

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.09.005

生物剂量法与模型模拟法测定紫外消毒器剂量的对比

王佳乐^{1,2}, 李梦凯^{1,2}, 孙 喆¹, 李文涛¹, 强志民^{2,3}

(1. 中国科学院生态环境研究中心 饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190; 3. 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘 要: 紫外线(UV)技术广泛应用于水消毒领域,确保UV消毒器剂量输出达标是保障消毒可靠性的核心,而辐射剂量的准确测定是关键。生物剂量法与流体动力学(CFD)模型模拟法是测定UV消毒器剂量的主要方法,其测试原理、准确性、费用、适用场景等均不相同,亟需结合测试实例予以阐明。系统阐述了两种方法的测试流程,并选择U型UV消毒器为研究对象,分别采用生物剂量法和模型模拟法测定其剂量。生物剂量法测试结果表明,在90、106和120 L/h流量下,UV消毒器对受试微生物MS2噬菌体的平均对数灭活率分别为2.74、2.38和2.15,辐射剂量分别为50.7、44.1和39.7 mJ/cm²,而CFD模型模拟法与生物剂量法测定结果之间具有较好的一致性。结合测试结果,进一步对比分析了两种方法的误差来源及优缺点,探讨了潜在的应用场景及优化改进方法。在实际应用中,应综合考虑各项因素,选择测定UV消毒器辐射剂量的适合方法,以提高消毒可靠性。

关键词: 紫外线消毒器; 辐射剂量测定; 生物剂量法; 流体动力学模型模拟法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)09-0033-06

Comparison between Biodosimetry and Model Simulation for Determining Fluence of UV Disinfector

WANG Jia-le^{1,2}, LI Meng-kai^{1,2}, SUN Zhe¹, LI Wen-tao¹, QIANG Zhi-min^{2,3}

(1. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Ultraviolet (UV) disinfection has been widely used in water treatment. To ensure the reliability of UV disinfection, sufficient UV fluence should be delivered in UV disinfector to meet the standard requirement, in which the accurate determination of fluence is the key. Biodosimetry and computational fluid dynamics (CFD) model simulation are the main methods for determining fluence in UV disinfector. However, their testing principles, accuracy, cost, and applications are different, which urgently need to be expounded with practical cases to provide references for domestic engineers and technicians. Biodosimetry and model simulation were applied to determine the fluence in a U-shaped UV

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点实验室联合课题(21L02ESPC); 中伊丝路科学基金资助项目(032GJHZ2022035MI)
通信作者: 李梦凯 E-mail: mkli@rcees.ac.cn

disinfectant. Their testing processes were systematically explained. The results showed that the tested UV disinfectant achieved 2.74-lg, 2.38-lg, and 2.15-lg reductions of the challenge microorganism (i.e., MS2 phage), with biosimetry determined fluences at 50.7 mJ/cm², 44.1 mJ/cm², and 39.7 mJ/cm² for flow rates of 90 L/h, 106 L/h and 120 L/h, respectively. The results from CFD model simulation and biosimetry were in good agreement. Furthermore, the errors, advantages and disadvantages, application objectives, potential optimization and improvement of the two methods were discussed. In practical applications, various impact factors should be comprehensively considered, and the appropriate method should be selected to improve the reliability of UV disinfection.

Key words: UV disinfectant; determination of fluence; biosimetry; computational fluid dynamics model simulation

紫外线(UV)消毒具有广谱性好、无消毒副产物和无次生环境风险等优势^[1],已广泛应用于饮用水、污水、再生水和船舶压舱水等的消毒。UV消毒效果取决于辐射剂量,其为剂量率和辐照时间的乘积。《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019)规定,当UV用于市政污水、生活饮用水和城市污水再生利用消毒时,UV等效剂量(RED)应分别不低于20、40和80 mJ/cm²。

UV消毒器在设计时,由于消毒器结构、灯性能、进出水口位置的差异,不同厂家产品输出剂量的差异性较大;而UV消毒器在运行时,剂量受到灯输出、套管结垢、水UV透过率(UVT)和流量的影响,剂量输出也不稳定。因此,确保UV消毒器剂量输出达标是保障消毒可靠性的核心,而辐射剂量的准确测定是关键。现阶段,生物剂量法和流体动力学(CFD)模型模拟法是测定UV消毒器辐射剂量的主要方法。生物剂量法在UV消毒领域受到广泛认可^[2-3],通过测定消毒器在不同工况下对微生物的灭活效果评估辐射剂量,已被美国、奥地利、德国、中国等多个国家的标准所采用^[4-5]。CFD模型模拟法能够模拟不同构型消毒器内部的光场(UV剂量率分布)、流场和病原微生物的运动轨迹,从而计算辐射剂量,近年来广泛应用于UV消毒器的研发,指导腔体结构(如管径、进出水口位置等)和灯管布设的优化^[6-10]。两种方法的测试原理、准确性、费用、适用场景等均不相同,亟需结合测试实例予以阐明。

笔者采用生物剂量法与CFD模型模拟法,测定了某U型低压汞灯UV消毒器在不同运行条件下的辐射剂量,系统阐述了两种方法的测试流程,并结合测定结果,分析了两种方法的误差来源和优缺点,

探讨了潜在的应用场景及优化改进方法,以期工程和技术人员提供参考,从而选择测定UV消毒器辐射剂量的适合方法,提高UV消毒的可靠性。

1 材料与方法

1.1 UV消毒器

选择U型管式不锈钢UV消毒器(见图1)作为研究对象,长度为160 mm,内径为48 mm,低压汞弧长为86 mm,输出功率为5 W,石英套管直径为23 mm,额定流量为106 L/h。

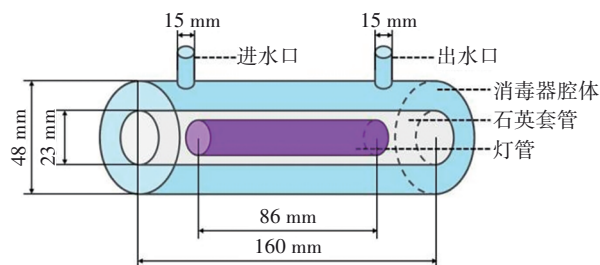


图1 UV消毒器示意

Fig.1 Schematic diagram of UV disinfectant

1.2 生物剂量法

选择MS2噬菌体(ATCC 15597-B1)作为受试微生物。首先挑取营养琼脂平板上的大肠杆菌(ATCC 15597,噬菌体宿主菌)菌落于胰蛋白胍酵母葡萄糖肉汤(TYGB)培养基中振荡培养12 h(37℃),加入MS2噬菌体继续振荡培养48 h(37℃);然后通过离心去除细胞碎屑获得上清液,并使用0.22 μm无菌针头式过滤器过滤后得到噬菌体储备液(浓度为10⁹~10¹⁰ PFU/mL);最后用超纯水(25℃, Milli-Q)稀释至10⁵~10⁶ PFU/mL后用于实验。采用《紫外线水消毒设备 紫外线剂量测试方法》(GB/T 32091—2015)推荐的咖啡调节受试菌液

的UVT,并用紫外可见分光光度计(Hach DR5000)测定UVT。使用平板计数法测定受试菌液MS2噬菌体浓度,将MS2噬菌体与大肠杆菌接种在营养琼脂平板上,放入37℃培养箱中培养12 h后进行计数。营养琼脂平板成分:胰蛋白胨为10 g/L,酵母抽提物为1 g/L,氯化钠为8 g/L,葡萄糖为1 g/L,氯化钙为0.294 g/L,维生素B1为10 mg/L,琼脂粉为15 g/L。

采用准平行光束仪测定MS2噬菌体的UV剂量响应曲线,准平行光束仪配装功率为105 W的254 nm低压高输出汞灯。通过UV辐照计(ILT1700)测定受试菌液表面的辐照度,通过校正因子校正获得平均剂量率(0.178 mW/cm²)^[11],乘以辐照时间可获得准平行光束仪输出的UV剂量。通过改变辐照时间获得多个剂量,测定MS2噬菌体的剂量响应曲线(对数灭活率与UV剂量的关系曲线)。

测定待测消毒器对受试微生物的对数灭活率。测试前UV灯需预热15 min,将消毒器与水泵相接,让MS2受试菌液以稳定的流量(90、106和120 L/h)流入消毒器,在进出水口取样测定对数灭活率。每组实验重复三次,根据测定的平均对数灭活率,比对剂量响应曲线,得到消毒器的RED值。

1.3 CFD模型模拟法

采用CFD模拟软件(ANSYS Fluent 13.0)进行UV消毒器腔体空间网格划分以及流场、光场和微生物运动路径的模拟,求解方程并输出RED计算结果。网格划分是基于有限元体积法划分四面体网格计算域,待测UV消毒器的计算网格数为3.5×10⁵个,模拟结果具有良好的网格无关性。

选定标准 k - ε 湍流模型为流场子模型。在边界条件设定中,设定消毒器进水口为速度入口,消毒器出水口为压力出口,工作压力为大气压,同时设定进出水口流量大小、水力半径和湍流强度。消毒器水流的湍流强度可以根据式(1)计算得出:

$$I = 0.16Re^{-0.125} \quad (1)$$

式中: I 为水流湍流强度; Re 为水流雷诺数。

选定离散坐标辐射模型为光场子模型,它能在有限的离散立体角度上求解辐射输运方程。模型假定UV光从灯管外石英套管表面发出,根据灯管功率和套管表面积确定辐射剂量率。通过对比消毒器腔体剂量率实测结果与模拟结果,确定模型表面辐射剂量率的校正因子,校正离散坐标辐射模型^[12]。因此,离散坐标辐射模型能够综合考虑介质

吸收、散射、内壁反射等因素的影响,得到精确度更高的模拟结果。

采用离散相模型并激活拉格朗日随机行走算法,模拟消毒器内微生物运动轨迹。微生物以离散相的形式随水流进入UV消毒器,其在消毒器内的运动受局部水流流态和自身无规则运动的共同影响。从消毒器进水口截面均匀投加微生物模拟微粒,数量为5 300个,对每个微粒沿程进行UV剂量率的时间积分,从而得到各微粒接受的UV剂量。通过ANSYS Fluent软件对消毒器出水口处的模拟微粒进行取样,可以得到模拟微粒在消毒器内的坐标、水力停留时间以及接受的UV剂量,并计算出模拟微粒的水力停留时间分布与UV剂量分布,进而结合受试微生物剂量响应曲线,根据式(2)计算得到消毒器的RED值。

$$RED = -\frac{1}{k} \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{-k(D_i - D_0)} \right] + D_0 \quad (2)$$

式中: k 为受试微生物的UV灭活速率常数,cm²/mJ; D_0 为受试微生物灭活剂量响应曲线在X轴上的截距,mJ/cm²; N 为投加的模拟微粒总数; D_i 为第 i 个模拟微粒所接受到的UV剂量,mJ/cm²。

2 结果与讨论

2.1 生物剂量法测定辐射剂量

图2为采用准平行光束仪测定的MS2噬菌体剂量响应曲线。基于消毒器应用场景和USEPA UV灭活MS2噬菌体的数据,测试剂量选定为0~70 mJ/cm²,得到灭活速率常数 k 为0.054 cm²/mJ ($R^2 = 0.998$),具有较好的线性度,该结果将用于消毒器RED值的评估。

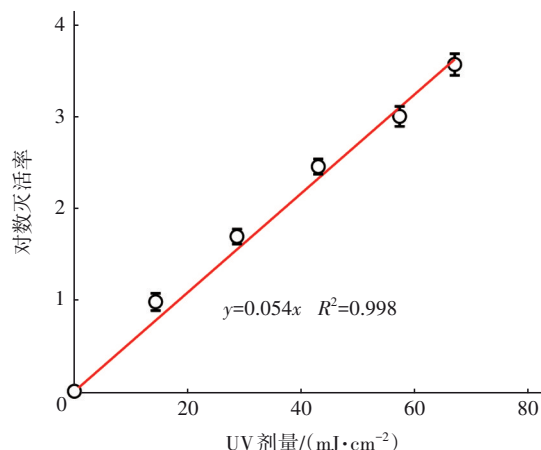


图2 MS2噬菌体剂量响应曲线

Fig.2 Determined dose-response curve of the MS2 phage

在 UVT 为 99% 以及流量为 90、106 和 120 L/h 的运行条件下, UV 消毒器对 MS2 噬菌体(浓度为 3.17×10^5 PFU/mL)的对数灭活率(平均值 \pm 标准偏差)分别为 2.74 ± 0.09 、 2.38 ± 0.06 和 2.15 ± 0.21 。结合 MS2 噬菌体剂量响应曲线(见图 2), 计算得到消毒器 RED 值分别为 50.7、44.1 和 39.7 mJ/cm^2 。

2.2 CFD 模型模拟法测定辐射剂量

通过 CFD 软件对 UV 消毒器建模, 并模拟光场, 得到量化的消毒器腔体剂量率分布(流量 = 106 L/h, UVT = 99%)。截取光场轴向断面进行分析, 如图 3(a)所示, 消毒器内剂量率分布并不均匀, 在轴向上, 中心处的剂量率最强, 随着向消毒器两端移动逐渐减弱, 进出水口处存在暗区; 在径向方向, 距离灯管越近, 剂量率越强。

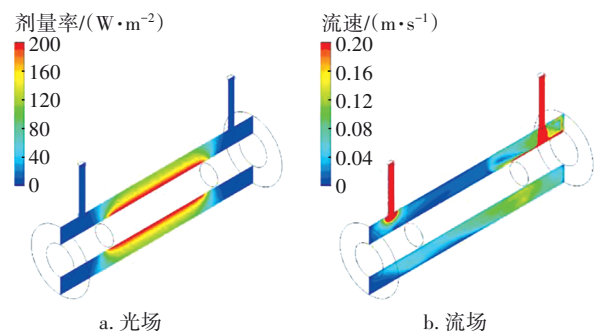


图3 UV 消毒器轴向断面的光场和流场

Fig.3 Optical field and fluid field in axial section of UV disinfectant

图 3(b)显示了 UV 消毒器在额定流量(106 L/h)下的流场, 可以看出进水口的水流接近推流状态, 进入腔体后迅速转变为湍流状态, 水流速度沿着轴向断面逐渐变慢。在消毒器出水口处对模拟微粒进行取样, 沿其运动轨迹对 UV 剂量率进行时间积分, 得到微粒在消毒器出水口处所接受的 UV 剂量, 模拟 5 300 个粒子即可获得剂量分布, 见图 4。

结合消毒器 UV 剂量分布与 MS2 噬菌体剂量响应曲线, 根据式(2)得到消毒器在不同运行条件下的 RED 值(见表 1)。在 UVT 为 99% 以及流量为 90、106 和 120 L/h 的运行条件下, UV 消毒器 CFD 模拟辐射剂量分别为 42.1、37.9 和 35.8 mJ/cm^2 , 即流量越大 UV 消毒器辐射剂量越小。

根据 UV 剂量分布计算得到待测消毒器最小 UV 剂量(D_{\min})、平均 UV 剂量(D_{avg})和第 10 百分位 UV 剂量(D_{10})。可以看出 D_{\min} 、 D_{avg} 和 D_{10} 随流量增加而减小, RED 值与 D_{10} 和 D_{\min} 较为接近, 却与 D_{avg} 差距

较大, 说明 UV 消毒器的消毒效果(RED 值)主要取决于接受低 UV 剂量的模拟微粒, 与 D_{avg} 关系不大。因此, 在进行 UV 消毒器优化设计时, 应尽量避免导致低 UV 剂量的设计缺陷(如暗区、短流等), 以提高 UV 消毒效果(RED 值)。

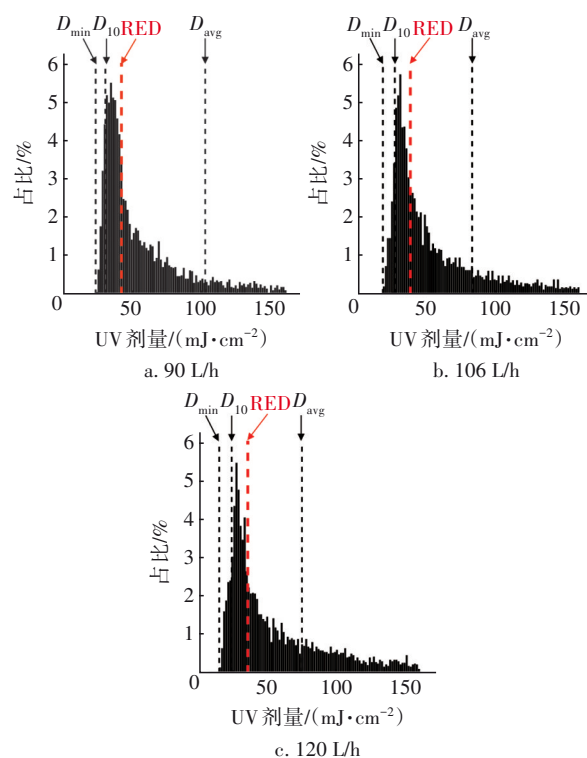


图4 不同流量下待测 UV 消毒器剂量分布

Fig.4 Fluence distributions of UV disinfectant at different flow rates

表1 CFD 模型模拟 D_{\min} 、 D_{avg} 、 D_{10} 和 RED 值

Tab.1 Simulated D_{\min} , D_{avg} , D_{10} and RED values by CFD model

流量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	$D_{\min}/$ ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$D_{\text{avg}}/$ ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$D_{10}/$ ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	RED/ ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)
90	23.4	102.5	30.4	42.1
106	17.8	83.1	26.5	37.9
120	14.9	75.4	24.0	35.8

2.3 两种方法的对比讨论

剂量测定方法的选择应根据实际应用场景和需求, 表 2 为两种测试方法的对比。生物剂量法的优势在于测试结果直观、易于理解, 测试结果可以验证厂家的消毒器设计效果, 保证消毒器出厂时达标。问题在于, 首先, 原理上该方法无法现场直接测定消毒器长期运行过程中的辐射剂量, 实时检定 UV 消毒效果是否达标^[13-14]。其次, 它不能准确量化

反映UV消毒器内部的UV剂量率分布以及流体动力学特性,无法指导消毒器的优化设计。最后,对于大型UV消毒器,此方法存在工作量大、成本高、准确度低等问题。CFD模型模拟法的优点在于可快速、低费用模拟消毒器UV剂量率分布和流态,计算出剂量,指导消毒器的优化设计。问题在于,首先,传统UV光场模型尚无法考虑消毒器套管、内壁等对UV光子的反射、折射、散射等行为,准确性有待提高。其次,灯管输出效率、套管UV透过率(套管本身和污染垢层的吸收)等关键参数均使用

标称值^[15],不能准确反映实际运行时消毒器的状态,因此其模拟结果仍需实验验证^[16-17]。最后,CFD模拟操作专业性较强,科研人员需通过软件操作培训和UV消毒器模拟实践提高模拟准确性。因此,生物剂量法在UV消毒领域受到广泛认可,常用于已研发消毒器的剂量验证;模型模拟法参数调整灵活、成本较低,常用于消毒器的优化设计。在剂量测定的实际应用中,应综合考虑测试成本及时间、准确性及误差来源和剂量验证需求等因素,选择测定辐射剂量的适合方法,提高UV消毒可靠性。

表2 剂量测定方法的比较

Tab.2 Comparison of fluence determination methods

项 目	生物剂量法	CFD模型模拟法
测试装置	准平行光束仪、过流灭活设备(水泵、储水池等)、微生物培养装置	CFD计算用服务器
成本及工作量	成本高,工作量大	成本低,工作量小
测试时间	长	短
准确性	结果直观,易于理解,但微生物实验操作误差较高,且存在剂量响应曲线非线性误差	无实验操作误差,但关键输入参数只能为标称值(如灯效、套管透过率等)而非实际值,需实验验证
剂量验证	广泛认可,已被多个国家标准所采用	无法输入关键参数的实际值,测定结果只能作为参考
光场/流场测定	不能获得消毒器内部信息,分析性能时能测定RED值	能够获得不同构型消毒器内部的光场与流场,指导消毒器优化设计
改进方法	染料微球法,通过化学染料微球替代受试微生物,提高测试精度	“探头-模型”法,通过剂量率探头校正关键参数标称值和实际值间的差异,准确测定实时辐射剂量

生物剂量法的误差源于剂量响应曲线非线性误差和消毒器微生物实验误差,而CFD模型模拟法的误差源于模拟中采用的标称值与实际值间的差异。通过对比发现,尽管在相同流量下模型模拟法测定结果略低于生物剂量法,但误差小于17%,因此认为两种方法之间具有较好的一致性。

针对生物剂量法测试中剂量响应曲线的非线性误差,工程人员测定了BIAS参数进行校正;而对于微生物实验上的误差,相关学者研发了染料微球技术^[18],其以染料微球替代受试微生物通过UV消毒器,采用流式细胞仪测定染料微球光反应产物的荧光信号,从而计算辐射剂量。与生物剂量法相比,该技术具有操作简单、测试精度高与可评估辐射剂量分布的优势,但同样存在测试时间长、成本高和需要特定操作装置等问题。针对CFD模型模拟法的误差,“探头-模型”结合技术被研发,即采用剂量率探头(荧光微探头)测试运行中UV消毒器空间一点(或多个点位)的实时剂量率,与CFD模拟(采用标称值)剂量率对比以获得校正系数^[19],即可

将CFD模拟结果校正为实时RED值,以排除套管污染、灯输出等实时波动导致的模拟误差。已有研究表明,经探头校正后的CFD模型模拟法与生物剂量法测定结果基本吻合^[17,19]。

3 结论

① 生物剂量法测试结果表明,在90、106和120 L/h的流量下,UV消毒器对MS2噬菌体的平均对数灭活率分别为2.74、2.38和2.15,辐射剂量分别为50.7、44.1和39.7 mJ/cm²,而CFD模型模拟法与生物剂量法测定结果之间具有较好的一致性。

② 生物剂量法的误差源于剂量响应曲线非线性误差和消毒器微生物实验误差,而CFD模型模拟法的误差主要源于模拟中采用的标称值与实际值间的差异。在实际应用中,生物剂量法常用于已研发消毒器的剂量验证,而模型模拟法常用于消毒器优化设计。应综合考虑测试成本及时间、准确性及误差来源和剂量验证需求等因素,选择测定辐射剂量的适合方法,以提高UV消毒可靠性。

参考文献:

- [1] SONG K, MOHSENI M, TAGHIPOUR F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review[J]. *Water Research*, 2016, 94: 341–349.
- [2] QUALLS R G, JOHNSON J D. Bioassay and dose measurement in UV disinfection [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1983, 45(3): 872–877.
- [3] LINDEN K, DARBY L. Estimating effective germicidal dose from medium-pressure UV lamps [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(11): 1142–1149.
- [4] ÖNORM. Plants for the Disinfection of Water Using Ultraviolet Radiation Requirements and Testing Low Pressure Mercury Lamp Plants: M5873-1[S]. Vienna: Österreichisches Normungsinstitut, 2003.
- [5] DVGW. UV Systems for Disinfection in Drinking Water Supplies: Requirements and Testing: W294 [S]. Berlin: German Technical and Scientific Association for Gas and Water, 2006.
- [6] 李文涛, 詹露梦, 李梦凯, 等. 穿孔导流板对紫外消毒器性能影响的CFD模拟评估[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(19): 40–46.
- LI Wentao, ZHAN Lumeng, LI Mengkai, *et al.* Impact of perforated plate on UV disinfection reactor performance as evaluated with CFD modeling[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (19) : 40–46 (in Chinese).
- [7] XU C, ZHAO X S, RANGAIAH G P. Performance analysis of ultraviolet water disinfection reactors using computational fluid dynamics simulation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 221: 398–406.
- [8] IMBERDORF G E, TAGHIPOUR F, KESHMIRI M, *et al.* Predictive radiation field modeling for fluidized bed photocatalytic reactors [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(16): 4228–4238.
- [9] IMBERDORF G E, TAGHIPOUR F, MOHSENI M. Radiation field modeling of multi-lamp, homogeneous photoreactors [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2008, 198 (2/3) : 169–178.
- [10] WOLS B A, HOFMAN J, BEERENDONK E F, *et al.* A systematic approach for the design of UV reactors using computational fluid dynamics [J]. *AIChE Journal*, 2011, 57(1): 193–207.
- [11] BOLTON J R, LINDEN K G. Standardization of methods for fluence (UV dose) determination in bench-scale UV experiments [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(3): 209–215.
- [12] LI W T, LI M K, BOLTON J R, *et al.* Impact of inner-wall reflection on UV reactor performance as evaluated by using computational fluid dynamics: the role of diffuse reflection [J]. *Water Research*, 2017, 109: 382–388.
- [13] HO C K, KHALSA S S, WICKLEIN E, *et al.* Important Factors for Computational Modeling of UV Disinfection Systems [R]. Cincinnati: American Water Works Association, 2008.
- [14] LI M K, QIANG Z M, WANG C, *et al.* Development of monitored tunable biosimetry for fluence validation in an ultraviolet disinfection reactor [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 117: 12–17.
- [15] QIANG Z M, LI M K, BOLTON J R, *et al.* Estimating the fluence delivery in UV disinfection reactors using a ‘detector-model’ combination method [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 233: 39–46.
- [16] KESHAVARZFATHY M, TAGHIPOUR F. Computational modeling of ultraviolet light-emitting diode (UV-LED) reactor for water treatment [J]. *Water Research*, 2019, 166: 115022.
- [17] LI M K, LOU F, SUN Z, *et al.* On-site determination and approaches for measuring fluence rate distribution in water for model validation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 110: 169–177.
- [18] FANG S Y, GUAN Y S, BLATCHLEY III E R, *et al.* Conjugation of (E)-5-[2-(methoxycarbonyl) ethenyl] cytidine to hydrophilic microspheres: development of a mobile microscale UV light actinometer [J]. *Bioconjugate Chemistry*, 2008, 19(3): 592–597.
- [19] LI M K, LI W T, QIANG Z M, *et al.* On-site determination and monitoring of real-time fluence delivery for an operating UV reactor based on a true fluence rate detector [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(14): 8094–8100.

作者简介:王佳乐(2000–),男,内蒙古锡林郭勒盟人,硕士研究生,主要从事紫外线消毒原理与方法研究。

E-mail:jlwang_st@rcees.ac.cn

收稿日期:2022-10-06

修回日期:2023-02-20

(编辑:李德强)