

污水处理工艺对病毒的去除效果及 疫情期应急处理技术*

夏梦 苏益明 陈家斌 周雪飞 张亚雷[#]

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘要 在综述了对病毒具有高效物理筛分和截留作用的膜分离工艺和对病毒具有灭活作用的紫外线、液氯/二氧化氯、臭氧3种消毒工艺的基础上,针对疫情期病毒污水的防控提出了应急处理技术:(1)病毒污水的源头控制至关重要;(2)污水及污泥的处理工艺应当调整,以满足排放标准和处置要求;(3)应当加强相关工作人员个人防护措施。

关键词 污水处理工艺 新型冠状病毒 应急技术

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.04.023

Effect of sewage treatment technology on virus removal and emergency treatment technology in epidemic period XIA Meng, SU Yiming, CHEN Jiabin, ZHOU Xuefei, ZHANG Yalei. (State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Based on the review of membrane separation technology with effective physical screening and interception of virus and three disinfection technologies of ultraviolet ray, liquid chlorine/chlorine dioxide and ozone with inactivation of virus, the technical suggestions for emergency treatment of viral sewage during epidemic period were provided as follows: (1) viral sewage should be critically controlled in source. (2) Sewage and sludge treatment processes should be adjusted to meet discharge standards and disposal requirements. (3) Personal protective measures should be strengthened.

Keywords: sewage treatment technology; novel coronavirus; emergency treatment technology

全球范围内由病毒污染环境引起流行性传染病暴发的事件不断发生,严重威胁着人类健康。2003年,中国香港高层住宅区暴发的涉及300多人的SARS疫情被提出与一个有缺陷的污水处理系统有关^[1]。目前,在全国暴发的新型冠状病毒已证实的传播途径主要为飞沫和接触传播,气溶胶传播途径尚待进一步明确。而近期专家在部分病患粪便标本中检测到了新型冠状病毒,这预示着新型冠状病毒存在粪口传播风险^[2]。针对这一发现,《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》(环办水体函[2020]52号),为医疗和城镇污水的处理提出了新要求。对于传统污水处理系统,污水一级、二级处理工艺很难完全去除病毒或灭活病毒^[3],在疫情暴发期间很难达标排放。针对新型冠状病毒疫情期病毒污水防控的特殊需求,本研究重点综述了对病毒具有高效物理筛分和截留作用的膜分离工艺和对病毒具有灭活作用的紫外线、液氯/二氧化氯、臭氧3种消毒工艺,综合评估了

不同污水处理工艺杀灭病毒的能力,为新型冠状病毒暴发期污水安全处理提供参考依据。

1 水体中病毒的赋存及分布特性

水体中病毒的赋存主要指通过相关检测表征病毒是否存在,与其存在形式与结合状态无关^{[4]9}。

1.1 自然水体中病毒的赋存及传播途径

病毒是一类蛋白质外壳包裹核酸(DNA和RNA)的微小非细胞生命形态,一旦脱离宿主进入自然环境后不能进行自我复制与增殖,但在天然状态下能长期存活并保持感染活力,如肠道、轮状、甲型肝炎和诺如等病毒在自然水体中存活时间可长达1个月以上并保持强感染性^{[5]2}。目前,已发现有700余种介水传播病毒,它们中大多数可稳定存在于各类水体中并能随水四处流动传播^{[4]2}。

病毒在水体中的传播主要通过饮用水、食物和直接接触3种方式进行传播。饮用水传播主要是大量病毒颗粒通过感染者的粪便或呕吐物排入污水

第一作者:夏梦,女,1990年生,博士研究生,研究方向为污水处理与生物质资源化利用。[#] 通讯作者。

* 国家杰出青年科学基金资助项目(No.51625804)。

表 1 饮用水传播病毒性疾病暴发案例
Table 1 Outbreaks of water-borne viral diseases

病毒	年份	地区	所致疾病	涉及人数	参考文献
甲型肝炎	2000	中国	甲型肝炎	124	[7]
轮状	2002—2003	阿尔巴尼亚	肠胃炎	2 722	[8]
	2005	印度	肠胃炎	1 783	[9]
轮状	2005	巴西	肠胃炎	799	[10]
	2007	德国	肠胃炎	59 000	[11]
	2005—2006	美国	肠胃炎	148	[12]
诺如	2007—2008	美国	肠胃炎	54	[13]
	2014	中国	病毒性腹泻	259	[14]
星状	2011	中国	病毒性腹泻	117	[15]

中^[6],然后未处理或处理不充分的污水进入受纳自然水体,进而污染饮用水源,人饮用后造成传染病的发生。近年,一些饮用水传播病毒性疾病暴发案例见表 1。

食物传播主要是食用病毒污水污染的水产品或长期灌溉的蔬菜,造成的食源性疾病暴发^[16]。有报道表明,诺如病毒引起的肠胃炎暴发及甲型肝炎病例都与食用受病毒污染的贝类有关^[17]。1988 年,上海流行的甲型肝炎被证实与食用被污染的毛蚶有关。另外有研究表明,用被脊髓灰质炎病毒污染的再生水浇灌芹菜,2 个月后仍可检出感染性病毒颗粒^[18]。

直接接触传播主要通过暴露在受病毒污染的景观娱乐水体中直接接触黏膜或伤口进入人体造成污染病的发生。XAGORARAKI 等^[19]报道了美国某海滩人体腺病毒为 10^3 个/L。而病毒在景观娱乐水体中的出现增加了人体暴露风险。有报道称,暴露在病毒污染严重的区域,感染耳朵、眼睛、肠胃或呼吸道疾病的风险是在未受病毒污染区域的两倍以上^[20]。

1.2 污水和污泥中病毒的赋存及分布特性

城市污水中含有大量的病原体。污水中的病毒一般会附着在泥砂、黏土、矿物等悬浮固体表面,这可在某种程度上对病毒起保护作用,使病毒具有一定的逆境抗性从而延长其存活时间^{[5]19}。特别是当病毒颗粒以聚集状态存在时,可提高其在不利环境因素下的存活几率,很大程度上病毒仅是从液相转移到了固相,即病毒被转移到污泥中。病毒在污水和污泥中的存活主要受污水、污泥的温度、盐度和成分等的影响。有报道称,肠道病毒在 22 ℃ 时灭活效率最高^{[21]443};冠状病毒灭活受温度影响极大^[22]。污水成分对病毒具有复杂的影响机制,污水中的一些细菌,如克雷伯氏菌、产气杆菌、枯草杆菌、绿脓杆菌

等可引起病毒灭活,一般认为,这些细菌的分泌物具有蛋白酶的作用从而能破坏病毒蛋白衣壳使其灭活,或通过细菌直接捕食使病毒去除^{[4]9};污水中一些藻类产生的多糖、多肽及小分子代谢产物等可使病毒灭活;污水中的悬浮物和有机物可提高病毒在水环境中的生存能力。此外,污泥的干化过程对病毒存活有较大影响,在污泥干化过程中加入石灰等物质提高 pH,能明显提高病毒去除率^{[1]10}。

2 不同污水处理工艺对病毒去除作用的评估

污水处理过程主要通过分离和灭活两种方式降低病毒浓度。分离是指病毒附着在颗粒物或絮体(如沙砾、污泥、混凝剂形成的絮体等)上,通过沉淀或过滤将病毒从污水中去除。灭活是指病毒受环境因素或消毒剂作用后丧失感染能力^{[4]19}。污水处理工艺对病毒的杀灭效果通常用病毒对数消减量(即出水与进水中病毒数量比的对数)表示^{[23]3607}。污水的一级处理主要是对附着病毒颗粒物进行分离沉淀。研究表明,一级处理工艺对病原微生物的去除效果较弱,甚至有研究表明,一级处理工艺有时会使污水中病毒数量不降反增;二级处理的活性污泥法被认为是减少病毒最有效的方法,病毒对数消减量约 1.0~1.6,比一级处理工艺多减少 1 左右^[24]。然而,它们大多不能灭活病毒,仅是将病毒从液相中转移出来。三级处理工艺对污水中较大颗粒病毒有显著去除效果,此物理过程可有效去除污水中 90%~99% 的病毒^{[21]444-445}。但较小病毒胶体颗粒($<10 \mu\text{m}$)仍然残存在水体中,存在危害人体健康的潜在风险,需要进一步消毒灭活。

2.1 膜分离技术

膜分离包括微滤、超滤、纳滤和反渗透等。HAI 等^{[23]3607-3608}评价了不同膜材料对 MS2 噬菌体的去除效率,结果表明,微滤对 MS2 噬菌体的对数消减

量最低,仅为 <1.79 ,超滤对 MS2 噬菌体的对数消减量较高(≥ 3),反渗透对 MS2 噬菌体的对数消减量最高(>6.5),但反渗透系统的造价及运行成本较昂贵,普通污水处理很少应用。

2.1.1 超滤法

以压力为推动力的膜分离技术之一的超滤法,用于改善污水水质,特别是提升再生水水质,清除病毒效果良好^{[25]23}。QIU 等^[26]研究发现,诸如、轮状、沙坡、星形、腺、肠道和 JC 病毒通过超滤处理后,病毒对数消减量达到 4.61~6.69。超滤法对于不同病毒的去除存在明显差异性,这种差异可能取决于病毒的颗粒大小、结构、膜孔径和膜的静电吸附作用等^[27]。OTTOSON 等^[28]在比较超滤去除病毒的研究中发现,超滤对肠道病毒的去除效果较好,而对诺如病毒的去除效果较差。研究发现,聚砜类超滤膜(10~300 ku)对病毒的对数消减量 ≥ 3 ,其中 100、150 ku 聚醚砜超滤膜的病毒对数消减量分别为 3.54、 >4.89 ;醋酸纤维素超滤膜(100 ku)的病毒对数消减量 >6 ^{[29]3608}。此外,水质条件也可影响超滤法对病毒的去除效果。LEE 等^{[25]28}等研究表明,调整水质 pH 为 5.5,混凝/超滤法的病毒去除率显著提升。虽然超滤法可有效降低病毒在水体中水平,但是其造价及运行成本都较昂贵,因此仍然需要进一步开发新型的膜分离技术。

2.1.2 膜生物反应器(MBR)

MBR 是一种将污水生物处理技术与膜分离技术相结合的新型污水处理工艺。研究表明,MBR 对病毒的去除最初主要依靠膜表面和膜孔径的吸附作用,随着膜污染程度的加剧,膜表面的滤饼层和凝胶层的截留机制对病毒的去除起主要作用^{[29]3616}。MBR 的病毒对数消减量为 3.4~6.8^[29-30]。需要注意的是,水质条件(悬浮物固体浓度、粒度分布、溶解性有机物浓度和黏度等)会影响膜污染,进而影响其去除病毒的效能。有研究表明,投加氢氧化铁、生物铁、氯化铁等可有效缓解 MBR 膜孔阻塞,提高膜组件对细菌、病毒的截留效果^[31]。此外,MBR 运行参数也是影响病毒去除的重要因素,研究表明,较长水力停留时间和较短污泥龄可提高病毒的去除率。

2.2 消毒

2.2.1 紫外线消毒法

紫外线主要起杀菌作用的波长在 254~257 nm,该波段可满足微生物内部 DNA 和 RNA 的能量吸收,导致碱基对发生聚合,进而阻止蛋白质合成,使得微生物不能繁殖,达到杀灭微生物的目的^{[32]6}。其消毒效果受水温、pH 影响小,但受浊度及水中悬浮物影响较大。紫外线消毒的广谱高效性意味着其对病毒具有很好的灭活效果。研究表明,实际水处理中,紫外线消毒剂量一般为 40~140 mW·s/cm²,当紫外线消毒剂量为 30~45 mW·s/cm²时就可高效去除二级处理和深度处理出水中病毒和链球菌^[33]。本次流行的新型冠状病毒与 SARS 病毒同属于冠状病毒。研究表明,在 40 mW·s/cm²紫外线辐射下作用 2 min 可将 SARS 病毒的感染性完全杀灭^[34]。目前,《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第七版)》也提出新型冠状病毒对紫外线敏感。虽然紫外线消毒法能在短时间内杀死大部分病原体,但其灭菌作用只在其辐照期间有效,不具有残余的消毒能力。另外,微生物细胞自身修复和光修复作用容易使水体重新被污染。紫外光灯的稳定性和老化问题也是紫外线消毒过程中亟待解决的难题。

2.2.2 液氯/二氧化氯消毒法

液氯消毒作用主要依靠 HOCl 的强氧化性来实现。当液氯进入水中后会立刻水解生成具有强氧化性的 HOCl 和 ClO⁻,HOCl 是分子量很小的电中性分子,容易渗透扩散进带有负电的微生物细胞内,破坏其胞内的酶系统,导致致病菌死亡^{[32]7}。液氯消毒对水质 pH 敏感,由于实际待消毒水体中含有氨氮,向水中投氯后,HOCl 与氨分段反应过程影响消毒作用,当 pH >9.0 时,几乎只生成一氯胺;当 pH 约为 7.5 时,生成数量相当的一氯胺和二氯胺;在 pH <6.5 时,二氯胺占优势;当 pH <4.5 时,三氯胺生成。导致氨氮和起氧化作用的氯完全从溶液中消失的点称为折点。折点后剩余氯是游离态的有效余氯,这时消毒效果最好。城市深度处理出水消毒需要的氯剂量 5~20 mg/L、接触反应时间 30~60 min。当污水中游离余氯量保持 0.5 mg/L 以上时可保证完全灭活污水中的 SARS 病毒^{[35]69}。实际应用中,液氯消毒的有效性取决于液氯投加量,若液氯投加量过少则消毒效果不明显,投加量过多会造成二次污染^[36-37],因此必须根据实际情况确定投氯的装置和设备,使其达到理想的消毒效果又避免二次污染^{[32]7}。

2.2.2 液氯/二氧化氯消毒法

二氧化氯消毒较液氯具有明显的优越性,它是一种强氧化剂,在水中的溶解度是氯的 5 倍,氧化能力是氯的 2.63 倍,其杀菌作用不受 pH 影响,可在广泛的 pH(3~9)范围内杀灭水中的细菌和病毒。但受水温影响较大,低温时需要提高二氧化氯投加量。目

前,二氧化氯灭活病毒的机制存在两种不同的观点,一种是病毒核酸直接发生致死性损害灭活病毒;另一种是病毒蛋白衣壳变性灭活病毒^[38]。虽然二氧化氯对不同病毒的灭活机制不同,但研究表明,二氧化氯对多种病毒均具有良好的灭活效果,当 pH 为 3~7、剂量 7 mg/L、接触反应 10 min 时可有效灭活脊髓灰质炎、柯萨奇、埃可、腺、单纯疱疹和流行性腮腺炎等病毒^[39]。当污水中二氧化氯保持 2.19 mg/L 以上时可保证完全灭活污水中的 SARS 病毒^{[35]69}。

2.2.3 臭氧消毒法

臭氧消毒对病毒、芽孢等具有强大的杀伤力,是目前最有效的一种消毒剂^[40],其灭活病毒的机制根据主要破坏的是病毒衣壳还是核酸而存在差异。臭氧消毒不残留有害物质,不存在二次污染的可能性,其消毒在宽泛的水体温度和 pH 范围内均有效,在低浊度(≤ 1 NTU)和低有机物的水体中,臭氧消毒 5 min 后,剩余臭氧量约为 0.1 mg/L 可满足消毒要求。在城市污水消毒中,1~10 mg/L 的臭氧量接触反应 15 min 就能把细菌和病毒杀死。水中臭氧为 17.82 mg/L 作用 4 min 可使 SARS 病毒完全灭活^[41]。有研究表明,臭氧对医院污水消毒的最优工艺条件为 pH=9.5、 5°C 、反应 60 s、臭氧投加量 20 mg/L,此时对粪大肠菌群的对数消减量可达到 3.37^{[32]50-50}。

3 新型冠状病毒疫情期病毒污水应急处理技术

根据不同污水处理工艺去除病毒的效果,现从以下 4 个方面提出新型冠状病毒疫情期病毒污水应急处理技术:

(1) 强化污染源污水管理控制,防止污染扩散。对于近期中国暴发的新型冠状病毒,研究人员已在感染者粪便中检测到病毒存在。因此,做好相关场所,特别是医院污染源管理控制是防止污染扩散的关键环节。对已设有污水处理设施的医院应强化污水处理,适当调整消毒剂投加量,确保各项消毒指标均能达标排放。对于中小型及乡镇医院,绝大多数的污水基本没有经过严格处理^[42],因此不得直排进入城市污水排水管网,应当采用专用的容器收集病区人员的排泄物,进行单独消毒处理,或进行改建增设污水处理设施,以保证排水的安全性。

(2) 适当调整污水处理工艺,快速灭活病毒。疫情暴发期污水处理厂应适当调整消毒工艺,暂停再生水使用。对于采用氯消毒的项目,应适当调整氯投加量,保持出水中有余氯;对于采用紫外线消毒的项目,由于其没有后续消毒作用,建议增加

临时管道投加氯消毒剂做辅助;对于采用臭氧消毒的项目,应适当调整其投加量和接触反应时间;对于采用膜分离的项目,应密切关注膜污染情况,可适当投加药剂进行调控,试剂可采用聚合氯化铝或多核类絮凝剂,投加量宜为 20~50 mg/L。此外,应加强生化系统监控,进水中如存在过量余氯,将会降低或抑制活性污泥的活性,影响生物处理单元的正常运行,故需对活性污泥形状进行密切观察。疫情期间,应密切观察进出水水质水量变化,提前预判并及时调整工艺参数,确保系统运行稳定。

(3) 关注污泥处理处置,防止病毒扩散传播。疫情期间各处理单位应适当减少生化池污泥各项指标的检测频次,密切关注在线污泥浓度。如有异常,及时比对仪表并化验检测,同时做出相应调整。对于污泥的处理处置,疫情期间应当充分考虑相关病毒学安全性问题,建议提高污水处理厂污泥热干化温度,或在污泥干化环节增设消毒工艺,消毒剂可采用液氯、次氯酸钠或过氧乙酸等,进一步提高灭活病毒的效率。建议污泥的各处理环节在全密闭环境中进行,防止病毒传播扩散,当污泥相应指标符合要求后进行卫生填埋或焚烧处置。

(4) 加强工作环境安全,落实个人防护措施。疫情期间,预处理单元应该保持良好的通风和除臭,污水渠道和相关设备保持密闭,防止臭气和病菌散发。生产区域内所有可能接触污水、污泥的生产区域,应每日消毒处理。来水水质水量稳定的情况,进出水指标应尽量以在线监测设备自动检测为主,视情况减少人工取样化验频率。对需要人工检测的项目,取样人员应当做好相应防护措施:①取样前应正确佩戴防护用品;②取样时应避免身体部位与污水直接接触;③检测期间,应打开通风系统;④检测完成后,要对取样器材、化验室进行消毒;⑤离开工作场所前,摘除口罩、防护镜等集中消毒或处理;⑥离开工作场所后,及时做好个人清洁工作。

4 结 论

新型冠状病毒的暴发严重威胁人民身体健康,而其潜在的粪口传播途径更对公众健康造成隐患。因此,疫情暴发期含病毒污水的安全处理显得尤为重要。在综述了对病毒具有高效物理筛分和截留作用的膜分离工艺和对病毒具有灭活作用的紫外线、液氯/二氧化氯、臭氧 3 种消毒工艺的基础上,针对疫情期病毒污水的防控提出了应急处理技术:(1)病毒污水的源头控制至关重要;(2)污水及污泥的处理

工艺应适当调整,以满足排放标准和处置要求;(3)应当加强相关工作人员个人防护措施。

参考文献:

- [1] PEIRIS J S M, CHU C M, CHENG V C C, et al. Clinical progression and viral load in a community outbreak of coronavirus-associated SARS pneumonia: a prospective study [J]. *The Lancet*, 2003, 361(9371): 1767-1772.
- [2] 齐晔, 陈刘欢, 张栗, 等. 新型冠状病毒肺炎的公众认知、态度和行为研究[J]. *热带医学杂志*, 2020, 20(2): 145-149.
- [3] 赵祖国. 污水中病毒浓缩、消毒规律及灭活机理研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2008.
- [4] 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.
- [5] 李丹. 水中病毒分析方法及水处理过程病毒去除特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [6] HAMZA I 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.
- [7] 龚震宇, 杨介者, 李立壮, 等. 一起学生饮用生水引起的甲型肝炎爆发疫情调查[J]. *中华流行病学杂志*, 2002, 23(2): 155.
- [8] DIVIZIA M, GABRIELI R, DONIA D, et al. Waterborne gastroenteritis outbreak in Albania [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(1): 57-61.
- [9] KARMAKAR S, RATHORE A S, KADRI S M, et al. Post-earthquake outbreak of rotavirus gastroenteritis in Kashmir (India): an epidemiological analysis [J]. *Public Health*, 2008, 122(10): 981-989.
- [10] SIQUEIRA A A, SANTELLI A C F S, ALENCAR JR L R, et al. Outbreak of acute gastroenteritis in young children with death due to rotavirus genotype G9 in Rio Branco, Brazilian Amazon region, 2005 [J]. *International Journal of Infectious Diseases*, 2005, 14(10): 898-903.
- [11] MAYR C, STROHE G, CONTZEN M. Detection of rotavirus in food associated with a gastroenteritis outbreak in a mother and child sanatorium [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2009, 135(2): 179-182.
- [12] YODER J, ROBERTS V, CRAUN G F, et al. Surveillance for waterborne disease and outbreaks associated with drinking water and water not intended for drinking - United States, 2005-2006 [J]. *Surveillance Summaries*, 2008, 57(9): 39-69.
- [13] BRUNKARD J M, AILES E, ROBERTS V A, et al. Surveillance for waterborne disease outbreaks and other health events associated with recreational water - United States, 2007-2008 [J]. *Surveillance Summaries*, 2011, 60(12): 1-32.
- [14] 宋建强, 朱晓微, 楼银伟, 等. 饮用不洁桶装水引起的一起诺如病毒急性胃肠炎暴发调查[J]. *浙江预防医学*, 2015, 27(10): 1045-1048.
- [15] 夏文, 倪贤生, 吴越, 等. 一起星状病毒引起暴发流行的实验室检测[J]. *现代预防医学*, 2013, 40(4): 744-745.
- [16] KUKKULA M, MAUNNULA L, BONSDORFF S C H V. Outbreak of viral gastroenteritis due to drinking water contaminated by norwalk-like viruses [J]. *The Journal of Infectious Diseases*, 1999, 180(6): 1771-1776.
- [17] KARAMOKO Y, IBENYASSINE R, AIT MHAND R, et al. Assessment of enterovirus contamination in mussel samples from Morocco [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology Advances*, 2006, 22(2): 105-108.
- [18] SOIZICK L G, ROBERT A. A scientific review of binding and inactivation of viruses on and in food, with a focus on the role of the matrix [M]. Washington, D. C.: American Society for Microbiology (ASM) Press, 2008.
- [19] XAGORAKI I, KUO D H W, WONG K, et al. Occurrence of human adenoviruses at two recreational beaches of the Great Lakes [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(24): 7874-7881.
- [20] HEERDEN J, EHLERS M M, GRABOW W O L. Detection and risk assessment of adenoviruses in swimming pool water [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 99(5): 1256-1264.
- [21] ARTUR R, NIGEL C. Survival of human enteric viruses in the environment and food [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2004, 28(4): 10-14.
- [22] GUNDY P M, GERBA C P, PEPPER I L. Survival of coronaviruses in water and wastewater [J]. *Food and Environmental Virology*, 2009, 1(1): 10-14.
- [23] HAI F I, RILEY T, SHAWKAT S, et al. Removal of pathogens by membrane bioreactors: a review of the mechanisms, influencing factors and reduction in chemical disinfectant dosing [J]. *Water*, 2014, 6.
- [24] LUCENA F, DURAN A E, MORON A, et al. Reduction of bacterial indicators and bacteriophages infecting faecal bacteria in primary and secondary wastewater treatments [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2004, 97(5): 1069-1076.
- [25] LEE S, IHARA M, YAMASHITA N, et al. Improvement of virus removal by pilot-scale coagulation-ultrafiltration process for wastewater reclamation: effect of optimization of pH in secondary effluent [J]. *Water Research*, 2017, 114(1).
- [26] QIU Y, LEE B E, 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.
- [27] MADAENI S S A, FANE A G A, GROHMANN G S B. Virus removal from water and wastewater using membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 1995, 102: 65-75.
- [28] OTTOSON J, HANSEN A, BJORLENIUS B, et al. Removal of viruses, parasitic protozoa and microbial indicators in conventional and membrane processes in a wastewater pilot plant [J]. *Water Research*, 2006, 40(7): 1449-1457.
- [29] KUO 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 Research*, 2010, 44(5): 1520-1530.
- [30] SIMMONS F J, KUO D H W, XAGORAKI I. Removal of human enteric viruses by a full-scale membrane bioreactor during municipal wastewater processing [J]. *Water Research*, 2011, 45(9): 2739-2750.
- [31] 刘晓娟. 氢氧化铁-膜生物反应器处理医院污水的实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [32] 王哲. 医院污水臭氧消毒工艺优化研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2015.
- [33] BRAUNSTEIN J L, LOGE F J, TCHOBANOGLOUS G, et al. Ultraviolet disinfection of filtered activated sludge effluent for reuse applications [J]. *Water Environment Research*, 1996, 68(2): 152-161.
- [34] ANSALDI F, BANFI F, MORELLI P, et al. SARS CoV influenza A and syncytial respiratory virus resistance against common disinfectants and ultraviolet irradiation [J]. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*, 2004, 45(12): 5-8.
- [35] 王新为, 李劲松, 金敏, 等. SARS 冠状病毒的抵抗力研究[J]. *环境与健康杂志*, 2004, 21(2).
- [36] 黄其明. 综合医院的污水处理[J]. *给水排水*, 2001, 27(5): 68-70.
- [37] SCHIJVEN J, TEUNIS P, SUYLEN T, et al. QMRA of adenovirus in drinking water at a drinking water treatment plant using UV and chlorine dioxide disinfection [J]. *Water Research*, 2019, 158: 34-45.
- [38] SHANNON M A, BONN P W, ELIMELECH M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades [J]. *Nature*, 2008, 452(7185): 301-310.
- [39] 吴锦华, 韦朝海, 李平, 等. 医院含病毒污水的安全处理技术[J]. *安全与环境学报*, 2004, 4(增刊): 8-10.
- [40] KANJO Y, KIMATA I, ISEKI M, et al. Inactivation of *Cryptosporidium* spp. oocysts with ozone and ultraviolet irradiation evaluated by in vitro excystation and animal infectivity [J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(7): 119-125.
- [41] 张翔敏, 郑从义, 肖庚富, 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.
- [42] 唐心强, 大年邦雄, 张丽清, 等. 不同类型医院污水处理方案的分析与优化[J]. *环境科学与管理*, 2005, 12(6): 91-93.

编辑: 黄 苇 (收稿日期: 2020-02-26)

