

城市排水系统微生物气溶胶检测评估方法及控制策略

顾敏燕

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:城市污水中含有各种致病微生物,城市排水系统作为污水输送和处理的基础设施,系统中微生物气溶胶的检测监测和健康风险评估具有重要意义。总结排水系统微生物气溶胶检测步骤和方法(采样点选择-富集技术-检测和监测技术)、健康风险评估方法和控制策略,能够为城市排水系统微生物气溶胶的检测监测和风险评估提供方法参考。

关键词:排水系统;微生物气溶胶;检测;评估;控制策略

中图分类号: TU992,X7

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)02-0173-06

0 引言

微生物气溶胶是悬浮在空气中的复杂胶体体系,至少包括细菌、真菌、病毒及其副产物、灰尘和液体等,可能引起各类传染病、急性中毒、过敏和癌症等,其中,呼吸道症状和肺部损伤最为常见^[1]。微生物气溶胶来源广泛,例如垃圾堆置或填埋厂、医院或实验室、畜禽养殖厂、城市排水系统等。其中,城市排水系统作为输送和处理污水的基础设施,具有系统环节多、影响范围大等特点,值得重点关注。城市污水中含有各种致病性病毒(例如 SARS-CoV-2)^[2]、耐多药细菌、真菌和其他微生物,因此在污水产生、输送和处理全过程中,任何环节导致污水中的病原微生物逸散至空气中,都可能导致显著的环境和健康风险,尤其是排水行业工作人员的职业健康。

随着微生物气溶胶关注度的提升,国内外研究者对微生物气溶胶的研究也逐步深入。微生物种类从早期的仅研究细菌^[3],发展到真菌和病毒;检测方法从培养计数法、染色计数法发展到生物传感器、PCR、高通测序法等;研究对象从仅针对污水处理厂,逐渐关注系统中其他环节,例如排水管网和污泥处理处置等;微生物气溶胶在污水和空气两相间的逸散和扩散影响因素及其机理逐渐明确^[4];微生物气溶胶的健康风险及评估方法逐步完善^[5];由此,提出了越来越多的微生物气溶胶控制技术和策略^[4]。

本文将全面总结国内外研究者针对城市排水系

统微生物气溶胶开展的研究,包括微生物气溶胶的采样方法、检测监测方法、气溶胶污染和健康风险分析,以及控制策略。本文旨在为城市排水系统运行中微生物气溶胶检测监测、风险防范提供参考。

1 微生物气溶胶检测

1.1 采样点选择

城市排水系统在污水产生、输送和处理全过程中产生职业健康风险的主要节点包括排水检查井、泵站、调蓄池和污水处理厂等公众或排水工作人员容易接触的地方。从接触频率上而言,各设施的工作人员巡检点为风险最大处;从污染浓度上而言,各排水设施微生物气溶胶浓度较高的点位为风险最大处。因此,为识别气溶胶风险较高的地方,研究者需要对排水系统各环节的相关点位进行微生物气溶胶的检测。

研究表明^[6-9],污水处理厂的不同处理单元对微生物气溶胶的产生具有显著差异,因此采样点通常分布在不同处理单元和厂界并设置相应的背景对照点。邱雄辉等人^[7]将采样点布置在采用奥贝尔氧化沟工艺污水处理厂的曝气沉砂池、氧化沟、终沉池、污泥脱水车间和出水口等5个污水处理单元以及厂区上风向100 m处的背景值点。张俊超^[10]将采样点布置在氧化沟工艺污水处理厂的格栅间上方、配水池上方、氧化沟下风向1 m、二沉池下风向1 m、污泥脱水间中间位置和厂门口距离出口2 m处,采样高度为1.3 m。孙强^[6]通过对比A²O工艺污水处理厂的污泥脱水间、格栅间、曝气池、二沉池、接触消毒间、初沉池、办公区等点位的微生物气溶胶浓度特征,选择3个浓度较高的采样点和1个对照点进行进一步实验,分别是污泥脱

收稿日期:2021-09-03

基金项目:上海城投(集团)有限公司科技创新计划项目(CTKY-ZDXM-2020-021-003)

作者简介:顾敏燕(1990—),女,博士,工程师,从事排水相关科研和咨询工作。

水间、格栅间、曝气池和附近湿地公园。Han 等人^[8]研究了北京、合肥、宜兴和广州的 9 个污水处理厂的微生物气溶胶,针对 A²O 工艺,选择了细格栅、厌氧池、好氧池、污泥脱水间和背景对照点作为采样点;针对 SBR 工艺选择细格栅、序批式反应器、污泥脱水间和背景对照点;针对氧化沟工艺,则选择细格栅、氧化沟反应池、污泥脱水间和背景对照点。

针对检查井、泵站和调蓄池目前尚缺乏相关研究。与污水处理厂不同,检查井、泵站和调蓄池通常占地不大,尤其是检查井。检查井微生物气溶胶风险主要产生在开盖检查时,因此采样点可设置在开盖状态下的井盖处。泵站的集水井和捞渣间分别因为贮存污水、捞渣设备直接接触污水可能导致气溶胶风险较大。此外,由于中控室 24 h 均有值班人员,因此中控室采样点也需要关注。

1.2 富集技术

微生物气溶胶采样的方法主要有自然沉降法和仪器采样法^[11],如表 1 所示。常用的仪器采样法包括撞击法、离心法、过滤法和静电沉降法等,均是通过外力作用将生物粒子收集到介质中,进而进行下一步培养或分析。由于排水系统微生物气溶胶十分复杂,涉及各类细菌、真菌、病毒。针对细菌,可选择的

方法较多,例如固体撞击法、液体冲击法、过滤法、离心法和静电法等。真菌可选择固体撞击法、冲击法、过滤法和离心法等。病毒气溶胶采集则可采用液体冲击法、过滤法、离心法(液体介质)、静电法和固体撞击法,但采用固体撞击法时应在琼脂表面涂抹水溶性黏质层^[12]。根据已有排水系统微生物气溶胶的研究报道,固体撞击法是目前最常用的细菌和真菌采集方式之一。邱雄辉等人^[7]采用 Andersen 六级撞击式采样器对西安某污水厂进行气溶胶采集,实现 0.65~7.0 μm 以上的六级尺寸粒子分别采集。同样的,杨唐等人^[13]也采用 Andersen 六级撞击式采样器对 3 座 A²O 工艺污水厂进行气溶胶采集。此外,也有部分研究采用过滤法。杨凯雄等人^[14]采用总悬浮颗粒物 TSP 采样器对长三角地区某污水厂(SBR)进行气溶胶采集,滤膜材质为玻璃纤维,实现 0.1~6 μm 范围内粒子的捕捉。针对病毒的富集,液体冲击法和过滤法使用较为广泛。Fannin 等人^[15]利用液体冲击式 LVS 采样器实现污水处理厂气溶胶肠道病毒富集。Myatt 等人^[16]利用过滤法和固体撞击法对低浓度呼吸道病毒进行富集,对比研究表明,过滤法结合 PCR 的检测方法比撞击式结合细胞培养的方法具有更高的病毒富集效率。

表 1 微生物气溶胶富集技术

富集方法	原理	部分采样器类型	优点	缺点
自然沉降法	根据奥梅梁斯基公式由落在平板上的菌落数推测空气中微生物含量	—	操作简单、经济	沉降量受颗粒大小影响,不够科学;采样效率低,难以测出粒径较小的微生物气溶胶;采样条件苛刻,需为静止无风状态
固体撞击法	微生物气溶胶粒子在获得足够的惯性后脱离气流,撞击在平板上	Andersen 采样器 WL 型采样器	采集粒子粒径范围宽,通常为 0.2~20 μm;采样效率高;生物失活率低;应用范围广 微生物气溶胶粒子分布均匀;采样效率高;采样装置与主机可分离	不适合压力敏感型微生物 噪声大;捕获范围小,6~20 μm,捕获率低
液体冲击法	微生物气溶胶粒子在获得足够的惯性后脱离气流冲入缓冲液,惯性较大的粒子被液体捕获	Porton 采样器	操作简单、经济、检测范围广;可用于脆弱微生物的采样;液体样本使微生物能长期保存	不适宜低温条件采样;低浓度的微生物采样效率低
离心法	空气高速旋转,气溶胶粒子在离心力作用下甩向边缘的采样介质被捕获	LWC-1 型采样器	结构简单、易携带、噪音小	较小粒子采样效率低;撞击叶片导致误差
气旋法	利用气流高速气旋时的惯性,使气流中的微生物粒子分离,被内壁上的循环冲洗采样液吸收	Bio-Guardian 型、Spin-Con 型、大流量旋风采样器	操作简单、尺寸紧凑、能耗低、可连续采样	容易被气流携带损失、微生物活性损失大
静电法	利用多种方法使微生物粒子带电荷,利用静电吸附原理,在电场作用下采集气溶胶粒子	LVS/10K	对较小粒子捕获率高、采集容量大	产生臭氧,降低微生物活性;不适宜空气湿度大;结构复杂,消毒和维护难度大
过滤法	微生物气溶胶粒子通过各种滤材时被阻留	—	低温采集率高,可长时间采集	滤膜易堵塞、采气量不稳定;微生物易被吹干致死

1.3 检测技术

排水系统各点位微生物气溶胶采集后, 需要进一步根据不同目的对微生物的种类、浓度或粒径进行检测。表 2 列举了部分常见微生物气溶胶检测方法及其原理和优缺点。检测方法根据测试目的选择, 还应与适宜的气溶胶采样方法搭配。细胞培养计数法是较常用的定量方法, 可与固体撞击法、液体冲击法或过滤法等气溶胶采集方法组合。杨凯雄等人^[14]利用过滤法进行气溶胶采集, 配合细胞培养计数法和高通测序法测定了污水处理厂气溶胶中的细菌浓度和种类; 杨唐等人^[13]和邱雄辉等人^[7]采用六级撞击式采样器进行气溶胶采集, 利用差别化的细胞培养计数法测定了污水处理厂气溶胶中细菌和真菌的浓度和粒径分布。Guzman 等人^[17]和 Williams 等人^[18]采用 BGM 细胞培养法分别测定了生污泥、消化后脱水污泥和堆肥污泥的肠道病毒浓度, 以及初沉污泥的腺病毒浓度。除了细胞培养计数法之外, 一些更先进的分子生物学技术和基因检测技术也逐渐运用到排水系统微生物的检测中。Monpoeho 等人^[19]、Prado 等人^[20]和 Albinana-Gimenez 等人^[21]利用 RT-PCR 法分别检测了初沉污泥、活性污泥、浓缩污泥和消化污泥的肠道病毒浓度, 活性污泥的轮状病毒, 生污泥和活

性污泥的腺病毒以及活性污泥的甲型肝炎病毒。Han 等人^[8]以过滤法采样配合高通测序法, 对 9 个污水处理厂中 95 种细菌和 22 种真菌进行了定性和定量检测。

2 微生物气溶胶监测

由于微生物气溶胶单次检测无法对排水系统工作人员或公众进行长期的警示和保护, 因此实时监测同样十分重要, 尤其针对长期暴露和气溶胶风险波动较大的点位。监测技术相比于检测技术要求更高, 需要满足 24 h 连续在线、不使用或者少使用耗材和试剂, 以及操作简单, 检测快速。表 2 中的部分气溶胶检测技术也具有作为监测手段的可行性, 例如生物传感器法、流式细胞计数法、QPCR 法和质谱法等, 但是需要开发相应的配套设备。以美国 TSI、美国 PMS、日本 Bioviaila 和中科院上海光学精密机械研究所为例, 目前国内外企业或研究机构开发了利用激光诱导空气中微生物粒子产生荧光的监测手段, 分辨率达到 1 个微生物粒子。此外, 美国和芬兰应用紫外技术诱导活微生物产生紫外荧光。可见, 在实时监测技术中, 激发生物荧光成为了目前的主要技术途径之一。

表 2 微生物气溶胶检测技术

检测方法	原理	优点	缺点	适用目的
细胞培养计数法	在特定培养基上培养样本, 获得群落后进行计数	可以采用选择性培养基对微生物种类进行区分	培养周期长; 依赖于微生物的可培养性; 结果准确性低。	定量
染色计数法	DAPI 染色后进行荧光镜检计数	操作简单	活细胞、死细胞和残核细胞均无差别检出	定量
PCR	对特定核苷酸片段进行扩增后, 通过凝胶电泳进行定性分性; 掺入放射性核素, 扫描标记后的光密度进行定量分析	特异性和灵敏度较高; 分析快速	间接测定 PCR 终产物, 定量不准确; 无法说明微生物的活性	定性 / 半定量
QPCR	实时检测扩增反应中的循环产物荧光信号	实现对样本初始物定量和定性; 检测快, 操作简单、安全; 特异性探针, 准确性高; 灵敏度大幅提高	技术成熟度尚低	定性 / 定量
基因芯片	应用已知核酸序列作为探针与互补的靶核苷酸序列杂交, 通过检测每个探针分子的杂交信号强度, 进而获取样品分子的数量和序列信息 ^[22]	特异性高、灵敏度高; 可实现样品高通量、并行检测; 测试快速	需要扩增	定性 / 定量
高通量测序法	通过测序平台进行测序后, 进行生物信息学分析或病原数据库比对, 得到微生物检出序列数、基因组覆盖度、检测深度和属种丰度等数据	通量高; 准确率高; 更低检测限; 不依赖于已知核酸序列, 无需特殊探针设计	测试和分析方法对结果影响较大; 时效性较低	定性 / 定量
生物传感器	由固定化的生物敏感材料作为识别元件, 通过转换器 and 放大器转化为电信号	成本低、灵敏度高、选择性高; 快速; 能检测具有多个生物信号识别位点的蛋白质毒素和病原体	不适用于浓度低、杂质多的条件	定性 / 定量
流通式血球计数法	用荧光染料染色后, 利用流通式血球计数仪计数	灵敏度高于一一般荧光显微镜, 抗干扰能力强	无法区分微生物活性	定量
电子显微镜	根据电镜下病毒形态结构特征进行判断	直观、快速	一般用于病毒检测	定性
质谱分析法	分析电离分子的质荷比对分子进行定性定量分析	超高灵敏度、浓度范围大; 对大多数物质都能响应	杂质对灵敏度影响大; 难以分析未知微生物	定性 / 定量

3 微生物气溶胶污染解析和健康风险分析

3.1 粒径、浓度和种属解析

在通过以上方法获得数据的基础上,对其展开深入的数据解析是风险分析的基础。在粒径方面,研究表明,尺寸小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物可以进入鼻腔、小于 $7\text{ }\mu\text{m}$ 则可以进入咽喉,而小于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物可深入肺泡并沉积,加入血液循环系统^[23]。此外,粒径越小则活性更强,寿命也越长,小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶颗粒可在大气中滞留 10 年以上。因此,微生物气溶胶粒径分析是气溶胶检测中重要的部分。固体碰撞法通常使用的 Andersen 六级撞击式采样器具有 6 级筛孔,可分别采集不同粒径的气溶胶粒子,1 级: $\geq 7\text{ }\mu\text{m}$, 2 级: $4.7\sim 7\text{ }\mu\text{m}$, 3 级: $3.3\sim 4.7\text{ }\mu\text{m}$, 4 级: $2.1\sim 3.3\text{ }\mu\text{m}$, 5 级: $1.1\sim 2.1\text{ }\mu\text{m}$, 6 级: $0.65\sim 1.1\text{ }\mu\text{m}$ 。6 级采样粒径分别针对 1 级不可进入人体、2 级进入咽喉、3 级进入气管和支气管、4 级进入第二支气管、5 级进入端支气管、6 级进入肺泡。Andersen 八级撞击式采样器也是同理。此外,光学显微镜、电子显微镜等都可以测试气溶胶粒子的准确直径分布。

微生物气溶胶浓度也是影响气溶胶风险的重要因素,是气溶胶暴露计量模型和健康风险评价模型的重要参数。研究表明,不同温度和湿度、风速、光照,不同的排水系统设施,污水处理厂不同处理工艺等,都会引起微生物气溶胶浓度的显著差异。而微生物气溶胶种属的鉴定能够判断气溶胶的危害程度,例如脊髓灰质炎病毒和诺如病毒^[24]能够在污水处理厂逸散的气溶胶中检测到。尽管目前的风险评价模型中没有种属的相关参数,但是种属的测定对于防止强致病菌、病毒侵害十分必要。

3.2 健康风险评价

健康风险评价步骤主要包含暴露计量模型、暴露因子参数选取和健康风险评价模型。不同暴露途径的计算模型如公式(1)和(2)所示,健康风险评价模型如公式(3)和(4)所示^[9]。

$$ADD_{\text{呼吸}} = \frac{c \times IR \times EF \times ET_{\text{吸入}}}{BW \times AT} \quad (1)$$

$$ADD_{\text{皮肤}} = \frac{c \times IR \times EF \times ET_{\text{皮肤}}}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中: $ADD_{\text{呼吸}}$ 为呼吸系统平均暴露量, $\text{CFU}/\text{d}/\text{kg}$; c 为微生物气溶胶浓度, CFU/m^3 ; IR 为呼吸速率, m^3/d ; EF 为暴露频率, d/a ; $ET_{\text{吸入}}$ 为呼吸吸入暴露年限, a ; $ADD_{\text{皮肤}}$ 为皮肤接触平均暴露量, $\text{CFU}/\text{d}/\text{kg}$;

SA 为接触皮肤表面积, m^2 ; P_c 为皮肤渗透率, m/h ; $ET_{\text{皮肤}}$ 为皮肤接触途径暴露时间, d ; BW 为人体质量, kg ; AT 为预期寿命, d 。

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (3)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (4)$$

式中: HQ 为非致癌风险商,表示各个暴露途径单个污染物的非致癌风险; RfD 为参考剂量, $\text{CFU}/\text{d}/\text{kg}$; HI 为多污染物多暴露途径的非致癌总风险。

4 微生物气溶胶控制策略

4.1 源头覆盖

污水处理厂的各环节,尤其是曝气池,通常可通过定期清洁或轻质材料覆盖达到防止逸散的效果。目前,铰链盖已用于覆盖全规模处理设施中的生物气溶胶源^[25]。其他研究也建议采用覆盖源头的方法来减少生物气溶胶的排放^[26]或者设计不直接暴露到空气中的设备^[27]。目前国内大多数城市的污水处理厂开始采用全覆盖的设计方案,能够从源头避免气溶胶的逸散,同样的,针对排水系统中的检查井、泵站、调蓄池等其他设施,也大多采用全覆盖的方式。但有研究表明覆盖可能会使导致曝气池氧气传输受限,因此通常盖子都有开口,仍然可能导致气溶胶释放^[28-29]。

4.2 自由漂浮载体介质

另一种策略是使用自由漂浮载体介质(FFCM),这种介质由低密度材料组成,可放置在水面上用来阻止微生物气溶胶的释放。Hung 等人^[30]在实验室规模的生物反应器中使用聚苯乙烯球珠,研究表明,随着球体粒径的减小,气溶胶减排量增加;使用多层球珠结构,可以适度提高目标物的捕获效率。在电镀和污水曝气实验中,自由漂浮载体介质在去除或防止大多数气溶胶颗粒的释放上,效果十分有效,最多可达 90% 左右。Noh 等人^[31]研究发现在膜生物反应器中引入粉末活性炭(PAC)会增加细菌絮体的形成,并减少游离细菌数量。目前还没有在实际污水处理厂进行 FFCM 实验的相关研究。

FFCM 目前仍然面临两个方面的挑战,一是曝气过程,尤其是机械曝气,可能会将介质沿水流推离生物气溶胶源,从而降低其有效性。二是需要经常清洁或更换。总体而言,FFCM 用于排水系统微生物气溶胶排放控制的研究仍处于早期阶段。在实际排水处理设施中的有效性还需要进一步研究。

4.3 有效消毒灭菌

常见的空气消毒方法有以下几种:物理法、化学法和其他消毒法。

物理法中以紫外消毒最为常见,但此法的消毒效果会收到诸多因素的影响,如照射强度、温度、气流等条件的差异等^[32],故紫外消毒法在实际的使用中有明显的局限性。另一种常见物理法是等离子体消毒法,其原理是利用电离产生的活性氧化物破坏细胞膜的活性成分,从而实现杀菌效果,有研究表明这种方法的杀灭效果能达到98.9%^[33],此外如层流净化、静电沉积、空气离子消毒等均属于物理消毒法,但这些方法均适用于相对密闭的空间,有明显的局限性。

化学消毒法顾名思义就是物质的化学特性实现消毒,主要分为两类:利用强酸碱性物质进行高效的终末消毒等;另一类是通过强氧化性破坏细菌活性的方法,如臭氧和过氧乙酸等消毒方法。但化学法普遍存在损害人和动物健康的缺陷,还可能污染环境^[34]。

其他方法有生物消毒法、中草药消毒法、光催化消毒法、多因子协同法等。

5 结论

城市污水中含有各种致病性病毒、耐多药细菌、真菌和其他微生物,在污水产生、输送和处理全过程中,微生物气溶胶的检测监测和健康风险评估具有重要意义。本文总结了国内外研究者在排水系统微生物气溶胶检测和防控方面进行的研究。微生物气溶胶富集、采样点的选择、检测和监测和健康风险评估是评估排水系统气溶胶污染的四个关键步骤。其中富集和检测监测技术的选择建议根据不同的目的进行,尤其是注意富集和检测技术的合理搭配。健康风险评估能够为控制措施的制定和实施提供依据。

参考文献:

- [1] Kim, K., Kabir, E., and Jahan, S. A. Airborne bioaerosols and their impact on human health. [J]Journal of Environmental Sciences, 2018, 67, 23-35.
- [2] Lodder, W. and de Roda Husman, A.M. SARS-CoV-2 in wastewater: potential health risk, but also data source. [J]The Lancet Gastroenterology & Hepatology, 2020, 5(6), 533-534.
- [3] 郁庆福,郭奕芳,卢玲,等.污水微生物气溶胶对大气污染的研究[J].中国卫生检验杂志,1991,1(2):70-73.
- [4] Burdsall A C, Y Xing, Cooper C W, et al. Bioaerosol emissions from activated sludge basins: Characterization, release, and attenuation[J]. Science of The Total Environment, 2020, 753:141852.
- [5] 邱雄辉,李彦鹏,张燕茹,等.污水处理厂微生物气溶胶的暴露风险评估[J].安全与环境学报,2012,12(3):89-92.
- [6] 孙强.某城市污水处理厂典型区域大气微生物气溶胶分布特征研究[D]兰州:兰州交通大学,2019.
- [7] 邱雄辉,李彦鹏,牛铁军,等.城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性[J].环境科学,2012,33(7):2191-2196.
- [8] Han Y, Yang T, Xu G, et al. Characteristics and interactions of bioaerosol microorganisms from wastewater treatment plants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 391:122256.
- [9] 邱雄辉.污水厂微生物气溶胶的逸散特征,传输特征及健康风险研究[D]西安:长安大学,2012.
- [10] 张俊超.典型城市市政设施微生物气溶胶污染特性及控制技术研究[D]北京:北京建筑工程学院,2012.
- [11] 潘湛,王勤熙.气溶胶病毒富集与检测研究进展[J].温州医学院学报,2008,38(6):579-581.
- [12] GB/T 38517—2020,颗粒 生物气溶胶采样和分析通则[S].
- [13] 杨唐,韩云平,李琳,等.不同影响因素对 A~2/O 工艺污水处理厂生物气溶胶微粒径分布特征的影响[C].中国环境科学学会科学技术年论文集.北京:中国环境科学出版社,2019
- [14] 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.
- [15] Fannin K F, Vana S C, Jakubowski W. Effect of an activated sludge wastewater treatment plant on ambient air densities of aerosols containing bacteria and viruses [J]. Applied & Environmental Microbiology, 1985, 49(5):1191-1196.
- [16] Myatt T A, Johnston S L, Rudnick S, et al. Airborne rhinovirus detection and effect of ultraviolet irradiation on detection by a semi-nested RT-PCR assay[J]. BMC Public Health, 2003, 3(5): 1-7.
- [17] C Guzmán, Jofre J, Montemayor M, et al. Occurrence and levels of indicators and selected pathogens in different sludges and biosolids [J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 103(6):2420-2429.
- [18] Williams F P, Hurst C J. Detection of environmental viruses in sludge: enhancement of enterovirus plaque assay titers with 5-IO-DO-2'-Deoxyuridine and comparison to adenovirus and coliphage titers[J]. Water Research, 1988, 22(7):847-851.
- [19] Monpoeho S, Maul A, Mignottecadiergues B, et al. Best Viral Elution Method Available for Quantification of Enteroviruses in Sludge by Both Cell Culture and Reverse Transcription-PCR [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(6):2484-2488.
- [20] Prado T, Gaspar A, Miagostovich M P. Detection of enteric viruses in activated sludge by feasible concentration methods [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2014, 45(1):343-349.
- [21] Nestor, Albinana-Gimenez, Pilar, et al. Distribution of Human Polyoma- viruses, Adenoviruses, and Hepatitis E Virus in the Environment and in a Drinking-Water Treatment Plant[J]. Environmental Science & Technology, 2006.
- [22] 杜茜,李劲松.微生物气溶胶污染监测检测技术研究进展[J].解放军预防医学杂志,2011,29(6):455-458.
- [23] 朱元,郑海洋,顾学军,等.大气气溶胶的检测方法研究[J].环境科

- 学与技术, 2005, 28(021):175-177.
- [24] Matsubara K, Katayama H. 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).
- [25] Fe Rnando N L, Fe Dorak P M. Changes at an activated sludge sewage treatment plant alter the numbers of airborne aerobic microorganisms[J]. Water Research, 2005, 39(19):4597-4608.
- [26] Fathi S, Hajizadeh Y, Nikaeen M, et al. Assessment of microbial aerosol emissions in an urban wastewater treatment plant operated with activated sludge process[J]. Aerobiologia, 2017, 33(4):1-9.
- [27] O'Hara R E, Rubin R. Reducing Bioaerosol Dispersion from Wastewater Treatment and Its Land Application: A Review and Analysis[J]. Journal of Environmental Health, 2005, 68.
- [28] Ashley K I, Mavinic D S, Hall K J. Bench-scale study of oxygen transfer in coarse bubble diffused aeration [J]. Water Research, 1992, 26(10):1289-1295.
- [29] Fe Rnando N L, Fe Dorak P M. Changes at an activated sludge sewage treatment plant alter the numbers of airborne aerobic microorganisms[J]. Water Research, 2005, 39(19):4597-4608.
- [30] Hung H F, Yu M K, Chien C C, et al. Use of floating balls for reducing bacterial aerosol emissions from aeration in wastewater treatment processes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175 (1-3): 866-871.
- [31] 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.
- [32] 张伟, 裴著革, 室内空气消毒研究进展[J]. 解放军预防医学杂志, 2008, 26(3):227-229.
- [33] 张华山, 李官贤, 裴著革, 等, 低温等离子体发生器净化效果评价[J]. 解放军预防医学杂志, 2003, 21(5):340-342.
- [34] 刘洋, 谢珊珊, 杨凯等, 空气微生物气溶胶检测与空气消毒技术研究进展[J]. 职业与健康, 2017, 33(10):1422-1426.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com