

污泥厌氧稳定化流程中肠道病毒的去除与归趋

詹咏¹, 钱康¹, 陆宇涵², 陈江峰¹, 王慧¹, 白建峰³,
王先恺⁴, 董滨⁴

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海大学 计算机工程与科学学院, 上海 200444; 3. 上海第二工业大学 资源与环境工程学院, 上海 200120; 4. 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)

摘要: 根据对典型肠道病毒的生物性研究, 选取诺如病毒、腺病毒、轮状病毒作为研究对象, 以安徽某污泥厂作为研究地点, 污泥厂采用的是离心浓缩-水解-厌氧消化-机械脱水-太阳能干化技术, 旨在评估不同污泥处理工艺对这些病毒去除效果的影响。本研究利用实时荧光定量 PCR 技术, 对污泥处理各阶段的病毒含量进行定量分析。研究表明, 污泥厌氧消化是诺如病毒和腺病毒的去除效率最高的单元, 其对数去除率分别为 0.68 lg 和 0.61 lg, 太阳能干化单元是轮状病毒的去除效率最高的单元, 其对数去除率为 0.73 lg。该污泥处理流程对诺如病毒、腺病毒、轮状病毒总量的去除分别达到了 98.7%, 97.6%, 98.4%, 但由于进泥中病毒总量较高, 最终污泥处置进入环境中含量为 1.52×10^4 copies/g DW, 5.17×10^4 copies/g DW, 7.92×10^3 copies/g DW。

关键词: 肠道病毒; 污泥厂; 厌氧消化; 去除率

中图分类号: X 835 **文献标志码:** A

Removal and trend of enteric viruses in sludge anaerobic stabilization process

ZHAN Yong¹, QIAN Kang¹, LU Yuhan², CHEN Jiangfeng¹, WANG Hui¹, BAI Jianfeng³,
WANG Xiankai⁴, DONG Bin⁴

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
3. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 200120, China;
4. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the biological study of typical enteric viruses, norovirus, adenovirus, and rotavirus were selected as the focus of this research. The study was conducted at a sludge treatment facility in

收稿日期: 2023-06-24

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1908702); 国家自然科学基金重点资助项目(52192684)

第一作者: 詹咏(1971-), 女, 副教授。研究方向: 水污染控制工程。E-mail: jannet6@163.com

通信作者: 董滨(1978-), 男, 教授。研究方向: 环境工程。E-mail: dongbin@tongji.edu.cn

引文格式: 詹咏, 钱康, 陆宇涵, 等. 污泥厌氧稳定化流程中肠道病毒的去除与归趋[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(5): 556-566.

Citation: ZHAN Yong, QIAN Kang, LU Yuhan, et al. Removal and trend of enteric viruses in sludge anaerobic stabilization process[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(5): 556-566.

Anhui Province, where the treatment processes employed include centrifugal concentration, hydrolysis, anaerobic digestion, mechanical dewatering, and solar drying. The primary objective of this research is to evaluate the effectiveness of different sludge treatment processes in the removal of these viruses. This study utilized real-time fluorescence quantitative PCR technology to quantitatively analyze the virus content in various stages of sludge treatment. Research shows that anaerobic digestion of sludge is the unit with the highest removal efficiency for norovirus and adenovirus, with logarithmic removal rates of 0.68 lg and 0.61 lg, respectively. The solar drying unit is the unit with the highest removal efficiency for rotavirus, with logarithmic removal rate of 0.73 lg. The total amount of Norovirus, adenovirus and rotavirus removed by this sludge treatment process reached 98.7%, 97.6% and 98.4%. However, due to the high total amount of virus in the sludge, the final content of sludge into the environment was 1.52×10^4 copies/g DW, 5.17×10^4 copies/g DW, 7.92×10^3 copies/g DW.

Keywords: enteric viruses; sludge plant; anaerobic digestion; removal rate

新冠疫情期间,病毒在全球肆虐成疾,研究表明确诊患者体内的粪便会携带大量致病病毒例如肠道病毒、流感病毒、冠状病毒等,这些病毒会以患者粪便作为载体,通过污水管道进入污水处理厂。2020年2月1日,新型冠状病毒核酸首次在确诊患者粪便中检出,同年2月13日,活体新冠病毒首次在患者粪便中检出^[1]。相关研究表明,部分病毒具有较强的环境适应能力,进入污水处理系统后仍然能保持一定的感染能力,持续时间最长有几个月^[2]。活性污泥法是国内目前最常见的污水二级处理工艺之一。在使用活性污泥对污水进行生化处理过程中,由于活性污泥中有机物含量高,水体中大量的病原体会被活性污泥所吸附,富集在污泥中^[3],大大削弱了消毒单元对病毒的去除效率^[4]。有证据表明,在污泥用于园林绿化土地利用的过程中,生物固体中的病毒将被雾化,病毒会通过空气接触人群产生重大健康风险^[5-7]。国内目前正在大力推行污泥的稳定化、无害化、资源化处理处置,但是从发布的相关标准如《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB24188—2009)^[8]、《农用污泥污染物控制标准》(GB4284—2018)^[9]来看,其指标仍停留在粪大肠菌群、细菌总数、寄生虫卵等,尚未对病毒有相关限制指标。因此,本研究通过对污泥处理全流程中的病毒检测归趋分析,可为污泥中病毒相关指标的制定提供相关理论支持。

病毒是一种由核酸(DNA或RNA)和蛋白质构成的非细胞型生物,根据其包膜存在情况可分为无包膜类病毒和包膜类病毒。研究表明包膜类病

毒在环境中的生存能力较差,容易被降解失活^[3],在污泥处理全流程监测过程中指示能力较差,因此本次实验选择非包膜病毒作为研究对象。研究表明,腺病毒、诺如病毒和轮状病毒是污水污泥中最常见的肠道病毒,具有致病剂量小,环境中存活时间长,传播途径多样,全人群易感等特点^[10-12]。人体摄入少量活体病毒就有产生较高的感染风险,可能出现肠胃炎、结膜炎、呼吸道疾病,这将增加人群伤残调整生命年(DALY),加重人类的疾病负担。Pepper等^[13]的研究表明,腺病毒对免疫力低的患者致死率较高,病例死亡率高达50%,Tozzoli等^[14]的研究发现,诺如病毒和腺病毒经常在表层土壤改良剂、污水、污泥中均有检出,Crawford等^[15]的研究表明,轮状病毒主要通过粪口途径传播,在易感宿主中,只需要少量病毒颗粒即可引起疾病。由病毒引起的传染病每年都会出现,尽管大多数不会对公共卫生造成威胁^[3],但是对于污水污泥厂的职业人员来说仍需引起重视,因为他们是最容易受到这些病毒侵害的高危人群,也是切断病毒传播链中重要的一部分。

厌氧消化是国内外目前对污泥进行稳定化处理的常见方法^[16]。厌氧消化使得污泥病原生物大量削减,污泥病原微生物丰度下降呈现良好的卫生学特性^[17]。国内外已有大量研究证实,污泥厌氧消化能够有效去除污泥中常见致病细菌和虫卵。Carraturo等^[18]的研究表明,污泥厌氧消化能够在较短时间内实现伤寒沙门氏菌和大肠杆菌浓度的大量削减,24~48 h后两种微生物均未检出。Al-Sulaimi等^[19]的研究发现,嗜热厌氧消化

在 51 d 内对蠕虫虫卵的灭活效率达到了 43.6%，厌氧消化是去除蠕虫虫卵有效预处理步骤。Yang 等^[20]的研究表明，厌氧消化降低了病原菌的相对丰度，厌氧消化结合热水解预处理可有效减少除产气荚膜梭菌外的大多数致病菌。然而，国内外目前对污泥厌氧消化去除病原体的研究仍停留在致病细菌和病虫卵，对肠道病毒的研究内容较少，没有深入探究典型肠道病毒在污泥厌氧消化工艺处理全流程中的去除效果。因此，本研究选择安徽某厌氧消化污泥厂作为病毒检测地点，选取诺如病毒、轮状病毒、腺病毒这 3 种污泥中的典型肠道病毒作为研究对象，探究实际流程中厌氧消化对肠道病毒的去除效率。

1 材料与方法

1.1 污泥样本采集

污泥样本采自安徽六安某污泥处理厂，采用工艺为离心浓缩-水解-厌氧消化-机械脱水-太阳能干化技术。该污泥处理厂处理城区内 3 所污水处理厂排出的剩余污泥，污泥处理规模为 140 t/d，进泥含水率 80%~99.2%，污泥在厌氧消化厂区进行厌氧消化和机械脱水后，污泥通过管道运输至太阳能干化厂进一步脱水干化处理，设计出泥含水率为 70% 以下，干化后的污泥用于园林绿化、制砖等。

2023 年 3—5 月期间，在前两日无雨的晴天早上 8 时 30 分，于图 1 所示进料缓存池、污泥水解池、消化缓存池、带式脱水车间、太阳能干化棚

中每个单元采取 500 g 污泥样品作为原污泥、水解污泥、消化污泥、脱水污泥、干化污泥，每个单元重复采 3 次作为平行样。

如图 1 所示，原污泥、水解污泥、消化污泥样品泥质均匀，因此直接从罐体中采集，脱水污泥采集带式脱水机脱水后污泥；如图 2 所示，由于太阳能干化棚中的干化污泥占地面积广，为了采集的样品具有较好的代表性，综合参考国内外关于污染场地采样布点的要求^[21,22]，考虑到干化棚中污泥基本均匀，采用五点采样法制备混合样品来分析干化场中典型肠道病毒含量，对干化棚进行对角划分，采取 5 个点样品，在中心点和离出口 33.36 m 与对角线交界处的 4 个点设置采样点，每个点 100 g，混匀合成 500 g 后装入无菌聚乙烯瓶运至实验室检测，该步骤重复 3 次作为 3 组平行样进行质量控制，从图 3 检测结果可得，当月的 3 组平行样检测结果误差较小，结果较为可靠。3，4，5 月检测结果显示干化污泥中诺如病毒的含量基本不变，保持在 10^4 copies/g DW 左右，腺病毒和轮状病毒含量在 4 月有一个数量级的增长，5 月与 4 月含量持平基本不变。

1.2 污泥样本保存

现场采集的泥样使用无菌聚乙烯瓶分装保存在 4 ℃ 冰盒中，1 h 内送至当地污水处理厂实验室进行病毒洗脱浓缩预处理，将浓缩的病毒颗粒沉淀溶解在核酸保存液中后，使用泡沫箱加上 10 kg 干冰的保温方式将病毒浓缩液快递至合肥麟美检测公司进行实时荧光定量 PCR 检测，运送途中干冰损耗有限，样品始终低温保存，多余样品存放

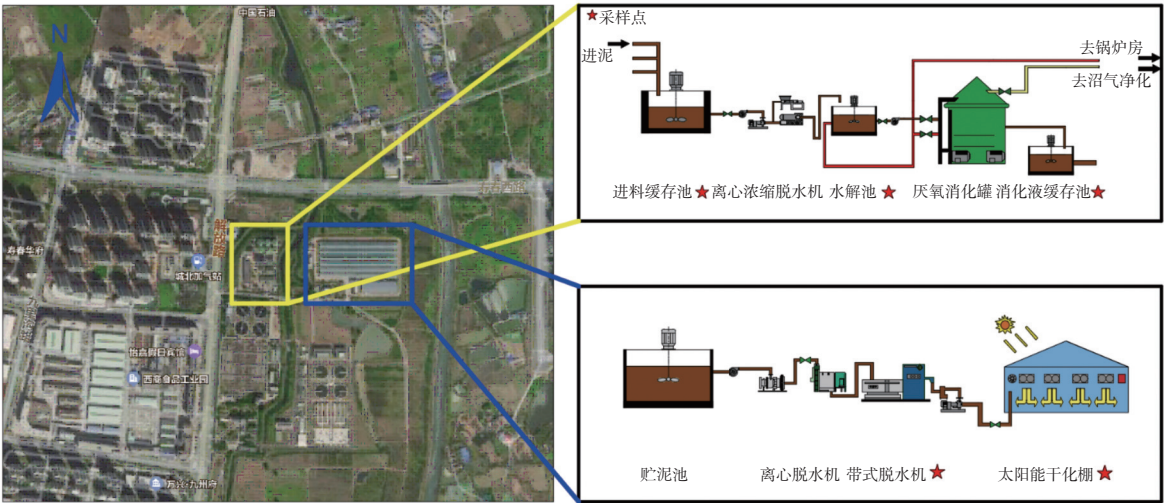


图 1 厌氧消化和太阳能干化污泥处理厂工艺流程图

Fig.1 Flow diagram of sludge treatment plant with anaerobic digestion and solar drying process

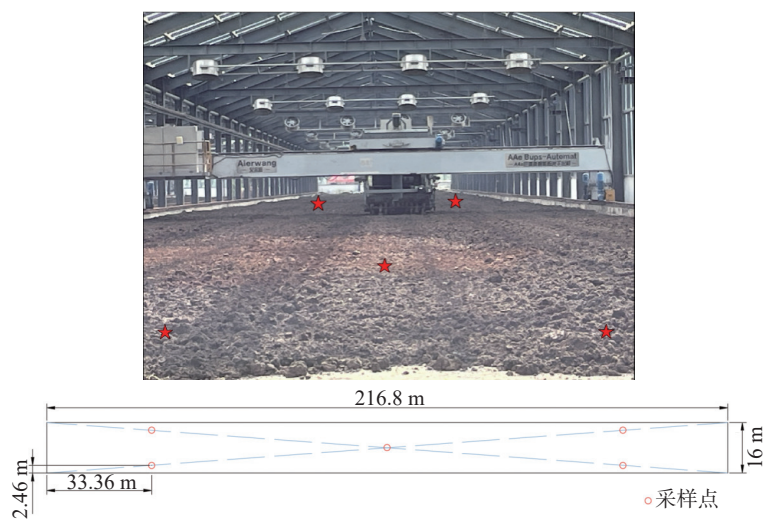


图 2 干化污泥采样布点和现场图

Fig.2 Sample location and site map for fried sludge

在-80 ℃ 冰箱中。

1.3 污泥样本处理

1.3.1 实验室测试环境

预处理实验室位于当地污水处理厂水质处理检测实验室，实验室具备 CMA 检测认证，实验室桌面使用 75% 酒精喷洒擦拭消毒，玻璃棒烧杯等玻璃仪器使用高压蒸汽灭菌锅消毒，实验过程中样品置于 4 ℃ 冰盒中防止由于高温引起的核酸断裂消解损耗，使用磁力搅拌机和 4 ℃ 水浴震荡机进行机械洗脱、使用 4 ℃ 冷冻离心机进行离心浓缩，具备对污泥样品中病毒洗脱和浓缩的测试条件。病毒提取和实时荧光定量 PCR 检测由合肥麟美检测公司负责。实验室属于清洁级实验室，采用 YEASEN 公司的 Hifair II 1st Strand cDNA Synthesis Kit 反转录试剂盒进行反转录，使用罗氏公司的 LightCycler480 进行荧光定量检测，实验室具备病毒 qPCR 测试条件，所有的枪头和耗材都采用高压蒸汽灭菌法消毒，实验室桌面设备使用 75% 酒精消毒，样本使用核酸保存液存放于-80 ℃ 冰箱。实验室环境空气中可能存在环境中常见的核酸酶，会略微降低实验样本中病毒含量，但是环境空气中酶含量较低，并且核酸保存液可以降低空气中酶对样本病毒的分解，因此空气中酶对病毒检测的干扰有限。

1.3.2 污泥中病毒的洗脱

污泥病毒的洗脱方法采用甘氨酸洗脱法。对于原污泥、水解污泥、消化污泥这 3 种含水率较高呈现流态状的污泥，先使用离心机在 12000g 下离心 1 min，分别得到 50 g 固态污泥，脱水污泥

和干化污泥均取 50 g。使用 150 mL 甘氨酸缓冲溶液(pH 9.5)以 3 : 1 的比例稀释 50 g 污泥样品，以分离与有机物结合的病毒粒子。随后用磁力搅拌机搅拌 30 min，搅拌后的样品用水浴震荡机在 4 ℃ 以 250 r/min 震荡 10 min，在机械力的作用下洗脱附着在污泥固体颗粒上的病毒。用离心机在 4 ℃，8000g 工况下离心 15 min 澄清样品。将上清液倒入烧杯中，弃去沉淀，使用 0.45 μm 孔径的聚醚砜膜过滤上清液，过滤以去除细菌、腐殖质和真核细胞。通过缓慢加入 1 mol/L HCl，将上清液的 pH 值调节至 7.0，构成病毒提取物。

1.3.3 污泥中病毒的浓缩

目前，国内外病毒浓缩方法有聚乙二醇沉淀法、超速离心法、过滤法、铝盐沉淀法。本次实验选用聚乙二醇沉淀法，因为此法相比其他方法更加成熟，适用的病毒广，成本低，操作简易。根据污泥洗脱上清液的体积，定量加入 PEG8000 和氯化钠，形成 PEG8000 含量为 10% 和氯化钠含量为 2.3% 的洗脱混合液体体系，将此洗脱混合液放置在 4 ℃ 的水浴震荡器中以 150 r/min 震荡 2 h，随后放入 4 ℃ 冰箱过夜孵育，适宜的盐浓度条件下，病毒颗粒会与聚乙二醇形成多聚体。随后使用离心机以 13000g 离心 90 min，将水溶液与病毒颗粒多聚体分开，使用移液枪吸取 1 mL 核酸保存液，反复吹吸附着在离心管壁的病毒颗粒多聚体，瞬时离心，使所有液体聚集在管底，收集病毒颗粒多聚体形成的沉淀，用于后续核酸提取和实时荧光定量 PCR 检测。

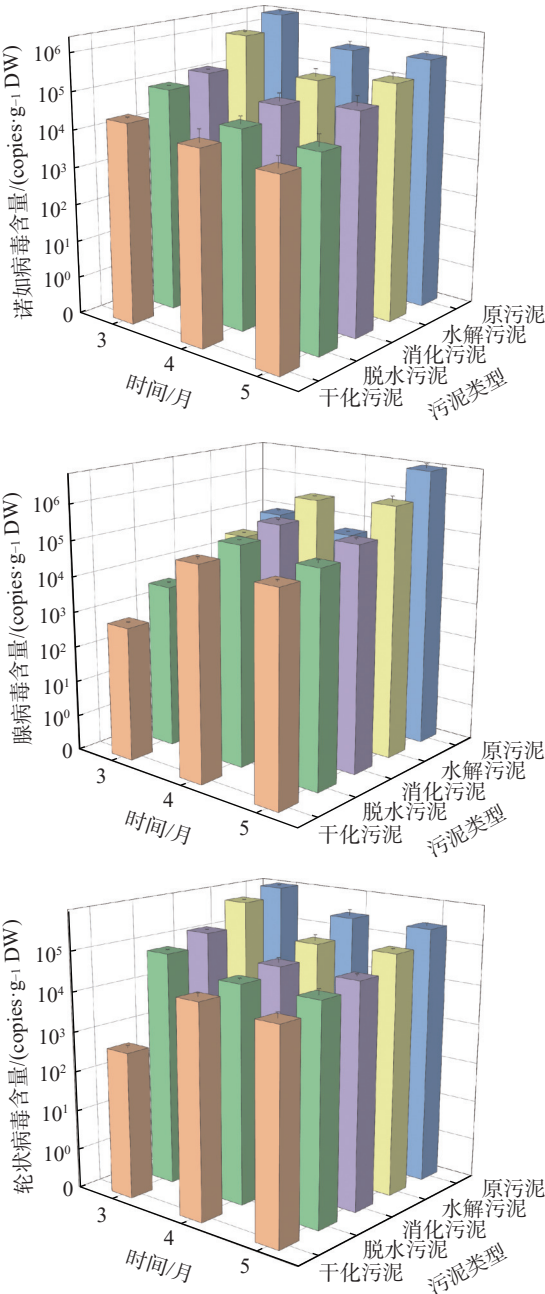


图3 各处理单元每月病毒检测结果

Fig.3 Monthly virus detection results of each processing unit

1.3.4 污泥中病毒的荧光定量 PCR 检测

a. 病毒基因组基因合成

基因合成产物为本次实验标准品。合成产物约 5 μg，根据浓度与拷贝数换算公式，按照比例稀释成 9 组梯度，使用 CurveExpert1.4 对数据进行拟合，用于标准曲线构建。

b. 引物设计

通过 NCBI 查找诺如病毒 (Norovirus GII)、腺病毒 (Adenovirus 7)、轮状病毒 (Rotavirus) 序列信息，并设计引物，如表 1 所示。

表 1 病毒引物

Tab.1 Virus primers

名称	序列	产物大小(bp)
NV-QF	ATGTTTCAGRTGGATGAGRTTCTC	89
NV-QR	TCGACGCCATCTTCATTACACA	
HAV-QF	TTYGAGGTGGAYCCCATGGA	137
HAV-QR	AGAASGGYGTGCGCAGGTA	
HRV-QF	GTNTTTCACACAGGYATGA	256
HRV-QR	GGTCACATCTCTCACTA	

c. DNA/RNA 提取

提取工作由合肥麟美生物科技有限公司负责，2 种 RNA 病毒 (诺如病毒 NV、轮状病毒 HRV) 使用 Trizol 法提取，1 种 DNA 病毒 (腺病毒 HAV) 使用吸附柱法 (试剂盒) 提取。

d. 反转录

采用 YEASEN 公司的 Hifair II 1st Strand cDNA Synthesis Kit 反转录试剂盒进行反转录，合成 cDNA 第一链，详细操作步骤参照试剂盒说明书进行。

e. qPCR 检测

采用罗氏公司的 LightCycler480 进行荧光定量检测，扩增体系和扩增程序设置分别如表 2 和表 3 所示。其中，SYBR Green qPCR Mix 是一种用于实时定量 PCR (qPCR) 实验的预混试剂，它可以允许研究人员通过检测荧光信号的强度来实时监控 PCR 扩增过程。

表 2 qPCR 扩增体系

Tab.2 qPCR amplification system

名称	加量/μL
SYBR Green qPCR Mix	5
上游引物F	0.5
下游引物R	0.5
cDNA或DNA模板	1
ddH ₂ O	~10

表 3 扩增程序设计

Tab.3 Amplification program design

温度/℃	时间/s	循环次数/次
96	300	1
95	15	45
60	30 (采集荧光)	45

1.4 污泥样本分析

由图 4 可以看出，污泥浓缩、水解、厌氧消化工艺单元均提高了进料污泥的 pH 值。进料污泥的 pH 值平均在 6.55，厌氧消化后污泥 pH 值提高

至平均 7.21, 而最终处理产物干化污泥的 pH 值平均为 6.54。污泥进泥温度在 20.1 ℃ 左右, 进入水解池后在热水管加热作用下污泥温度升高至 38 ℃ 左右, 进入厌氧消化罐后污泥温度稳定在 39.7 ℃ 左右, 带式脱水后污泥温度降至 22.4 ℃, 最终在太阳能干化作用下, 3—5 月的污泥温度可上升至

27.1 ℃ 左右。浓缩、水解和厌氧消化普遍可提高污泥电导率, 而处理后的污泥在机械脱水和太阳能干化作用下电导率下降。厌氧消化可降低污泥 TS 和有机质含量, 这是由于厌氧消化可在厌氧条件下, 通过细胞的内源代谢作用将污泥有机质转化为甲烷, 进而实现污泥减量。

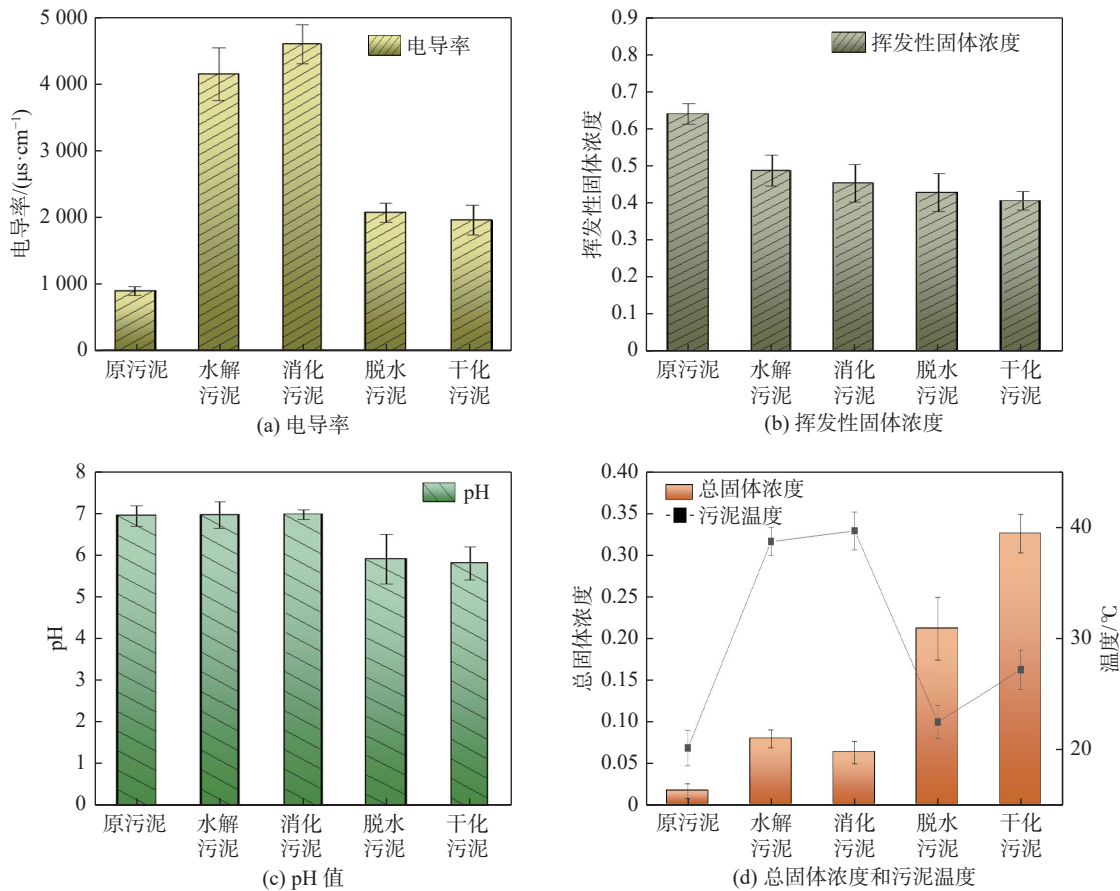


图 4 污泥理化性质和运行参数

Fig.4 Physicochemical properties and operating parameters of sludge

从图 3 检测结果来看, 3 种病毒在当月 3 组平行样之间检测结果误差较小, 检测结果较为准确。对比 3—5 月的数据, 发现诺如病毒在每个处理单元的含量变化不大, 基本在一个数量级内。腺病毒的含量呈现略微上升的趋势, 4 月每个单元有一个数量级的增长, 5 月含量与 4 月持平。轮状病毒变化趋势并不明显, 整体变化较小, 仅 3 月和 4 月在干化单元有一个数量级的增长。

2 结果与讨论

2.1 污泥中典型肠道病毒的去除

经过长达 3 个月的污泥厂区中原污泥、水解污泥、消化污泥、脱水污泥、干化污泥的典型肠

道病毒检测, 如图 5(d) 所示, 研究发现污泥进泥中腺病毒含量最高, 达到了 2.13×10^6 copies/g DW, 其次是诺如病毒含量为 1.16×10^6 copies/g DW, 含量最少的是轮状病毒, 其含量为 4.91×10^5 copies/g DW。通过对比进泥和出泥中病毒浓度水平, 观察到该污泥厂离心浓缩—水解—厌氧消化—机械脱水—太阳能干化技术流程对 3 种典型肠道病毒的去除效果由高到低为诺如病毒, 轮状病毒, 腺病毒, 其对数去除率分别为 1.88, 1.79, 1.61 lg。腺病毒为线性双链 DNA 病毒, 轮状病毒为双链 RNA 病毒, 而诺如病毒为单股正链 RNA 病毒。有研究表明人类 DNA 病毒在污泥中具有较长的保持能力, 受损的腺病毒基因组可以通过宿主细胞的脱氧核

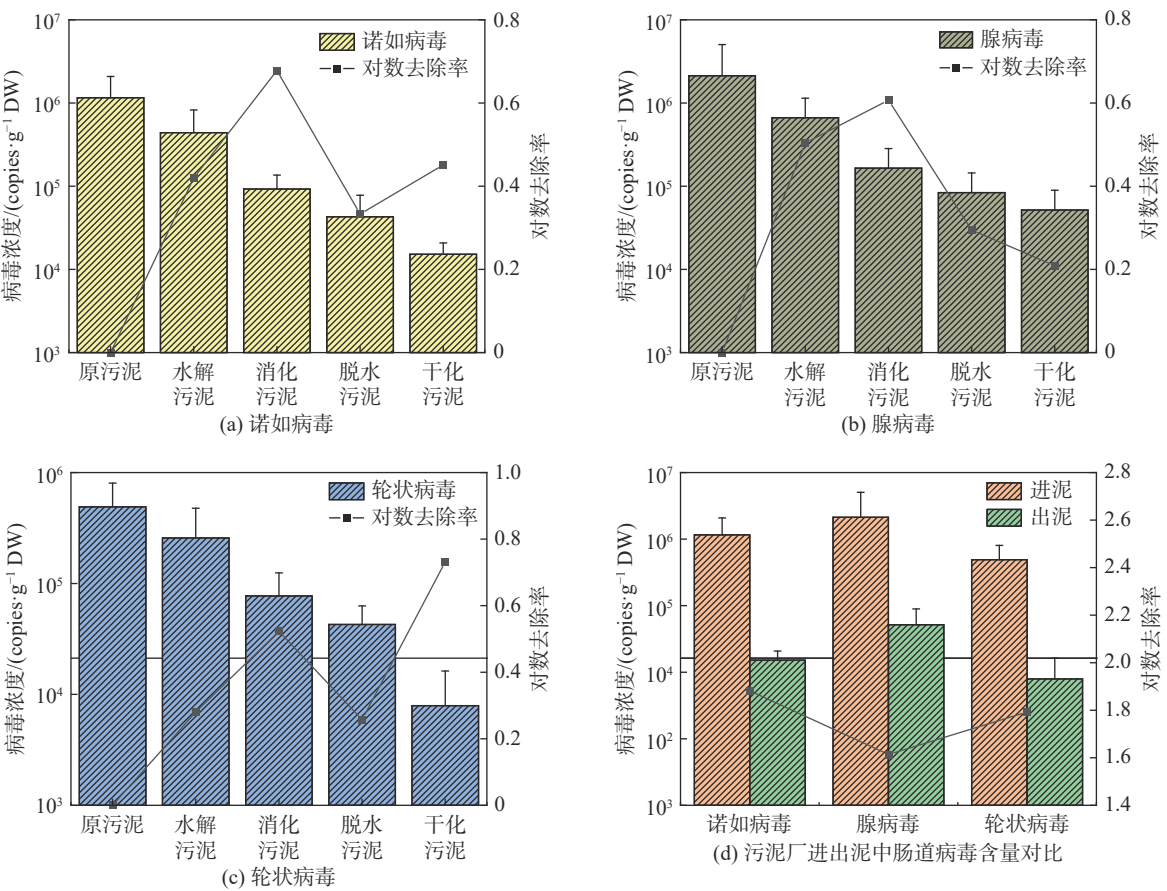


图5 污泥中典型肠道病毒对数去除率

Fig.5 Logarithmic removal rate of typical Enterovirus in sludge

糖核酸修复机制进行修复^[23]，具有 DNA(ssDNA 和 dsDNA)和 dsRNA 的病毒比 ssRNA 病毒具有更高的环境抗性^[24]，这与我们观察到的腺病毒相对于诺如病毒和轮状病毒两种 RNA 病毒在污泥处理全流程中赋存浓度较高，未来可以考虑将腺病毒作为污泥指示病毒。

通过对污泥处理各环节中腺病毒、诺如病毒、轮状病毒的含量变化和对数去除率数据分析。从图 5(a)~(c)中可以看到，诺如病毒和轮状病毒的去除趋势相对一致，两者均在污泥厌氧消化和太阳能干化单元有较高的去除效率，各个处理单元对诺如病毒的去除效率由高到低为厌氧消化，太阳能干化，离心浓缩水解，带式脱水，其对数去除率分别为 0.68，0.45，0.42，0.33 lg；各个处理单元对轮状病毒的去除效率由高到低为太阳能干化，厌氧消化，离心浓缩水解，带式脱水，其对数去除率分别为 0.73，0.52，0.28，0.26 lg；各个处理单元对腺病毒的去除效率由高到低为厌氧消化，离心浓缩水解，带式脱水，太阳能干化，其对数去除率分别为 0.61，0.50，0.29，0.21 lg。

腺病毒作为 DNA 病毒，其理化性质稳定具有较高的环境抗性，在复杂环境中能够保持病毒核酸结构完整^[25]，这与我们观察到的腺病毒在污泥处理的各个阶段与诺如病毒和轮状病毒相比较检出浓度较高，腺病毒在太阳能干化棚中低温干化作用下病毒含量削减效果没有诺如病毒和轮状病毒显著的现象相符。

2.2 各处理单元去除贡献率

对各处理阶段典型肠道病毒去除量分析，通常去除量分析采用去除贡献率表示，去除贡献率由目标处理单元病毒去除量与病毒总去除量的比值得出。

如表 4 所示，污泥浓缩水解单元对诺如病毒、腺病毒和轮状病毒 3 种典型肠道病毒的去除贡献率最高，分别达到了 62.78%，70.37%，48.37%。在污泥处理流程中，对诺如病毒和腺病毒去除贡献率由高到低的单元依次为污泥浓缩水解单元，厌氧消化单元，机械脱水单元，太阳能干化单元，各处理单元对轮状病毒去除贡献率由高到低依次为污泥浓缩水解单元，厌氧消化单元，太阳

表 4 各处理单元对 3 种典型肠道病毒的去除贡献率

Tab.4 Contribution rate of each processing unit to the removal of three typical enteroviruses

肠道病毒	各处理单元对典型肠道病毒的去除贡献率/%			
	浓缩水解	厌氧消化	机械脱水	太阳能干化
诺如病毒	62.78	30.46	4.33	2.43
腺病毒	70.37	24.18	3.91	1.54
轮状病毒	48.37	37.29	7.14	7.20

能干化单元，机械脱水单元。浓缩水解单元和厌氧消化单元对典型肠道病毒的总去除贡献率占比达到了 85%~95%，污泥中病毒在污泥加药浓缩，热水解高温和厌氧消化体系中微生物等复杂的作用下得到有效去除，污泥浓缩水解和厌氧消化单元为该污泥处理流程中去除病毒的主要单元。

2.3 污泥处理过程中肠道病毒归趋

污泥进泥中 3 种典型肠道病毒的含量水平达到了 $10^5\sim10^6$ copies/g DW，赋存大量肠道病毒的原污泥在进入厌氧消化罐前首先要进行污泥加药浓缩和热水解预处理，通过浓缩和热水解使污泥含水率和温度达到消化条件才能通入厌氧消化罐体。污泥进泥含水率在 99.2% 左右，在污泥缓存池内使用 3 台浓缩进泥泵(2 用 1 备)运输至 4 台浓缩机内，离心浓缩机处理能力为 360~600 kgDS/h。污泥浓缩前首先经过加药处理，从图 4 中可以看到，污泥浓缩水解和厌氧消化可以提高污泥电导率，而处理后的污泥经过离心脱水和太阳能干化会导致污泥电导率下降。加入的药剂是浓度为 0.2% 的聚丙烯酰胺(PAM)，污泥和 PAM 混合后会发生絮凝反应，泥水得到初步分离。病毒粒子会从污泥液相进一步的吸附到泥相中，加药后的污泥进入污泥浓缩离心机，在离心力的作用下，污泥中的含水量减少，达到浓缩的效果，液相中的病毒随离心机的脱水得到去除。污泥浓缩的病毒去除机理主要是与含水量有关，有研究表明环境湿度会影响病毒存活，湿度每降低 10%，病毒可检出量便会减少 80%^[26]。通过污泥浓缩后，污泥含水率由 99.2% 降低到 89.9%，病毒随着污泥含水率降低而得到部分去除。浓缩后污泥进入水解池，该污泥厂设置两座水解池，池体内部配置热水盘管，池体配置功率为 11 kW 的顶部搅拌机，两座水解池间歇运行，浓缩后的污泥在水解池内暂存，水解池中采用 65 ℃ 的热水管将污泥加热至 38 ℃ 左右，热水解池中的污泥絮体在高温高压

下会发生解体，污泥中的病菌、虫卵大量削减，细胞逐渐破碎，随着宿主细胞的死亡，肠道病毒难以在此环境中保持活性，大量病毒粒子被分解，污泥逐渐变成了流动性好、性质稳定、容易降解且传染风险低的有机质基质。污泥加药浓缩和热水解单元去除了污泥中诺如病毒总量的 62%，腺病毒总量的 68.7%，轮状病毒总量的 47.6%，污泥浓缩和水解是该污泥处理流程中肠道病毒总量去除量最大的单元。水解池对病毒的去除机理主要是高温，有研究表明，高温会导致病毒的衣壳蛋白变性或被外界胞外蛋白酶分解，病毒存活率和存活时间降低^[27]。

热水解将污泥加热至约 38 ℃ 后通过厌氧进泥泵输送至厌氧消化罐，污泥厂设置 3 座厌氧消化罐。单座罐体的直径 17 m，高度 16 m，运行液位约 12 m，单座罐体有效容积为 2700 m³，罐体总容积为 8100 m³，系统进料设计浓度为 10%，设计停留时间约 29 d；厌氧消化罐采用内置式沼气储囊，单座储囊储存容积约为 700 m³。每座厌氧消化罐均采用两台 22 kW 的侧壁式搅拌机进行搅拌，罐内设置热盘管，可通入热水对厌氧消化罐补充热量。从图 4 中可以看到，厌氧消化可以使污泥有机质含量从水解污泥的 49% 降低至 45%，这是由于在无氧的条件下，由兼性厌氧细菌及专性厌氧细菌降解转化有机物，其最终产物为二氧化碳和甲烷气，从而使污泥达到减量化、稳定化。厌氧消化体系中的厌氧消化罐体与进泥缓存池和消化缓存池均使用管道直接密闭相连，无暴露点位，避免了病原微生物在整个生产过程的扩散。从图 6 可以看到，污泥厌氧消化去除了污泥中诺如病毒总量的 30.1%，腺病毒总量的 23.6%，轮状病毒总量的 36.7%。厌氧消化过程中污泥含水率基本不变，维持在 88.6% 左右。因此，含水率在此阶段对病毒去除效率的提升影响微弱，污泥厌氧消化对肠道病毒的去除机理主要与温度、pH 值、游离氨和微生物有关。温度的影响：随着温度上升，病毒的蛋白质会变性，酶类的活性消失，进而导致病毒的存活时间和存活率降低。pH 值的影响：厌氧消化有产氢、产酸、产甲烷 3 个阶段，pH 值会在 5~7.5 之间波动，会导致部分病毒的蛋白质衣壳和核酸造成破坏，厌氧消化产生挥发性脂肪酸(VFAs)和非荷电氨，会对病毒或宿主细胞的正常生理功能产生毒性等不利影

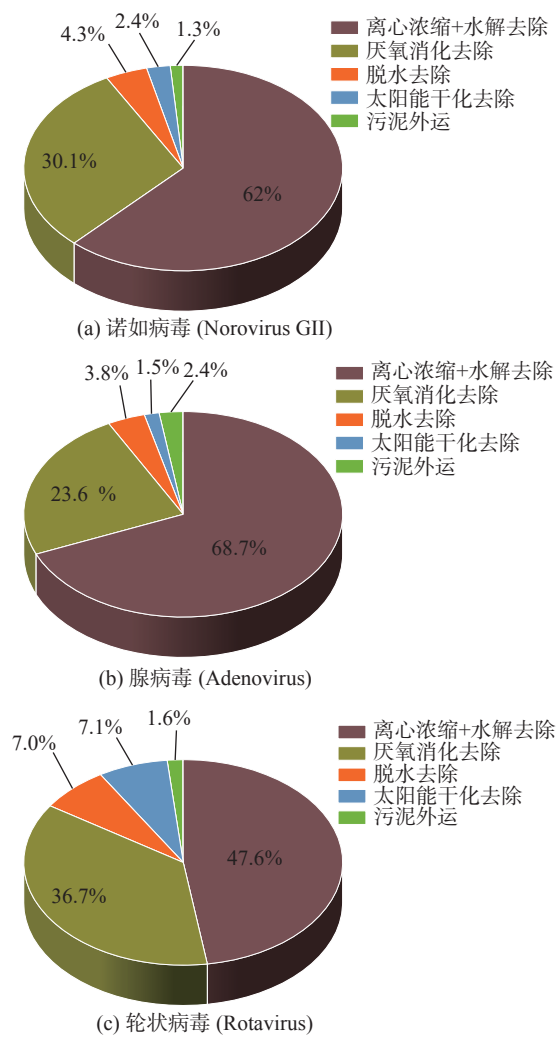


图 6 污泥处理全流程典型肠道病毒归趋

Fig.6 Typical fate of Enterovirus in the whole sludge treatment process

响。游离氨的影响：有研究表明，厌氧消化污泥中脊髓灰质炎病毒会在污泥游离氨的作用下发生不可逆转的灭活^[28]；Magri 等^[29]研究发现，腺病毒和轮状病毒对游离氨的抗性低于噬菌体。微生物的影响：有研究表明污泥微生物数量会影响病毒在污泥中的存活率，一些细菌和真菌能够使用病毒衣壳蛋白作为底物生长，从而导致病毒的灭活^[30]，厌氧消化过程中大肠杆菌噬菌体 MS2 会在微生物产生的蛋白酶作用下失活，这是污泥中肠道病毒削减的重要因素之一^[31]。

厌氧消化后的消化污泥进入到离心脱水机+带式脱水机进行脱水处理。从图 6 中可以看到，污泥脱水去除诺如病毒总量的 4.3%、腺病毒总量的 3.8%、轮状病毒总量的 7%。该污泥处理厂使用离心脱水机加带式脱水机构成机械脱水系统。离心脱水车间共有 4 台离心脱水机，2 台韦斯伐里亚的

离心机目前闲置停运，1 台贝亚雷斯的离心机处理流量为 8 m³/h，1 台浙江三联的离心机处理流量为 12 m³/h，离心脱水后污泥含水率降至 80% 左右。带式脱水机房设置 4 台高压带式脱水机，对含水率 80% 污泥的处理能力为 2.5~3.5 t/h，设计处理后污泥含水率在 70% 左右。污泥脱水的病毒去除机理与含水率有关，检测结果显示机械脱水后污泥含水率由 88.6% 降低到 77.3%。由于病毒缺乏细胞器，无法独立生长，只能依靠活的宿主细胞才能完成自身蛋白质衣壳和核酸的复制，而宿主细胞的存活需要水，因此污泥含水率降低会导致污泥中病毒含量的减少。

脱水后污泥通过卡车运输，使用铲车将污泥平铺到太阳能干化棚，污泥厂共有 6 条太阳能干化生产线，通过布料收料一体机的布料和翻抛，在日晒、风吹等自然条件下，形成一个高温干燥的区域使污泥温度保持在冬季 27 ℃，夏季 38 ℃ 左右，通过 20 d 左右的干化处理，当污泥含水率降至 40% 即可运出污泥处理厂。从图 6 中可以看到，太阳能干化去除污泥中诺如病毒总量的 2.4%、腺病毒总量的 1.5%、轮状病毒总量的 7.1%。太阳能干化属于低温热干化，分析数据可得其去除诺如病毒和轮状病毒的效率比腺病毒高，太阳能干化单元影响病毒去除效果的主要因素是温度和污泥含水率，然而腺病毒由于其对环境抗性强，太阳能干化对其去除效率不及诺如和轮状病毒，其对数去除率为 0.21 lg。研究表明，腺病毒本身对紫外线和消毒剂的耐受能力更强，其机理目前可分为两种，一是根据 Schwarzenberger 和 Scheid 的研究，腺病毒进入水中后会被 Acanthamoeba (棘阿米巴属变形虫) 吸附，腺病毒虽不能在其体内繁殖，但能保持感染活性并减少各类消毒措施对腺病毒的杀灭效果^[32]，并且 Mattana 等^[33]的研究表明原生动物的吸附能力不同，两者之间存在一定的选择性。二是因腺病毒为双链 DNA 结构，其在污泥中的稳定性要高于另两种 RNA 病毒。

最终出泥中仅有诺如病毒总量的 1.3%、腺病毒总量的 2.4%、轮状病毒总量的 1.6%，残留在干化污泥中，但是由于病毒总量较大，其平均含量分别达到了 1.52×10³，5.17×10⁴，7.92×10³ copies/g DW。国内外目前没有对污泥中肠道病毒的含量做限制指标，但据国外文献统计，美国 b 类污泥中检出的腺病毒含量在 3.7×10⁰~4.3×10² copies/g DW，诺

如病毒的含量在 $1.0 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^3$ copies/g DW^[34], 六安污泥中肠道病毒含量处在美国 b 类污泥中的中高水平, 残留的诺如病毒、腺病毒、轮状病毒的含量进入环境后仍有较高风险。

3 结 论

在污泥厌氧消化和太阳能干化系统中, 3 种典型肠道病毒的去除效率由高到低为诺如病毒, 轮状病毒, 腺病毒, 其对数去除率分别为 1.88, 1.79, 1.61 lg。腺病毒作为 DNA 病毒, 其自身分子结构稳定, 环境抗性强, 相比其他两种 RNA 病毒在该污泥处理系统中赋存含量较高, 去除效果较差。

污泥厌氧消化单元和太阳能干化单元是该污泥厂去除典型肠道病毒的主要单元, 其中厌氧消化单元对诺如病毒和腺病毒去除效率最高, 其对数去除率分别达到了 0.68 lg 和 0.61 lg, 太阳能干化单元对轮状病毒去除效率最高, 其对数去除率达到了 0.73 lg。

通过对 3 种典型肠道病毒归趋分析可得, 该污泥处理流程对诺如病毒、腺病毒、轮状病毒总量的去除分别达到 98.7%, 97.6%, 98.4%, 但由于进泥中病毒总量较高, 最终出泥中典型肠道病毒平均浓度仍有 $10^3 \sim 10^4$ copies/g DW, 处在美国 b 类污泥中肠道病毒含量的中高水平, 其进入土壤环境后对人体仍有致病风险。

参考文献:

- [1] 王连杰, 李金河, 郑兴灿, 等. 城镇污水系统中病毒特性和规律相关研究分析 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 14–21.
- [2] WIGGINTON K R, YE Y, ELLENBERG R M. Emerging investigators series: the source and fate of pandemic viruses in the urban water cycle[J]. Environmental Science:Water Research & Technology, 2015, 1(6): 735–746.
- [3] SCHLINDWEIN A D, SIMÕES C, BARARDI C. Comparative study of two extraction methods for enteric virus recovery from sewage sludge by molecular methods[J]. Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, 2009, 104(4): 576–579.
- [4] 孙玉焕, 骆永明. 污泥中病原物的环境与健康风险及其削减途径 [J]. 土壤, 2005, 37(5): 474–481.
- [5] 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]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(13): 5459–5469.

- [6] DUMONTET S, SCOPA A, KERJE S, et al. The importance of pathogenic organisms in sewage and sewage sludge[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, 51(6): 848–860.
- [7] STRAUCH D. Survival of pathogenic micro-organisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge[J]. *Revue Scientifique et Technique de l'OIE*, 1991, 10(3): 813–846.
- [8] GB 24188—2009, 城镇污水处理厂污泥泥质 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [9] GB 4284—2018, 农用污泥污染物控制标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [10] JIANG Y, XIE S H, DENNEHY C, et al. Inactivation of pathogens in anaerobic digestion systems for converting biowastes to bioenergy: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 120: 109654.
- [11] ALBINANA-GIMENEZ N, CLEMENTE-CASARES P, BOFILL-MAS S, et al. Distribution of human polyomaviruses, adenoviruses, and hepatitis e virus in the environment and in a drinking-water treatment plant[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(23): 7416–7422.
- [12] ARRAJ A, BOHATIER J, LAVERAN H, et al. Comparison of bacteriophage and enteric virus removal in pilot scale activated sludge plants[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(2): 516–524.
- [13] PEPPER I L, BROOKS J P, GERBA C P. Pathogens in biosolids[J]. Advances in Agronomy, 2006, 90: 1–41.
- [14] TOZZOLI R, DI BARTOLO I, GIGLIUCCI F, et al. Pathogenic *Escherichia coli* and enteric viruses in biosolids and related top soil improvers in Italy[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, 122(1): 239–247.
- [15] CRAWFORD S E, RAMANI S, TATE J E, et al. Rotavirus infection[J]. *Nature Reviews Disease Primers*, 2017, 3(1): 17083.
- [16] GHOLIPOUR S, GHALHARI M R, NIKAEEN M, et al. Occurrence of viruses in sewage sludge: a systematic review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153886.
- [17] 李伟, 马富亮, 文洋, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情期期间城镇再生水厂污泥处理处置运行实践 [J]. 北京水务, 2021, (3): 41–47.
- [18] CARRATURO F, PANICO A, GIORDANO A, et al. Hygienic assessment of digestate from a high solids anaerobic co-digestion of sewage sludge with biowaste by testing *Salmonella* Typhimurium, *Escherichia coli* and

SARS-CoV-2[J]. *Environmental Research*, 2022, 206(20): 112585.

[19] AL-SULAIMI I, NAYAK J K, AL-MAMUN A, et al. Effective removal of Helminths Ova from wastewater and its inactivation from sewage sludge using thermophilic anaerobic digestion[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2023, 20: 100793.

[20] YANG W, CAI C, GUO Y Q, et al. Diversity and fate of human pathogenic bacteria, fungi, protozoa, and viruses in full-scale sludge treatment plants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 134990.

[21] 王晓俐, 刘利军. 污染场地调查采样布点浅析 [J]. *山西化工*, 2013, 33(6): 59–63.

[22] 湛宏伟, 陈鸿汉, 刘菲, 等. 污染场地健康风险评价的实例研究 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 230–235.

[23] EISCHEID A C, THURSTON J A, LINDEN K G. UV disinfection of adenovirus: present state of the research and future directions[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(15): 1375–1396.

[24] DECREY L, KOHN T. Virus inactivation in stored human urine, sludge and animal manure under typical conditions of storage or mesophilic anaerobic digestion[J]. *Environmental Science:Water Research & Technology*, 2017, 3(3): 492–501.

[25] GERBA C P, ROSE J B, HAAS C N. Sensitive populations: who is at the greatest risk?[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1996, 30(1/2): 113–123.

[26] 周立祥, 郑绍建, 胡霁堂. 污泥农牧地应用中病原物的存活及其控制措施 [J]. *农业环境保护*, 1995, 14(3): 128–131.

[27] JOHN D E, ROSE J B. Review of factors affecting microbial survival in groundwater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(19): 7345–7356.

[28] WARD R L, ASHLEY C S. Identification of the virucidal agent in wastewater sludge[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1977, 33(4): 860–864.

[29] MAGRI M E, FIDJELAND J, JÖNSSON H, et al. Inactivation of adenovirus, reovirus and bacteriophages in fecal sludge by pH and ammonia[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 520: 213–221.

[30] VASICKOVA I, PAVLIK M, VERANI A, et al. Issues concerning survival of viruses on surfaces[J]. *Food and Environmental Virology*, 2010, 2(1): 24–34.

[31] 戴晓虎, 李小伟, 杨婉, 等. 污水处理厂污泥中病毒的赋存特性及处理处置过程中暴露风险防控研究进展 [J]. *给水排水*, 2020, 46(3): 60–73.

[32] CARDUCCI A, MORICI P, PIZZI F, et al. Study of the viral removal efficiency in a urban wastewater treatment plant[J]. *Water Science & Technology*, 2008, 58(4): 893–897.

[33] MATTANA A, SERRA C, MARIOTTI E, et al. *Acanthamoeba castellanii* promotion of in vitro survival and transmission of coxsackie B3 viruses[J]. *Eukaryotic Cell*, 2006, 5(4): 665–671.

[34] BROOKS J P, MCLAUGHLIN M R, GERBA C P, et al. Land application of manure and class B biosolids: an occupational and public quantitative microbial risk assessment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6): 2009–2023.

(编辑：黄 娟)