

孙文俊, 吕东明. 紫外线技术在我国城镇给排水处理中应用的挑战和趋势[J]. 净水技术, 2023, 42(3):1-6.

SUN W J, LÜ D M. Challenge and trend of UV technology application in urban water supply and drainage treatment at home[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3):1-6.

## 紫外线技术在我国城镇给排水处理中应用的挑战和趋势

孙文俊<sup>1,2,\*</sup>, 吕东明<sup>2</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中国环保机械行业协会紫外线专委会, 北京 100825)

**摘要** 文中对紫外线水处理技术在我国城镇给排水处理中应用的现状、挑战和趋势做了系统阐述, 针对在城市污水消毒处理应用中出现和/或应该注意的问题也进行了分析与总结, 有助于水行业的从业者、水科学的研究者及用户能对这一技术有正确的理解和认识。同时, 文章还指出如何用好并充分发挥这一绿色安全的环保技术的作用, 为我国实现“双碳”目标和服务“健康中国”等国家战略方面做出更大贡献。

**关键词** 紫外线消毒 城镇给排水 紫外线剂量 第三方验证 紫外高级氧化

**中图分类号:** TU991; TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)03-0001-06

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.03.001

## Challenge and Trend of UV Technology Application in Urban Water Supply and Drainage Treatment at Home

SUN Wenjun<sup>1,2,\*</sup>, LÜ Dongming<sup>2</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Chinese Ultraviolet Association, China Association of Machinery Industry for Environmental Protection, Beijing 100825, China)

**Abstract** This paper systematically expounds the current situation, challenges and trends of the application of ultraviolet (UV) water treatment technology in urban water supply and drainage treatment at home, and analyzes and summarizes the problems that appear and/or should be paid attention to the application of urban wastewater disinfection treatment, which is helpful for practitioners of water industry, researchers of water science and users to have a correct understanding of this technology. At the same time, this paper also points out how to make good use of and give full play to the role of this green and safe environmental protection technology, and make greater contributions to China's national strategies such as achieving the "carbon peaking and carbon neutrality" goal and serving the "healthy China".

**Keywords** ultraviolet (UV) disinfection urban water supply and drainage UV dosage third-party validation UV advanced oxidation



孙文俊,《净水技术》期刊青年编委,清华大学环境学院副研究员,中国环保机械行业协会紫外线专委会主任委员,国际紫外线协会董事会成员,加拿大西安大略大学兼职教授。主要研究方向为紫外线消毒及高级氧化技术、给水深度处理技术等。

[收稿日期] 2022-10-19

[基金项目] 科技部重点研发计划: 城镇节水提质增效与全过程降损管控技术研究与集成应用(2021YFC3201304)

[通信作者] 孙文俊, 副研究员, 研究方向为紫外线消毒及高级氧化技术、给水深度处理技术等, E-mail: wsun@tsinghua.edu.cn.

自 2003 年非典疫情暴发后,紫外线消毒技术在我国的城市污水处理中得到了快速和广泛的应用。此后,随着对紫外线消毒技术认知程度的深入,紫外线消毒作为一种物理消毒方法,因其杀菌广谱性好、不使用化学药剂和不产生消毒副产物,也逐渐在城镇给水处理中被应用。紫外线消毒成为满足新条件下提高供水安全的重要选择。

但是,我国总体上对紫外线消毒技术的基础研究还不足,对该技术的机理和特性存在一定认知上的误区,导致在工程应用中暴露出了一些问题,制约了该技术进一步工程应用的进展。

本文分别从紫外线消毒技术在我国城镇污水处理和给水处理中的应用入手,分别阐述应用现状、面临的挑战,对常见的认知误区进行回应,并就紫外高级氧化技术等新兴水处理技术的发展和紫外消毒及下一步的研究方向和发展趋势提出观点。

## 1 紫外线消毒技术在城镇污水处理中的应用现状和挑战

有关部门及企业的数据统计表明,截至 2019 年底,我国共建成 9 200 多座城镇污水处理厂,总处理规模达到 2.27 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ 。其中大约 3 000 家的污水厂采用了紫外线消毒工艺,处理规模约为 1.6 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ ,以处理规模计算,紫外线消毒处理的水量占到现有污水厂处理水量的 70% 左右。这意味着我国多半以上的城镇人口受益于紫外线消毒这一环境友好型水处理技术,如果按照 3  $\text{mg}/\text{L}$  的氯投加量计算,我国每年可以向处理与受纳水体少投放约 17.5 万 t 的氯消毒剂,对保护环境、生态和人类健康以及可持续发展产生了巨大的经济与社会效益。2020 年 4 月,国际紫外线协会(IUVA)发布白皮书<sup>[1]</sup>,证明了紫外线技术对于新冠病毒的有效性,这为紫外线消毒防控新冠病毒通过水媒传播提供了理论依据。

然而,在很长的一段时间,紫外线消毒技术在我国污水处理应用中存在着认识上的不足。例如,不少人认为紫外线消毒就是把紫外灯管放入水中,不同紫外消毒设备的消毒效果差别不大,可按价低者进行采购;紫外消毒设备属于非标产品,很多用户和设计单位不了解应如何评估紫外消毒设备及其方案是否可以满足工程上的消毒设计要求,导致一些用户和设计单位采取“拿来主义”,对紫外设备厂家所

报的设备方案照单全收,默认其消毒性能能够满足要求,使一些消毒性能存在严重缺陷的紫外设备被用到工程中,造成污水厂尾水消毒排放不达标,对紫外线消毒技术的科学性和有效性带来了负面误导。

### 1.1 紫外线消毒在污水处理中应用效果的制约因素

实际上,现代紫外线消毒理论和技术经过近 40 年的发展,已经成为一项全世界普遍认可、非常成熟和有效的工程应用技术。对某紫外设备厂家生产的紫外设备现场应用的统计分析发现,在国内 500 多个安装运行其设备的污水厂现场中,曾经有 50 多个出现过大肠菌出水不合格的情况,其中由于紫外设备无法满足进水水质消毒需求的情况只有 2 个,而绝大部分的不合格都是设备使用维护不当或者大肠菌检测操作不规范造成的。如果不加分析就简单地否定这一环境友好、低碳环保的技术,进而因噎废食,显然不是科学的态度和方法,也不利于技术的进步。通过调研目前国内污水处理中紫外线消毒技术的应用情况,总结该技术在污水处理中得以有效应用的制约因素主要包括以下方面。

#### 1.1.1 设备剂量不足

在紫外消毒设备不能满足出水达标要求的污水厂中,一个重要的原因就是紫外设备所能实现的紫外照射剂量偏低,不满足消毒目标要求。导致这个情况发生的原因是一些紫外设备厂家不知道如何计算设备的紫外剂量,也不对所生产设备的紫外剂量进行检测,或者出于降低设备造价的目的在设备剂量上缺斤短两。一般来说,在同等处理水量下,水质越差需要的紫外设备规模越大,但一些设备厂家不了解水质对紫外设备剂量与规模的影响,处理不同水质时仍只是按设备的处理流量来简单放大或缩小设备规模,导致结果无法达标。另外,有些设备水位控制器设计的问题造成明渠中水位不当导致消毒短路而无法达标。紫外消毒设备的剂量多少与计算方法是紫外消毒的核心问题,因为剂量是判断紫外消毒设备及方案是否可以达标的唯一参数,同时它与紫外设备的规模及价格息息相关。

#### 1.1.2 缺少可靠的清洗系统

另一常见的导致设备不达标的原因是紫外灯套管的清洗维护效果不好。由于污水水质较差,对紫外灯套管的清洗是确保紫外消毒设备达标的一个重要日常维护工作。尽管现在市场上的紫外消毒设备

基本都带有在线的自动清洗装置,但清洗效果从原理和实践看存在差异。即便是使用高效的机械加化学在线自动清洗方式,若水厂操作人员忘记及时补充清洗液,也可能导致在线清洗系统不能正常发挥作用,套管结垢从而影响消毒效果。当然也有些污水厂采用的紫外消毒设备的在线自动清洗装置本身在原理和实践上就不可能高效清洗套管表面,清洗效果一般或者较差,最终导致设备因难以维护和消毒达标而废弃。

除此之外,有些污水厂的紫外灯的技术选型上选用了错误的灯管类型,导致设备无法使用和达标。比如中压紫外灯技术由于单支灯管功率太高,灯管运行温度较高,并不适合污水应用,容易使污水中的一些成分在灯管套管表面形成清洗液也难以及时去除的污垢,从而影响设备达标和维护使用。

### 1.1.3 灯管达到寿命仍在用

紫外灯的寿命和日常照明灯具的寿命概念不同,日常照明灯具的使用寿命是以灯具是否还可以点亮照明来界定的,而紫外灯的使用寿命则是以设备厂家质保的灯管寿命终点时的紫外输出能量(即灯管老化系数)来界定。一些污水厂为了节省运行费用,在紫外灯管寿命早已大大超出质保使用寿命时,即紫外灯的紫外输出能量已经老化衰减到不能满足消毒所需剂量的情况下仍不更换灯管,导致消毒不达标。也有用户在灯管寿命到期更换新灯管时,为了节省成本只更换部分旧灯管,同样会造成设备消毒不达标。

### 1.1.4 取样和检测不规范

大肠杆菌在室温,特别是在较高室温且见光环境下的增长繁殖是几何级数级的。污水厂出水中,微生物水样的取样、保管、运输及储存分析需要遵循一定的标准规范,比如从现场取得的水样需要及时放入装有冰袋的便携式暗箱中保存并运输到实验室处置分析,如果实验室不能及时处置分析水样,则需要将水样放入冰箱里保鲜等。一些污水厂内实验室分析人员在大肠菌培养检测过程中的不当操作也是误判紫外消毒不达标的原因之一。个别地区也存在着当地环保监管部门在对污水厂取样、保管以及后续处置分析过程中操作不规范导致误判的情况。以华南某城市的环保监管部门为例,曾发现该部门周五前往多个污水厂采样,但样品瓶随意放置在敞开

见光的收纳篮中,且没有冰袋等保鲜用品,回到实验室后水样放置在常温的室内环境中,直到周一才对这些水样进行处置与分析,加大了大肠菌读数不达标的可能。

## 1.2 工程设计中判断紫外消毒设备方案合理性的基本原则

现阶段,我国城镇污水处理行业应提高对紫外消毒技术的正确认识和了解,用户和设计单位应掌握如何判断一个厂家所提供的紫外消毒设备及其设备方案的消毒性能是否能够满足工程设计要求,从而确保可以买到合格放心的产品,保护自身利益和公众安全。

### 1.2.1 生物验定剂量

判断一个设备厂家提供的紫外消毒设备方案其消毒性能是否满足工程的设计要求,关键是看其方案所能实现的照射到微生物上紫外能量的多少,即紫外剂量是否满足消毒目标的设计要求。紫外剂量的计算方法很多<sup>[2]</sup>,其中唯一被世界各地包括我国法规标准制定和执行部门认可与接受的就是生物验定剂量方法。这个方法是在一定测试条件(工况)下,通过对微生物进出紫外消毒设备前后存量浓度的变化反推,得到设备在该测试条件下能够传递的有效紫外剂量(即设备的实际剂量),然后改变测试条件(通常是设备处理的流量、水质),即可得到该设备在不同工况下的紫外剂量曲线,如图1所示。

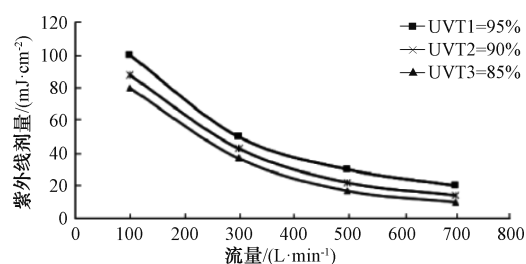


图1 紫外设备生物验定剂量曲线<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Bioassay Dosage Curve of UV Device<sup>[2]</sup>

该曲线的横坐标一般为单台设备(常见于管道式紫外设备)或平均到每支灯管(常见于明渠式紫外设备)处理的流量,纵坐标是该设备可以实现的有效紫外剂量,即生物验定剂量,UVT为处理水体的紫外透光率。设备制造商应该用这些设备曲线去计算其设备方案的紫外剂量,最终体现为方案中的设备规模(设备台数、灯管数量,最终为设备中灯管的总装机功率),剂量越高,设备规模也越大。用户

和设计单位只需让厂家出具紫外消毒设备的生物验定剂量报告和剂量曲线,就可以简单快速地核算其所报设备方案的紫外剂量是否满足消毒目标要求。为了保证公众安全,世界各地的法规和标准制定部门一般都要求设备的生物验定剂量测试应由行业内比较公认的有资质或权威的独立第三方按行业相关标准进行。世界范围内主要的验证体系与规范包括美国环保署的饮用水紫外消毒设备 EPA 验证、德国 DVGW 的饮用水紫外消毒设备验证、奥地利的 ÖNORM 饮用水紫外消毒设备验证等,我国也发布了《紫外线水消毒设备 紫外线剂量测试方法》国家标准,清华苏州环境创新研究院和山东省城市给排水水质监测中心已建立了相关的检测能力,但不少紫外设备厂家都没有做过相关测试。因此,用户如果想买到合格的紫外消毒设备,就应该要求紫外设备厂家提供由有资质或经验的独立第三方用这些厂家的消毒设备按照行业规范检测得到的设备生物验定剂量报告和剂量曲线,没有报告的设备厂家,其剂量难以得到保证。

#### 1.2.2 总装机功率和消毒达标担保时效

紫外消毒设备能照射到微生物上的紫外剂量是衡量设备是否可以消毒达标的唯一参数,但在用户和设计单位对厂家设备的生物验定剂量报告的真实性和准确性不太确定的情况下,也可以从厂家的设备方案中灯管的总装机功率上看出端倪。在灯管类型和消毒器形制相同的条件下,各个厂家的紫外消毒设备方案如果剂量相同或相近,其方案的灯管总功率不应该相差太悬殊。如果某个厂家所报设备方案的灯管装机功率与行业内最好的设备厂家设备方案的功率相比存在差异,至少 20% 以上,那基本可以认为该厂家的设备方案的消毒剂量无法达到要求。尽管紫外消毒设备的功率可以作为一定程度的参考,但并不完全建议用它来衡量紫外消毒设备的消毒性能,其原因是每个厂家设备的系统效率不同,有些技术较好的厂家其设备的系统效率较高,可以做到用较少的紫外灯装机功率与能耗达到相同的消毒效果。事实上,即使两家紫外设备厂家用同样的灯管,其设备的消毒效果也完全可能是不一样的,甚至相差较大。最可靠的判断方法还是核算紫外设备厂家所报的消毒设备方案的有效紫外剂量,即生物验定剂量,在这一剂量相同的前提下,再去比较评估不同厂家设备的价格、运行成本(含电耗与灯管更

换费用等)以及运维上的便利,才能确保用户采购到消毒性能可靠同时性价比较高的紫外消毒设备。还有一些紫外消毒设备厂家的消毒达标担保是在设备调试验收结束后或者现场安装后 18 个月失效,这也反映了这些厂家的设备剂量计算中存在着问题,比如可能没有充分考虑紫外灯管老化衰减对剂量的影响因素。从保护用户利益来讲,紫外消毒设备的消毒性能担保应该是设备使用寿命全周期内终身有效的,这也是用户在选择紫外设备厂家的设备时应该注意的。

## 2 紫外线消毒技术在城镇给水处理中的应用现状和挑战

### 2.1 给水处理中紫外线消毒的意义和作用

随着经济的发展和人民生活水平的提高,政府和公众对于饮用水安全的重视与关注也不断提高。近年来我国饮用水水质标准经历了几次修订,最新的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对饮用水水质提出了更高的安全要求,特别是消毒副产物和余氯上限的要求给传统氯消毒工艺带来一定的挑战。在此基础上,上海、深圳、苏州、福州等城市也都提出了更为严格的高品质或优质饮用水的目标或地方标准。紫外线消毒作为一种物理消毒方法,由于其杀菌广谱性好、不使用化学药剂和不产生消毒副产物,成为满足新条件下提高供水安全的重要选择。

饮用水中可能存在着耐氯微生物。除了贾第鞭毛虫、隐孢子虫等人们熟知的耐氯微生物外,研究<sup>[3-7]</sup>显示,我国给水厂的出厂水和供水管网上普遍都发现了诸如鞘氨醇单胞菌、假单胞菌、蜡样芽孢菌、溶血不动杆菌、纺锤芽孢杆菌、蜂房芽孢杆菌、军团菌及噬硫菌等耐氯微生物,其中一些耐氯微生物为条件致病菌。如果要对上述耐氯微生物进行有效灭活,需要大大增加氯的 CT 值,导致氯消毒的不经济性甚至工程上无法实施,而且还会大大增加消毒副产物超标的风险。严格来说,传统的单一氯消毒单元模式这个屏障是存在安全漏洞的,而且一旦氯消毒单元出现问题,给水厂中就彻底失去了微生物安全屏障。因此,从生物安全和化学安全上说,多屏障消毒策略和理念将成为提高供水安全的必由之路。这一理念现在已在北美和欧盟地区的城市水厂中被广泛接受和实践,而紫外线消毒由于其既可满足生物安全,又可满足化学安全要求,成为联合消

毒方式中不可或缺的一环,甚至是关键的一环。

## 2.2 紫外线消毒在我国给水处理中的应用现状

近年来,多屏障消毒理念和紫外线消毒技术逐渐得到了我国给水领域的认可和推动,在我国城市给水厂中得到了初步的应用。据不完全统计,目前国内已经有60多家大型给水厂采用了紫外线消毒工艺,处理规模达到1 000万 $\text{m}^3/\text{d}$ 。其中,2009年建成的天津泰达自来水厂三期工程和上海临江水厂紫外线消毒工艺成为我国最早运行紫外线主消毒工艺的自来水厂,2014年建成通水的北京郭公庄水厂的紫外氯联合消毒工艺成为“十二五”国家重大专项的示范工程,2017年建成的拉萨纳金水厂采用的紫外线消毒工艺是国产设备应用规模最大的工程<sup>[8]</sup>。实践表明,紫外线消毒作为主消毒工艺可以提高水质的微生物安全性,可以适当降低后续氯消毒工艺的CT值,在一定程度上降低消毒副产物的生成量和水的毒性效应,为保障供水的水质安全发挥积极作用。也有相关研究<sup>[9]</sup>表明,紫外线联合氯消毒相比较传统的紫外线消毒,管网水质安全性有所提升。

实际应用中,相比污水厂用户,给水厂用户更重视紫外消毒设备的消毒性能和品质,这也是保证供水安全的需要。在紫外消毒设备的选型采购方面,除了必须经过行业的标准生物验定剂量验证外,我国的涉水批件也是一个需要考虑的重要的认证要求,在一些城市,当地的卫生检疫部门明确要求给水厂使用的涉水设备和材料具备国内的涉水批件才能投产供水。我国新修订的《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)中也与时俱进地增加了紫外消毒工艺的有关内容,这对紫外线消毒技术在我国城市给水厂中的应用提供了积极的指导和推动作用。据了解,目前越来越多的城市正在考虑或设计饮用水紫外消毒工艺,可以预见紫外线消毒将会在提高我国城市供水水质安全方面发挥更重要的作用。

## 3 紫外线高级氧化技术及其应用

紫外线除了可以对水进行消毒处理,也可以通过光解与过氧化氢或其他氧化剂联用产生羟基自由基,对水体中的微量有机污染物进行高级氧化处理。羟基自由基是强氧化剂,而且没有选择性,与臭氧相比对化学污染物处理具有较好的广谱性,产生溴酸盐等副产物的风险低,因此,可以对水体中更多种类

的有机污染物进行有效降解,其中包括在给水处理领域内引起广泛关注和讨论的N-亚硝基二甲胺(NDMA)。NDMA是国外给水处理和再生水处理相关标准中常见的一种目标污染物,紫外线高级氧化技术目前被认为是处理NDMA最为经济有效的技术和工程手段。此外,紫外线高级氧化技术对水中的2-甲基异茨醇(2-MIB)和土臭素去除率高达90%,同时可以对水体中多种藻毒素实现99%以上的去除,因此,被认为是饮用水中嗅味和与之相关的藻毒素控制的有效技术选择,特别是其针对季节性的间歇运行模式。

在国外饮用水和与饮用相关的再生水处理中,紫外线高级氧化技术已经有很多成功的工程案例,在我国的应用尚处于萌芽阶段,2020年建成的山东潍坊的庆云水厂紫外线高级氧化工艺是我国第一个在给水处理厂应用的案例<sup>[10]</sup>。随着对水体中新兴污染物的认识和关注度的提高,随着我国城镇给水污染物处理向着微量与痕量的趋势发展,紫外线高级氧化技术将会在我国城市饮用水,特别是高品质饮用水的处理中发挥重要作用。

## 4 我国紫外线水处理技术及应用研究的趋势和发展方向

紫外线水处理技术在我国城镇给排水厂中的应用带动了国内科研单位和高等院校的相关研究工作,相关工作也为应用领域了解和掌握该技术起到了支撑作用。

图2显示了中国知网上有关紫外消毒主题的国内文献发表数量变化趋势,可以看到每年发表的紫外文献数量大概从1999年起有显著的跃升,这和紫外线消毒技术在国内城镇污水处理中的应用推广的开始时间基本吻合。2002年—2003年,有关紫外消毒技术的文献数量有了较大的飞跃,既为2003年非典疫情期间和后疫情时期紫外消毒技术在我国城镇污水厂中的应用做了技术铺垫,也同时支撑了其应用的发展。经过对国内紫外线消毒技术文献的分析发现,这些文献内容涵盖了从紫外消毒的灭活机理、杀菌有效性,到紫外消毒反应器设计、剂量验证、紫外光强监测、工程应用和对工程使用的紫外消毒设备进行运行效果与成本分析等,为广大用户与设计单位认识和了解紫外线水处理技术提供了支撑。但我国紫外线水处理技术的研究存在“单打独斗”的

现状,相互之间缺乏充分的同行交流,这可能与国内暂时缺少该专业领域交流平台有关。对此,清华大学牵头成立了中国环保机械行业协会紫外线专委会,通过与 IUVA 签订合作备忘录、组织紫外线技术国际研讨会等活动,增加行业的国内和国际交流,对提升我国的紫外线水处理技术水平和影响力会大有裨益。

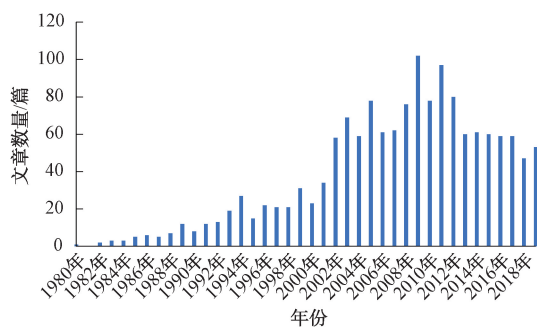


图2 我国每年发表的有关紫外消毒技术的文章数量  
Fig. 2 Number of Articles on UV Disinfection Technology Annual Publication at Home

从研究方向方面,新的紫外线高级氧化技术体系、紫外发光二极管(UVLED)和准分子灯等新紫外线光源的应用原理等主题将是研究热点,行业内也非常渴望新一代智慧化、节能高效的紫外线水处理系统在实际工程中应用的研究,这符合国家的“双碳”战略目标的基本方向。

## 5 结语

紫外线水处理技术是一项对环境、生态和人类友好的技术,与化学消毒方法相比,它也更为低碳,对人类社会的可持续发展具有重要价值。这项技术在我国城镇污水处理中已得到了广泛的应用,未来在提升我国供水水质安全上也将会有一席之地。但我国对紫外线技术及应用的认识和掌握水平还需要提高,特别是广大用户和设计单位需要更为充分地了解紫外线水处理设备性能的设计计算依据和设备运行中应注意的问题,从而确保工程上使用的相关设备可以满足工程设计和生产要求。

从行业发展的角度:一是期待所有的设备制造厂家通过自律来保证用户利益和公众安全;二是需要用户和设计单位借助第三方检测评价的手段提升自己了解紫外线产品的了解和判断能力;三是科研机构继续加强对紫外高级氧化技术体系、UVLED 和准分子灯等新紫外线光源的应用原理等热点领域的研

究,让紫外线技术为保护我国的环境、生态和人类健康发挥其应有的作用。

## 参考文献

- [1] BLATCHLEY III E R, PETRI B, SUN W J. SARS-CoV-2 UV dose-response behavior [EB/OL]. (2020) [2022-10-23]. <https://iuva.org/resources/covid-19/SARS%20CoV2%20Dose%20Response%20White%20Paper.pdf>.
- [2] 孙文俊, 吕东明, 贾瑞宝, 等. 紫外设备剂量标准化验证方法及必要性[J]. 净水技术, 2019, 38(5): 1-6, 25. SUN W J, LÜ D M, JIA R B, et al. Verification method and necessity for dose standardization of UV equipment [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(5): 1-6, 25.
- [3] 刘小琳, 刘文君, 金立燕, 等. 北京市给水管网管壁微生物膜群落[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(9): 1458-1461. LIU X L, LIU W J, JIN L Y, et al. Microbes in the Beijing water distribution system [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2008, 48(9): 1458-1461.
- [4] 张明露, 刘文君, 李翠萍, 等. 活性炭净水工艺微生物安全性研究[J]. 给水排水, 2015, 41(8): 22-25. ZHANG M L, LIU W J, LI C P, et al. Study of microbial safety in biological activated carbon filtration process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(8): 22-25.
- [5] 李百玲. 供水管网中耐氯菌种群多样性及耐氯机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. LI B L. Community diversity and resistance mechanism of the chlorine-resistant bacteria in drinking water distribution system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [6] 张国鹏, 蒋旗军, 王梅芳, 等. 水厂蜡样芽孢杆菌的灭活工艺研究[J]. 给水排水, 2018, 44(2): 39-43. ZHANG G P, JIANG Q J, WANG M F, et al. Study on process for bacillus cereus inactivation in waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(2): 39-43.
- [7] JING Z B, LU Z D, SANTORO D, et al. Which UV wavelength is the most effective for chlorine-resistant bacteria in terms of the impact of activity, cell membrane and DNA? [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 447: 137584. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137584.
- [8] SUN W J. New technology at the world's highest water treatment plant [EB/OL]. (2021-08-05) [2022-10-23]. <https://iwa-network.org/new-technology-at-the-worlds-highest-water-treatment-plant/>.
- [9] AO X W, CHEN Z Y, LI S M, et al. The impact of UV treatment on microbial control and DBPs formation in full-scale drinking water systems in northern China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 87: 398-410. DOI: 10.1016/j.jes.2019.08.003.
- [10] SUN W J, OGUMA K, JIA R B, et al. First UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> AOP systems for municipal drinking water treatment in China [EB/OL]. (2021-11-03) [2022-10-23]. <https://uvsolutionsmag.com/articles/2021/first-uv-h2o2-aop-systems-for-municipal-drinking-water-treatment-in-china/>.