体-冲击采样器(5 L/min,5~24 h)	肠道病毒	曝气池	1.9×10 ⁴
	甲型肝炎病毒		2.1×10 ⁴
	轮状病毒		2.2×10 ⁵
液体-冲击采样器(12.5 L/min,2 h)	诺如病毒	曝气池	3.2×10 ³
明胶过滤-采集器(1 L/min,400 min)	诺如病毒	进水	2.4×10 ⁵ ±1.4×10 ⁵
聚碳酸酯过滤-采样器(4 L/min,24 h)	诺如病毒	曝气池	1.42×10 ³ ±1.14×10 ³

1.4 污水处理厂中典型肠道病毒存活与去除的影响因素

典型肠道病毒在污水处理厂中的存活与去除受到多方面因素的影响,其可分为物理因素、化学因素和生物因素3种。

1.4.1 物理因素

涉及肠道病毒去除和存活的物理因素包括温度、悬浮物、光照等^[44]。温度是影响病原微生物存活最关键的因素。研究^[45]表明随着温度的升高,病毒衣壳蛋白会变形破坏或被活性升高的胞外蛋白酶降解,从而导致病毒失活。据Casanova等^[46]的研究显示,小鼠肝炎病毒在25℃的条件下,10 d后滴度下降了2lg,而在4℃的同等条件下,其滴度并未存在显著下降。Zhao等^[47]的研究表明甲型肝炎病毒在4℃瓶装水中存活一年后其滴度仅下降约1lg,而在20℃和35℃的情况下,40 d后其滴度下降了约

Pašmionka^[37]的研究发现污水厂工作人员对于诺如病毒与轮状病毒的疾病负担伤残调整寿命年(DALY)指标可达到0.123和0.0576,远超世界卫生组织制定的1×10⁻⁶的参考值。刘子欣^[38]的研究表明污水处理厂工作人员关于肠道病毒和诺如病毒的年感染概率可达23%和50%,DALY指标也远超美国环保局制定的1×10⁻⁴的参考值。因此,需关注并预防污水处理厂气溶胶对厂内工作人员与周边居民造成的健康危害。

2lg和5lg,并且其在240 d和80 d时彻底失去了活性。Ibrahim等^[48]研究表明,在37℃灭菌后河水中腺病毒存活时间为27 d,在4℃保存下其活性可延长为73 d,而在-20℃的情况下其存活时间甚至可以达到197.5 d。因此,对大多数病毒而言,低温条件下肠道病毒的存活时间更长。并且随着温度的升高,病原体和悬浮颗粒间的吸附性能也会下降。病原体和悬浮颗粒间的吸附性能也是影响其活性的关键因素,肠道病毒在悬浮颗粒物上的吸附可减少酶、其他降解因子和紫外线(UV)灭活等环境因素对其的影响,延长病原体在污水中的存活时间。Fongaro等^[49]的研究表明,水中的病毒浓度在经过沉降后显著降低,PhiX-174噬菌体和腺病毒的沉降与固体颗粒的沉降呈正相关。Sakoda等^[50]的研究表明,大肠杆菌噬菌体吸附在固体上时比悬浮在水中时更加稳定,固体表面的吸附增强了它们的存活能力。

光照也是影响水中病原体存活的重要因素,相关研究^[51]表明 UV 辐射是环境中主要的天然杀病毒剂。UV 通过改变病毒和微生物的遗传物质、断裂键、变性蛋白质(蛋白质分子吸收紫外光后,会导致氢键的解离从而导致其变性)来对病毒和微生物的基因组造成损害,达到削减水中病毒存活时间的效果。Johnson 等^[52]的研究表明,脊髓灰质炎病毒在黑暗环境的海水中 24 h 后滴度下降了约 1lg,而在同一时期阳光下海水中的滴度却下降了 3lg。光照对病原菌的去除效果也与 UV 强度有关,Meng 等^[53]的研究表明灭活 1lg 的腺病毒需要 30 mW/cm² 剂量,当 UV 强度达到 124 mW/cm² 时腺病毒的灭活效率可达 4lg。

1.4.2 化学因素

影响污水中病毒存活的化学因素有 pH、氧化剂等。不同病毒在水中的等电点不同,水体 pH 的变化会改变病毒表面的带电性质^[54],影响病毒在水中的迁移和吸附性能,并且 pH 能通过影响微生物表面的蛋白构型情况影响微生物的活性和感染能力。但生活污水的 pH 值通常情况下为 6~8,大多数肠道病毒在这个范围内存活较为稳定。Chin 等^[55]的研究发现,在室温条件下,pH 值在 3~10 的新冠病毒存活情况稳定。而 Booth 等^[56]的研究表明,诺如病毒能在 pH 值为 2~10 的缓冲液中存活,在 pH 值为 2 的情况下存活 30 min 后仍具有感染性。氧化剂如二氧化氯、次氯酸钠、臭氧等,能够有效降低病毒的传染活性。研究^[57]表明二氧化氯会使包膜病毒的血凝素和神经氨酸酶变形,而这些蛋白对病毒的传染性必不可少,因此,消除了病毒的传染性。Hatanaka 等^[58]的研究表明在加入 80 mg/L 的次氯酸钠或二氧化氯后 10 s 后,SARS-CoV-2 病毒的滴度下降可以达到约 4lg。Orel 等^[59]的研究也表明次氯酸钠对脊髓灰质炎病毒有很高的杀灭作用,在水中加入 0.63%次氯化钠溶液在经过 2 min 后其滴度可下降 10lg。

1.4.3 生物因素

研究^[60]表明病毒的存活率可能会随着表面微生物的数量而增加或减少,细菌或微小真菌能够攻击和灭活具有感染性的病毒颗粒。一些细菌可以产生低分子物质或使用病毒衣壳蛋白作为底物生长,从而使病毒失活。除了细菌和真菌外,水中还存在大量原生动物、后生动物、藻类等生物,对病毒的存

活均存在不同程度的影响。Kim 等^[61]的研究表明脊髓灰质炎病毒在从水相被吸附到絮体后,絮体上的后生动物通过摄食作用将其转移至体内达到灭活病毒的效果。Bettarel 等^[62]的研究发现微藻能吸附水中的病毒,通过沉淀或其体系中生物(异养纳米鞭毛虫和纤毛虫)的捕食去除。但是对于病毒而言,水中的生物除了负面影响外,也存在保护和传播病毒的作用。Scheid 等^[63]的研究发现棘阿米巴属变形虫(*Acanthamoeba*)在吞食腺病毒后,腺病毒在其体内形态并未发生改变,且仍具有感染能力。在宿主阿米巴的保护下,腺病毒还可以免受各种消毒剂的不良作用。Battistini 等^[64]也发现纤毛虫吸收水中腺病毒后,腺病毒可在其体内存活长达 35 d。因此,环境水体中的肠道病毒与各种生物间存在复杂的相互关系,其共生、捕食、竞争等都会影响其在水中的存活和分布。

2 环境样本中微生物的浓缩与检测

由于环境样本中肠道病毒的含量一般较低,且其存在的许多物质会影响后续的检测,如有机质和颗粒物等。因此,在检测前需对样品进一步洗脱和浓缩,提高后续检测的准确性和灵敏度。

2.1 水样中病毒的富集与浓缩方法

水样中病毒的浓度较低时,常见的浓缩方法包括:膜过滤-洗脱法、絮凝沉淀法、超滤法、固体吸附-洗脱法等^[65]。吸附-洗脱法是其中运用较多的浓缩方法,包含膜过滤-洗脱法和固体吸附-洗脱法,通过特定介质吸附水中病毒,再使用洗脱液洗脱完成浓缩。膜过滤-洗脱法是通过带电荷的滤膜来吸附水中带负电荷的病毒,根据膜所带电荷的不同可分为阳离子膜和阴离子膜。常见的阴离子膜有硝酸纤维膜、尼龙膜、玻璃纤维膜等,Jothikumar 等^[66]使用 Millipore 硝化纤维膜对实验室模拟水样中脊髓灰质炎病毒的回收率可达 80%,但阴离子膜使用前需要在酸化条件下加入阳离子,如 Al³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等。此外,Berg 等^[67]的研究表明,由于污水中的有机物质较多,阴离子膜对污水中病毒的浓缩效果较差,需要在过滤前初步去除水中有机质。常见的阳离子膜有纳米铝滤膜、石棉-纤维素膜等,与阴离子膜相比阳离子膜可以直接吸附带负电的病毒。冯微宏等^[68]的研究表明,Nanoceram 阳离子膜对模拟水样中诺如病毒的回收率为 28.8%±6.1%。固体吸

附-洗脱法也是通过带电荷的滤料介质对病毒进行吸附,目前研究热门的滤料包括活性炭、硅胶、玻璃棉、硅藻土及各种改性材料等。Brinkman 等^[69]运用硅藻土浓缩废水中肠道病毒的回收率为 47%~98%。Vilagines 等^[70]使用 50 g 玻璃棉对河水中脊髓灰质炎病毒的回收率为 75%,但固体吸附-洗脱法的浓缩效率与其滤料的用量及环境条件有关。Menut 等^[71]使用 5 g 玻璃棉对脊髓灰质炎病毒的回收效率为 25.5%。

絮凝沉淀法是通过加入具有絮凝特性的物质,将病毒沉淀后通过超高速离心的方式将病毒依附在管壁上,在去除上清液后通过缓冲液将其重悬达到浓缩的效果。这种方法适用于较为浑浊的水样以及污泥,但其浓缩体积仅适用于生活污水、医疗废水等病毒较高的水体。超滤法的原理是依据滤孔孔径大小的差异性来截取水中的病毒,并不需要加入其他物质,只与微生物直径和自身孔径相关,但超滤法易堵塞滤膜,适用于自来水、三级出水等较为洁净的水体。金萍等^[72]使用超滤法和 PEG 沉淀法对纯水中诺如病毒的回收率分别为 34.72%和 6.21%。张崇森^[73]应用滤膜吸附-PEG 沉淀法对二级出水及进水中肠道病毒的回收率分别为 65.93%和 33.25%。因此,关于污水处理厂水样的富集浓缩方法在进水等较为浑浊的水体单元采用絮凝沉淀法较为合适,而出水及后续洁净水体中应使用超滤法或吸附-沉淀法。

2.2 泥样中病毒的富集与浓缩方法

污泥中病毒的浓缩方法通常可分为两步,洗脱和富集。污泥中病毒的洗脱,就是通过加入化学试剂使污泥和病毒分离,使其从固相向水相转移,再通过离心的方式去除沉淀。Mignotte 等^[74]通过对 8 种浓缩技术进行比较,得出向污泥中加入 0.3 mol/L 的 NaCl 和 7%牛肉提取物(pH 值=7.5)、100 mL 氟利昂和 10%牛肉提取物(pH 值=9),两种方法在后续定量和培养过程中有更好的表现,但第二种方法相较于第一种更加便捷,且后续不存在氟利昂的环境处置问题。Yang 等^[22]通过向污泥中投加假单胞 Phi6 噬菌体、MS2 大肠杆菌噬菌体、T4 噬菌体、PhiX174 噬菌体 4 种不同类型的典型病毒替代物对比了 4 种浓缩方法,得出向污泥中加入 10%牛肉提取物(pH 值=7.2)的方法回收率最高,其 phiX174 噬菌体回收率可达 60.49%。污泥富集的方法与前

文污水浓缩方法一致,为 PEG 沉淀法、超滤法、超速离心法等,在实际试验过程中病毒的浓缩可以由多种方法一起构成,如可使用滤膜法进行初步浓缩后再使用有机絮凝法进一步浓缩,可以达到更好的富集效果。

2.3 气样中病毒的采集方法

关于空气中气溶胶样品的采集效果主要在于采集方式的不同,不同的采集方式其捕获气溶胶中病毒的能力以及捕获后微生物的活性不同。现有的采集方法依照其原理可分为重力沉降法、撞击式采样法、冲击式采样法、气旋式采样法、静电采样法等^[75-77]。撞击沉降法是目前采用较为广泛的方法之一,最具代表性的便是 Andersen 六级采样器,其优点在于拥有六级筛孔径不同的筛板,通过不同的孔径和不同的气流流速使不同大小粒径的病毒截留在不同的筛板上,得到气溶胶中微生物的粒径分布,根据动力学原理可以模拟不同粒径下人吸入肺部后的感染性。但其缺点是受到采样器气流扰动和惯性影响会造成微生物损伤或死亡,影响后续检测。由于病毒在气溶胶中的含量很少,加上其本身结构十分脆弱,运用冲击式采样法是目前污水处理厂采集病毒气溶胶的主流方法之一,其收集气溶胶的液体介质能更好地保持病毒的活性减少其损失。Courault 等^[42]使用 AGI 冲击式液体采样器对小鼠诺如病毒的回收率可达 71.8%。

2.4 病毒检测技术

在样品完成洗脱浓缩等前处理后,关于污水处理厂等环境样本的病毒检测方式主要可分为细胞培养法、免疫学检测法和分子学检测方法^[42,78]。细胞培养法是最传统的检测方法,通过显微镜直接观察进行定性鉴定和分析或运用特定宿主细胞分离和鉴定病毒。其主要用于评价病毒的感染活性,常用 50%细胞感染剂量(TCID50)或培养皿空斑数(Pfu)来表征。但这种方法检测周期较长,污水中的病毒大部分都很难培养(如诺如病毒、轮状病毒等)且污水中各类微生物成分复杂,不能很好地对其分离培养,因此,检测结果往往与实际结果存在较大差异性。免疫学检测法现有如酶联免疫吸附法、免疫荧光法、胶体金免疫技术等^[79],其主要通过带有标记的抗体(或抗原)与抗原(或抗体)的特异性结合,通过其荧光反应或酶的呈色反应对其进行定性及定量分析,但该方法存在检测限较高、灵敏度较低等问

题,因此,不太适用于微生物浓度低的环境样本检测。

分子检测技术包含聚合酶链反应(PCR)、脉冲场凝胶电泳(PFGE)、高通量测序、基因芯片等,其具有灵敏度高、周期短、特异性强等优点。实时荧光定量 PCR 是在原有 PCR 的基础上发展的定量技术,是目前用于污水处理厂病原体定量检测最主流的方法^[73]。其通过在 PCR 反应体系中加入荧光基团,最后用样品的荧光信号值代入标准曲线对其进行定量分析。但污水的成分十分复杂,污水中含有的有机质(如腐植酸)和颗粒物等会影响 PCR 最终的检出结果,因此,需要在前处理过程中用 PEG 沉淀、离心或树脂过滤等方法减少检测的误差。

3 健康风险评估

污水处理厂中的病原体种类繁多,其暴露情况不同,感染的随机性和工人的易感程度相差较大,并且缺少污水处理厂流行病学的的数据,因此,关于污水处理厂职业人员及周边群众的健康风险评估十分困难。定量微生物风险评价(quantitative microbial risk assessment, QMRA)法是一种可以有效评估污水处理厂内感染风险的主流方法^[80],通过病原体的传染性、浓度和人群的暴露时间来定量计算其感染风险。它已被广泛运用于食品、饮用水、再生水及污水处理厂等各方面微生物的风险评估,并且已被美国、加拿大、荷兰等多个国家运用于环境治理方面,为其卫生策略和标准制定提供支撑。QMRA 的主要步骤可分为危害鉴定、暴露评估、剂量-反应分析和风险评估 4 个步骤^[81]。

3.1 危害鉴定

危害鉴定是对污水处理厂水中病毒种类的识别及其对人体健康损伤的定性分析。由于污水处理厂中病毒的种类繁多,且变异迭代快,受到检测成本、人力资源和检测技术等制约,现有的检测手段难以检测污水中所有的病毒。因此,应基于污水处理厂自身水体特点确定目标病毒。通过现有的当地水体监测数据、临床医学研究及流行病学研究,确立污水处理厂水体中覆盖范围广、致病性强或后续危害严重的病毒。根据前文的文献查阅和对国内污水处理厂的监测数据分析,污水处理厂中主要的危害来源包括诺如病毒、腺病毒、轮状

病毒、星状病毒等。

3.2 暴露评估

暴露评估是在完成水体特征目标病毒识别后,通过对所在环境中目标污染物的污染浓度、频率和人体暴露的持续时间、暴露途径、暴露方式等进行分析来计算病毒在环境中的暴露剂量。暴露途径主要包括手口接触和液滴飞溅导致的口腔摄入、附着于空气气溶胶中的病毒通过呼吸导致的鼻腔摄入和皮肤接触^[7]。现有关于暴露剂量的计算方法包括生物标记法、直接检测法和模型预测法^[82],由于前两种方法在污水处理厂评价中缺失的数据较多,污水处理厂中暴露剂量的确立多采用模型预测法。根据不同暴露途径下人对目标病毒的摄入量(V)和指定水体中病毒的暴露浓度(C)来计算目标污染物的摄入量(D)。在关于暴露剂量的计算中,暴露参数包括评价对象的体重、呼吸频率、手口接触频次等,可以通过实地调研或通过查阅技术规范,如中国人群暴露手册和美国 USEPA 暴露手册中建议的数值来确定。

3.3 剂量-反应分析

剂量-反应分析就是在通过目标病毒暴露剂量计算后,用暴露剂量代入数学模型对其导致人体发生感染的概率进行定量计算。目前,较为主流的剂量分析采用的是流行病学调查法和数据模型分析法^[83],在风险评价中流行病学调查法用于剂量分析虽然准确且可靠,但由于人群暴露感染数据不完善,大部分情况下水体环境的流行病学难以完整获得,并且根据地区的不同其数据也可能存在差异。相较于流行病学调查法,数据模型分析法更为普及,是目前最常用于污水处理厂的分析方法。目前,关于水中病毒主要的计算模型为指数模型和 Beta-Poisson 模型^[84],每种病毒含有不同的参数,需通过计算体现其感染概率的差异性,常见病毒的计算模型以及模型参数如表 4 所示。许多病毒其感染后并不会走向致病结局,因此,在利用常见模型计算出其感染率后,仍需进一步计算不同病原体的感染-致病率(f)。而感染-致病率的计算主要通过病毒人体试验数据通过构建模型模拟的方式计算得出,但在污水处理厂方面关于感染-致病率模型的构建和计算数据并不完善,现有的模型构建方法包括蒙特卡洛模拟法、极大似然估算法等^[41]。

表 4 常见肠道病毒的剂量-反应模型及其参数^[85-87]
Tab. 4 Dosage-Response Model and Parameters of Common Enteroviruses^[85-87]

病毒类型	指数模型	Bate-Passion 模型	
	R	α	β
腺病毒	0.607 0	/	/
甲型肝炎病毒	1.822 9	/	/
柯萨奇病毒	0.014 5	/	/
埃可病毒	0.012 8	/	/
脊髓灰质炎病毒	0.009 1	/	/
轮状病毒	/	0.253 1	0.462 5
诺如病毒	/	0.04	0.055

表 5 不同国家或地区对污水处理厂周边居民或职业人员风险评估结果^[41,89-92]

Tab. 5 Results of Risk Assessment for Professional Personnels or Residents around WWTPs in Different Countries and Regions^[41,89-92]

水体类别	国家或地区	病毒类型	年患病率	疾病负担 DALY 指标
再生水	中国	轮状病毒	/	8.6×10^{-3}
		甲型肝炎病毒	/	3.8×10^{-3}
		诺如病毒	/	2.01×10^{-4}
二级出水	沙特阿拉伯	诺如病毒	/	2.01×10^{-4}
	加泰罗尼亚	诺如病毒	45.0%	7.8×10^{-4}
	澳大利亚	诺如病毒	1.52%	2.34×10^{-3}
	澳大利亚	诺如病毒	/	8.75×10^{-4}
三级出水	加泰罗尼亚	轮状病毒		3.22×10^{-3}
		腺病毒	3.06%	1.44×10^{-3}
		诺如病毒	9.7%	1.94×10^{-3}
好氧池	加泰罗尼亚	诺如病毒	24.0%	3.9×10^{-4}
		伊朗	轮状病毒	1.05%
出水河道	坎帕拉	诺如病毒	35.4%	0.123
		轮状病毒	/	5.8×10^{-3}
		诺如病毒		1×10^{-4}

4 总结与展望

(1) 污水处理厂中肠道病毒种类繁多,国内关于污水中病原体的研究大多集中于细菌与真菌,病毒的去除机制及去除效果研究较少。国内常用的 AAO 生物处理工艺和氧化沟等工艺在现有研究中去除效率约为 90%,现有的常规处理技术对部分肠道病毒的去除效果不佳,出水与剩余污泥中仍存在较高浓度病毒。并且,目前国内现有的执行标准并未对病毒的排放作出限制,关于肠道病毒的污水排放和污泥后续处理处置标准有待完善。

(2) 由于环境样本来源广泛且不同地区其水体水质存在较大差异,对于大多数肠道病毒而言,现有

3.4 风险评估

风险评估是在危害鉴定、暴露评估、剂量-反应分析 3 项的基础上,将得到的数据进行计算,最终达到病毒感染后对人引起的健康损失进行定性描述的目的。为减少风险评估因计算方法导致的差异性,目前国内外研究中关于 QMRA 的计算多数采用由世界卫生组织和哈佛卫生院提出的 DALY 指标^[88],并且依据世界卫生组织提出的污染物造成的疾病负担 DALY 指标应低于 1×10^{-6} 的标准,可以估算出目标水体病毒的最高浓度,以此来协助日后标准的制定。表 5 为国内外研究关于不同环境水体中肠道病毒的风险评估结果。

的污水、污泥浓缩及检测方法并未形成统一的标准体系。环境样本中病毒浓度较低,因此,不同的浓缩及检测方法往往导致其数据结果存在较大差异。

(3) 分析国内外监测数据可得,应重点关注进水、曝气池等单元产生的气溶胶和出水下游周边地区中病毒的含量及其对工作人员与周边居民的疾病负担。国内关于污水处理厂进行的流行病学调查研究数据和不同病原体感染性的试验数据较少,且不同地区优势病毒并不相同,需要进行实地调研,因此,污水处理厂职业人员和周边居民的健康风险评估价仍存在较大的不确定性。

污水处理厂中关于肠道病毒的研究还有待进一

步深入。(1)对国内污水处理厂优势肠道类病毒类别进行进一步识别,参考现有国内外使用的病毒提取方法,建立相关病毒的污水污泥浓缩检测标准,完善污水处理厂各环节病毒浓度基础数据,制定污水处理厂病毒相关控制标准,规定出水及污泥后续处理处置中肠道病毒的排放限值。(2)目前国内关于污水处理厂职业人员和周边居民的风险评估研究极为缺乏,应尽快建立污水处理厂各环节风险评价体系,在QMRA体系的基础上,通过参考国外已运用模型如蒙特卡罗等代入国内实地调研数据,减小模型误差引起的不确定性,阐明污水处理厂职业人员的健康风险,制定相关防护措施,构建完善的公共卫生安全管理体系,实现污水处理厂肠道病毒全流程的风险管控。(3)加强污水处理厂肠道病毒去除新技术的研究,现有的污水处理厂对于肠道病毒的去除效果不佳,处理后的水体对人群仍有较高的致病风险,应加强相关后续削减病毒含量深度处理方法的研究。

参考文献

- [1] 卓家同. 我国坚持新冠肺炎疫情防控“动态清零”不动摇的原因与成效[J]. 上海预防医学, 2022, 34(12): 1257-1260. ZHUO J T. Reasons and achievement of Chinese dynamic zero-COVID-19 strategy's consistency [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2022, 34(12): 1257-1260.
- [2] ROSA G, IACONELLI M, MANCINI P, et al. First detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewaters in Italy[J]. Science of the Total Environment, 2020, 389: 139652. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139652.
- [3] CUI Q J, HUANG Y, WANG H, et al. Diversity and abundance of bacterial pathogens in urban rivers impacted by domestic sewage [J]. Environmental Pollution, 2019, 249: 24-35. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.02.094.
- [4] LI J J, LIU J, YU H, et al. Sources, fates and treatment strategies of typical viruses in urban sewage collection/treatment systems: A review [J]. Desalination, 2022, 534: 115798. DOI: 10.1016/j.desal.2022.115798.
- [5] ÁLVAREZ B, LÓPEZ M M, BIOSCA E G. Biocontrol of the major plant pathogen *Ralstonia solanacearum* in irrigation water and host plants by novel waterborne lytic bacteriophages [J]. Front Microbiol, 2019, 10: 2813. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02813.
- [6] YAZAN I, MARIAM O, DANA K, et al. Detection and removal of waterborne enteric viruses from wastewater: A comprehensive review [J]. Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105613.
- [7] AMOAH I D, KUMARI S, BUX F. A probabilistic assessment of microbial infection risks due to occupational exposure to wastewater in a conventional activated sludge wastewater treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2022, 843: 156849. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156849.
- [8] HAMZA A, JURZIK L, STANG A, et al. Detection of human viruses in rivers of a densely-populated area in Germany using a virus adsorption elution method optimized for PCR analyses [J]. Water Research, 2009, 43(10): 2657-2668.
- [9] CIOFFI B, MONINI M, SALAMONE M, et al. Environmental surveillance of human enteric viruses in wastewaters, groundwater, surface water and sediments of Campania Region [J]. Regional Studies in Marine Science, 2020, 38: 101368. DOI: 10.1016/j.rsma.2020.101368.
- [10] 张德友. 北京地区水环境中轮状病毒的分布规律及其健康风险评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2009. ZHANG D Y. The distribution and health risk assessment of rotavirus in environment water samples of the Beijing Region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [11] QIU Y, LEE B, NEUMANN N, et al. Assessment of human virus removal during municipal wastewater treatment in Edmonton, Canada [J]. Journal of Applied Microbiology, 2015, 119(6): 1729-1739.
- [12] SIDHU J P S, SENA K, HODGERS L, et al. Comparative enteric viruses and coliphage removal during wastewater treatment processes in a sub-tropical environment [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 669-677. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.265.
- [13] TATIANNIA P, FUMIAN T, MIAGOSTOVICH M, et al. Monitoring the hepatitis A virus in urban wastewater from Rio de Janeiro, Brazil [J]. Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine & Hygiene, 2012, 106(2): 104-109.
- [14] VILLAR L, PAULA V, DINIZ-MENDES L, et al. Molecular detection of hepatitis A virus in urban sewage in Rio de Janeiro, Brazil [J]. Letters in Applied Microbiology, 2010, 45(2): 168-173.
- [15] KUO H, SIMMONS F, BLAIR S, et al. Assessment of human adenovirus removal in a full-scale membrane bioreactor treating municipal wastewater [J]. Water Research, 2010, 44(5): 1520-1530.
- [16] OUARDANI I, TURKI S, AOUNI M, et al. Detection and molecular characterization of *Hepatitis A virus* from Tunisian wastewater treatment plants with different secondary treatments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82(13): 3834-3845.
- [17] SARMILA T, RAJANI G, BIKSAH M, et al. Virus reduction at wastewater treatment plants in Nepal [J]. Environmental Challenges, 2021, 5: 100281. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100281.

- [18] 周进宏. 肠道病原体在污水处理和回用中的分布及衰变过程研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
ZHOU J H. Study on the survival and fading of enteric pathogens in the process wastewater treatment, reclamation and environmental reuse [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [19] KATAYAMA H, HARAMOTO E, OGUMA K, et al. One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan [J]. *Water Research*, 2008, 42(6/7): 1441-1448. DOI: 10.1016/j.watres.2007.10.029.
- [20] SCHLINDWEIN A D, RIGOTTO C, SIMÕES C M O, et al. Detection of enteric viruses in sewage sludge and treated wastewater effluent [J]. *Water Science & Technology*, 2010, 61(2): 537-544.
- [21] 戴晓虎, 侯立安, 章林伟, 等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 145-153.
DAI X H, HOU L A, ZHANG L W, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 145-153.
- [22] YANG W, CAI C, DAI X. Interactions between virus surrogates and sewage sludge vary by viral analyte: Recovery, persistence, and sorption [J]. *Water Research*, 2022, 210: 117995. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117995.
- [23] BOFILL-MAS S, ALBINANA-GIMENEZ N, CLEMENTE-CASARES P, et al. Quantification and stability of human adenoviruses and polyomavirus JCPyV in wastewater matrices [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(12): 7894-7896.
- [24] REYNOLDS K. Adenovirus: Balancing water treatment challenges [EB/OL]. (2004-09-15) [2023-03-06]. <https://wponline.com/2004/09/15/adenovirus-balancing-water-treatment-challenges>.
- [25] SIDHU J, TOZE S. Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review [J]. *Environment International*, 2009, 35(1): 187-201.
- [26] PRADO T, GASPAR A, MIAGOSTOVICH M. Detection of enteric viruses in activated sludge by feasible concentration methods [J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2014, 45(1): 343-349.
- [27] ASSIS A, OTENIO M, DRUMOND B, et al. Optimization of the skimmed-milk flocculation method for recovery of adenovirus from sludge [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 583(1): 163-168.
- [28] KOICHI M, HIROYUKI K. Development of a portable detection method for enteric viruses from ambient air and its application to a wastewater treatment plant [J]. *Pathogens*, 2019, 8(3): 131. DOI: 10.3390/pathogens8030131.
- [29] WONG K, ONAN B, XAGORARAKI I. Quantification of enteric viruses, pathogen indicators, and salmonella bacteria in class B anaerobically digested biosolids by culture and molecular methods [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(19): 6441-6448.
- [30] RHODES E, BOCZEK L, WARE M, et al. Determining pathogen and indicator levels in class B municipal organic residuals used for land application [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(1): 265-274.
- [31] KITTIGUL L, RUPPROM K, CHE-ARSAE M, et al. Occurrence of noroviruses in recycled water and sewage sludge: Emergence of recombinant norovirus strains [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, 126(4): 1290-1301.
- [32] BALBOA S, MAURICIO-IGLESIAS M, RODRIGUEZ S, et al. The fate of SARS-COV-2 in WWTPS points out the sludge line as a suitable spot for detection of COVID-19 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145268. DOI: 10.1101/2020.05.25.20112706.
- [33] STRAUB T, PEPPER I, GERBA C. Hazards from pathogenic microorganisms in land-disposed sewage sludge [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 1993, 132: 55-91. DOI: 10.1007/978-1-4684-7065-93.
- [34] WANG Y, LI L, XUE S, et al. Characteristics and formation mechanism of intestinal bacteria particles emitted from aerated wastewater treatment tanks [J]. *Water Research*, 2019, 163: 114862. DOI:10.1016/j.watres.2019.114862.
- [35] WANG Y, LAN H, LI L, et al. Chemicals and microbes in bioaerosols from reaction tanks of six wastewater treatment plants: Survival factors, generation sources, and mechanisms [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 9362. DOI: 10.1038/s41598-018-27652-2.
- [36] 程荣, 亓畅, 石磊, 等. 污水处理设施中微生物气溶胶的产生、传播及风险评估[J]. *给水排水*, 2020, 46(4): 59-69.
CHENG R, QI C, SHI L, et al. Generation, transmission and risk assessment of microbial aerosols in sewage treatment facilities [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(4): 59-69.
- [37] PAŚMIONKA I. Evaluation of microbiological quality of atmospheric air in a selected sewage treatment plant in Lesser Poland [J]. *Aerobiologia*, 2020, 36: 249-260. DOI: 10.1007/s10453-020-09627-x.
- [38] 刘子欣. 污水管网气溶胶扩散模拟及病毒传播风险评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
LIU Z X. Simulation of aerosol diffusion in sewer networks and risk assessment of virus transmission [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [39] MASCLAUX F, HOTZ P, GASHI D, et al. Assessment of airborne virus contamination in wastewater treatment plants [J]. *Environmental Research*, 2014, 133: 260-265. DOI: 10.1016/j.envres.2014.06.002.
- [40] CARDUCCI A, DONZELLI G, CIONI L, et al. Quantitative

- microbial risk assessment in occupational settings applied to the airborne human adenovirus infection [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(7): 733. DOI: 10.3390/ijerph13070733.
- [41] HASAN P, PASALARI A, ANGILA M, et al. Assessment of airborne enteric viruses emitted from wastewater treatment plant; Atmospheric dispersion model, quantitative microbial risk assessment, disease burden [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 464–473. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.07.010.
- [42] COURAULT D, ALBERT I, PERELLE S, et al. Assessment and risk modeling of airborne enteric viruses emitted from wastewater reused for irrigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 512 – 526. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.105.
- [43] UHRBRAND K, SCHULTZ A, KOIVISTO A, et al. Assessment of airborne bacteria and noroviruses in air emission from a new highly-advanced hospital wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2017, 112: 110 – 119. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.046.
- [44] LAHRICH S, LAGHRIB F, FARAHI A, et al. Review on the contamination of wastewater by COVID-19 virus; Impact and treatment [J]. *Science of the Total Environment*. 2021, 751: 142325. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142325.
- [45] JOHN D, ROSE J. Review of factors affecting microbial survival in groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(19): 7345–7356.
- [46] CASANOVA L, RUTALA W, WEBER D, et al. Survival of surrogate coronaviruses in water [J]. *Water Research*, 2009, 43(7): 1893–1898.
- [47] ZHAO Z, HOSSAIN M, JUNG S, et al. Survival of murine norovirus and hepatitis a virus in bottled drinking water, strawberries, and oysters [J]. *Food Control*, 2022, 133: 108623. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108623.
- [48] IBRAHIM E, EL-LIETHY M, ABIA A, et al. Survival of *E. coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium*, HAAdV-2 and MNV-1 in river water under dark conditions and varying storage temperatures [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 648: 1297 – 1304. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.275.
- [49] FONGAROA G, KUNZ A, MAGRI M, et al. Settling and survival profile of enteric pathogens in the swine effluent for water reuse purpose [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2016, 219(8): 883–889.
- [50] SAKODA A, SAKAI Y, HAYAKAWA K, et al. Adsorption of viruses in water environment onto solid surfaces [J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(7): 107–114.
- [51] EFSTRATIOU M, TZORAKI O. Coronavirus survival on beach sand; Sun vs COVID-19 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112270. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112270.
- [52] JOHNSON D, ENRIQUEZ C, PEPPER I, et al. Survival of *Giardia*, *Cryptosporidium*, poliovirus and *Salmonella* in marine waters [J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(11/12): 261–268. DOI: 10.1016/S0273-1223(97)00270-9.
- [53] MENG Q, GERBA C. Comparative inactivation of enteric adenoviruses, poliovirus and coliphages by ultraviolet irradiation [J]. *Water Research*, 1996, 30(11): 2665–2668.
- [54] AGNIESZKA M, KARWOWSKA E, ANDRZEJ R, et al. Influence of bacteria adsorption on zeta potential of Al₂O₃ and Al₂O₃/Ag nanoparticles in electrolyte and drinking water environment studied by means of zeta potential [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 271: 225–233. DOI:10.1016/j.surfcoat.2014.12.015.
- [55] CHIN A, POON L. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions-authors' reply [J]. *The Lancet Microbe*, 2020, 1(4): e146. DOI: 10.1016/S2666-5247(20)30095-1.
- [56] BOOTH C, FROST G. Survival of a norovirus surrogate on surfaces in synthetic gastric fluid [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2020, 105(3): 468–473.
- [57] OGATA N, SHIBATA T. Protective effect of low-concentration chlorine dioxide gas against influenza A virus infection [J]. *Journal of General Virology*, 2008, 89(1): 60–67.
- [58] HATANAKA N, XU B, YASUGI M, et al. Chlorine dioxide is a more potent antiviral agent against SARS-CoV-2 than sodium hypochlorite [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2021, 118: 20–26. DOI: 10.1016/j.jhin.2021.09.006.
- [59] OREL I, GRAF H, RIOU P. Decontamination efficacy of sodium hypochlorite solutions for poliovirus [J]. *Biologicals*, 2020, 67: 75–80. DOI: 10.1016/j.biologicals.2020.07.007.
- [60] VASICKOVA I, PAVLIK M, VERANI A. Issues concerning survival of viruses on surfaces [J]. *Food and Environmental Virology*, 2010, 2: 24 – 34. DOI: 10.1007/s12560-010-9025-6.
- [61] KIM T, UNNO H. The roles of microbes in the removal and inactivation of viruses in a biological wastewater treatment system [J]. *Water Science & Technology*, 1996, 33(10/11): 243–250. DOI: 10.1016/0273-1223(96)00426-X.
- [62] BETTAREL Y, SIME-NGANDO T, BOUVY M, et al. Low consumption of virus-sized particles by heterotrophic nanoflagellates in two lakes of the french massif central [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2005, 39(2): 205–209.
- [63] SCHEID P, SCHWARZENBERGER R. *Acanthamoeba* spp. as vehicle and reservoir of adenoviruses [J]. *Parasitology Research*, 2012, 111(1): 479–485.
- [64] BATTISTINI R, MARCUCCI E, VERANI M, et al. Ciliate-adenovirus interactions in experimental co-cultures of *Euplotes octocarinatus* and in wastewater environment [J]. *European Journal of Protistology*, 2013, 49(3): 381–388.
- [65] RAMES E, KOIKO A, STRATTON H, et al. Technical aspects

- of using human adenovirus as a viral water quality indicator [J]. *Water Research*, 2016, 96: 308–326. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.042.
- [66] JOTHIKUMAR N, KHANNA P, PAULMURUGAN R, et al. A simple device for the concentration and detection of enterovirus, hepatitis e virus and rotavirus from water samples by reverse transcription-polymerase chain reaction [J]. *Journal of Virological Methods*, 1995, 55(3): 401–415.
- [67] BERG G, DAHLING D, BERMAN D. Recovery of small quantities of viruses from clean waters on cellulose nitrate membrane filters [J]. *Applied Microbiology*, 1971, 22(4): 608–614.
- [68] 冯微宏,肖勇,钱燕华,等. 两种水源性诺如病毒富集方法的比较[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(6): 1549–1554.
FENG W H, XIAO Y, QIAN Y H, et al. Comparison of two concentration methods for norovirus in water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(6): 1549–1554.
- [69] BRINKMAN N, HAFFLER T, CASHDOLLAR J, et al. Evaluation of methods using celite to concentrate norovirus, adenovirus and enterovirus from wastewater [J]. *Journal of Virological Methods*, 2013, 193(1): 140–146.
- [70] VILAGINES P, SARRETTE B, HUSSON G, et al. Glass wool for virus concentration at ambient water pH level [J]. *Water Science and Technology*, 1993, 27: 3–4. DOI: 10.2166/wst.1993.0364.
- [71] MENUT C, BERIL C, SCHWARTZBROD L. Poliovirus recovery from tap water after concentration over glass powder and glass wool [J]. *Water Science and Technology*, 1993, 27(3/4): 291–294. DOI: 10.1016/0043-1354(93)90211-Y.
- [72] 金萍,石利民,张韶华,等. 水中诺如病毒的两种富集方法的效果比较[J]. *医学动物防制*, 2021, 37(12): 1215–1219.
JIN P, SHI L M, ZHANG S H, et al. Comparison on effects of two enrichment methods for norovirus in water [J]. *Journal of Medical Pest Control*, 2021, 37(12): 1215–1219.
- [73] 张崇森. 水环境中肠道病原体的 PCR 检测方法与健康风险评估研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
ZHANG C M. Study on the PCR detection method and health risk assessment of enteric pathogens in water environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [74] MIGNOTTE, MAUL A, SCHWARTZBROD L. Comparative study of techniques used to recover viruses from residual urban sludge [J]. *Journal of Virological Methods*, 1999, 78: 1–2. DOI: 10.1016/s0166-0934(98)00161-x.
- [75] MAINELIS G. Bioaerosol sampling: Classical approaches, advances, and perspectives [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2020, 54(5): 496–519.
- [76] 卢维来,许添顺,汤晖,等. 微生物气溶胶检测技术的研究进展[J]. *微生物学报*, 2022, 62(4): 1345–1361.
LU W L, XU T S, TANG H, et al. Technologies for microbial aerosol sampling and identification: A review and current perspective [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(4): 1345–1361.
- [77] HADDRELL A, THOMAS R. Aerobiology: Experimental considerations, observations, and future tools [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2017, 83(17): 00809–17. DOI: 10.1128/AEM.00809–17.
- [78] CANH V D, TORII S, FURUMAI H, et al. Application of capsid integrity (RT-) qPCR to assessing occurrence of intact viruses in surface water and tap water in Japan [J]. *Water Research*, 2021, 189: 116674. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116674.
- [79] 杨月琴. 水中病毒的浓缩检测与处理技术研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(5): 1220–1223.
YANG Y Q. Research development of viruses concentration detection and treatment in aquatic environment [J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(5): 1220–1223.
- [80] SONYA K, SUSAN P, TONY M, et al. Utility of QMRA to compare health risks associated with alternative urban sewer overflow management strategies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110309. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110309.
- [81] HASAN P, HESAM A, ANGILA A, et al. Assessment of rotavirus and norovirus emitted from water spray park: QMRA, diseases burden and sensitivity analysis [J]. *Heliyon*, 2022, 8(10): e10957. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10957.
- [82] MAN H, BERG H, LEENEN E, et al. Quantitative assessment of infection risk from exposure to waterborne pathogens in urban floodwater [J]. *Water Research*, 2014, 48: 90–99. DOI: 10.1016/j.watres.2013.09.022.
- [83] MESSNER M, BERGER P, NAPPIER S. Fractional poisson—A simple dose-response model for human norovirus [J]. *Risk Analysis*, 2014, 34(10): 1820–1829.
- [84] TEUNIS P, RUTJES S, WESTRELL T, et al. Characterization of drinking water treatment for virus risk assessment [J]. *Water Research*, 2009, 43(2): 395–404.
- [85] TIMM C, LUTHER S, JURZIK L, et al. Applying QMRA and DALY to assess health risks from river bathing [J]. *Hygiene & Environmental Health*, 2016, 219:681–692. DOI: 10.1016/j.ijheh.2016.07.017.
- [86] 郑祥,亓畅,陈惠鑫,等. 再生水补给型水体中病原微生物的来源,归宿及其风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(6): 1–11.
ZHENG X, QI C, CHEN H X, et al. The source, fate and risk analyses of pathogenic microorganisms in the water bodies fed by reclaimed water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(6): 1–11.

(下转第 118 页)

污水处理厂的优化设计和调度,提高设计成果的针对性和合理性,可以用于出水水质的超标风险分析,提高分析成果的科学性。

参考文献

- [1] 孙迎雪, 吴光学, 胡洪营, 等. 基于达标保证率的昆明市污水处理厂出水水质评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(6): 1113-1119.
SUN Y X, WU G X, HU H Y, et al. Assessment of effluent quality of wastewater treatment plant in Kunming based on the percentile of standard compliance method [J]. China Environmental Science, 2013, 33(6): 1113-1119.
- [2] 王立华, 陈理达, 吴国永, 等. 运用数理统计方法验证水利工程施工单位工程质量自检的可靠性[J]. 中国农村水利水电, 2008(1): 85-88.
WANG L H, CHEN L D, WU G Y, et al. Reliability verification of construction enterprise self-test of water conservancy project with statistics [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(1): 85-88.
- [3] 林丽文, 杨东来. 数理统计在工程质量控制中的应用[J]. 公路交通技术, 2009(4): 66-68.
LIN L W, YANG D L. Application of mathematical statistics in quality control of projects [J]. Technology of Highway and Transport, 2009(4): 66-68.
- [4] OLIVEIRA S C, SPERLING V M. Reliability analysis of wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2008, 42(4/5): 1182-1194. DOI: 10.1016/j.watres.2007.09.001.
- [5] 刘成军, 孟涛. 城市污水处理厂进水水质分布类型判别及应用[J]. 环境工程, 2014, 32(s1): 87-90.
LIU C J, MENG T. Distribution test and application of influent quality data of municipal wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(s1): 87-90.
- [6] 仇付国, 王敏. 城市污水中污染物监测与分布规律探讨[J]. 给水排水, 2009, 35(s2): 108-111.
QIU F G, WANG M. Research on statistical distribution of pollutants in municipal wastewater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(s2): 108-111.
- [7] 王卿卿. 城市污水处理厂设计进水水质确定方法的试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
WANG Q Q. The analysis and determination of the influent wastewater quality of the municipal wastewater treatment plant [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [8] 曾木海. 污水处理厂污水深度处理工艺综述与案例分析 [J]. 净水技术, 2021, 40(5): 75-80, 102.
ZENG M H. Overview and case analysis on advanced treatment process in wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(5): 75-80, 102.
- [87] GAUNT E, HARVALA H, MCINTYRE C, et al. Disease burden of the most commonly detected respiratory viruses in hospitalized patients calculated using the disability adjusted life year (DALY) model [J]. Journal of Clinical Virology, 2011, 52(3): 215-221.
- [88] 刘言正, 王晓昌, 陈荣. DALY 在城市污水再生回用健康风险评估中的应用 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(1): 97-100.
LIU Y Z, WANG X C, CHEN R. Application of disability adjusted life year in health risk assessment of municipal sewage reuse [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(1): 97-100.
- [89] ELOY G, MARTA R, GERTJAN M, et al. Quantitative risk assessment of norovirus and adenovirus for the use of reclaimed water to irrigate lettuce in Catalonia [J]. Water Research, 2019, 153: 91-99. DOI: 10.1016/j.watres.2018.12.070.
- [90] HELENA S, XAVIER F, NATALIA T, et al. Health risks derived from consumption of lettuces irrigated with tertiary effluent containing norovirus [J]. Food Research International, 2015, 68: 70-77. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.08.018.
- [91] RACHMADI A, AZIZKHAN Z, HONG P. Enteric virus in reclaimed water from treatment plants with different multi-barrier strategies: Trade-off assessment in treatment extent and risks [J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 146039. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146039.
- [92] FUHRMANN S, WINKLER M S, STALDER M, et al. Disease burden due to gastrointestinal pathogens in a wastewater system in Kampala, Uganda [J]. Microbial Risk Analysis, 2016, 4: 16-28. DOI: 10.1016/j.mran.2016.11.003.