

# 低压单波长紫外灯在水下时紫外线输出量的测量

陈 钰<sup>1,2,3</sup>, 张连峰<sup>1,2</sup>, 刘淑杰<sup>1,2</sup>, 赵剑强<sup>3</sup>, 吴秉奇<sup>1,2</sup>, 李梦凯<sup>4</sup>

(1. 深圳清华大学研究院 生态与环境保护实验室, 广东 深圳 518057; 2. 广东省环境微生物资源开发与应用工程技术研究中心, 广东 深圳 518057; 3. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 4. 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)

**摘 要:** 将碘化物/碘酸盐(KI/KIO<sub>3</sub>)化学曝光剂密封于自制的计量皿内,置于水下测量低压汞紫外灯周围的辐射照度,用发散辐射模式结合辐射照度计算出紫外线的输出量。国际紫外线协会(IUVA)推荐了以凯兹方程为基础的测量和计算紫外线输出量的方法,它是发散辐射模式在介质吸光系数为零时的辐射照度计算公式。因此,提出的测量方法在原理上是IUVA测量方法向水下的拓展。考察了曝光剂浓度和曝光剂内部混合对测量结果的影响,并对计量皿石英窗的反射和吸收量进行了计算,排除了相关误差。实测结果显示,此方法有较高的精确度,在不同吸光度的水体中,分别测得同一个8 W 低压汞紫外灯紫外线输出量的相对误差为1.73%。

**关键词:** 紫外灯; 紫外线输出量; 水下; 化学曝光剂; 凯兹公式; 发散辐射模式

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0047-06

## Measurement of UV Output of Monochromatic (254 nm) Low Pressure UV Lamp in Water

CHEN Yu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lian-feng<sup>1,2</sup>, LIU Shu-jie<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian-qiang<sup>3</sup>,  
WU Bing-qi<sup>1,2</sup>, LI Meng-kai<sup>4</sup>

(1. Laboratory of Ecological and Environmental Protection, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China; 2. Guangdong Research Center for Development and Application of Environmental Microbial Resources, Shenzhen 518057, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 4. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Chemical actinometer solution (KI/KIO<sub>3</sub>) was sealed and utilized to measure the irradiance of a low-pressure UV lamp in water. The UV output of a lamp could be calculated using the diffuse radiation model based on the measured irradiance data. The international ultraviolet association (IUVA) recommends the method based on the Keitz equation to measure the UV output of a lamp in air, which is an application of the diffuse radiation model when the absorbance coefficient of the media is zero. This work proposed to expand the application of the IUVA method in water. The influences of the concentration of chemical actinometer solution and the mixing of the solution inside the container were re-

searched. Reflections from the quartz window and the surface of the solution, as well as energy loss inside quartz were calculated. The potential errors on the energy losses were removed. The results indicated good measurement accuracy of the proposed method. The relative difference between two measurements of an 8 W low-pressure UV lamp in water with different UV absorbance coefficients was 1.73%.

**Key words:** UV lamp; UV output; in water; chemical actinometer; Keitz equation; diffuse radiation model

在紫外线反应器的设计和应用中,需要对辐射场进行计算分析。例如,目前有很多学者和制造商采用CFD软件模拟计算紫外线反应器<sup>[1~5]</sup>。对于这些计算,紫外灯的紫外线输出量是基础数据。国际紫外线协会(IUVA)推荐了以凯兹方程为基础的测量和计算紫外线输出量的方法<sup>[6]</sup>。这个方法是测量置于空气中紫外灯的紫外线输出量,而在水消毒反应器中,灯是置于水下的,通常是在反应器内设置水密封的石英套管,紫外灯在石英套管内。由于灯的温度对紫外线输出量有很大影响<sup>[7]</sup>,而水温、石英套管管径、壁厚等决定了灯的温度,且实际需要的数据是紫外灯和套管组合发出的紫外线输出量。因此,需要开发直接测量紫外灯在水下紫外线输出量的方法。目前,测量水下紫外线输出量的方法只能测到相对值,用于不同紫外灯之间的比较。而在进行紫外线反应器的辐射场计算时,需要紫外线输出量的绝对数据,然而到目前为止尚未见到这方面的研究报告。国际紫外线协会推荐的方法是在过线形灯管中垂线上、满足传感器能充分响应的入射角的位置,用紫外辐照计检测辐射照度,用凯兹方程的辐射照度计算出灯的紫外线输出量。这涉及到两个方面:辐射照度的测量、根据辐射照度计算出紫外线输出量。

将光电紫外辐照计的探头进行防水处理可以进行水下测量。但由于仪器基准值并不是在水中校准的,一般用于测量水下紫外线辐射照度的相对值,掌控紫外灯的寿命情况。化学曝光剂是以定量自身化学反应为依据的紫外线剂量测量方法,准确、可靠,且可用来对紫外辐照计进行校正<sup>[8,9]</sup>。开发一种能够置于水下的化学曝光剂是很有前景的。有学者做过这方面的尝试,在石英球内注入化学曝光剂液体,成功地测量了剂量率<sup>[10,11]</sup>。但球形石英自身反射、吸收等因素的影响不易掌握,且石英球在制造上较困难。

在紫外线辐射场的计算方面,为了建立数学公

式,需要在灯的物理特性以及辐射模式两方面进行理想化简化。在灯的物理特性方面,有许多理想化的简化或假设,例如,将灯考虑成无几何尺寸的线、有几何尺寸的柱体、光从灯表面发出、光从灯内部的各个发光粒子发出等。在辐射模式方面,有3种基本模式:diffuse model(发散模式)、specular model(镜型模式)、radial model(径向模式)。基于这两方面各种情况的组合,可以推导出许多数学公式对辐射场进行计算,统称为数学计算模型<sup>[12~16]</sup>。国际紫外线协会推荐在空气中测量方法的计算公式(凯兹方程)就是基于发散模式在介质吸收系数为零时的数学计算模型。

笔者开发了一种能够置于水下且受光面为平板石英的化学曝光剂器皿:将化学曝光剂液体密封于一个容器内,容器的受光面为平板石英窗。应用这个曝光剂器皿测量水下紫外灯周围的辐射照度,然后用发散模式计算出紫外线输出量,并对平板石英周围的反射和内部的吸收量进行了准确计算,排除了相应误差。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

化学曝光剂计量皿是一个1 cm × 1 cm × 4 cm的密封容器,其中一面为平板石英,用以接收紫外线。容器内部为化学曝光剂液体,溶液的组分为广泛采用的0.6 mol/L KI - 0.1 mol/L KIO<sub>3</sub> - 0.01 mol/L Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> · 10H<sub>2</sub>O(纯水配制)<sup>[8,9,17~19]</sup>。照射前后溶液在352 nm处吸光度采用UV-VIS分光光度计(UV-2600,岛津)进行测量。所用化学试剂均为分析纯,在使用前均未进行预处理。纯水采用纯水净化系统以自来水为源水自制,控制电导率在18.2 μS/cm以下。

### 1.2 测量方法

将化学曝光剂计量皿置于过灯管中垂线上,在距灯不同位置进行紫外线照射,通过化学曝光剂原理计算出不同距离的辐射照度,见图1。测量过程

中,对水温进行测定和控制。将灯管与石英套管组合固定在确定位置,通过固定支架调整计量皿距灯的位置,在计量皿受照射面(即石英窗)前放置可瞬时移除的遮光挡板,避免紫外线照射。开启紫外灯,预热 2 h 后,快速移出遮光挡板,然后开始记录化学曝光剂计量皿被照射的时间,最后测量曝光剂溶液在 352 nm 处的吸光度。测量时水温为 28 ℃。

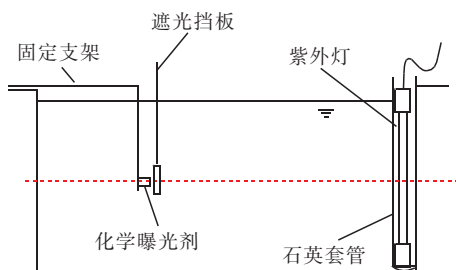


图 1 测量系统的构成

Fig. 1 Set-up of measurement system

### 1.3 碘化物/碘酸盐化学曝光剂

碘化物/碘酸盐(KI/KIO<sub>3</sub>)化学曝光剂是对 254 nm 光子数量直接测量,能够作为 254 nm 辐射量的基准,校准其他紫外辐照计<sup>[8,9]</sup>。

#### 1.3.1 曝光剂接收到的辐射照度

化学曝光剂计量皿是一个矩形容器,其中一面为平板石英窗,化学曝光剂溶液(KI/KIO<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O)密封在容器内。Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O 主要缓冲混合液的 pH 值。在波长为 248 ~ 330 nm 范围内的紫外线照射下, KI/KIO<sub>3</sub> 会产生三碘离子(I<sub>3</sub><sup>-</sup>)<sup>[17,19,20]</sup>。

根据朗伯比尔定律,曝光剂接收的光子数量和 352 nm 处的吸光度关系如下:

$$\text{光子数量} = \frac{c_0}{\varphi} = \frac{\text{Abs}_{352}}{\varepsilon_{352} L_0 \varphi} \quad (1)$$

式中: Abs<sub>352</sub> 为曝光剂在 352 nm 处的吸光度(1 cm 光程比色皿,下同),无量纲; c<sub>0</sub> 为吸光物质(I<sub>3</sub><sup>-</sup>)的浓度, mol/L; L<sub>0</sub> 为紫外光度计比色皿光程,本研究取 1 cm; ε<sub>352</sub> 为 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 在 352 nm 处的吸收系数,取 27 636 (mol · L<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup> · cm<sup>-1</sup><sup>[21]</sup>; φ 为量子产率,无量纲(与温度有关,文中测量时水温为 28 ℃,应取 0.75<sup>[8]</sup>)。

因此,在靠近石英窗的曝光剂表面接收到的辐射照度为:

$$I_a = \frac{\text{Abs}_{352}' V h c N_a}{L_0 \varphi \varepsilon_{352} \lambda t A (1 - R)} \quad (2)$$

式中: I<sub>a</sub> 为化学曝光剂所测辐射照度, mW/cm<sup>2</sup>; Abs<sub>352</sub>' 为曝光剂经 254 nm 紫外线照射前后在 352 nm 处吸光度的差值,无量纲; V 为器皿内曝光剂溶液的有效体积,本研究为 4 mL; h 为普朗克常数, 6.626 068 96 × 10<sup>-34</sup> J · s; c 为光在真空中的传播速度, 299 792 458 m/s; N<sub>a</sub> 为阿伏伽德罗常量, 6.02 × 10<sup>23</sup>; λ 为光波波长,本研究为 254 nm; t 为曝光照射时间, s; A 为液体被曝光的照射面积,本研究为 1 cm<sup>2</sup>; R 为综合能量损失系数,无量纲。

本研究将各种能量损失的总和除以损失前总能量定义为综合能量损失系数 R。综合能量损失系数 R 是包含了紫外线在介质间界面的反射以及在石英窗内被吸收损失掉的能量。

#### 1.3.2 能量损失系数的计算

当紫外线光束通过石英窗时,因介质折射率不同,有三种能量损失:石英表面的反射、石英内部对能量的吸收以及离开石英窗进入曝光剂时的反射。实际辐射照度需要在测量值的基础上叠加这些能量损失。石英窗周围能量损失示意图 2(石英窗壁厚 l<sub>q</sub> 为 1 mm,图中为清晰表达进行了放大)。

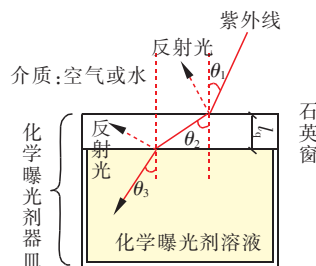


图 2 石英窗周围的能量损失

Fig. 2 Energy losses around quartz window

根据斯涅尔定律和菲涅耳方程:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right) \quad (3)$$

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_3} \sin \theta_2\right) \quad (4)$$

式中: θ<sub>1</sub>、θ<sub>2</sub>、θ<sub>3</sub> 为不同介质之间的人射角或折射角; n<sub>1</sub>、n<sub>2</sub>、n<sub>3</sub> 为三种介质的折射率,无量纲。

第一次反射:

$$r_{1\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (5)$$

$$r_{1\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (6)$$

$$R_1 = \frac{r_{1\perp}^2 + r_{1\parallel}^2}{2} \quad (7)$$

式中:  $r_{1\perp}$  为光束垂直于照射平面部分的反射率,无量纲;  $r_{1\parallel}$  为光束平行于照射平面的反射率,无量纲;  $R_1$  为第一次反射总的反射率。

同理可得第二次反射总的反射率  $R_2$ 。

到达石英窗的辐射照度根据发散模式进行计算,采用有限模型(finite model)的计算公式<sup>[22]</sup>,即:

$$I_{rp} = \sum_{\Delta l} \left( \frac{10^{-\varepsilon l_{path}} Q \Delta \theta_1}{n_1 \Delta A_{\theta_1}} \times \frac{2 \cos^3 \theta_1}{\pi} \right) \quad (8)$$

式中:  $I_{rp}$  为辐射照度,  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ;  $Q$  为紫外线输出量,  $\text{W}$ ;  $\theta_1$  为辐射角度,  $\text{rad}$ ;  $\varepsilon$  为吸收系数,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $l$  为灯的有效长度,  $\text{cm}$ ;  $n_1$  为灯长划分段数,无量纲;  $A_{\theta_1}$  是  $\theta_1$  方向上,  $\theta_1$  和  $\theta_1 + d\theta$  之间的微圆形面域面积,与辐射方向垂直,  $\text{cm}^2$ ;  $l_{path}$  为辐射点到被辐射点的距离,  $\text{cm}$ 。

经过两次反射和石英玻璃的吸收后,辐射照度为:

$$I_r = \sum_{\Delta l} \left( \frac{10^{-\varepsilon l_{path}} Q \Delta \theta_1}{n_1 \Delta A_{\theta_1}} \times \frac{2 \cos^3 \theta_1}{\pi} \right) (1 - R_1) \times (1 - R_2) 10^{-\varepsilon_q l_q / \cos \theta_2} \quad (9)$$

式中:  $I_r$  为包含综合能量损失的辐射照度,  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ;  $\varepsilon_q$  为石英窗的吸收系数,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $l_q$  为石英窗的厚度,  $\text{cm}$ 。

综合能量损失系数  $R$  (能量损失/损失前能量) 的计算如下:

$$R = \frac{l_{rp} - I_r}{l_{rp}} \quad (10)$$

辐射照度和综合能量损失系数采用 VBA 进行编程运算。

#### 1.4 紫外线输出量计算

紫外灯的辐射模式一般被抽象分成三种辐射模式,即发散模式、径向模式和镜型模式。考虑到灯表面并非完美平滑,每一种模式描述的都非真实情况。应用这些模式从辐射照度推算出紫外线输出量时,最终结果实际是受所选模式控制的,即同一组辐射照度数据,用不同模式可推算出不同的紫外线输出量,这些结果也不同程度地接近真实值。因此,准确地描述通过测量和模式计算两个步骤得到的紫外线输出量时,应加上辐射模式作为前缀,如“发散辐射

模式紫外线输出量”。Zhang 等曾进行过研究对比,对于线形紫外线灯,发散辐射模式相对更接近实测值<sup>[22]</sup>。本研究选用发散辐射模式进行计算,同国际紫外线协会保持一致。同时,在测量时也以推荐方法为基础,只是介质从空气换成了水。因此,该法可认为是将国际紫外线协会推荐的测量方法从空气中拓展到水下。发散辐射模式的辐射照度计算见式(8),为有限计算模型的表达形式<sup>[22]</sup>。

紫外灯紫外线输出量的具体推算方法如下:在灯管中垂线上不同位置通过化学曝光剂测量一系列的辐射照度数值,然后假定一个紫外线输出量,以发散辐射模式计算出这些点的理论辐射照度。计算实测值和理论值之差的平方和,调整假设的紫外线输出量,以平方和最小为目标,最后得出对应的紫外线输出量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 影响因素

#### 2.1.1 化学曝光剂浓度的影响

化学曝光剂是计量进入曝光剂的 254 nm 光子数量。曝光剂溶液对 254 nm 波长紫外线的实测透光度是 0.33%。理论上,只要无光子穿过液体到达计量皿内壁或底部而将光子浪费,即只要有足够的 KI/KIO<sub>3</sub> 溶液接受光子,测量的结果应该是一致的。但实测结果显示,相同数目的光子能诱发的 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 量并非独立于 KI/KIO<sub>3</sub> 的浓度。维持相同的照射条件,用准平行光束仪测量相同体积不同浓度曝光剂,结果见图 3。

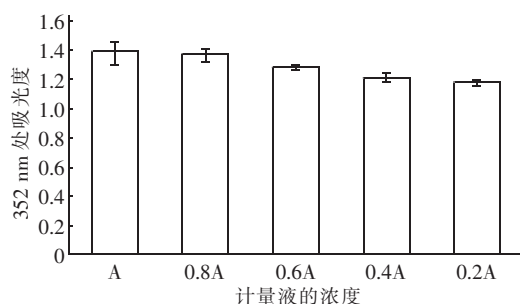


图3 计量液浓度对 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 产率的影响

Fig. 3 Influence of actinometer concentration on production of I<sub>3</sub><sup>-</sup>

由图 3 可以看出,352 nm 处吸光度随着曝光剂浓度的降低而减小,即生成 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 的量减少。此结果与 Rahn 等的研究结果相一致<sup>[17]</sup>。这可能有两个原因:低浓度会导致光子在溶液中穿行更长距离,甚至

穿过液体无法和曝光剂中  $\text{KI}/\text{KIO}_3$  进行反应; $\text{I}_3^-$  自身分解生成  $\text{I}^-$  和  $\text{I}_2$ , 导致  $\text{I}_3^-$  浓度降低, 如果  $\text{KI}$  浓度过低, 会加速这个分解反应。由于  $0.6 \text{ mol/L KI} - 0.1 \text{ mol/L KIO}_3 - 0.01 \text{ mol/L Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  这一浓度配比的量子产率已有很多学者进行了报告和应用<sup>[8,9,17-19]</sup>, 所以采用此浓度的溶液作为化学曝光剂。在本研究中, 称  $0.6 \text{ mol/L KI} - 0.1 \text{ mol/L KIO}_3 - 0.01 \text{ mol/L Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  比例的溶液为标准化学曝光剂浓度, 以符号 A 表达。如, 0.1A 代表将标准溶液稀释到了标准浓度的 1/10。

### 2.1.2 化学曝光剂混合的影响

由于曝光剂对 254 nm 处紫外线有较高的吸收系数, 因此光化学反应主要发生在液体表面。为考察照射过程中曝光剂不混合是否影响  $\text{I}_3^-$  的产生, 应用准平行光束仪对比了液体进行搅拌和不搅拌时产生的  $\text{I}_3^-$  量。结果表明, 搅拌对光化学反应的影响在可以忽略的水平。180 s 时的相对误差为 0.65%, 600 s 时的相对误差为 0.34%。即密封计量皿不会因为不搅拌而产生不可忽略的误差, 且  $\text{I}_3^-$  在液体内部有分子扩散。但是照射后, 根据液体颜色变化分布, 可视觉观察到计量皿内部  $\text{I}_3^-$  浓度并不均匀。因此, 进行 352 nm 吸光度检测前, 曝光剂需要进行充分混合。

### 2.2 水下紫外线输出量的测量

采用图 1 所示的测量系统, 实际测量了一支灯丝间距离为 23 cm 的紫外灯在水下的紫外线输出量。由于紫外灯在水下时被置于一个石英套管内, 因此系统实质上测量的是紫外灯和石英套管组合的紫外线输出量。为了进行对比, 分别在两种不同 254 nm 吸光度水体中进行了测量。试验通过投加咖啡粉进行吸光度调节。结果表明, 在 254 nm 波长处吸光度为 0.02 和 0.05 的水体(透光度分别为 95.5% 和 89.1%) 中测到的紫外线输出量分别为 3.41 W 和 3.47 W, 两个结果非常接近, 相对误差为 1.73%。

### 3 结论

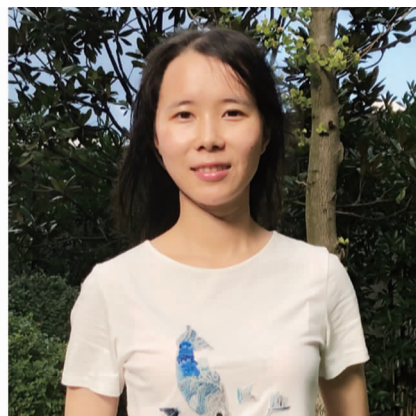
开发了能够在水下测量辐射照度的化学曝光剂计量皿, 并应用国际紫外线协会推荐方法的理论基础——发散辐射模型, 将测量从空气中拓展到了水下。结果显示, 化学曝光剂计量皿有较高的精度, 内部不搅拌对测量值无影响。水下所用化学曝光剂计量皿和普通化学曝光剂的区别在于液体和光源之间

多了一层石英窗。对于石英窗的反射、吸收和计量液体表面的反射产生的能量损失, 应用有限模型(definite model)推导出了完整的计算公式, 通过计算可消除这部分误差。

### 参考文献:

- [1] 张光辉, 顾平, 于丹丹. 紫外线消毒器水力特性的研究[J]. 水处理技术, 2008, 34(2): 16-20.  
Zhang Guanghui, Gu Ping, Yu Dandan. Hydraulic characteristics of UV disinfectors[J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(2): 16-20 (in Chinese).
- [2] Wols B A, Shao L, Uijtewaal W S J, et al. Evaluation of experimental techniques to validate numerical computations of the hydraulics inside a UV bench-scale reactor[J]. Chem Eng Sci, 2010, 65(15): 4491-4502.
- [3] 李继, 张艳, 董文艺. 基于 CFD 的两种紫外消毒模型的比较研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 125-129.  
Li Ji, Zhang Yan, Dong Wenyi. Comparison of two different UV disinfection models by CFD[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 125-129 (in Chinese).
- [4] Sultan T. Numerical study of the effects of lamp configuration and reactor wall roughness in an open channel water disinfection UV reactor[J]. Chemosphere, 2016, 155: 170-179.
- [5] 张连峰, 张金松, 刘文君, 等. 紫外线在消毒与环境净化应用中的辐射量的测量和计算[J]. 中国给水排水, 2017, 33(20): 41-45.  
Zhang Lianfeng, Zhang Jinsong, Liu Wenjun, et al. Measurement and calculation of ultraviolet radiation in disinfection and environmental purification[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(20): 41-45 (in Chinese).
- [6] Lawal O, Dussert B, Howarth C, et al. Proposed method for measurement of the output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps[J]. IUVA News, 2008, 10(1): 14-17.
- [7] Masschelein W J, Rice R G. Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation[M]. Boca Raton: Crc Press, 2002.
- [8] Bolton J R, Stefan M I, Shaw P, et al. Determination of the quantum yields of the potassium ferrioxalate and potassium iodide-iodate actinometers and a method for the calibration of radiometer detectors[J]. J Photochem

- Photobiol A: Chem, 2011, 222(1): 166 – 169.
- [9] Qiang Z, Li W, Li M, *et al.* Inspection of feasible calibration conditions for UV radiometer detectors with the KI/KIO<sub>3</sub> actinometer[J]. Photochem Photobiol, 2015, 91(1): 68 – 73.
- [10] Rahn R O, Bolton J, Stefan M I. The iodide/iodate actinometer in UV disinfection: Determination of the fluence rate distribution in UV reactors[J]. Photochem Photobiol, 2006, 82(2): 611 – 615.
- [11] Rahn R O. Fluence measurements employing iodide/iodate chemical actinometry as applied to upper-room germicidal radiation[J]. Photochem Photobiol, 2013, 89(4): 816 – 818.
- [12] Bolton J R. Calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: significance of refraction and reflection[J]. Water Res, 2000, 34(13): 3315 – 3324.
- [13] 孙文俊, 刘文君, 胡田甜, 等. 紫外线消毒系统中强度分布的理论计算与生物验证对比[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 563 – 567.
- Sun Wenjun, Liu Wenjun, Hu Tiantian, *et al.* Comparison of theoretical computation and bioassays of UV intensity distribution in an ultraviolet disinfection reactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 563 – 567 (in Chinese).
- [14] 李梦凯, 强志民, 史彦伟, 等. 紫外消毒系统有效辐射剂量测试方法研究进展[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 513 – 520.
- Li Mengkai, Qiang Zhimin, Shi Yanwei, *et al.* Research progress on the effective dose measurement methods for UV disinfection facilities[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(3): 513 – 520 (in Chinese).
- [15] 张光辉, 顾平. 封闭式紫外线消毒器光强计算及分布规律研究[J]. 给水排水, 2013, 39(s1): 88 – 93.
- Zhang Guanghui, Gu Ping. Distribution and calculation of ultraviolet intensity in a closed channel ultraviolet disinfection reactor[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(s1): 88 – 93 (in Chinese).
- [16] Boyjoo Y, Sun H, Liu J, *et al.* A review on photocatalysis for air treatment: From catalyst development to reactor design[J]. Chem Eng J, 2017, 310: 537 – 559.
- [17] Rahn R O, Stefan M I, Bolton J R, *et al.* Quantum yield of the iodide-iodate chemical actinometer: dependence on wavelength and concentrations[J]. Photochem Photobiol, 2003, 78(2): 146 – 152.
- [18] Goldstein S, Rabani J. The ferrioxalate and iodide-iodate actinometer in the UV region[J]. J Photochem Photobiol A: Chem, 2008, 193(1): 50 – 55.
- [19] Muller A, Stahl M R, Greiner R, *et al.* Performance and dose validation of a coiled tube UV-C reactor for inactivation of microorganisms in absorbing liquids[J]. J Food Eng, 2014, 138: 45 – 52.
- [20] Rahn R O. Potassium iodide as a chemical actinometer for 254 nm radiation: Use of iodate as an electron scavenger[J]. Photochem Photobiol, 1997, 66(6): 450 – 455.
- [21] Jin S, Mofidi A A, Linden K G. Polychromatic UV fluence measurement using chemical actinometry, biosimetry, and mathematical techniques[J]. J Environ Eng, 2006, 132(8): 831 – 841.
- [22] Zhang L, Anderson W A. A finite model for the prediction of the UV radiation field around a linear lamp[J]. Chem Eng Sci, 2010, 65(5): 1513 – 1521.



作者简介:陈钰(1993 – ), 女, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 研究方向为紫外线在水净化领域的应用。

E-mail: goover-cy@163.com

收稿日期: 2018 – 05 – 14