

大家之言

王光辉, 张行, 兰隽如, 等. 我国城镇污水处理厂紫外消毒工艺运行情况调研及优化建议[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 1-8.

WANG G H, ZHANG X, LAN J R, et al. Investigation and optimization of UV disinfection process in urban WWTPs at home[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 1-8.

我国城镇污水处理厂紫外消毒工艺运行情况调研及优化建议

王光辉^{1,2}, 张行^{1,3,*}, 兰隽如⁴, 许世伟¹

(1. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 2. 清华大学环境学院, 清华大学水质与水生态研究中心, 北京 100084; 3. 北京首创生态环保集团股份有限公司水汇智造分公司, 北京 100044; 4. 成都首创水务有限公司, 四川成都 611130)

摘要 城市污水处理是环境保护工程的重要组成部分, 其中紫外消毒工艺因高效、环保等优点被广泛应用于污水处理厂。然而, 紫外消毒工艺在实际运行中仍面临诸多挑战, 如消毒剂量的合理性、设备选型与维护保养等, 这些问题的存在不仅影响了污水处理厂的运行效率, 也制约了紫外消毒技术的进一步推广。因此, 对污水厂紫外消毒工艺进行系统调研, 对于提升污水处理厂的运行管理水平和优化紫外消毒工艺设计具有重要意义。为充分了解污水处理厂实际运行中紫外消毒工艺存在的问题及影响因素, 研究选取了全国范围内 79 座采用紫外消毒工艺的污水处理厂作为调研对象。这些污水处理厂分布广泛, 涵盖了不同的地理环境和处理规模, 范围覆盖西南、华中、华东、华南 4 大区域, 包括四川、重庆、贵州、湖北、湖南、河南、山东、广东 8 个省市, 处理规模由几百立方米每天到 20 万 m³/d, 确保了研究的代表性和广泛性。调研内容包括紫外消毒工艺的运行参数、设备配置、维护保养情况以及出水水质等, 旨在全面了解紫外消毒工艺的实际运行状况和存在的问题。调研结果显示, 紫外消毒工艺基本能够满足城镇污水处理厂出水中粪大肠菌群数量控制要求, 但仍存在紫外消毒剂量不合理、设备选型不合适、维护保养不到位等情况。此外, 水量波动、出水悬浮固体(SS)和色度等水质因素也被证实对紫外消毒效果有显著影响。基于调研结果, 研究提出了一系列针对性的建议: 污水处理厂应根据实际水质和水量波动情况, 合理调整紫外消毒剂量, 以确保消毒效果; 定期维护保养以延长设备使用寿命并保持消毒效果。这些建议不仅有助于提高现有污水处理厂的运行效率, 也为新建污水处理厂的紫外消毒工艺设计提供了参考。

关键词 紫外消毒 紫外反应器类型 消毒剂量 粪大肠菌群 光复活 消毒效果

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)10-0001-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.10.001

Investigation and Optimization of UV Disinfection Process in Urban WWTPs at Home

WANG Guanghui^{1,2}, ZHANG Xing^{1,3,*}, LAN Junru⁴, XU Shiwei¹

(1. Beijing Capital Eco-Pro Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

2. Center for Water and Ecology, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Shuihui Intelligent Manufacturing Branch, Beijing Capital Eco-Pro Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

4. Chengdu Capital Water Co., Ltd., Chengdu 611130, China)

Abstract The urban wastewater treatment is a crucial aspect of environmental protection engineering, and the ultraviolet (UV) disinfection process is widely employed in wastewater treatment plants (WWTPs) due to its high efficiency and environmentally friendly. Nevertheless, the UV disinfection process still encounters numerous challenges during practical operation, including issues related to the rationality of disinfection dosage, equipment selection, and maintenance. The presence of these problems not only

[收稿日期] 2024-03-29

[作者简介] 王光辉(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事城镇水务相关的投资、建设和运营等相关工作, E-mail: wanggh@capitalwater.cn。

[通信作者] 张行(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事城镇水务运营管理及工艺技术相关工作, E-mail: zhangxing9415@126.com。

impacts the operational efficiency of WWTP but also hinders the widespread adoption of UV disinfection technology. Therefore, it holds great significance to systematically investigate the UV disinfection process to enhance their operational and managerial capabilities while optimizing the design of the UV disinfection process. In order to fully understand the problems and influencing factors of UV disinfection process in WWTPs, 79 WWTPs using UV disinfection process were selected as research objects in this study. These WWTPs are widely distributed across various geographical environments and treatment scales, covering four regions of southwest, Central, East and South China, including eight provinces and cities in Sichuan, Chongqing, Guizhou, Hubei, Hunan, Henan, Shandong and Guangdong. The treatment scale ranges from several hundred m^3/day to 200 000 m^3/day , ensuring the representability and universality of the study. The investigation contents include the operating parameters, equipment configuration, maintenance and effluent quality of the UV disinfection process, aiming to fully understand the actual operating conditions and existing problems of the UV disinfection process. According to the survey results, the UV disinfection process can basically meet the requirements of fecal coliform numbers control in the effluent water of urban WWTP, but there are still unreasonable UV disinfection dose, unsuitable equipment selection, inadequate maintenance, etc. In addition, water quality factors such as water quantity fluctuation, suspended solids (SS) and chroma have also been proved to have a significant impact on the UV disinfection effect. Based on the investigation results, this study put forward a series of specific recommendations: the UV disinfection dose should be reasonably adjusted according to the actual water quality and water quantity fluctuation in WWTPs to ensure disinfection effect, and regular maintenance is needed to extend the service life of equipment and maintain disinfection effect. These suggestions not only help to improve the operation efficiency of existing WWTPs, but also provide a reference for the UV disinfection process design of new WWTPs.

Keywords UV disinfection UV reactor type disinfection dosage fecal coliform photoreactivation disinfection effect



王光辉,高级工程师,现任北京首创生态环保集团股份有限公司城镇水务事业群总经理,中国城镇供水排水协会工程教育专业委员会副主任,长期在城镇水务领域工作,擅长水务技术、投资、建设和运营等领域,目前代表公司管理水务资产近 700 亿元,覆盖全国 28 个省,140 多个地级市,涉及供排水项目公司 240 多家。主持并参与多项行业、地方标准的编制及审查,参与多项国家、地方科研课题的研究,先后荣获国家现代化创新管理二等奖,北京市现代化创新管理一等奖、二等奖,住建部华夏建设科学技术奖二等奖等多项省部级奖励,撰写发表论文 20 多篇,申请多项国家专利。

城市污水中含有大量病原微生物,如果排入自然水体,会对自然水体造成严重的破坏,危害人类和动植物的健康。因此,为保障公共卫生安全,阻止疾病传播,对污水处理厂的出水进行消毒后排放十分必要。2002 年,国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局联合发布了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002),对病原微生物指标——粪大肠菌群数做出了明确规定,要求执行一级 A 和一级 B 标准的污水处理厂出水中粪大肠菌群数不得超过 1×10^3 个/L 和 1×10^4 个/L。同时也存在一些地方标准要求更严于国家标准,如北京市环境保护局发布的《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中对新(改、扩)建污水处理厂所执行的 A 标准中要求粪大肠菌群数排放限值为 500 MPN/L。另外,随着新冠疫情的暴发,新型冠状病毒可能存在的介水传播风险使污水厂消毒成为行业关注焦点^[1-2]。

目前,国内污水处理厂常用的消毒方式有加氯法、紫外线法和臭氧法等,其中加氯法包括次氯酸

钠、液氯、二氧化氯消毒等^[3],紫外消毒和次氯酸钠消毒为主流消毒方式,经常单一应用或组合联用。次氯酸钠消毒工艺因为操作简单、消毒效果稳定高效、具有持续消毒能力而得到大规模应用。但另一方面,次氯酸钠消毒由于易生成消毒副产物,其具有“致畸”“致癌”“致突变”作用,可能对水生生态安全带来重大危害^[4-5]。紫外消毒具有接触时间短、占地面积小、无消毒副产物产生等优点,在污水消毒领域得到了广泛应用,且其消毒具有的绿色生态性在未来具有巨大应用前景^[6]。但实际运行过程中,紫外消毒效果易受到系统设计水平、设备质量、水质波动和维护频率等因素影响,且存在细菌复活的现象,种种原因导致紫外消毒效果实际运行状况不佳。针对上述问题,本研究对 79 座采用紫外消毒工艺的污水处理厂进行了全面调研,系统考察污水处理厂紫外消毒工艺运行情况,分析反应器类型、紫外灯类型、水量负荷和维护频率等因素对消毒效果的影响,以期为现有采用紫外消毒工艺的污水厂运行管理及新建污水厂的紫外消毒工艺

设计提供优化建议。

1 调研方法

调研范围覆盖西南、华中、华东、华南 4 大区域,包括四川、重庆、贵州、湖北、湖南、河南、山东、广东 8 个省市的 79 个污水处理项目,处理规模由几百立方米每天到 20 万 m^3/d ,具体污水处理厂处理规模及数量分布如图 1 所示。79 座采用紫外消毒工艺的污水处理厂中,西南区域(四川、重庆、贵州)占据过半,且对应规模分布均衡,故在调研过程中进一步对紫外消毒污水处理厂数量较多的西南区域 6 座污水处理厂进行重点分析。表 1 给出了重点

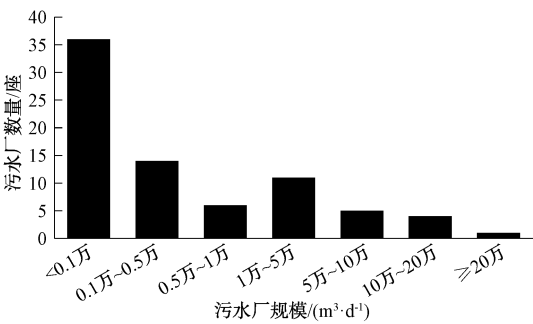


图 1 紫外消毒工艺污水处理厂的规模及数量分布
Fig. 1 Scale and Quantity Distribution of UV
Disinfection of WWTPs

表 1 西南区域 6 座污水处理厂运行概况
Tab. 1 Operation Overview of 6 WWTPs in Southwest Region

污水处理厂	设计规模/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	二级工艺	执行标准	紫外反应器类型	是否稳定达标
厂 1	10.0 万	开普顿大学(UCT)工艺	一级 A	明渠式	是
厂 2	5.0 万	周期循环活性污泥法(CASS)工艺	一级 A	明渠式	否
厂 3	1.0 万	AAO 氧化沟	一级 A	明渠式	是
厂 4	0.5 万	AAO	一级 A	明渠式	是
厂 5	1.5 万	AAO 氧化沟	一级 A	明渠式	是
厂 6	0.1 万	氧化沟	一级 A	封闭式	否

调研 6 座污水处理厂的运行概况,其中设计参数、反应器类型、紫外灯管类型和维护频率等来自运行报表或设计文件,粪大肠杆菌群数量来自各污水处理厂运行日报。

2 结果与分析

2.1 污水处理厂执行标准与达标情况分析

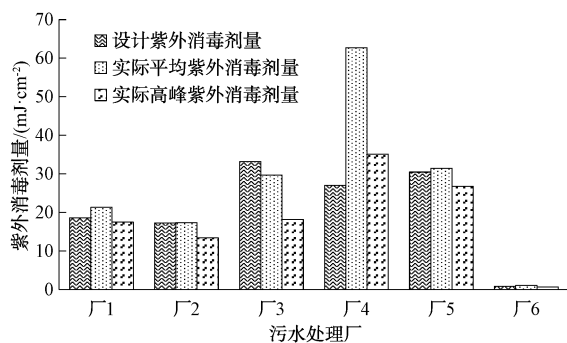
根据调研情况,样本中城镇污水厂粪大肠菌群数广泛执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准($\leq 1 \times 10^3$ 个/L),农村污水项目普遍执行一级 B 标准($\leq 1 \times 10^4$ 个/L)。对西南区域共计 37 座污水处理厂运行情况进行更加详细的研究分析发现,仅依靠紫外消毒工艺,只有约 22%的污水处理项目能实现稳定达标,约 62%的项目实现基本达标,另有约 16%的项目存在不达标问题,需要借助辅助消毒。其中,基本达标的污水项目主要为规模较小污水厂,存在设备故障、灯管更换不及时、光复活等不稳定因素,可通过强化运行管理来有效控制风险。存在不达标问题的污水项目,受消毒系统设计、设备质量、水质水量等因素影响,部分时段需要采取辅助消毒的方式,才能确保出水稳定达标。鉴于采用紫外消毒工艺的效果主要受系统

设计、设备选型、水质水量和设备维护等因素影响,故下文将对上述因素进行深入分析。

2.2 紫外消毒系统设计情况

2.2.1 主要设计参数

在设计污水厂紫外消毒系统时需考虑紫外线强度、照射时间、穿透率、灯管使用寿命、峰值系数、杀菌率等因素。紫外线消毒剂量是影响紫外消毒效果的直接因素,也是紫外消毒系统的主要设计参数。紫外线消毒剂量为单位面积接收到紫外线能量,由紫外线照射强度乘以曝光时间计算所得,设计紫外灯管的有效剂量时,需根据灯管的结垢系数和老化系数进行修正。工程设计中,紫外灯管的老化系数和套管结垢系数应交由有资质的第三方,使用同类设备在类似水质中所做的检验报告确定。根据《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019),若没有通过第三方验证,应使用 0.5 的默认值作为紫外灯老化系数、0.6 的默认值作为紫外灯石英套管结垢系数。本文的紫外消毒系数采用默认老化系数和套管结垢系数计算所得,具体数据如图 2 所示。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中对紫外线消毒的有效剂量的相关规定,二级处理的出水



注:厂2采用CASS工艺,间歇出水,处理流量按生化池的出水平均流量进行计算。

图2 各污水处理厂紫外消毒剂量

Fig. 2 UV Disinfection Dosage of Each WWTP

宜为15~25 mJ/cm²,再生水宜为24~30 mJ/cm²。由图2可知,除厂6外,其他污水厂实际紫外消毒剂

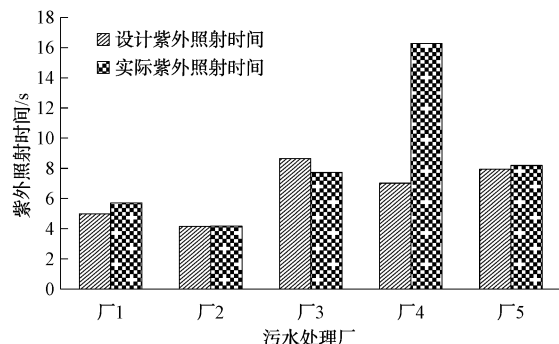
量均符合相关标准要求,即使在水流高峰期也能达到标准要求。

对比出水情况,厂2、厂6存在出水粪大肠菌群数偏高、出水效果不稳定的情况,由此推测可能与灯管选型、灯管数量设置不合理有关。设计不合理原因分析:厂2的紫外消毒剂量是根据生化池的平均出水流量进行设计的,但由于厂2采用CASS,间歇出水,且未设置缓冲调节池,实际流量是在进水流量下得到的,在流量设计时可能未考虑该因素,高峰期紫外消毒剂量可能无法满足相关标准;厂6处理规模小,但出水仍执行GB 18918—2002一级A标准,在设备选型时所选灯管功率较低(表2),紫外消毒剂量不达标。另外,厂4消毒效果较好,可能与实际处理水量较低,平均紫外消毒剂量大有关。

表2 各污水厂采用的紫外灯
Tab. 2 UV Lamps in Each WWTP

项目	厂1	厂2	厂3	厂4	厂5	厂6
设计规模/(m ³ ·d ⁻¹)	10.0万	5.0万	1.0万	0.5万	1.5万	0.1万
实际处理量/(m ³ ·d ⁻¹)	8.72万	4.96万	1.12万	0.22万	1.46万	0.08万
紫外灯类型	低压高强	低压高强	低压高强	低压高强	低压高强	低压高强
紫外灯管数量/支	280	120	40	16	32	4
单支紫外灯管功率/W	320	320	320	320	320	31
单支紫外灯管紫外线强度/(mW·cm ⁻²)	0.72	0.75	—	0.75	0.75	—
设计水力负荷/(m ³ ·d ⁻¹ ·根 ⁻¹)	357	625	250	313	469	250
灯管寿命/h	8 760(一年)	12 000	12 000	16 000	12 000	8 760(一年)
实际出水平均粪大肠菌群数/(个·L ⁻¹)	40	690	436	13	370	609

紫外消毒的优点之一为消毒时间短,一般为1~10 s。此次调研污水处理厂的紫外照射停留时间如图3所示,各污水厂的设计照射停留时间基本为4~8 s,各污水厂紫外消毒的设计照射时间与实际照射



注:厂6采用封闭式消毒器,缺少相关参数,未进行停留时间测算。

图3 各污水处理厂紫外照射时间

Fig. 3 UV Irradiation Time of Each WWTP

时间无较大差异。这是因为明渠式紫外消毒器一般采用模块安装,所有紫外灯管均匀排列且相互平行,以保证流过的污水在辐射范围内,而照射区尺寸又是依据模块设计的。仅厂4由于实际处理水量较设计水量小,实际紫外照射时间较长。

2.2.2 设备选型情况

紫外消毒系统的设备选型主要涉及两个方面:一方面是确定紫外消毒反应器的类型,另一方面是确定紫外灯管的类型。紫外线消毒反应器类型有明渠型和封闭型,根据调研统计,样本中基本采用明渠型消毒系统,仅个别小规模污水厂(站)采用封闭型管式消毒系统。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中规定:“污水厂出水采用紫外线消毒时,宜采用明渠式紫外线消毒系统”。明渠式紫外消毒系统是将多个独立的紫外灯模块安装在开放的明渠中,水流依靠重力自然流过消毒装置。相对于封闭

型反应器,明渠型更容易监测和维护,水流阻力更小。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),紫外线照射渠的设计,应符合下列规定:照射渠水流均匀,灯管前后的渠长度不宜小于1 m;渠道设水位探测和水位控制装置,设计水深应满足全部灯管的淹没要求;当同时应满足最大流量要求时,最上层紫外灯管顶以上水深需在灯管有效杀菌范围内。根据调研统计,西南区域项目照射渠长度、水深设计基本符合上述规定。

为保障紫外消毒效果,明渠紫外线消毒器需用水位控制器来控制水位,以防灯管以上的水层过厚或紫外灯管露出水面而影响消毒效果。固定堰和水力自动翻板闸门是污水厂最常使用的两种水位控制器。固定堰不仅可以保障流量高峰时间的最高液位,也可保证在流量为0时的最低液位,缺点是堰的上游容易沉积杂质,需配合安装冲洗阀门进行冲洗。合理设计的水力自动控制翻板闸门将使水位保持在一个较宽的流量变化范围内,但是在流量降低到接近0时,会发生泄漏导致紫外灯管暴露在水面上,影响消毒效果。例如,厂2采用CASS工艺,不能实现连续出水,现场实际采用的水位控制系统,会引起部分紫外灯管的频繁启动,灯管故障概率较高,影响处理稳定性及灯管使用寿命。因此,对于出水存在频繁断流的情况,如序批式反应器(SBR)相关工艺更适合采用固定堰式水位控制器。

污水处理紫外线消毒设备在选型过程中选用高强度的紫外线杀菌灯是很有必要的^[7]。污水紫外消毒系统中常用的紫外灯管有:低压灯(单只灯管功率小于100 W,单支灯管的功率和紫外输出强度都很低)、低压高强灯(单只灯管功率小于1 000 W,单支灯管的功率和紫外输出强度都较高)和中压灯(单只灯管功率在1 000 W以上,单支灯管的功率和紫外输出强度都很高)^[8]。本调研按照规模分布,对污水处理厂紫外设备基础信息进行对比分析(表2)。规模较大的污水厂($\geq 5\,000\text{ m}^3/\text{d}$)均采用单支功率为320 W的低压高强灯,而规模较小的污水厂(如厂6)则采用了单支功率为31 W的低压灯,设计规模和设计水力负荷基本符合紫外灯管的适用范围(表3)。这是因为若使用较多数量的紫外线灯,则对应紫外线镇流器的数量也需要更多,会导致整体设备线路更加复杂,灯管故障的概率也更高。中压灯系统单根灯管输出功率高,可用更少的灯管数量而达到较好的消毒效果,但存在灯管寿命低、能耗高、运行温度高、清洗维护要求高等缺点。低压灯运行能耗低,产生的单频射线不具备氧化性,无有毒有害的物质产生,更适用于中小型污水处理厂,但相较于中压灯,存在灯管数量更多、更换费用更高等缺点。因此,污水厂在选择紫外灯类型可根据紫外灯管的性能参数和适用范围进行选择。

表3 各类紫外灯管的性能参数及适用范围

Tab. 3 Performance Parameters and Application Range of UV Lamps

项目	低压灯	低压高强灯	中压灯
汞蒸气压力/Pa	0.13~1.30	0.13~1.30	13 000~1 300 000
每厘米弧长输入电功率/W	0.5	1.5~10.0	50~150
处理流量/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	<1万	3万~40万	>20万
水质条件	悬浮物(SS) $\leq 20\text{ mg/L}$ 紫外线透射率(UVT) $\geq 50\%$	SS $\leq 20\text{ mg/L}$ UVT $\geq 50\%$	SS $\leq 20\text{ mg/L}$ UVT $\geq 90\%$
水力负荷/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{根}^{-1}$)	100~200	250~500	1 000~2 000
输出波长/nm	253.7	253.7	230.0~300.0
清洗方式	人工/机械	人工/(机械+化学)	机械+化学
灯管寿命/h	8 000~12 000	8 000~12 000	5 000
灯管更换费用	较高	较高	较低

2.3 水质水量对紫外消毒效果的影响

2.3.1 水量对紫外消毒效果的影响

水量是影响紫外消毒效果的直接因素之一,2.2

节中分析的灯管水力负荷、照射时间,均能反映出水量对消毒效果的影响。大多数消毒系统采用的是明渠式,通过进水、出水渠道设计,以使照射渠水流均

匀。但实际过程中水流状态和理想状态差异较大,当水量激增时,水体和紫外线接触时间变短,实际紫外剂量无法满足消毒所需剂量。紫外消毒渠停留时间短,瞬时流量波动对消毒效果影响较大,因此,紫外消毒系统一般以最大峰值流量作为设计参数,从而提高系统耐水量冲击负荷。

根据调研情况,对于消毒效果不稳定的污水厂,其超标风险往往发生在水量较大时。对污水

厂水量与出水粪大肠菌群的关系进一步分析,并未发现明显规律,如图4所示。推测原因如下:1)处理水量基本在紫外消毒设计负荷内,因此水量对消毒效果的影响不明显;2)处理水量大时,部分项目采用临时补充消毒,此时无法体现紫外消毒对消毒效果的影响;3)进水水质可能存在变化,无法排除进水水质对紫外消毒效果的影响。

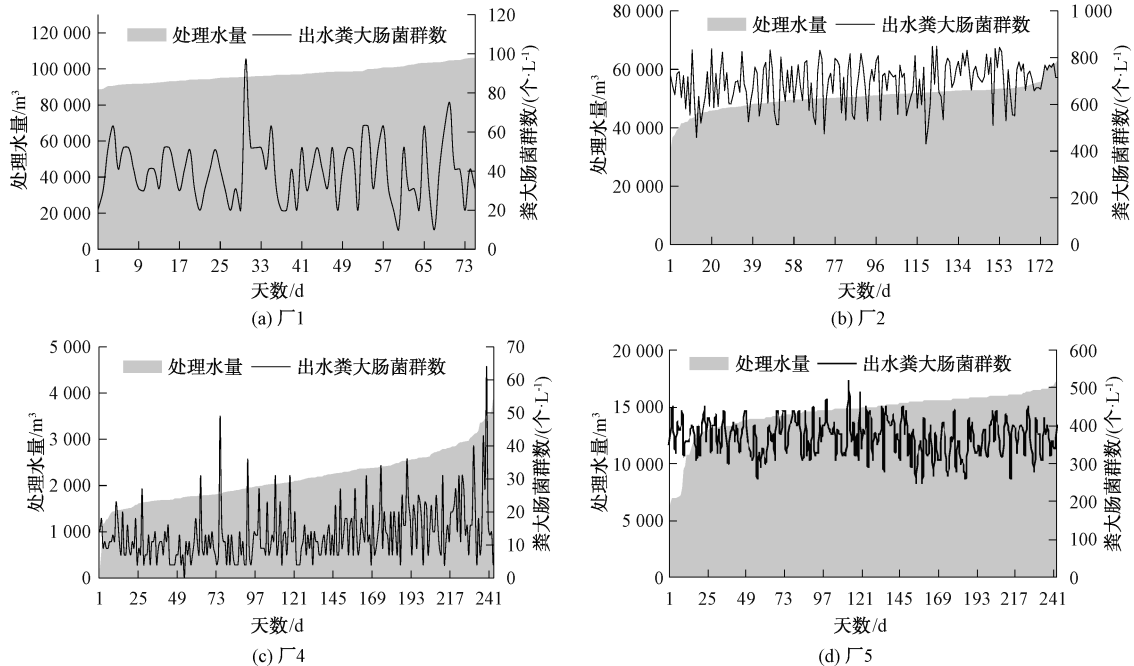


图4 各厂处理水量与出水粪大肠菌群关系

Fig. 4 Relationship between Treated Water Quantity and Fecal Coliform in Effluent of Each WWTP

2.3.2 水质对紫外消毒效果的影响

污水中的SS对消毒效果的影响体现在两个方面:一方面,SS吸收和散射了部分紫外线,导致穿透水体的紫外线强度减弱;另一方面,SS颗粒具有紫外线屏蔽作用,保护隐藏在SS颗粒中的微生物避免紫外线照射。随着流量的增大,SS对消毒效果的影响越明显。SS浓度主要受消毒前端生化处理单元及深度处理单元处理效果影响,一般要求紫外线进水的SS质量浓度不超过20 mg/L。本次所调研的污水厂出水SS平均值与出水粪大肠菌群平均值的关系如图5所示,除厂2、厂6(受设计因素和设备选型影响,实际紫外消毒剂量偏低,如2.2.1、2.2.2节)外,其他污水厂的消毒效果与SS浓度均有一定的相关性,SS浓度高的污水厂消毒效果相对较差。

UVT是指一定波长的紫外线透射特定厚度介

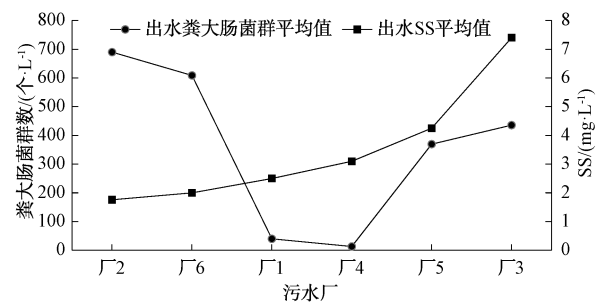


图5 出水SS及出水粪大肠菌群对应关系

Fig. 5 Relationship between SS and Fecal Coliform in Effluent

质后的紫外线强度与透射前的紫外线强度的百分比,如果不指明介质厚度,则默认介质厚度为1 cm。UVT通常受水体的色度等因素影响,色度是指水体颜色的强度,由水体中的有机物(富里酸、腐植酸等)和某些金属离子(铁、锰等)引起,这些物质能够

吸收紫外线,从而影响紫外线在水体中的穿透能力和消毒效果^[7]。在调研中发现,贵州某污水厂部分时段受进水超标工业废水冲击,出水色度偏高,紫外消毒效果受到一定影响。通常工业水占比较低的城镇生活污水处理厂出水色度较低,对紫外消毒效率影响并不大。除此之外,部分水体存在色度不高而 UVT 较低的情况,同样会影响紫外消毒效果。

微生物的种类和负荷是影响紫外消毒效果的另一重要因素。污水中有害微生物的种类繁多,且紫外线抗性不同,因此对于不同水质的污水,呈现出差异化的消毒效果。另外,微生物的负荷对紫外线消毒效率也有一定影响,初始微生物的含量越高,出水达标压力也越大。城镇污水处理厂以粪大肠杆菌群作为微生物控制指标,粪大肠杆菌对紫外光线比较敏感,去除率较高。但污水厂生化池出水粪大肠杆菌的数量是动态变化的,无法进行实时监测,因此设计时一般根据设计规范结合城镇污水厂的运行经验,选择目标剂量,以满足出水标准要求。

2.4 设备维护情况

紫外设备的维护是保障紫外消毒系统稳定运行的关键。当污水处理厂尾水流经紫外消毒器时,水中的 SS 会沉淀、附着在石英套管壁上,并且随着水中有机污染物含量的升高,产生污垢膜所需时间缩短,降低 UVT,进而影响消毒效果。因此,需定期对石英套管进行清洗,污水处理厂常用清洗方式有人工清洗、机械清洗、化学清洗、机械加化学清洗等方式,每次清洗时间间隔为 1~500 h。根据调研情况,样本中 86% 的污水厂采用自动机械清洗,少部分污水厂采用人工清洗,每次清洗时间间隔为 2~2 000 h,差异较大,主要与套管污染情况、自动程序参数设定等有关。大部分污水厂采用现有的清洗方式能满足套管清洁需求,但仍有个别污水厂存在自动机械清洗方式不能有效清洗污垢的问题,可能与清洗装置设计不匹配水质特点等有关,建议从清洗装置改造、增加化学清洗或人工清洗等方面改进。

紫外灯管随着使用时长其紫外线输出强度会逐渐衰减,因此需要在紫外灯管到达使用寿命之前进行更换。前文在 2.2.2 节介绍了不同类型紫外灯管的寿命情况,城镇生活污水项目一般采用的低压高强度灯,其使用寿命为 8 000~12 000 h。污水厂若未进行紫外灯管定期更换,将直接影响后期消毒的稳定性。根据调研情况,大部分项目对紫外灯管进行

了年度定期更换,以保障消毒效果。理论上,紫外灯管的状态对消毒效果有着显著影响,破损灯管附近的紫外光强度极其微弱,消毒效果微乎其微。因此,保证紫外灯管状态完好并减少破损,是控制消毒超标风险的重要措施。根据调研情况,部分项目存在由于灯管破损而影响出水稳定达标的情况,应根据破损情况及时采取辅助消毒、维护更换等措施。另外,在运行过程中要避免紫外灯管的频繁启动,以降低灯管及镇流器等系统设备故障频率。

建议污水处理厂加强对紫外消毒系统的日常巡视和维护,确保稳定运行,包括保证套管清洗效果、所有灯管正常且在使用寿命范围内,配套设备运行正常。其中,若系统设有自动套管清洗装置,注意观察清洗效果,效果不佳时可人工或化学辅助清洗。由于可能出现灯管破损、镇流器故障或水质水量异常等突发情况,建议配备临时应急加药消毒措施。

2.5 光复活情况

污水中的微生物在经紫外线照射后被灭活,但微生物有一定的损伤修复能力,在适宜的条件下可以实现复活^[9]。光复活(即在可见光照射下修复损伤的因子)是大部分微生物修复的主要方式,其直接表现就是微生物的数量增加。一般微生物复活率受消毒设备、复活光源、照射剂量和照射时间等影响。根据调研情况,在西南区域的 37 座污水处理厂中,仅四川某农村污水项目可能存在光复活情况,对取样后的细菌检测有明显影响,但仍在出水标准范围内,而其他项目并未发现此现象。推测原因:该项目执行一级 B 标准,与其他执行一级 A 标准的项目相比,设计照射剂量更低,且农村污水处理厂站较分散,取样检测的时间要长于一般城镇项目,因此,受光复活的影响可能更明显。紫外消毒剂量越高,微生物受到的损伤越大,光复活所需要的时间越久,复活率越低。研究^[10]表示,大肠杆菌避光培养 2~3 h 就会完全丧失光复活能力,若光复活对消毒效果影响较大,建议采用加大紫外消毒剂量和避光排放的方式控制光复活现象。

3 结论与建议

(1) 紫外消毒技术作用时间短、占地面积小,在农村污水处理等小规模项目上具有显著优势。调查发现紫外消毒基本可满足现阶段生活污水项目的出水粪大肠菌群达标要求。实际运行过程中部分污水

厂存在消毒不稳定的情况,主要与设计照射剂量选取不合理、水质水量波动大、设备维护不到位等因素有关。

(2) 紫外消毒工艺的设计需充分考虑项目的水质水量和工艺情况,需采取设计规范结合实际项目运营经验的方式进行紫外消毒器选型和目标剂量设计。对于采用序批式工艺,或可能存在水量负荷低、水量波动大、频繁断流、含有高色度工业废水等情况,消毒工艺选型时不建议优先考虑紫外消毒工艺,如需采用紫外消毒工艺,可选用固定堰等能有效控制水位的方式。

(3) 为保障消毒效果稳定,需重视紫外消毒系统的日常运行管理,包括加强日常水质水量监测,做好设备定期巡检、清洗、维护维修及更换,建议可增加临时应急加药消毒措施以应对异常突发情况。

参考文献

- [1] 李激,王燕,熊红松,等. 城镇污水处理厂消毒设施运行调研与优化策略[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 7-19.
LI J, WANG Y, XIONG H S, et al. Investigation and optimization strategies on the operation of disinfection facilities in municipal WWTPs[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8): 7-19.
- [2] 杨敏,尚巍,李鹏峰,等. 城镇污水处理厂次氯酸钠消毒影响因素及优化研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(9): 76-81.
YANG M, SHANG W, LI P F, et al. Influencing factors of sodium hypochlorite disinfection and its optimization in municipal wastewater treatment plants[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(9): 76-81.
- [3] 钱志斌. 微波紫外消毒技术在水处理工艺中的应用[J]. 净水技术, 2010, 29(6): 1-4.
QIAN Z B. Application of microwave ultraviolet light disinfection technology in water treatment processes[J]. Water Purification Technology, 2010, 29(6): 1-4.
- [4] ZHANG Z, ZHU Q, HUANG C, et al. Comparative cytotoxicity of halogenated aromatic DBPs and implications of the corresponding developed QSAR model to toxicity mechanisms of those DBPs: Binding interactions between aromatic DBPs and catalase play an important role[J]. Water Research, 2020, 170: 115283. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115283.
- [5] KOMAKI Y, MARINAS B J, PLEWA M J. Toxicity of drinking water disinfection byproducts: Cell cycle alterations induced by the monohaloacetonitriles [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(19): 11662-11669.
- [6] 王红禹. 给水厂紫外消毒工艺设计要点分析[J]. 净水技术, 2014, 33(s1): 37-38, 53.
WANG H Y. Analysis of design of UV disinfection process in water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2014, 33(s1): 37-38, 53.
- [7] 安瑞. 城市污水处理厂出水紫外消毒影响因素分析[J]. 给水排水, 2016, 52(s1): 135-140.
AN R. Analysis of influencing factors of ultraviolet disinfection of effluent water from municipal wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(s1): 135-140.
- [8] 冯爱山. 城市污水处理厂紫外线消毒系统设计要点[J]. 水工业市场, 2012(2): 53-56.
FENG A S. Key points for the design of ultraviolet disinfection systems in urban sewage treatment plants [J]. Water-Industry Market, 2012(2): 53-56.
- [9] 阮景章. 城市污水处理厂尾水紫外线消毒的设计及应用[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2008, 35(5): 240-241.
RUAN J Z. Design and application of ultraviolet disinfection for tail water of urban sewage treatment plants [J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection, 2008, 35(5): 240-241.
- [10] 郭美婷,胡洪营. 紫外线消毒后微生物的光复活特性及其评估方法[J]. 环境科学技术, 2009, 32(4): 77-80.
GUO M T, HU H Y. Photoreactivation characteristics and its evaluation method after UV disinfection [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(4): 77-80.