

## 净水技术前沿与热点综述

黄思伟, 刘成, 李荣, 等. 城镇污水处理工艺去除病原微生物的研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(4):4-13.

HUANG S W, LIU C, LI R, et al. Research progress of urban wastewater treatment process for pathogenic microorganisms removal[J].

Water Purification Technology, 2022, 41(4):4-13.



扫我试试?

## 城镇污水处理工艺去除病原微生物的研究进展

黄思伟<sup>1</sup>, 刘成<sup>1,\*</sup>, 李荣<sup>1</sup>, 李鹏程<sup>2</sup>

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211816)

**摘要** 城镇污水中含有大量的病原微生物, 其具有强致病性和强耐受性, 进入水环境后可能对人类健康及生态环境造成严重影响, 因此, 对污水中病原微生物的控制尤为关键。消毒工艺是控制病原微生物的主要工艺, 但较高的病原微生物负荷可能会影响消毒工艺的效果, 为了控制污水厂出水的微生物风险, 这需要消毒工艺前的各工艺将水中的病原微生物量控制到较低的程度以保障出水水质的安全, 因此, 探究并强化除消毒工艺外的污水处理工艺对病原微生物的控制则具有重要意义。文中综述了病原微生物的种类及其危害性, 总结分析了污水处理厂各工艺对病原微生物的控制效能及机理, 最后对现阶段病原微生物控制存在的问题及尚需完善的内容进行了讨论, 以为污水处理厂中病原微生物的控制提供参考。

**关键词** 污水 病原微生物 控制效能 深度处理 现存问题

中图分类号: X703; TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)04-0004-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.04.002

## Research Progress of Urban Wastewater Treatment Process for Pathogenic Microorganisms Removal

HUANG Siwei<sup>1</sup>, LIU Cheng<sup>1,\*</sup>, LI Rong<sup>1</sup>, LI Pengcheng<sup>2</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract** Municipal wastewater contains a large number of pathogenic microorganisms, which have strong pathogenicity and strong tolerance and may cause serious effects on human health and ecological environment after entering the water body. Therefore, the control of pathogenic microorganisms in wastewater is particularly critical. Disinfection process is the main process for the control of pathogenic microorganisms, but a high load of pathogenic microorganisms may affect the effect of disinfection process. In order to control the microbial risk of wastewater treatment plant (WWTP) effluent, it is necessary to control the amount of pathogenic microorganisms in wastewater to a low degree by all processes before disinfection process to ensure the safety of effluent quality. Therefore, it is of great significance to explore and strengthen the wastewater treatment process in addition to the disinfection process for the control of pathogenic microorganisms. In this paper, the types and harmfulness of pathogenic microorganisms are reviewed, and the control efficiency and mechanism of each process on pathogenic microorganism in WWTP are summarized and analyzed. Finally, the existing problems and the contents that need to be improved in the control of pathogenic microorganisms are discussed, in order to

[收稿日期] 2021-08-08

[基金项目] 国家科技重大专项(2012ZX07403-001)

[作者简介] 黄思伟(1997—), 男, 硕士, 研究方向为污水深度处理工艺去除病原微生物, E-mail: 865600481@qq.com。

[通信作者] 刘成(1977—), 男, 教授, E-mail: 107489860@qq.com。

provide a reference for WWTP of pathogenic microorganisms in control.

**Keywords** wastewater pathogenic microorganism control efficiency advanced treatment existing problem

水是传播疾病的重要媒介,近几十年世界各地均暴发过大面积的水媒性传染病,每年因水中病原微生物而引发的疾病能造成 1.6 万~1 200 万人死亡<sup>[1]</sup>。城镇污水主要包括生活污水、工业废水以及径流污水,有超过 100 种的致病微生物,如大肠杆菌、志贺氏菌、肠道病毒、轮状病毒、隐孢子虫、贾第鞭毛虫等<sup>[1-2]</sup>。病原微生物具有个体小、繁殖快、存活能力强等特点,多数有较强的致病性和耐受性,处理不当则会带来潜在危险,提高了水源性流行疾病暴发的风险。除此之外,污水中也存在大量的抗生素抗性细菌及抗性基因并难以有效去除,进入到水环境后则会导致抗性基因广泛传播转移,影响自然微生态结构,对人体健康也有极大的威胁<sup>[3]</sup>。控制病原微生物是水质安全保障的首要问题,因此,对病原微生物控制方法的研究尤为重要。

污水处理厂是主要处理城镇污水的设施,通常通过一级处理、二级处理以及消毒处理实现对污水水质中典型污染物去除的目的。国家对污水处理的标准也逐步提升,2015 年国家出台的《水污染防治计划》对水环境质量和城镇污水厂升级改造都提出了明确的要求;地方政府在“水十条”的基础上,也颁布了更严格的地方排放标准<sup>[4]</sup>。目前,我国大部分城镇污水处理厂执行《城镇污水处

理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 排放标准,同时也有许多省市制定与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 IV 类和 III 类指标相当的排放标准。面对日益严格的出水水质要求,深度处理工艺有利于强化污水中病原微生物的去除,目前常用的深度处理工艺主要有膜分离工艺、混凝沉淀过滤工艺、人工湿地工艺、活性砂滤池工艺、深床滤池工艺等,可以通过截留、吸附、过滤、化学氧化和生物竞争等作用实现病原微生物的去除<sup>[5-7]</sup>。本文在分析城镇污水中病原微生物污染特性基础上,总结城镇污水处理工艺对病原微生物的控制效能及机理,并结合目前城镇污水处理领域的发展趋势,探讨污水厂病原微生物的强化控制途径及发展方向,以期污水处理厂的病原微生物的控制提供参考。

## 1 城镇污水中病原微生物的污染特点

污水中含有大量的病原微生物,主要包括病原菌、病毒和原生动物。病原微生物种类繁多,不同类型的病原微生物致病剂量不同,引起的健康危害也存在差异,因此,明确污水中病原微生物的种类、危害、致病剂量及浓度分布尤为重要。表 1 列出污水中较为典型的致病微生物的危害、致病剂量以及二级出水中浓度分布水平。

表 1 污水中常见的病原微生物特征及浓度分布水平<sup>[8-15]</sup>

Tab. 1 Characteristics and Concentration Distribution Level of Common Pathogenic Microorganisms in Wastewater<sup>[8-15]</sup>

名称	主要疾病	致病剂量	二级出水中浓度分布水平
志贺氏菌( <i>Shigella</i> )	痢疾、腹部痉挛、腹泻	低	2~20 个/L
沙门氏菌( <i>Salmonella</i> )	腹泻、肠胃炎、脑膜炎、骨髓炎	中	10~200 个/L
大肠杆菌( <i>Escherichia coli</i> )	出血性肠炎、腹泻、呕吐	高	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>6</sup> 个/L
肠病毒( <i>Enterovirus</i> )	脑膜炎、脑炎、结膜炎、呼吸系统疾病	低	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup> copies/L
腺病毒( <i>Adenovirus</i> )	肠胃炎、结膜炎、呼吸系统疾病	低	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup> copies/L
轮状病毒( <i>Rotavirus</i> )	肠胃炎、腹泻	低	0~10 <sup>3</sup> copies/L
诺如病毒( <i>Norovirus</i> )	肠胃炎、呕吐、腹泻	低	10~10 <sup>3</sup> copies/L
贾第鞭毛虫( <i>Giardia</i> )	腹泻、吸收不良综合征	低	10~2 500 孢囊/L
隐孢子虫( <i>Cryptosporidium</i> )	肠胃炎、腹泻、胆囊炎	低	1~100 卵囊/L

由表 1 可知,污水中病原微生物致病剂量各异但均能对人体造成危害,并在二级出水中仍有检出。

病原菌是污水中分布最广、数量最多的病原微生物,常见的水源性病原菌有致病性大肠杆菌、志贺氏菌、

沙门氏菌等。污水中含有大量的病原菌,其中,粪大肠菌群、沙门氏菌、志贺氏菌等典型病原菌在污水厂进水中的含量分别高达  $10^8 \sim 10^{10}$ 、 $10^7 \sim 10^8$ 、 $10^7 \sim 10^8$  个/L<sup>[16-17]</sup>。致病菌种类繁多,分离、检测以及定量均很复杂,因此,将以总大肠菌群、粪大肠菌群为代表的粪便指示菌浓度用于定量水中微生物风险评估<sup>[18]</sup>。粪便指示菌具有检测方便、指示能力较好等优点,其中,大肠杆菌则被认为是反映水体粪便污染最合适的指标,目前已被广泛用于评价水中微生物污染状况<sup>[19]</sup>。

除病原菌之外,水中的病毒以及原生动动物也对人体存在着极大的危险。病毒在污水中广泛存在,目前已发现超过 700 种水媒性病毒,其中,仅肠道病毒在污水中就存在 150 余种,主要包括肠病毒、腺病毒、轮状病毒、诺如病毒等,它们在污水厂进水中的含量分布在  $3.14 \times 10^2 \sim 1.93 \times 10^5$  copies/mL,能在水体中存活 1 个月以上并保留强感染性<sup>[17,20-21]</sup>。噬菌体被认为是人类肠道病毒的预测因子,其中,大肠杆菌噬菌体、噬菌体 MS2 以及噬菌体 f2 也凭借检测方便、不对人类致病、与人类肠道病毒性质类似等特点被用作常见的病毒指标<sup>[22-24]</sup>。被合称为“两虫”的隐孢子虫和贾第鞭毛虫,则是主要的原生动动物污染,美国、澳大利亚等国家以及欧盟都已将“两虫”纳入水质安全控制的硬性指标<sup>[25]</sup>。未经处理的污水中含有大量的隐孢子虫、贾第鞭毛虫,含量分别达到 60 000、100 000 孢囊/L<sup>[26]</sup>。“两虫”作为代表性的病原原生动动物,在污水厂出水中的含量需要严格控制。

总体而言,污水中存在大量的病原微生物且经过二级处理后出水仍保持一定数量,较高的病原微生物负荷可能会影响消毒工艺对病原微生物的控制效果。为了控制污水厂出水的微生物风险且避免提高消毒剂投加量对排放水体产生负面影响,这需要消毒工艺前的各工艺将水中的病原微生物量控制到较低的程度以保障出水水质的安全,因此,强化污水厂中各单元对病原微生物的去除,对控制病原微生物有着重要作用。目前,关于污水处理工艺对病原微生物的控制研究较少,为了避免病原微生物带来的安全隐患问题,亟需明确污水处理中各工艺控制病原微生物的控制效能

及机理,这也对污水中病原微生物的控制及强化去除有着重要的指导意义。

## 2 城镇污水处理工艺对病原微生物的控制效能及机理

### 2.1 污水中病原微生物的控制机理

病原微生物在污水环境中由于受到生物因素与非生物因素的影响难以顺利进行繁殖,多数病原微生物在经历饥饿、持续失活等过程后最终死亡。生物的相互作用会增强对病原微生物的控制,原生动动物通常作为生物防治剂,通过捕食作用以减少水中的致病菌、病毒<sup>[27]</sup>。原生动动物在生物反应器中也发挥着重要作用,已有研究表明由于原生动动物的捕食作用,生物过滤器中已经观察到原生动动物对大肠杆菌的改善去除<sup>[28]</sup>。除此之外,病毒诱导细菌细胞裂解、产生细菌、释放抗菌药物再加上以蛭弧菌为代表的食细菌对病原菌摄食等生物因素,均可以增强对病原微生物的控制<sup>[7]</sup>。

病原微生物的生长也受温度、pH、营养条件、太阳辐射等非生物因素的影响,不利的生存环境会导致病原微生物的衰减以及死亡。陈燕飞<sup>[29]</sup>得出在 pH 值=3 的条件下,大肠杆菌与金黄色葡萄球菌出现大量死亡。李静等<sup>[30]</sup>探究了温度与 pH 对沙门氏菌生长的影响,试验结果表明在 pH 值=5 的条件下沙门氏菌的生长明显受到抑制,在 45 °C 时,其存活率为 0。Domaizon 等<sup>[31]</sup>表明病原菌的去除受水体的营养情况影响,在富营养水体与贫营养水体中衰减率分别为 28% 和 70%,差异明显。Ansa 等<sup>[32]</sup>明确了太阳辐射是水生环境中大肠杆菌失活的主要因素,其对细菌的损害效果随水体深度增加而降低。

在污水处理过程中,各工艺则更多通过氧化灭活和吸附截留这 2 种主要的控制机理去除病原微生物。氧化灭活是指氧化剂通过氧化作用破坏病原微生物的结构使其丧失感染能力,吸附截留是指通过过滤介质的物理或生物吸附作用以及直接截留作用,使病原微生物从污水中去除。不同工艺去除机理不同,因此,其对病原微生物的控制效能也存在差异。表 2 列举几种污水处理中常见工艺对各类病原微生物的控制效能,并在后续进行深入论述。

表2 城镇污水主要处理工艺对病原微生物的控制效能及机理  
Tab. 2 Control Effectiveness and Mechanism of Main Municipal Wastewater Treatment Processes for Pathogenic Microorganisms Removal

处理工艺	主要控制机理	病原微生物种类	去除率	参考文献
序批式活性污泥工艺	生物吸附	粪大肠菌群	99.98%	[33]
		病原性大肠杆菌	98.4%	
		志贺氏菌	99.4%~99.8%	
		沙门氏菌	>99%	
传统活性污泥工艺	生物吸附	大肠杆菌	90.0%~99.6%	[34]
		肠球菌	60.2%~98.4%	
		F-特异性噬菌体	80.0%~99.5%	
曝气生物滤池	生物吸附、过滤截留	粪大肠菌群	96.7%~99.9%	[35-36]
		沙门氏菌	95.0%~96.8%	
		肠球菌	96.8%~99.0%	
		轮状病毒	84.2%~99.9%	
		诺如病毒	90.0%~99.2%	
		腺病毒	80.0%~99.8%	
移动床生物膜反应器	生物吸附、过滤截留	总大肠菌群	99.8%	[37]
		大肠杆菌	99.5%	
微滤	机械筛分、吸附截留	粪大肠菌群	99.8%	[38]
超滤	机械筛分、吸附截留	粪大肠菌群	99.997%	[39]
		体细胞噬菌体	99.7%	
		隐孢子虫	98.6%	
		贾第鞭毛虫	99.6%	
混凝沉淀过滤	絮凝共沉淀、过滤截留	大肠杆菌	59.3%~93.8%	[40]
		金色葡萄球菌	36.9%~84.9%	
人工湿地	生物吸附、过滤截留	粪大肠菌群	85.9%~89.0%	[41-42]
		沙门氏菌	35.4%~54.3%	
深床滤池	物理吸附、过滤截留	总大肠菌群	36.904%~99.997%	[43]
		粪大肠菌群	60.2%~99.7%	
		贾第鞭毛虫	60.2%~98.0%	
		隐孢子虫	20.6%~95.0%	
紫外消毒	紫外线破坏核酸功能	大肠杆菌	>99.99%	[44]
		体细胞噬菌体	>99.99%	
次氯酸钠消毒	氧化灭活	大肠杆菌	99.997%	[45]
氯胺消毒	氧化灭活	大肠杆菌	99.9%	[46]
臭氧消毒	氧化灭活	鼠伤寒沙门菌	99.999 9%	[47]
		金黄色葡萄球菌	99.999 9%	
		大肠杆菌	99.999 9%	

## 2.2 一级处理工艺对病原微生物的控制效能

一级处理工艺作为污水处理厂中的预处理工艺,主要通过格栅、筛网的筛滤以及沉淀池的沉淀作用去除附有病原微生物的颗粒物,总体上控制效能十分有限。Fu 等<sup>[39]</sup>经过长期监测发现经过格栅筛分以及沉砂池除砂处理后隐孢子虫、贾第鞭毛虫、体细胞噬菌体以及粪便大肠菌没有明显去除。Payment 等<sup>[48]</sup>也得出了类似的结论,加拿大蒙特利尔某污水处理厂的一级处理工艺对粪大肠菌群、粪链球菌、大肠埃希氏杆菌、产气荚膜梭菌的去除率分别为 25%、29%、12%、51%,对水中肠道病毒则没有去除效果。

## 2.3 活性污泥工艺对病原微生物的控制效能

活性污泥法是控制污水水质的主要工艺,活性污泥上聚集的细菌及原生动植物可以分泌出具有黏着性的胶体物质,对病原微生物有着极强的吸附与黏接作用,从而使其从污水中去除。常见的活性污泥法有传统活性污泥法(CAS)、序批式活性污泥法(SBR)、氧化沟活性污泥法、厌氧-缺氧-好氧法(AAO 工艺)等。程艳艳等<sup>[33]</sup>证实了 SBR 工艺对水中的粪大肠菌群、病原性大肠杆菌、志贺氏菌以及沙门氏菌等病原菌有出色的控制效果,其中,粪大肠菌群数由  $1.36 \times 10^8$  个/L 大幅下降至  $2 \times 10^4$  个/L,其余病原菌的去除率也均在 98% 以上。Barrios-Hernández 等<sup>[34]</sup>在荷兰两家污水处理厂研究发现 CAS 工艺对污水中的大肠杆菌、肠球菌以及 F-特异性噬菌体均有很好的去除效果,去除率均大于 95%。汤俊英<sup>[49]</sup>对 AAO 工艺、氧化沟工艺出水中总病原菌数进行检测,去除率分别可达 74.17%、98.38%,但出水中嗜水气单胞菌、铜绿假单胞菌等病原菌的丰度仍较大。活性污泥法可以有效减少病原微生物,但这也导致污泥中富集大量的病原微生物,如果处置不当则会产生微生物风险问题,因此,对污泥的无害化处理十分重要。

## 2.4 生物膜工艺对病原微生物的控制效能

生物膜法包括生物滤池、生物转盘、生物接触氧化法等工艺,主要通过生物吸附、自然衰减以及截留作用实现病原微生物的去除。生物吸附是生物膜法主要的病原微生物控制机理,生物膜的厚度、粗糙

度、膜龄、微生物群落均能影响对病原微生物的黏附性能,生物膜中的胞外聚合物(EPS)则会通过改变过滤介质的理化表面特性而改变病原微生物与介质表面之间的疏水性、静电作用和范德华力<sup>[50-52]</sup>。Hill 等<sup>[35]</sup>通过曝气生物滤池对污水中的粪大肠菌群、大肠杆菌、沙门氏菌、肠球菌、体细胞巨噬细胞和雄性特异性噬菌体共 6 个微生物指标进行去除,去除率均保持在 95%~99%。El-Senousy 等<sup>[36]</sup>也进行了类似的研究,曝气生物滤池对轮状病毒、诺如病毒、腺病毒、粪大肠菌群以及总大肠菌群的去除率分别为 84.2%~99.9%、90%~99.2%、80%~99.8%、96.7%~99.9%、96.4%~99.9%,去除效果良好但受季节变化而产生波动。Al-Wasify 等<sup>[37]</sup>考察了移动床生物膜反应器对总大肠菌群和大肠杆菌的控制效果,去除率保持在 99.5% 以上且出水浓度均低于 200 个/L。生物膜法对病原微生物有着稳定的去除效果且与活性污泥法相比对水质水量有着更好的适应能力,但由于其容积负荷有限、空间效率较低等问题通常被限制应用于小型污水处理厂中。

## 2.5 深度处理工艺对病原微生物的控制效能

### 2.5.1 膜分离工艺

膜分离工艺是最有效的去除病原微生物的技术之一,包括微滤、超滤和纳滤等,主要通过滤膜的机械筛分以及吸附截留作用将病原微生物截留在膜表面或内部<sup>[53]</sup>。Gómez 等<sup>[38]</sup>对比了不同的膜分离工艺的去除效果,微滤工艺对污水中粪大肠菌群的去除率达到 99.8%,超滤工艺则可以将出水中的粪大肠菌群数控制在 100 CFU/L 以下,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 排放标准。Fu 等<sup>[39]</sup>通过试验得出超滤工艺对病原微生物的去除率高于一级处理和二级处理的总去除率,粪大肠菌群的出水平均含量为 4 个/L,体细胞噬菌体、隐孢子虫以及贾第鞭毛虫的浓度低于检测限。膜分离工艺可以有效降低水中的病原微生物水平,同时也具有较好的环境效益,但膜污染、处理成本高等问题阻碍其在实际中的应用。

### 2.5.2 混凝沉淀工艺

混凝沉淀工艺是一种成熟的污水深度处理工艺,在污水处理厂中的应用较为普遍。混凝沉淀工艺可以通过网捕-卷扫、吸附架桥等作用使病原微生

物与水中的悬浮物、胶体和可絮凝的其他物质凝聚成“絮团”后沉积去除,常见的混凝剂有  $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{FeSO}_4$ 、聚合氯化铝(PAC)等。蒋以元等<sup>[54]</sup>在混凝剂 PAC 投加量为 15 mg/L 的条件下,通过混凝沉淀过滤工艺分别将大肠杆菌、细菌总数从  $10^3 \sim 10^6$ 、 $10^6 \sim 10^9$  个/L 降至  $10^2 \sim 10^5$ 、 $10^5 \sim 10^8$  个/L,去除率维持在 90% 左右。Arani 等<sup>[40]</sup>选择 2.5 mg/L 的硅藻土作为混凝剂,在 pH 值=7 的条件下对金色葡萄球菌、大肠杆菌的去除率分别为 59.3%~93.8%、36.9%~84.9%。相较于传统的混凝工艺,杀菌型混凝工艺有着更强的去除病原微生物能力,在近些年得到广泛研究。Zhang 等<sup>[55]</sup>通过协同使用 PAC 和聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDMAAC)这 2 种絮凝剂将对大肠杆菌的去除率提高到 94%,这归功于 PAC 的絮凝作用、其对胶体颗粒共沉淀作用以及 PDMAAC 改变细胞膜的通透性的能力。Zhang 等<sup>[56]</sup>还合成了具有杀菌基团和微嵌段结构的新型杆菌肽基絮凝剂 B-g-PAMDAC,有着极好的絮凝能力和杀菌能力,其对大肠杆菌、铜绿假单胞菌、蜡状芽孢杆菌、粪肠球菌的去除率均高于 99.6%。杀菌型混凝剂通过快速吸附和缓慢杀灭病原微生物提高了对各种病原微生物的控制效果,同时也减少了消毒副产物和胞外毒素的产生,有着较好的研究前景。

### 2.5.3 人工湿地工艺

人工湿地工艺是一种利用植物、基质、生物组合而成的人工生态水处理技术,通过基质的过滤截留、吸附、沉淀以及生物竞争等作用去除水中的病原微生物,植物类型、基质类型及温度等因素均会影响其控制效能<sup>[57-58]</sup>。熊瑛等<sup>[41]</sup>对比了不同尺度的人工湿地对粪大肠菌群的控制效能,出水浓度均保持在 5 000 个/L 以下且去除效率随着人工湿地的面积增大而增强。Rajan 等<sup>[59]</sup>探究了不同湿地植物对大肠杆菌去除的影响,试验结果表明仅种植宽叶香蒲的试验组的去除率仅有 80%,而种植宽叶香蒲、三棱蔗草和莎草的混合试验组出水中几乎检测不到大肠杆菌。Song 等<sup>[42]</sup>研究发现人工湿地工艺可以将出水中大肠杆菌以及沙门氏菌的含量控制在 3 000 个/L 以下,但去除效果受季节影响。大肠杆菌的去除效果在春季最高,秋季最低;沙门氏菌的去除效果略低于大肠杆菌,在夏季的去除率达到峰值。人工湿地是一种成本较低、抗冲击负荷强的深度处理工艺,但占地面积大、易堵塞等缺点限制了其在污水深

度处理中的应用。

### 2.5.4 深床滤池工艺

深床滤池工艺是指采用有效滤层高度  $\geq 1.5$  m,以石英砂、无烟煤、颗粒活性炭、天然沸石、离子交换树脂等作为填料的深度处理工艺<sup>[60-61]</sup>。深床滤池通过直接截留、惯性、沉淀、分子扩散、静电力作用等传输机制使污染物沉积在填料表面,被滤层过滤截留<sup>[62]</sup>。深床滤池在深度处理中可以实现去除悬浮物、有机污染物、氮、磷等指标,但其用于去除病原微生物的研究较少。Chan 等<sup>[63]</sup>考察了成熟的深床砂滤池对病原菌的去除效果,在 35 d 中测得出水的异养菌平均值在  $(1.8 \pm 1.6)$  CFU/mL,仅有一次检测到总大肠菌群以及大肠杆菌计数高于 0,表现出良好的病原菌控制能力。Levine 等<sup>[43]</sup>得出深床滤池的滤床深度可以影响贾第鞭毛虫和隐孢子虫的去除效率,100 cm 的砂层可以分别使贾第鞭毛虫、隐孢子虫去除 68%、90%,并随着深度增加去除率也相应增加,但这一特征与肠道病毒的去除没有显著的相关性。深床滤池是一种被忽视的病原微生物处理工艺,后续需对深床滤池控制病原微生物的效率、机理及影响因素进行进一步评估。

## 2.6 消毒工艺对病原微生物的控制效能

消毒工艺是污水厂控制病原微生物的主要方法,其中,紫外线消毒法是目前在水消毒方面公认的物理消毒技术,主要通过破坏病原微生物中的 DNA 或 RNA 而实现灭活。Francy 等<sup>[44]</sup>通过试验证实了紫外线消毒对病原微生物有极强的控制能力,大肠杆菌和体细胞噬菌体去除率均大于 99.99%。Fang 等<sup>[64]</sup>在紫外线强度为  $0.19 \text{ mW/cm}^2$ 、接触时间为 45 s 的条件下,对水中大肠杆菌及噬菌体 MS2 的去除率分别达 99.9% 和 90%,噬菌体 MS2 与大肠杆菌相比表现出对紫外线更强的耐受性。

化学消毒技术是通过消毒剂改变病原微生物细胞膜的通透性,使小分子代谢物质溢出胞外,影响细胞传递活性和能量代谢以及干扰、破坏其酶系统,从而影响微生物的代谢而达到氧化灭活,具有代表性的技术有氯消毒、臭氧消毒等<sup>[65]</sup>。氯系消毒剂在污水厂的实际消毒处理中应用较为普遍,常见的氯系消毒剂有液氯、二氧化氯、次氯酸钠、氯胺等。孔秀娟等<sup>[45]</sup>明确得出次氯酸钠可以有效灭活大肠杆菌且去除率随投加量增加而增加,在投加量达到 0.12

mg/L时,大肠杆菌的去除率稳定在4.5 lg左右。Amiri等<sup>[46]</sup>在pH值=6.0、接触时间为40 min的条件下,使用氯胺去除大肠杆菌,去除率达到99.9%。臭氧消毒也是一种具有高效性与广谱性的消毒技术,其对绝大多数病原微生物具有极好的灭活能力,在质量浓度为2 mg/L、作用时间为1 min的条件下,臭氧可以完全杀死大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠菌、枯草杆菌黑色变种芽胞、黑曲霉以及原生动物卵囊等<sup>[66]</sup>。Moreno-Andrés等<sup>[67]</sup>以溶藻弧菌为靶标微生物研究了臭氧对其的灭活过程,去除率达到了99.99%。Shin等<sup>[68]</sup>对具有一定抵抗力的微生物鞭毛甲藻进行了臭氧消毒,可以实现完全灭活。

### 3 现阶段存在的问题及尚需完善的内容

以大肠杆菌、大肠菌群为代表的粪便指示菌一直是反映水体微生物安全性的主要工具,然而这一概念存在着明显的局限性。已有报道称在水质符合大肠杆菌和大肠菌群标准的条件下,仍有隐孢子虫等持久性病原微生物未被消除进入水环境,而引发水源性疾病的暴发,这说明病原微生物的控制存在着一些规定上的缺陷<sup>[69]</sup>。为了改善这一问题,荷兰规定通过定量微生物风险评估对肠病毒、弯曲杆菌、隐孢子虫以及贾第鞭毛虫等指示病原体进行检测<sup>[70]</sup>。而目前我国对污水处理的要求仍停留在总大肠菌群数、粪大肠菌群数,针对其他可能引起较大健康风险的病原菌、病毒、原生动物等病原微生物则尚未制定统一的控制标准<sup>[71]</sup>。病原微生物的特性不同,决定了不同病原微生物对不同工艺存在着不同的耐受能力,这也会造成去除效果的差异,大肠杆菌的含量无法完全反映水体微生物的污染水平,工艺的选择也对病原微生物控制起到关键作用。因此,针对污水厂对病原微生物控制现阶段存在的问题,需要通过以下几个方面进行完善。

(1)完善污水病原微生物的评价体系。将大肠杆菌作为基础评估对象,同时将水中各类病原微生物作为研究目标,对水中典型、有代表性的病原菌、病毒以及原生动物作为研究对象,探究各工艺对病原微生物的控制效能及作用机理,进行更全面的检测评估以保障污水厂出水的微生物安全。建立更全面、更完善的污水病原微生物评价系统有利于更好地评估水体微生物污染程度,这亟需对我国污水排

放标准中的微生物硬性指标进行进一步明确规定。

(2)针对性的工艺设计。不同病原微生物对不同工艺的耐受程度不同,因此,工艺的选择对病原微生物的控制效能起到关键作用。以“两虫”为例,常规的消毒工艺对“两虫”的去除效果并不明显,其中隐孢子虫表现出对紫外消毒较强的耐受性,氯消毒则对隐孢子虫几乎没有去除效果,而臭氧消毒和二氧化氯消毒则凭借对“两虫”的良好去除效果均可以作为控制污水中“两虫”的消毒工艺<sup>[72-74]</sup>。

(3)污水处理工艺的联用。选用不同控制机理的工艺联用可以更彻底地实现病原微生物的去除,这在已有的研究中已经得到了证实。Lee等<sup>[75]</sup>使用混凝-超滤联用工艺去除污水中噬菌体MS2,平均去除率大于99.99%;邹振生等<sup>[76]</sup>通过生物膜-超滤膜联用工艺几乎完全去除污水中细菌、病毒以及虫卵,出水再经紫外消毒后可实现粪大肠菌群检出为0。臭氧-氯消毒、紫外线-过氧化氢(UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)消毒、紫外线-氯消毒等联合消毒工艺具有强化去除抗氯性的病原微生物(耐氯菌、芽孢杆菌孢子、隐孢子虫卵囊等)、减少消毒剂的使用量、提高持续消毒能力等优点,也可以进一步降低水中病原微生物指数<sup>[77-79]</sup>。污水处理工艺联用可以很好提升病原微生物的去除效能,大幅降低污水厂出水中微生物风险。

### 4 结论

病原微生物作为污水中主要的污染指标之一,对人体存在着极大威胁,极易引发水媒性传染病的暴发,因此,对污水中的病原微生物的控制十分重要。污水处理厂通过一级处理工艺、二级处理工艺、深度处理工艺以及消毒工艺对污水水质进行提升,病原微生物也在各个处理阶段得到不同程度的去除。目前,我国对污水处理的要求仅对大肠菌群数、粪大肠菌群数进行了规定,各项研究结果表明在如今提标改造的大背景下,污水处理厂已经可以很好地去除水中大肠杆菌,而针对其他可能引起较大健康风险的病原菌、病毒、原生动物等病原微生物目前尚未制定统一的控制标准,因此,在后续对污水中病原微生物的研究则需要有针对性考察。目前,国内关于污水厂处理工艺对病原微生物去除的针对性研究还相对匮乏,今后研究的重点应放在污水处理工艺对病原微生物的去除机理以及工艺的设计优

化,以提高对病原微生物的控制效能。

### 参考文献

- [ 1 ] ZAHEDI A, MONIS P, DEERE D, et al. Wastewater-based epidemiology—surveillance and early detection of waterborne pathogens with a focus on SARS-CoV-2, *Cryptosporidium* and *Giardia*[J]. *Parasitology Research*, 2021, 120: 4167–4188. DOI: 10.1007/s00436-020-07023-5.
- [ 2 ] CONDE-CID M, ARIAS-ESTÉVEZ M, NÚÑEZ-DELGADO A. SARS-CoV-2 and other pathogens could be determined in liquid samples from soils[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 273: 116445. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116445.
- [ 3 ] CZEKALSKI N, DÍEZ E G, BÜRGMANN H. Wastewater as a point source of antibiotic-resistance genes in the sediment of a freshwater lake[J]. *The ISME Journal*, 2014, 8(7): 1381–1390.
- [ 4 ] 周宏春. 水污染防治行动计划[J]. *绿色中国*, 2017(8): 51–54.
- [ 5 ] ZHU I X, GETTING T, BRUCE D. Review of biologically active filters in drinking water applications [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2010(12): 67–77.
- [ 6 ] 郑晓英, 王俭龙, 李鑫玮, 等. 臭氧氧化深度处理二级处理出水的研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1159–1165.
- [ 7 ] JUDITH F, LI D, CHRISTIAN G. Antagonistic microbial interactions: Contributions and potential applications for controlling pathogens in the aquatic systems [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 2192. DOI: 10.3389/fmicb.2017.02192.
- [ 8 ] DDEKER J P, FRANK K M. *Salmonella*, *Shigella*, and *Yersinia* [J]. *Clinics in Laboratory Medicine*, 2015, 35(2): 225–246.
- [ 9 ] SCHWIDDER M, HEINISCH L, SCHMIDT H. Genetics, toxicity, and distribution of enterohemorrhagic *Escherichia coli* hemolysin[J]. *Toxins*, 2019, 11(9): 502–514.
- [ 10 ] 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 & Biotechnology*, 2016, 32(4): 69. DOI: 10.1007/s11274-016-2018-3.
- [ 11 ] CHEN B S, LEE H C, LEE K M, et al. Enterovirus and encephalitis [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 261–275. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00261.
- [ 12 ] RAZZOLINI M T P, BRETERNITZ B S, KUCHKARIAN B, et al. *Cryptosporidium* and *Giardia* in urban wastewater: A challenge to overcome [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 257: 113545. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113545.
- [ 13 ] 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 等. 污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 [J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2558–2564.
- [ 14 ] 庞宇辰, 席劲瑛, 张彤, 等. 浊度与微生物指标在污水再生处理系统中的去除特性及相关性 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4203–4208.
- [ 15 ] 张彤, 胡洪营, 宗祖胜, 等. 城市污水再生处理过程中病原性原虫的去除特性 [J]. *环境科学*, 2008, 29(7): 1955–1960.
- [ 16 ] 赵晓芸, 卢静芳, 苑宏英, 等. 污水处理厂进出水中两种特征性病原菌水平及灭活特性 [J]. *环境与健康杂志*, 2013, 30(12): 1084–1086.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] EREGNO F E, TRYLAND I, MYRMEL M, et al. Decay rate of virus and faecal indicator bacteria (FIB) in seawater and the concentration of FIBs in different wastewater systems [J]. *Microbial Risk Analysis*, 2018, 8: 14–21. DOI: 10.1016/j.mran.2018.01.001.
- [ 19 ] DONDE O, XIAO B D. Understanding wastewater treatment mechanisms: A review on detection, removal, and purification efficiencies of faecal bacteria indicators across constructed wetlands [J]. *Environmental Reviews*, 2017, 25(4): 444–451.
- [ 20 ] 夏梦, 苏益明, 陈家斌, 等. 污水处理工艺对病毒的去除效果及疫情期应急处理技术 [J]. *环境管理*, 2020, 2(42): 514–518.
- [ 21 ] WONG K, FONG T T, BIBBY K, et al. Application of enteric viruses for fecal pollution source tracking in environmental waters [J]. *Environment International*, 2012, 45: 151–164. DOI: 10.1016/j.envint.2012.02.009.
- [ 22 ] 张云, 刘燕, 张强, 等. 饮用水标准中病毒指标应用现状及研究进展 [J]. *中国公共卫生*, 2010, 26(5): 540–542.
- [ 23 ] RAMBAGS F, TANNER C C, STOTT R, et al. Bacteria and virus removal in denitrifying bioreactors: Effects of media type and age [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 46–53. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.06.021.
- [ 24 ] NASSER A, SASI S, NITZAN Y. Coliphages as indicators for the microbial quality of treated wastewater effluents [J]. *Food and Environmental Virology*, 2021, 2(13): 170–178.
- [ 25 ] MOUTINHOA G M, SANTOSA I D, MATOSA M, et al. Research and identification of *Cryptosporidium* and *Giardia lamblia* in wastewater treatment plants [J]. *Annals of Medicine*, 2019, 51: 73. DOI: 10.1080/07853890.2018.1561629.
- [ 26 ] HAMILTON K A, WASO M, REYNEKE B, et al. *Cryptosporidium* and *Giardia* in wastewater and surface water environments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47(5): 1006–1023.
- [ 27 ] SUN S Y, NOORIAN P, MCDUGALD D. Dual role of mechanisms involved in resistance to predation by protozoa and virulence to humans [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1017. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01017.
- [ 28 ] HAIG S J, GAUCHOTTE-LINDSAY C, COLLINS G, et al. Bioaugmentation mitigates the impact of estrogen on coliform-grazing protozoa in slow sand filters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(6): 3101–3110.



- [29] 陈燕飞. pH对微生物的影响[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2009(3): 121-124.
- [30] 李静, 包斐斐, 李家璜, 等. 温度, pH值和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对减毒沙门氏菌VNP20009的生长及生物膜形成的影响[J]. 药理学学报, 2021, 6(56): 1606-1611.
- [31] DOMAIZON I, VIBOUD S, FONTVIEILLE D. Taxon-specific and seasonal variations in flagellates grazing on heterotrophic bacteria in the oligotrophic Lake Annecy—Importance of mixotrophy[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2010, 46(3): 317-329.
- [32] ANSA E D O, ANDOH A H, ANSA G A, et al. *Escherichia coli* removal in tropical oligotrophic and eutrophic lakes[J]. *Indian Journal of Environmental Health A*, 2013(2): 719-724.
- [33] 程艳艳, 张崇森, 王晓昌, 等. 城市污水处理工艺对宿主特异性标记物和肠道病原菌的去除效果[J]. 环境工程学报, 2014(3): 887-890.
- [34] BARRIOS-HERNÁNDEZ M L, PRONK M, GARCIA H, et al. Removal of bacterial and viral indicator organisms in full-scale aerobic granular sludge and conventional activated sludge systems[J]. *Water Research X*, 2020, 6: 100040. DOI: 10.1016/j.wroa.2019.100040.
- [35] HILL V R, KANTARDJIEFF A, SOBSEY M D, et al. Reduction of enteric microbes in flushed swine wastewater treated by a biological aerated filter and UV irradiation[J]. *Water Environment Research*, 2002, 74(1): 91-99.
- [36] EL-SENOUSY W M, ABOU-ELELA S I. Assessment and evaluation of an integrated hybrid anaerobic-aerobic sewage treatment system for the removal of enteric viruses[J]. *Food & Environmental Virology*, 2017, 9(3): 1-17.
- [37] AI-WASIFY R, HAMED S R, BAYOUM M N. Greywater treatment for irrigation purposes using pottery scraps and aerated moving bed biofilm reactor[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 126: 40-47. DOI: 10.5004/dwt.2018.22897.
- [38] GÓMEZ M, RUA A, GARRALÓN G, et al. Urban wastewater disinfection by filtration technologies[J]. *Desalination*, 2006, 190(1-3): 16-28. DOI: 10.1016/j.desal.2005.07.014.
- [39] FU C Y, XIE X, HUANG J J, et al. Monitoring and evaluation of removal of pathogens at municipal wastewater treatment plants[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(6): 1589-1599.
- [40] ARANI S S, AZIZAN S N F, AKHIR F N M, et al. Removal efficiency of Gram-positive and Gram-negative bacteria using a natural coagulant during coagulation, flocculation, and sedimentation processes[J]. *Water Science and Technology*, 2019, 80(9): 1787-1795.
- [41] 熊琰, 张列宇, 车伍, 等. 不同尺度人工湿地对污染物及病原菌的去除效果研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(2): 215-219.
- [42] SONG Z W, SUN Q, MIAO Y, et al. Seasonal variation and correlation of *Escherichia coli* and *Salmonellae* in a full-scale constructed wetland for wastewater treatment in China[C]. Chengdu: 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2010.
- [43] LEVINE A D, HARWOOD V J, FARRAH S R, et al. Pathogen and indicator organism reduction through secondary effluent filtration: Implications for reclaimed water production[J]. *Water Environment Research*, 2008, 80(7): 596-608.
- [44] FRANCY D S, STELZER E A, BUSHON R N, et al. Comparative effectiveness of membrane bioreactors, conventional secondary treatment, and chlorine and UV disinfection to remove microorganisms from municipal wastewaters[J]. *Water Research*, 2012, 46(13): 4164-4178.
- [45] 孔秀娟, 马军, 文刚, 等. 紫外-氯对细菌的协同消毒效果[J]. 水处理技术, 2016, 42(1): 41-44.
- [46] AMIRI F, MESQUITA M M F, ANDREWS S A. Disinfection effectiveness of organic chloramines, investigating the effect of pH[J]. *Water Research*, 2010, 44(3): 845-853.
- [47] 陈梦曦, 吴媚, 李欣洋, 等. 真空臭氧消毒机对微生物杀灭效果的实验研究[J]. 现代预防医学, 2018, 45(23): 113-116.
- [48] PAYMENT P, PLANTE R, CEJKA P. Removal of indicator bacteria, human enteric viruses, *Giardia* cysts, and *Cryptosporidium* oocysts at a large wastewater primary treatment facility[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2001, 47: 188-193. DOI: 10.1139/w00-143.
- [49] 汤俊英. 城市给排水系统中致病菌与毒性因子的分布与归趋[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [50] AFROOZ A R M N, BOEHM A B. *Escherichia coli* removal in biochar-modified biofilters: Effects of biofilm[J]. *PLoS One*, 2016, 11(12): 1-17.
- [51] BOZORG A, GATES I D, SEN A. Impact of biofilm on bacterial transport and deposition in porous media[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2015, 183: 109-120. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2015.10.008.
- [52] JANJAROEN D, LING F Q, MONROY G, et al. Roles of ionic strength and biofilm roughness on adhesion kinetics of *Escherichia coli* onto groundwater biofilm grown on PVC surfaces[J]. *Water Research*, 2013, 47(7): 2531-2542.
- [53] 高圣华, 张晓, 张岚. 饮用水中病毒的健康危害与控制[J]. 净水技术, 2020, 39(3): 1-8.
- [54] 蒋以元, 柯真山, 张昱, 等. 城市污水再生利用中的消毒问题研究[J]. 环境工程学报, 2008(1): 16-18.
- [55] ZHANG S X, ZHENG H L, TANG X M, et al. Sterilization by flocculants in drinking water treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 382: 122961. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122961.
- [56] ZHANG S X, TANG X M, ZHENG H L, et al. Combination of

- bacitracin-based flocculant and surface enhanced Raman scattering labels for flocculation, identification and sterilization of multiple bacteria in water treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 407: 124389. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124389.
- [57] VYMAZAL J. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 724–751. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.034.
- [58] HICKEY A, ARNSCHEIDT J, JOYCE E, et al. An assessment of the performance of municipal constructed wetlands in Ireland [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 210: 263–272. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.12.079.
- [59] RAJAN R J, SUDARSAN J S, NITHIYANANTHAM S. Efficiency of constructed wetlands in treating *E. coli* bacteria present in livestock wastewater [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 17: 2153–2162. DOI: 10.1007/s13762-019-02481-6.
- [60] DOBRE T, ZICMAN L R, PÁRVULESCU O C, et al. Species removal from aqueous radioactive waste by deep-bed filtration [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 303–310. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.05.065.
- [61] ZHENG X W, ZHANG S Y, ZHANG J B, et al. Advanced nitrogen removal from municipal wastewater treatment plant secondary effluent using a deep bed denitrification filter [J]. *Water Science & Technology*, 2018, 77(11–12): 2723–2732. DOI: 10.2166/wst.2018.231.
- [62] 杨瑾涛. 新型复合滤层深床滤池工艺对污水厂二级出水的处理效能及机理分析[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [63] CHAN S, PULLERITS K, RIECHELMANN J, et al. Monitoring biofilm function in new and matured full-scale slow sand filters using flow cytometric histogram image comparison (CHIC) [J]. *Water Research*, 2018, 138: 27–36. DOI: 10.1016/j.watres.2018.03.032.
- [64] FANG J Y, LIU H L, SHANG C, et al. *E. coli* and bacteriophage MS2 disinfection by UV, ozone and the combined UV and ozone processes[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(4): 547–552.
- [65] 李同, 董红敏, 陶秀萍. 畜禽养殖污水消毒技术研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2013, 15(2): 137–143.
- [66] 李玉冰, 张凡建, 蔡泽川, 等. 猪场养殖污水臭氧消毒净化效率试验[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2017(16): 59–61.
- [67] MORENO-ANDRÉS J, MORILLO-PONCE J, IBÁEZ-LÓPEZ M E, et al. Disinfection enhancement of single ozonation by combination with peroxydisulfate salt [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5): 104335. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104335.
- [68] SHIN M, LEE H J, KIM M S, et al. Control of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* by ozone in seawater [J]. *Water Research*, 2017, 109: 237–244. DOI: 10.1016/j.watres.2016.11.050.
- [69] RICHARDSON A J, FRANKENBERG R A, BUCK A C, et al. An outbreak of waterborne cryptosporidiosis in Swindon and Oxfordshire [J]. *Epidemiol Infect*, 1991(3): 485–495.
- [70] HIJNEN W A M, SUYLEN G M H, BAHLMAN J A, et al. GAC adsorption filters as barriers for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water treatment [J]. *Water Research*, 2010, 44(4): 1224–1234.
- [71] 陈亚楠, 王亚炜, 魏源送, 等. 不同功能地表水体中病原微生物指示物的标准比较[J]. 2015, 35(2): 337–351.
- [72] ADEYEMO F E, SINGH G, REDDY P, et al. Efficiency of chlorine and UV in the inactivation of *Cryptosporidium* and *Giardia* in wastewater [J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0216040. DOI: 10.1371/journal.pone.0216040.
- [73] 肖淑敏, 赵晓芸, 张岩, 等. 天津市某污水处理厂出水中贾第虫和隐孢子虫含量及其潜在健康危害[J]. *环境与职业医学*, 2015, 32(7): 637–641.
- [74] PASSOS T M, SILVA L H M, MOREIRA L M, et al. Comparative analysis of ozone and ultrasound effect on the elimination of *Giardia spp.* cysts from wastewater [J]. *Ozone Science & Engineering*, 2014, 36(2): 138–143.
- [75] 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: 23–30. DOI: 10.1016/j.watres.2017.02.017.
- [76] 邹振生, 邹清川, 张建治. 双膜式医院污水处理工艺 [J]. *给水排水*, 2011, 47(s1): 361–363.
- [77] DING W Q, JIN W B, CAO S, et al. Ozone disinfection of chlorine-resistant bacteria in drinking water [J]. *Water Research*, 2019, 160: 339–349. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.014.
- [78] 王俭龙, 郑晓英, 李魁晓, 等. 再生水紫外和氯单独与组合消毒试验研究 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31(9): 75–78.
- [79] 张蓉, 范宇, 陈乐意, 等. UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 高级氧化法深度处理生活污水污水处理厂生化池出水 COD 研究 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(6): 2383–2389.