

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.001

城市污水系统微生物气溶胶产生及其安全防控策略

刘艳臣, 戚祥, 董骞, 左志强, 邱勇, 梁鹏, 黄霞
(清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 针对城市污水收集、传输与处理过程中存在高致病性病原微生物通过气溶胶途径传播的风险, 总结分析了建筑排水、市政污水管网、污水处理厂全流程的微生物气溶胶产生特点及其潜在病原微生物传播风险。从气溶胶病原微生物排放浓度水平、病原微生物种类及其传播过程等方面, 解析了污水系统全过程的微生物气溶胶产生特征及其传播风险情况。提出了针对污水系统微生物气溶胶传播风险安全防控的策略, 可为污水系统微生物气溶胶产生的病原微生物传播风险认识与安全防控提供支持。

关键词: 污水系统; 病原微生物; 微生物气溶胶; 风险防控

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)22-0001-07

Microbial Aerosol Generation in Sewerage System and Its Prevention and Control Strategies

LIU Yan-chen, QI Xiang, DONG Qian, ZUO Zhi-qiang, QIU Yong,
LIANG Peng, HUANG Xia

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Regarding the transmission risk of highly pathogenic microorganisms in aerosols generated from sewerage system, the microbial aerosol generation characteristics and its potential pathogens transmission risk in building drainages, drainage pipe networks and sewage treatment plants were summarized in this paper. The generation characteristics and the spread risk of microbial aerosols in the whole sewerage system were analyzed from the aspects of emission concentration level of aerosol pathogens, pathogens species and its transmission process. The prevention and control strategies on microbial aerosol transmission risk in sewerage system are proposed, which helps to understand and prevent the spread risk of pathogens from microbial aerosols in sewerage systems.

Key words: sewerage system; pathogens; microbial aerosol; risk control

排水系统涵盖建筑排水(马桶等受水器具、建筑排水管道和化粪池等附属排水构筑物)、市政排水管网(雨水和污水管网)、污水处理厂等单元,其中污水收集、输送及处理过程承担卫生防疫、污水

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(52091543); 清华大学春风基金资助项目(20213080026); 中国工程院应急专项(2020-ZD-15)

净化及水与物质资源循环利用等功能。新冠肺炎疫情(COVID-19)疫情暴发,排水系统成为备受关注的病毒传播潜在风险点,而COVID-19传播感染途径主要为飞沫和接触传播,因此排水系统的气溶胶产生及潜在病毒传播风险途径的防控成为关切的要点。

1 排水系统微生物气溶胶的产生特征

气溶胶是指固体或液体微粒稳定地悬浮于气体介质中所形成的分散体系,微粒粒径为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 。当微粒含有细菌、真菌、病毒等微生物时称之为微生物气溶胶。由于微生物气溶胶中可能含有病原微生物,因此对人类健康存在一定风险^[1-2]。排水系统具有开放性和运行复杂等特征,在系统运行过程中存在病毒随气溶胶传播的潜在风险,比如确诊患者、疑似病例的粪便排泄物在排泄和输送过程中产生的气溶胶可能会促进病原微生物的扩散和传播。建筑排水马桶冲水和排水立管跌水、市政污水管道检查井跌水、溢流口污水溢流、污水泵站提升等过程均有产生气溶胶的潜在风险。污水处理厂的预处理单元、曝气区域、剩余污泥脱水过程等环节均会因水流扰动或曝气等作用,促进气溶胶的产生,存在污水中病原微生物向空气扩散的潜在可能。污水处理厂出水经过深度处理和消毒后,虽然也存在跌水过程产生气溶胶的情况,但因出水中病原微生物含量相对较低,能够引发病原微生物向空气扩散的风险则相对降低。排水系统这些扰动过程会导致富含微生物的颗粒进入空气,形成微生物气溶胶(见图1)。

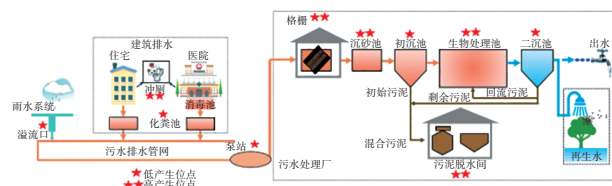


图1 污水系统微生物气溶胶的主要产生环节

Fig.1 Main points of microbial aerosol generation in sewerage system

排水系统中污水输送及处理包含三相混合过程,导致病毒有可能在气、液、固三相中进行转移扩散。在污水排放过程中,病毒的主要来源为粪便和尿液等人体排泄物,主要类型是肠道类病毒,如诺如病毒、腺病毒等无包膜病毒,但相关的研究也表明,高传染性呼吸道病毒也会通过粪便、尿液进入

排水系统,如SARS-CoV和SARS-CoV-2等冠状病毒^[3]。污水收集、污水处理、污泥处理等过程都可能产生包含病毒的气溶胶,污水系统的正常运行过程无法避免气溶胶的产生与释放。污水源头排放过程的病毒浓度相对较高,液相的病毒浓度大多分布在 $10^{10} \sim 10^{14} \text{ GC/m}^3$ ^[3]。排水过程产生的气溶胶中微生物浓度一般为 $10^2 \sim 10^4 \text{ CFU/m}^3$ ^[4],而进入污水处理厂后的一级预处理(格栅间、曝气沉砂池、初沉池)、二级生化处理(主要是曝气池、二沉池和污泥脱水间)以及再生水利用(如绿化喷洒)过程中会产生微生物气溶胶,其中格栅间、曝气池上方以及污泥脱水间的气溶胶浓度最高,浓度数量级分别为 10^3 、 10^4 和 $10^3 \sim 10^4 \text{ CFU/m}^3$ 。携带病毒的气溶胶存在较远距离传播扩散的可能,这也给排水系统气溶胶途径的病毒传播扩散的阻控带来了挑战。

2 排水过程微生物气溶胶产生及其特性

2.1 建筑排水过程

一般情况下,人类粪便或者尿液中存在大量的病毒,在人体排泄物(尿液等)内检出的病毒数量大多在 $10^{11} \sim 10^{14} \text{ GC/m}^3$ 的浓度水平。比如,尿液中的包膜类SARS-CoV病毒含量约为 10^{10} GC/m^3 ,非包膜多瘤病毒含量约为 $10^{11} \sim 10^{15} \text{ GC/m}^3$;粪便中的包膜类SARS-CoV病毒检出量约为 10^{10} GC/g ,非包膜类如犬细小病毒约 $10^3 \sim 10^9 \text{ GC/g}$ 。但也应注意到,并非粪便和尿液排出的所有病毒都具有致病性,而是传染性疾病患者的尿液和粪便含有高致病风险病毒的概率很大。

建筑排水过程的微生物气溶胶主要由污水的扰动产生。目前已有研究表明,在如厕冲水时马桶中的瞬间气旋会将大量液滴或者气溶胶带到空气中,马桶每次冲水可产生 $10^5 \sim 10^7$ 个气溶胶颗粒^[5],虽然有报告提及液滴或气溶胶会随机附着携带不定量的无包膜病毒或包膜病毒^[6],然而试验研究表明,在马桶冲水过程产生的气溶胶中未能检测出(PFU检测方法)试验模拟投加(病毒液相初始浓度为 10^{13} PFU/m^3)的无包膜病毒(MS2)和包膜病毒(Phi6)^[5]。含致病性病毒的液滴或气溶胶进入空气后,较大的液滴或者气溶胶会较快沉降,而较小的气溶胶则会较长时间漂浮在空气中,在相对封闭的卫生间中,人们更容易吸入或接触到这类可能携带病原微生物的气溶胶。虽然新冠病毒感染患者的

粪便及尿液均可能携带新型冠状病毒,同时建筑排水设施产生的气溶胶也成为被公众怀疑的潜在传播途径,然而目前为止依然没有明确的患者案例证据表明马桶冲水过程产生的气溶胶可直接导致病毒的传播感染,同处一室的人员接触依然是更高风险的传播途径。

建筑排水系统除了卫生设备如压力冲水马桶外,排水立管中也会由于污水排入及跌落而产生较高浓度的微生物气溶胶。污水在建筑排水立管排放过程中会发生垂直跌落或者剧烈水平扰动,由此产生的含有病毒的微生物气溶胶,会随水流气流在排水管道、通风管道中输移。当室内排水管道水封因干涸而被破坏或者排水管道破损等情况发生时,都可能导致病原微生物的传播扩散。此外,排水立管顶部通风帽等处也可能会成为病毒扩散源。已有研究通过模拟建筑排水过程,证明在不同楼层住户排水管道水封被破坏条件下,马桶冲水过程产生的携带病原微生物的气溶胶能够实现跨层传播^[7],这说明建筑排水管道若发生气溶胶泄漏,则会带来病毒传播风险。但到目前为止,流行病学病例分析还未有明确证据证明建筑排水系统气溶胶传播途径的感染案例。对建筑排水气溶胶传播途径引起怀疑和推测的较早案例均来自香港,第一个是2003年香港公寓大楼严重急性呼吸系统综合征的大规模社区暴发事件,被广泛推测为由卫生间或排水立管气溶胶携带 SARS-CoV 病毒引起的扩散传播;第二个是2020年2月香港康美楼大厦出现同住大厦同一单元两例相隔10层新冠病毒感染者,同样在传播途径推测中将未完全密封的室内排气管作为病毒传播的可能途径。广州市疾病预防控制中心也于2020年6月12日公布了某城中村怀疑由于建筑排水立管破裂导致的新冠病毒传播案例。

2.2 市政排水管网污水输送过程

市政污水管道中病毒的浓度水平变化与季节变化、区域分布、人群特征均有关联性,一般取决于对应季节该地区或社区被感染患者的数量及感染者排出的病毒水平。人体排泄物经建筑排水系统排出后,一般会被稀释10~100倍,因此建筑排水单元排出的污水中病毒浓度一般为 $10^9 \sim 10^{12}$ GC/m³^[8]。基于感染性水平检测方法的病毒浓度以污水中肠病毒、腺病毒和轮状病毒的感染性检测结果为例,其检出浓度一般小于 10^7 感染单位/m³^[9]。粪便等人

体排泄物携带病毒经建筑排水系统排出后,一般经过化粪池单元的水解过程,悬浮于污水中的病毒可视为胶体特征微粒,多数病毒尤其是冠状病毒可吸附于其他悬浮胶体颗粒物表面。有研究对比了非包膜病毒与包膜病毒在污水沉积物(污泥)和不同材质管道表面的吸附情况,结果表明较高比例的包膜与非包膜病毒保持在液相悬浮状态(90%以上),在沉积物与管壁表面的吸附比例相对较低^[10]。这说明污水在市政管网输送过程中会保持较高的病毒浓度水平,加大了污水管网微生物气溶胶产生的健康风险威胁。

污水管网污水输送过程的气溶胶产生情况主要取决于污水流态扰动程度,正常运行的污水管网水面相对平稳,一般硫化氢等臭味物质扩散和气溶胶产生过程均相对较弱,而在一些流态扰动剧烈的运行节点如检查井跌水、溢流口污水溢流、污水泵站提升等管网节点位置,臭味物质的扩散和气溶胶的产生过程均较为显著^[11-12]。目前,针对污水管网产生的微生物气溶胶中病毒含量的研究还相对较少。有研究者通过实验室模拟了污水管网汇水节点微生物气溶胶的产生速率,结果表明,管网汇水过程微生物气溶胶的产生速率为 10^5 个/min,而气溶胶中非包膜病毒浓度是包膜病毒的200倍(病毒液相初始浓度均为 10^{13} PFU/m³),其中包膜病毒的气溶胶检出浓度为 10^2 PFU/m³^[5],这说明非包膜病毒更容易随着气溶胶的产生过程进行扩散传播。进一步对比实际污水管网内气溶胶产生过程中不同病原微生物的检出浓度(最大值范围约为 $10^2 \sim 10^4$ CFU/m³)情况^[4],结果也同样表明不同类别病原微生物在气溶胶产生过程中的浓度水平有较大差异。这表明气溶胶产生过程的病毒等病原微生物浓度水平与病原微生物的结构种类有较大关系,当然也与病原微生物在污水液相中的原始浓度水平有关。由于不同病原微生物的试验条件和检测方法存在差异,现有结果还较难获得确切的直接对比关系。有研究者采用模型对污水管网业务工作人员吸入气溶胶的潜在健康风险进行了预测评估^[13],评估结果也说明需要加强污水管网日常业务人员的工作防护,以降低吸入气溶胶的风险。

3 污水处理过程微生物气溶胶产生及其特性

3.1 微生物气溶胶浓度及其影响因素

目前我国具有排污许可证的污水处理厂(站)

超过1万座,处理规模差异较大(每天几百吨至几百万吨)。采用相同污水处理工艺的污水处理厂规模越大,整体微生物气溶胶浓度越高^[14-16]。污水处理厂(站)的微生物气溶胶浓度主要受以下三方面因素的影响:

① 污水处理系统的活性污泥浓度

污水处理厂各工艺段水体中微生物含量以及微生物气溶胶浓度总结如表1所示。格栅间主要实现进水的大颗粒杂物的物理分离预处理,产生微生物气溶胶的微生物类型和浓度受进水特征的影响较大。下游生化处理过程存在活性污泥曝气,且生化池中微生物含量较高,因此产生的微生物气溶胶浓度提升约10倍。二沉池出水中微生物含量相对生化池明显减少,该区跌水导致的微生物气溶胶浓度降低到格栅间的1/10。尽管如此,目前尚未有直接证据表明污泥中微生物浓度和微生物气溶胶产生浓度相关,因此还需要开展细致深入的观测和研究。

表1 污水处理厂各工艺段水体中微生物含量、微生物气溶胶浓度及空间特性

Tab.1 Microbial concentration, microbial aerosol concentration and spatial characteristics in each process section of sewage treatment plant

CFU·m⁻³

项 目	水体中微生物浓度	微生物气溶胶浓度	空间特性
格栅进水	10 ⁷ ~ 10 ⁸ ^[17]	约 10 ³	多数封闭
沉砂池			开放
初沉池		10 ²	开放
生化池	10 ¹⁴ ~ 10 ¹⁵ ^[14]	约 10 ⁴	开放
二沉池出水		10 ²	开放
污泥脱水		10 ³ ~ 10 ⁴	封闭

② 曝气方式

污水处理系统的曝气过程(如气浮、曝气沉砂、生化曝气等)会产生大量的微生物气溶胶,曝气方式(机械曝气、气泡)和曝气量都会对微生物气溶胶产生造成影响。有研究分析了6座污水处理厂3种曝气方式(卧式滚筒、表面涡轮、气泡扩散)对微生物气溶胶产生的影响,发现:卧式滚筒(10³ ~ 10⁴ CFU/m³)>表面涡轮(10² ~ 10³ CFU/m³)>气泡扩散(小于10² CFU/m³)。膜生物反应器(MBR)的曝气量较高,产生的微生物气溶胶浓度也会较高。实验室

规模的研究显示,MBR中微生物气溶胶浓度数量级为10⁶ CFU/m³[反应器体积为12 mL,曝气速率为6 m³/(h·m²),HRT为6 h,封闭检测]^[18]。

③ 空间特性(开放、封闭)

表1显示,相对封闭或空气不流通环境中的微生物气溶胶浓度数量级整体高于开放空间(除生化池外)。有报道表明,污泥脱水间气相中微生物气溶胶浓度(9 282 CFU/m³)显著高于A²/O工艺曝气池(1 784 CFU/m³)^[19]。

此外,相关研究也表明,季节因素也会影响污水处理厂微生物气溶胶的产生和空间分布。一般而言,夏季产生的微生物气溶胶浓度(生化池为4 878 CFU/m³)比冬季(生化池为1 869 CFU/m³)高;在空间分布上,下风向的微生物气溶胶浓度远高于上风向^[15]。

3.2 微生物气溶胶中潜在致病微生物种类

污水处理过程产生的微生物气溶胶中的微生物种类较多(如细菌、真菌、病毒等)。Yang等^[12]对比A²/O和氧化沟,发现不同污水处理工艺产生的微生物气溶胶的微生物群落结构存在显著差异。研究^[14]已经发现微生物气溶胶含有人类健康风险微生物,主要包括病原菌、真菌和病毒等(见表2)。这些微生物可能通过呼吸道吸入、皮肤接触和摄入而感染人类(尤其是污水处理厂工作人员),并引起各种疾病如上呼吸道感染、痢疾等。

表2 污水处理厂微生物气溶胶中潜在致病微生物种类

Tab.2 Potential pathogenic microorganism species of microbial aerosol in WWTP

项目	种属	浓度水平
病原菌	丛毛单胞菌、施氏假单胞菌、克雷伯氏菌、沙门氏菌、弓形杆菌、孢杆菌、鼠疫杆菌等	
	肠杆菌	972 CFU/m ³
	金黄色酿脓葡萄球菌	403 CFU/m ³
	绿脓杆菌	53 CFU/m ³
真菌	假丝酵母菌(念珠菌)、红酵母菌、青霉菌和禾谷镰孢菌	
病毒	腺病毒(AdVs)	2.27×10 ⁶ GC/m ³
	诺如病毒(NoVs)	6.55×10 ² GC/m ³
	轮状病毒(RoVs)	48 个/m ³

从污水处理厂排放的微生物气溶胶中分离出的病原菌主要有:绿脓杆菌、丛毛单胞菌、施氏假单胞菌、克雷伯氏菌、沙门氏菌等^[20-22];肠杆菌、金黄色

酿脓葡萄球菌、绿脓杆菌的可培养浓度数量级范围约为 $10 \sim 10^3$ CFU/m³ (采用安德森六级采样器收集)。真菌类主要是枝孢菌,群落结构分析中占比较高的还有假丝酵母菌(念珠菌)、红酵母菌、青霉菌和禾谷镰孢菌。其中,假丝酵母菌和部分红酵母菌具有较高的人类致病性^[23]。

以往的研究手段大多基于实验室可培养微生物检测技术,很难检测出病毒的存在。随着现代DNA分析技术的不断提高,在微生物气溶胶中发现了一些过去未关注过的病毒,比如腺病毒、诺如病毒、轮状病毒等^[24-26]。尽管现有研究还没有在污水厂微生物气溶胶中发现SARS、MERS和COVID-19等人类呼吸道致病和传染性病毒,但并不代表特殊时期这类病毒不会出现在污水处理厂微生物气溶胶中。这需要未来进一步的研究和观察。

4 风险分析及防控策略

4.1 风险分析

参照世界卫生组织(WHO)认可的定量微生物风险评估(QMRA)框架,气溶胶病毒传播风险评估过程需要识别病毒危害、暴露途径、剂量-人体反应关系和风险表征。与普通人群相比,污水管网及污水处理系统的工作人员具有更高的生物气溶胶接触风险。有研究发现,污水处理厂工人具有甲型肝炎抗体的比例偏高,说明污水系统产生的气溶胶可能会对工人健康产生危害^[27]。

一般在封闭空间或者较近的传播距离内,气溶胶不断积累致使病原微生物处于相对较高的浓度水平,若同时处于湿度平衡状态,细菌或病毒则能保持较长的存活时间,从而增大密闭空间中暴露人群的传播风险,因此需要重视密闭空间及其附近位点的生物气溶胶产生的风险防控。

气溶胶携带病毒的长距离传播风险同样需要受到关注,大部分微生物气溶胶颗粒动力学直径 $< 4.7 \mu\text{m}$,很有可能会随风迁移几百米或更远距离,细小颗粒极易被吸入肺中,给免疫力较低的工人和附近居民造成潜在健康威胁,也可能造成人体过敏反应。

SARS-CoV-2与SARS-CoV均为冠状病毒,两者在传播风险方面包括致病性、传染性及传染途径等均较为相似,近50%的新冠肺炎患者粪便及尿液中可检出新冠病毒。在重点污水排放源头得到有

效消杀管控的前提下,一般污水管网和污水处理厂的新 coronavirus 浓度水平会相对较低,而污水环境中包膜病毒的可存活情况一般也低于非包膜病毒。已有研究表明,污水气溶胶生成过程中包膜病毒扩散速率也低于非包膜病毒,因此在含冠状病毒污水排放源头得到有效管控的前提下,污水管网和污水处理厂新 coronavirus 微生物气溶胶的传播暴露风险相对较低。

截至目前,尚未有明确通过污水系统内污水-生物气溶胶传播途径的新冠患者确诊病例的流行病学报道。但是,目前对污水中冠状病毒的实际存活能力和可感染活性均还未知,污水产生的微生物气溶胶中的新冠病毒实际浓度水平和可感染活性情况也尚未有报道。鉴于冠状病毒依然在污水环境中难于实现分离、回收和检测,已有的少量可参照研究结果还存在一定不确定性,因此,在污水排放和处理过程中依然存在新冠病毒随气溶胶产生过程进行传播的可能,需要十分重视污水系统微生物气溶胶产生与传播过程的新冠病毒风险防控。

4.2 风险防控策略建议

针对污水系统微生物气溶胶产生过程的高风险病原微生物传播风险防控,需要根据不同类别病原微生物的致病风险和传播途径采取科学举措和精准施控,在充分保障污水系统稳定运行和从业人员安全防护的前提下,做到适度安全防控。

① 加强含有高风险病原微生物污水排放源头的消杀管控,最大限度地降低污水排放源头的高风险病原微生物传播风险。传染病患者集中诊疗隔离场所需强化排水消毒,病例多发小区等场所也需在高发时段内针对排放污水采取临时强化消毒措施;新发病例或疑似病例所住楼房排水立管,应在发现病例后的第一时间进行消毒处理;居家隔离疑似患者规范使用冲水马桶,封盖冲水过程可在马桶内投入适量消毒液或消毒氯片;疫情期间居民住户每日检查室内受水器具排水口、地漏等的水封状况,小区物业定期检查建筑室外排水、通气管路密封状况,及时修复破损。

② 保障污水系统安全稳定运行,降低运行过程微生物气溶胶的产生水平。污水管网保持相对较低的安全水位运行,确保居住小区、医院等重点防控区域排水通畅、污水管不冒溢,确保排水管网溢流口不发生溢流事件;污水泵站保持平稳运行,

泵站运行控制在安全液位和水量波动区间;污水管网明显恶臭逸散点可及时进行窨井盖通气孔临时封盖,污水泵站、污水处理厂内已具备除臭系统的应完善臭气处理运行系统,确保产生的臭气经抽吸及多级处理后安全排放;有条件的医院污水处理设施宜采用全密闭(微负压)运行,设置必要的气溶胶消毒过程。

③ 加强污水系统从业人员的安全防护,严格管理排水泵站密闭空间,加强面向公众的安全宣传警示。禁止非工作人员、无防护措施的工作人员接近密闭空间;在污水泵站和污水厂内所有可能接触污水、栅渣及其废液、沉砂池的排砂、污泥脱水机房、污泥堆放等微生物气溶胶暴露风险较高的生产区域或场所,应加强日常清扫和消杀;污水系统从业人员日常业务行为应加强安全防护,避免直接接触污水或吸入微生物气溶胶;在管网污水溢流口等微生物气溶胶产生风险点做好面向公众的安全宣传与警示。

5 结论与建议

在污水管网和污水处理设施的运行过程中,存在多个微生物气溶胶产生和扩散的场景。污水微生物气溶胶产生过程受到污水流态扰动条件、病原微生物种类、污水病原微生物浓度水平等因素的综合影响。针对污水系统微生物气溶胶产生过程的风险防控,需要根据不同类别病原微生物的致病风险和传播途径采取科学举措和精准施控。未来需要针对污水系统全流程的气溶胶产生与扩散速率、气溶胶载体携带病毒的种类和浓度、新型冠状病毒等高危病原微生物在污水和气溶胶中的赋存状态及其可感染活性等方面开展深入研究工作。

参考文献:

- [1] STELLACCI P, LIBERTI L, NOTARNICOLA M, *et al.* Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants: a case study. I. estimating odour emission impact [J]. *Desalination*, 2010, 253(1/3): 51-56.
- [2] STELLACCI P, LIBERTI L, NOTARNICOLA M, *et al.* Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants: a case study. II. estimating airborne biological hazard [J]. *Desalination*, 2010, 253(1/3): 106-111.
- [3] WIGGINTON K R, YE Y, ELLENBERG R M. Emerging investigators series: the source and fate of pandemic viruses in the urban water scycle [J]. *Environmental Science (Water Research & Technology)*, 2015, 1(6):735-746.
- [4] HAAS D, UNTEREGGER M, HABIB J, *et al.* Exposure to bioaerosol from sewage systems [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2010, 207(1):49-56.
- [5] KAISEN L, LINSEY C M. Aerosolization of ebola virus surrogates in wastewater systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(5):2669-2675.
- [6] CHATTOPADHYAY S, TAFT S. Exposure Pathways to High-consequence Pathogens in the Wastewater Collection and Treatment Systems [R]. Washington: US EPA, 2018.
- [7] MICHAEL G, THOMAS J A, DAVID A K, *et al.* Pathogen cross-transmission via building sanitary plumbing systems in a full scale pilot test-rig [J]. *PloS One*, 2017, 2:1-13.
- [8] ZHANG C M, XU L M, XU P C, *et al.* Elimination of viruses from domestic wastewater: requirements and technologies [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2016, 32(4):69.
- [9] HEWITT J, LEONARD M, GREENING G E, *et al.* Influence of wastewater treatment process and the population size on human virus profiles in wastewater [J]. *Water Research*, 2011, 45(18): 6267-6276.
- [10] LEE M T, PRUDEN A, MARR L C. Partitioning of viruses in wastewater systems and potential for aerosolization [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2016, 3: 210-215.
- [11] ZUO Z, CHANG J, LU Z, *et al.* Hydrogen sulfide generation and emission in urban sanitary sewer in China: what factor plays the critical role? [J]. *Environment Science (Water Research & Technology)*, 2019, 5:839-848.
- [12] YANG Z, ZHU D, YU T, *et al.* Case study of sulfide generation and emission in sanitary sewer with drop structures and pump station [J]. *Water Science and Technology*, 2019, 79(9):1685-1694.
- [13] HAAS C N, RYCROFT T, BIBBY K, *et al.* Risks from ebolavirus discharge from hospitals to sewer workers [J]. *Water Environmental Research*, 2017, 89(4): 357-368.
- [14] HAN Y, YANG T, YAN X, *et al.* Effect of aeration mode on aerosol characteristics from the same wastewater

- treatment plant [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115324.
- [15] YANG K, LI L, WANG Y, *et al.* Emission level, particle size and exposure risks of airborne bacteria from the oxidation ditch for seven months observation [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(6): 1803–1811.
- [16] YANG K, LI L, WANG Y, *et al.* Airborne bacteria in a wastewater treatment plant: emission characterization, source analysis and health risk assessment [J]. *Water Research*, 2019, 149: 596–606.
- [17] 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.
- [18] NOH J H, CHOI H, KIM H Y, *et al.* Reducing bacterial aerosol emissions from membrane bioreactors: the impact of SRT and the addition of PAC and calcium [J]. *Water Research*, 2019, 156: 58–70.
- [19] 高敏, 李琳, 刘俊新. 典型城市污水处理工艺微生物气溶胶逸散研究 [J]. *给水排水*, 2010, 36(9): 146–150.
- GAO Min, LI Lin, LIU Junxin. Dissipation of microbial aerosols from typical municipal wastewater processes [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(9): 146–150(in Chinese).
- [20] GANGAMMA S, PATIL R S, MUKHERJI S. Characterization and proinflammatory response of airborne biological particles from wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(8): 3282–3287.
- [21] GOTKOWSKA-PŁACHTA A, FILIPKOWSKA Z, KORZENIEWSKA E, *et al.* Airborne microorganisms emitted from wastewater treatment plant treating domestic wastewater and meat processing industry wastes [J]. *CLEAN – Soil Air Water*, 2013, 41(5): 429–436.
- [22] DONG L M, ZHOU L T, ZHANG X Y, *et al.* Bioaerosol emissions and detection of airborne antibiotic resistance genes from a wastewater treatment plant [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 124: 404–412.
- [23] KOWALSKI M, WOLANY J, PASTUSZKA J S, *et al.* Characteristics of airborne bacteria and fungi in some polish wastewater treatment plants [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, 14(10): 2181–2192.
- [24] UHRBRAND K, SCHULTZ A C, KOIVISTO A J, *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.
- [25] PASALARI H, ATAEL-PIRKOOR A, AMINIKHAH 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.
- [26] MASCLAUX F G, HOTZ P, GASHI D, *et al.* Assessment of airborne virus contamination in wastewater treatment plants [J]. *Environmental Research*, 2014, 133: 260–265.
- [27] LECHEVALLIER M W, MANSFIELD T J, GIBSON J M. Protecting wastewater workers from disease risks: personal protective equipment guidelines [J]. *Water Environmental Research*, 2020, 92(4): 524–533.
-
- 作者简介:刘艳臣(1980–),男,黑龙江兰西人,博士,副教授,研究方向为污水系统优化运行管理,发表文章70多篇,获得多个省部级奖项。
- E-mail:liangpeng@tsinghua.edu.cn
- 收稿日期:2020-04-14
- 修回日期:2020-05-07

(编辑:丁彩娟)