

黄苑强, 秦雄, 袁振, 等. 真空紫外线在小型水质净化器中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(2):77-82.

HUANG Y Q, QIN X, YUAN Z, et al. Application of vacuum ultraviolet in small scale water purifiers[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2):77-82.

## 真空紫外线在小型水质净化器中的应用

黄苑强<sup>1</sup>, 秦雄<sup>1</sup>, 袁振<sup>1</sup>, 姚森<sup>2,3</sup>, 张连峰<sup>1,2,\*</sup>, 常保延<sup>4</sup>

(1. 深圳市水务科技有限公司, 广东深圳 518031; 2. 深圳清华大学研究院生态与环境保护实验室, 广东深圳 518057; 3. 广西大学化学化工学院, 广西南宁 530004; 4. 无锡华兆泓光电科技有限公司, 江苏无锡 214112)

**摘要** 185 nm 紫外线是一种具有强大氧化能力的高级氧化技术, 能够有效地分解水中微量有机物。文中利用低压汞灯发出的 185 nm 紫外线的氧化能力, 针对水中微量有机物的去除进行了试验研究。首先, 设计制作了单灯净水器和 4 灯并联的加强型净水器进行试验研究, 结果表明, 185 nm 紫外线在去除抗生素等污染物方面具有潜力; 大石英套管的使用显著提高了净水器的效果。此外, 探究了不同流量、抗生素浓度和紫外线灯数量对净水器去除效率的影响, 并探讨了流量变化对混合扰动和去除率的关系。最后, 通过消毒试验验证了加强型净水器的消毒效果。研究为家庭提供了一种高效的水质净化解决方案, 并为紫外线技术在水处理领域的应用提供了实证和探索。

**关键词** 真空紫外线 水质净化器 微量有机物 抗生素 消毒 深度处理

**中图分类号:** O69 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)02-0077-06

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.009

## Application of Vacuum Ultraviolet in Small Scale Water Purifiers

HUANG Yuanqiang<sup>1</sup>, QIN Xiong<sup>1</sup>, YUAN Zhen<sup>1</sup>, YAO Sen<sup>2,3</sup>, ZHANG Lianfeng<sup>1,2,\*</sup>, CHANG Baoyan<sup>4</sup>

(1. Shenzhen Water Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518031, China;

2. Laboratory of Ecology and Environmental Protection, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China;

3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

4. Wuxi Huazhaohong Photoelectric Technology Co., Ltd., Wuxi 214112, China)

**Abstract** 185 nm VUV is an advanced oxidation technology with strong oxidation capacity, which can effectively decompose trace organic matter in water. This paper conducted experimental research on the removal of trace organic substances in water using the oxidizing capability of 185 nm VUV emitted by low-pressure mercury lamps. By designing a single-lamp water purifier and a four-lamp parallel enhanced water purifier, this paper demonstrated the potential of 185 nm VUV in removing contaminants such as antibiotics. The experimental results showed that the use of the large quartz sleeves significantly improved the effectiveness of the water purifier. Additionally, this paper investigated the influence of flow rates, antibiotic concentrations, and the number of VUV lamps on the removal efficiency of the water purifier, as well as the relationship among flow rate variation, mixing disturbance, and removal rate. Finally, the disinfection efficacy of the enhanced water purifier was verified through disinfection experiments. This study provides an efficient solution for household water purification and contributes to the empirical and exploratory application of VUV technology in the field of water treatment.

**Keywords** vacuum ultraviolet water purifier trace organic substance antibiotics disinfection advanced treatment

[收稿日期] 2023-07-06

[基金项目] 深圳市环境科研课题(KKY1507); 深圳市科技计划项目(JCYJ20180306170551939); 无锡华兆泓光电科技有限公司研发基金(HZHYF2020-3)

[作者简介] 黄苑强(1986—), 男, 工程师, 主要从事水质净化技术的研发工作, E-mail: 715537948@qq.com。

[通信作者] 张连峰(1963—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事紫外线在净化环境方面的应用工作, E-mail: tyou6@hotmail.com。

虽然自来水已经符合国家饮用水标准,但微量的有机污染物(如残留药物)仍然存在于水中。尽管长期饮用含有这些微量有机物的水对健康是否有潜在风险尚无定论,但随着检测技术的不断提升和人们对高品质生活的需求,这些微量有机物的存在引起了越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>。基于 185 nm 紫外线的水处理技术是一种具有强大氧化能力的高级氧化技术<sup>[4-5]</sup>,能够有效地分解水中微量有机物<sup>[3,6-13]</sup>,例如残留药物。其不投加化学药剂及高能量的氧化能力等特性使其成为理想的水质净化技术之一。

低压汞灯的原理是低压汞蒸汽在电场的作用下会发出 254 nm 和 185 nm 两种波长的紫外线,比例是 100 : 8<sup>[4]</sup>。185 nm 紫外线很容易和空气中的氧气反应,产生臭氧而影响消毒场所的环境。因此,通常有两种低压汞灯,一种是一般消毒用低压汞灯,利用的是 254 nm 紫外线的消毒效果,并在灯管上涂敷涂层阻止 185 nm 紫外线的射出,这类低压汞灯俗称“无臭氧灯”。另一种利用的是 185 nm 紫外线的氧化,其紫外线灯管采用具有良好透过率的材质,可最大限度释放 185 nm 紫外线,俗称“有臭氧灯”。185 nm 紫外线具有很强的氧化能力,是一种高级氧化技术,可无差别地对周围的物质进行氧化,不但可以分解有机物,还可对细菌和微生物的细胞壁、细胞膜进

行破坏而具有消毒效果。185 nm 紫外线在真空紫外线的范围(100 ~ 200 nm)内,因此,通俗地称为“真空紫外线”。

为了满足家庭的高效水质净化需求,本文采用低压汞灯发出的 185 nm 紫外线,研发了一种小型深度水质净化器。该净化器结构紧凑,利用真空紫外线技术,能够高效地去除自来水中的残留药物。通过在净水器中设置适宜的石英管和紫外线灯,水中的残留药物得到了有效降解和去除,并且具有很好的消毒能力。通过试验研究,验证了小型真空紫外线深度水质净化器的可行性和有效性,为家庭提供更安全、更清洁的饮用水。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试剂与仪器

化学试剂均为分析纯,使用前未进行任何预处理。仪器为分光光度计(50 Conc, GE/Varian)。

### 1.2 分析方法

抗生素浓度的分析是采用紫外分光光度法。首先通过扫描,获知各抗生素的特征波长。然后配制各抗生素标准溶液,以此特征波长下的吸光度制作标准曲线。利用这些标准曲线,即可测量分析抗生素浓度。各抗生素的标准曲线和测量范围如表 1 所示<sup>[12]</sup>。

表 1 各抗生素和亚甲基蓝的特征吸收波长及测得的标准曲线相关系数

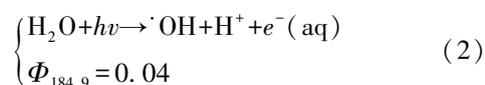
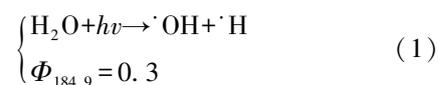
Tab. 1 Characteristic Absorption Wavelengths and Measured Calibration Coefficients of Antibiotics and Methylene Blue

项目	特征吸收波长/nm	测定质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	测得吸光度范围(1 cm 光程)	R <sup>2</sup>
四环素	267	0.2~10	0.014 7~0.306 4	0.999 2
土霉素	268	0.2~9	0.007 9~0.251 9	0.999 7
阿莫西林	272	0.2~9	0.003 5~0.028 2	0.996 7
替硝唑	317	1~9	0.035 7~0.301 7	0.999 6
氯霉素	278	1~9	0.029 6~0.241 6	0.999 1
亚甲基蓝	650	0.2~3	0.034 6~0.486 9	0.999 1

### 1.3 试验装置

在应用 185 nm 紫外线作为高级氧化技术时,主要难点是 185 nm 紫外线在水中的穿透率很低。185 nm 真空紫外线在水中的吸收系数为 1.80 cm<sup>-1</sup><sup>[14]</sup>(254 nm 紫外线吸收系数为 0.022 3 cm<sup>-1</sup>,相当于 1.0 cm 光程的透光率为 99.5%),根据 Lambert-Beer 定律,可计算在水中的衰减(图 1)。可知,185 nm 光子无法触及距离光源 10 mm 以外的区域。即在 185 nm 真空紫外线净水器中,被处理水体必须进入

灯周围 10 mm 以内。除紫外线自身衰减外,水体的混合也是一个影响因素。185 nm 紫外线可以在水中产生自由基,如式(1)~式(2)<sup>[15]</sup>,自由基和 185 nm 光子共同氧化周围的有机物。



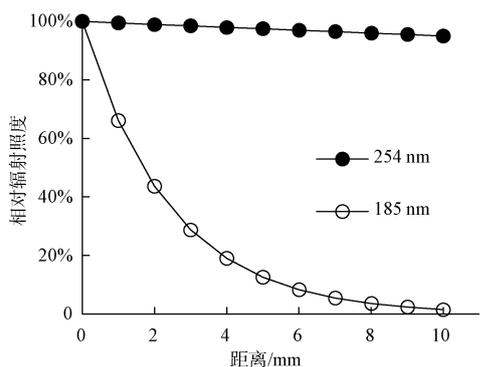
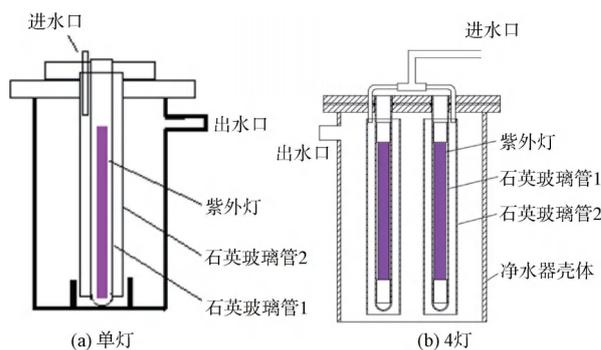


图1 真空紫外线在水中随距离的衰减  
Fig. 1 Reduction of Vacuum Ultraviolet with the Distance in Water

其中： $\Phi_{184.9}$ ——量子产率。

一方面,自由基自身可以移动,另一方面,水体内部的自身混合可以导致水体轮流进入近灯处。254 nm 紫外线的穿透距离很远,因此,净水器的内径小有利于 185 nm,大有利于 254 nm。为了充分发挥双波长紫外线的各自优势,设计了大内径的净水器,但在近灯处设置了 254 nm 能有效透过的石英管(图 2)。设计制作了两套试验装置:单灯净水器和 4 灯净水器。前者主要是针对大石英套管对去除效果的初步评估,后者是接近实际应用的设计。单灯净水器的结构如图 2(a) 所示。在内径为 100 mm、高为 360 mm 的圆形容器的中心设置 185 nm 紫外线高透光度的石英管 1(内径为 22 mm,外径为 25 mm,高为 390 mm)。在石英管内设置 185 nm 紫外线灯(20 W,ZW20D15Y-Z287,柯维,佛山)。在外径为 25 mm 的石英管外再设置一个内径为 45 mm、外径为 48 mm 的石英管 2(文中称为大石英套管),此石英管不接触底部,水可从下部流出。进水直接从上部进入此石英管内。水用蠕动泵(BT-600EA,杰恒)泵入,出水口高于水底 280 mm 处,装置的有效容积(水体体积)为 2.06 L。由于 185 nm 紫外线在水中的穿透率很低,大石英套管的作用是限制水体流过高于 185 nm 紫外线的区域,然后再次流过紫外线灯大套管的周围。再次流过是为了充分利用 254 nm 紫外线,其在水中的穿透率很高。4 灯净水器结构的结构如图 2(b) 所示。在一个内径为 216 mm、高度为 280 mm 的容器内设置了 4 套单灯净水器的灯和石英管。通过蠕动泵(BT-600EA,杰恒),水从上部进入,在高度为 245 mm 处流出。该净水器的有效容积为 8.5 L。



注:4 灯在容器内均匀对称排列,图 2(b) 以两灯为例。

图 2 真空紫外线净水器

Fig. 2 Vacuum Ultraviolet Water Purifier

## 2 结果与讨论

### 2.1 大石英套管作用

用单灯净水器进行了降解 0.6 mg/L 亚甲基蓝的试验,结果如图 3 所示。试验分别对比了有、无大石英套管的两种情况下,单灯净水器对亚甲基蓝的去除效果。结果显示,在有、无大石英套管的两种情况下,单灯净水器对亚甲基蓝的去除效果。结果显示,在有、无大石英套管的两种情况下,单灯净水器的去除效率明显提高。具体而言,经过单灯净水器处理后,出水中亚甲基蓝的去除率分别为 55%(有)和 14%(无),对比试验明确展示了大石英套管在净水过程中的重要作用。该套管的设置保证了水体流过高于 185 nm 紫外线的区域,使得 185 nm 紫外线能够更充分地照射水体,并提高了去除有机物的效果。这一试验结果充分验证了大石英套管在单灯净水器中的关键作用。通过增加大石英套管,净水器能够更有效地利用 185 nm 真空紫外线,实现对有机物的高效去除。这为深度水质净化技术的研发和应用提供了有力的试验支持,并证明了大石英套管在净水器性能提升方面的重要性。

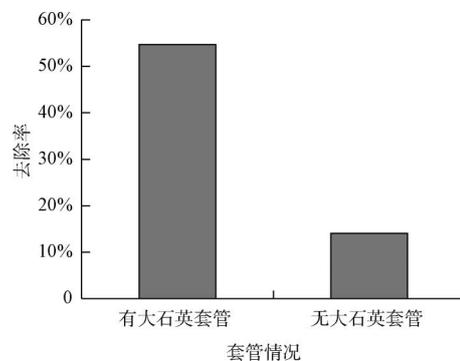


图 3 大石英套管有、无的对比试验结果

Fig. 3 Comparison of Experimental Results between the Cases of Presence and Absence of Large Quartz Sleeve

## 2.2 抗生素的去除

应用4灯净水器,进行了一系列的抗生素降解试验。首先,使用自来水配制了初始质量浓度均为0.2 mg/L的各抗生素溶液。然后,利用杰恒蠕动泵在200 mL/min流量下进行试验。试验过程中,在进水口以及出水口取样,并测定样品溶液的吸光度。试验结果如图4所示。净水器对抗生素显示了去除能力(46.4%~93.4%),但抗生素降解的难易程度是由其分子结构决定的,对于不同的抗生素,去除效果有所不同。图5是进行了降解试验的各抗生素的分子结构。替硝唑的分子结构内有包含氮原子的环形构造,环内的碳和氮原子的原子轨道处于 $sp^2$ 杂化状态,杂化轨道形成 $\delta$ 键,没有参与杂化的p轨道在与 $\delta$ 键垂直的方向形成一个环形 $\pi$ 键,环形结构相对稳定。但是,替硝唑的分子结构内存在连接到环上的不稳定长链,因此,表现出了高去除率。同理,芳香环和长链组成的阿莫西林也表现出了高去除率。从分子结构上分析,氯霉素的高去除率属于例外。推测和两个氯原子的强电负性和氧、氮原子的分布相关,导致云均匀,使得长链结构稳定。电子四环素拥有多环,各环 $\delta$ 键共轭,是比较稳定

(难分解)的分子结构。土霉素虽然也有四个环,但中间的两个环并没有构成 $\delta$ 键共轭,因此并不稳定,表现出了较高的去除率。综上,图4中去除率显示的抗生素易降解性顺序和分子结构的分析基本吻合。需要指出,图4中的“去除率”是指化学结构发生变化,并不是被彻底氧化成了 $CO_2$ (总有机碳的减少<sup>[12]</sup>)。

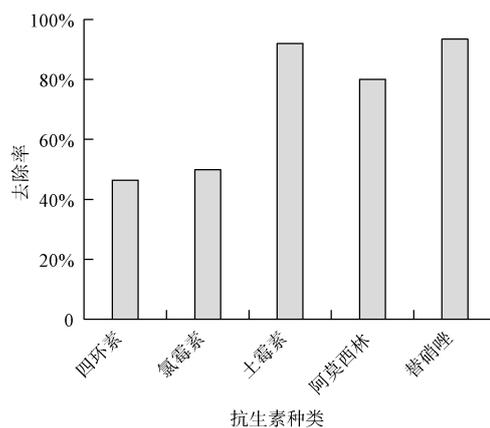


图4 加强型净水器的抗生素去除率

Fig. 4 Removal Rates of Various Antibiotics in Enhanced Water Purifier

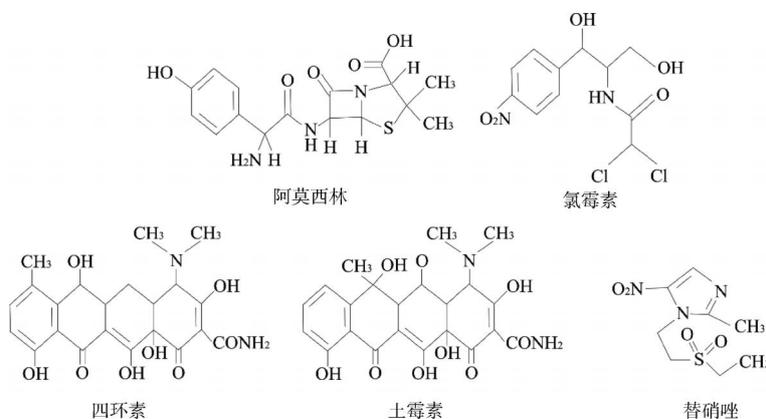


图5 5种抗生素分子结构

Fig. 5 Molecular Structure of Five Kinds of Antibiotics

## 2.3 灯数量与去除效果

应用4灯净水器,以四环素为去除目标,研究了点亮不同数量的灯的去除效率。使用自来水配制了质量浓度为0.5 mg/L的四环素溶液,并将进水流量设定为200 mL/min。分别开启了1、2、3、4个185 nm紫外灯,测量进出水的四环素浓度。试验结果如图6所示,四环素的去除效率与灯数量之间近乎呈直线关系。说明由于大套管的存在,各个灯几乎可

以视为独立的净水器,其去除效果相互独立。这一发现对于设计和优化多灯净水器具有重要意义。可以定量预测增加紫外灯数量后,能够提高的去除效率。

## 2.4 初始浓度的影响

为了更全面地评估净水器对抗生素的去除效果,选择了4种抗生素,并在进水流量恒定、4灯净水器内所有紫外线灯都点亮的条件下进行了一系列

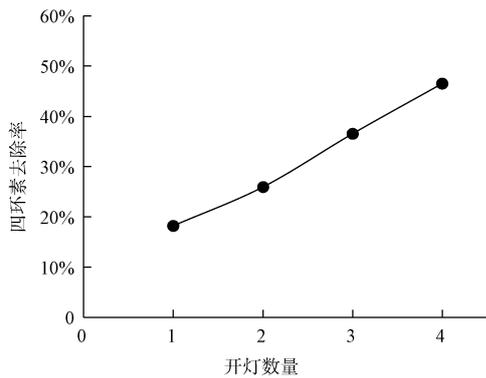


图6 不同开灯情况下净水器对四环素的去除率

Fig. 6 Removal Rates of Water Purifier for Tetracycline under Different Amount of Lamps

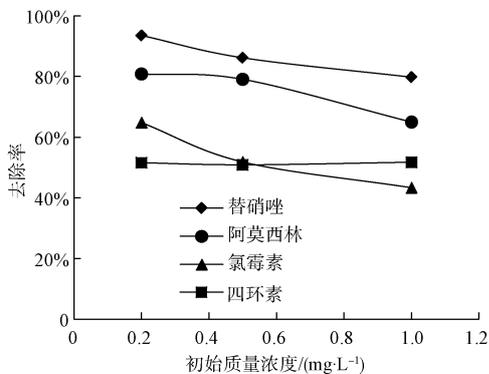


图7 加强型净水器对各抗生素在不同初始浓度下的去除率

Fig. 7 Removal Rates of Each Antibiotic in Different Initial Concentration by Enhanced Water Purifier

的试验。试验结果如图7所示,在不同初始浓度抗生素的处理过程中,去除效果与抗生素浓度呈负相关关系,即浓度越低,去除率越高。这与以前报告的数学分析相吻合<sup>[12]</sup>,这进一步验证了185 nm紫外线技术在低浓度污染物处理中的适用性。这一结果增加了本研究的试验数据的工业意义:以mg/L水平的质量浓度进行的试验取得的去除效率远低于更低初始质量浓度( $\mu\text{g/L}$ 或 $\text{ng/L}$ )的去除效率。而家庭净水器的设计目标是针对极低浓度的抗生素等微量污染物。

### 2.5 流量的影响

流量和水力停留时间成反比,但不同流量下的去除率的变化与流量并非呈直线关系,4灯净水器的试验结果如图8所示。这是因为流量的变化不仅会改变水力停留时间,还会对水体内部的混合扰动产生影响。较大的流速会减少水力停留时间,但对混合扰动起到正面作用。因此,当流量增大时,由于

混合扰动的作用增强,去除率的减弱并非按与流量的反比关系快速下降。这表明,流量的调控在净水器的实际应用中具有重要意义。通过适当控制流量,可以在保证辐射剂量的合理范围内,兼顾水力停留时间和混合扰动效果,以达到最佳的去除效果。因此,在设计真空紫外线净水器时,水体混合是一个重要因素。如果只考虑185 nm光子的传播(图1),设计趋于保守。

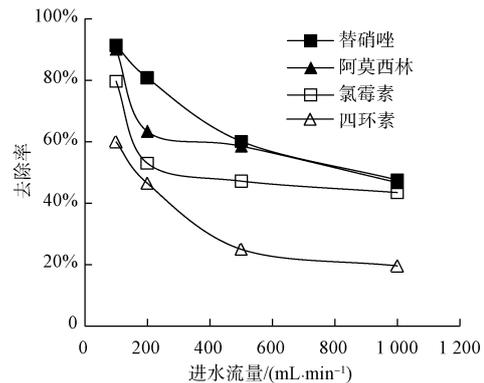


图8 流量对各抗生素去除率的影响

Fig. 8 Effect of Flow Rates on Removal Rates of Antibiotics

### 2.6 消毒

为了考察真空紫外线净水器的消毒效果,在进水中添加细菌(菌种取自人工养鱼缸)。然后,测量进出水的细菌浓度。共进行了两种流量的试验,425 mL/min和850 mL/min。初始时,进水中细菌菌落总数为8000个/L。经过净水器的处理,检测出水样品并进行了菌落总数的测定。无论是425 mL/min还是850 mL/min的流量条件下,出水样品中均未检测到细菌的存在。这说明加强型净水器在高强度紫外线辐射的作用下,有效地实现了对细菌的消毒。这些试验结果进一步验证了加强型净水器的高效性和可靠性。其在水处理过程中能够有效地杀灭细菌,确保出水的安全和卫生。这为家庭用户提供了一个可靠的水质净化解决方案。

### 3 讨论与结论

本研究利用真空紫外线技术实现了净水器高效的水质净化,得出以下结论。

(1) 185 nm真空紫外线净水装置能够有效地去除水中残留药物。残留药物的分子结构决定自身的不稳定性(可降解性)。试验得到的去除率在46.4%~93.4%,且试验数据显示的易降解性顺序和分子结构的分析基本吻合。

(2)大石英套管的引入明显提高了净水器的去除效率。亚甲基蓝试验显示,同等试验条件下,无、有大石英管,去除率从14%增加到了55%。

(3)去除效率与浓度的关系是负相关,浓度越低,去除率越高。因此,185 nm 紫外线技术适用于处理家庭自来水中极低浓度的抗生素等污染物。

(4)净水器的去除效率和点灯的数量成正比。这揭示了净水器的设计可以成正比放大或缩小规模。4灯净水器在去除抗生素方面表现出很高的效率,证明了多灯并联的净水器设计的可行性。

综上,本研究的小型深度水质净化器利用真空紫外线技术在家庭水处理中具有良好的应用效果。它能够高效去除水中微量有机物、抗生素和细菌等污染物,提供高品质的饮用水。然而,仍有一些问题需要进一步研究和改进,如流量对去除效率的影响、长期使用的稳定性等。

### 参考文献

- [ 1 ] 王德东,周金华,钟巍,等. 两台常用家庭净水器净水功能比较[J]. 医学动物防制, 2019, 35(3): 283-286.  
WANG D D, ZHOU J H, ZHONG Y, et al. Comparison of water purification functions of two common household water purifiers [J]. Journal of Medical Pest Control, 2019, 35(3): 283-286.
- [ 2 ] 谢田,谭燕,白付春,等. 基于居民饮用水消费习惯及支付意愿调查的末端净水市场分析[J]. 净水技术, 2020, 39(9): 163-168.  
XIE T, TAN Y, BAI F C, et al. Analysis of terminal purified water market based on survey of drinking water consumption custom and payment willingness of the residents [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(9): 163-168.
- [ 3 ] ZHANG Y L, WANG W L, LEE M Y, et al. Promotive effects of vacuum-UV/UV (185/254 nm) light on elimination of recalcitrant trace organic contaminants by UV-AOPs during wastewater treatment and reclamation: A review [J]. Science of the Total Environment, 2022, 818: 151776. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151776.
- [ 4 ] MASSCHELEIN W J. Ultraviolet light in water and wastewater sanitation[M]. London: Lewis Publishers, 2002.
- [ 5 ] OPPENLÄNDER T. Photochemical purification of water and air [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- [ 6 ] DUCA C, IMBERDORF G, MOHSENI M. Effects of inorganics on the degradation of micropollutants with vacuum UV (VUV) advanced oxidation [J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2017, 52(6): 524-532.
- [ 7 ] OUYANG W Y, WANG W L, ZHANG Y L, et al. VUV/UV oxidation performance for the elimination of recalcitrant aldehydes in water and its variation along the light-path [J]. Water Research, 2023, 228(1): 119390. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119390.
- [ 8 ] WU Y, DENG L, BU L, et al. Degradation of diethyl phthalate (DEP) by vacuum ultraviolet process: Influencing factors, oxidation products, and toxicity assessment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(6): 5435-5444.
- [ 9 ] 陈钰,姚森,黄苑强,等. 真空紫外线应用于水消毒和净化领域的理论基础和潜力[J]. 照明工程学报, 2023, 34(3): 99-105.  
CHEN Y, YAO S, HUANG Y Q, et al. Theoretical basis and potential application of 185 nm vacuum ultraviolet in water disinfection and purification [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2023, 34(3): 99-105.
- [ 10 ] 吴琼,万秒,李倩,等. 真空紫外线(185 nm)辐射测量方法与紫外灯臭氧产出特性研究[J]. 中国照明电器, 2021(8): 1-10, 20.  
WU Q, WAN M, LI Q, et al. Study on measurement method of vacuum ultraviolet (185 nm) radiation and ozone production characteristics of ultraviolet lamp [J]. China Light and Lighting, 2021(8): 1-10, 20.
- [ 11 ] 邵婉婷,王文龙,杜焯,等. 双波长紫外线(VUV/UV)对有机污染物强化去除特性与原理[J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1397-1406.  
SHAO W T, WANG W L, DU Y, et al. Enhancement and synergism of VUV/UV irradiation on elimination of organic pollutants [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(6): 1397-1406.
- [ 12 ] 陈钰,张连峰,秦雄,等. 185 nm 真空紫外线照射下水中抗生素的光解[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 45-49.  
CHEN Y, ZHANG L F, QIN X, et al. Photolytic decomposition of antibiotics in water under 185 nm vacuum ultraviolet [J]. China Water and Wastewater, 2019, 35(21): 45-49.
- [ 13 ] 吴铮笛,温栋,李梦凯,等. 真空紫外线(185 nm)在水处理中的研究及应用进展[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 43-48.  
WU Z D, WEN D, LI M K, et al. Research and application progress of vacuum ultraviolet (185 nm) in water treatment [J]. China Water and Wastewater, 2017, 33(22): 43-48.
- [ 14 ] WEEK J L, MEABURN G M, GORDON S. Absorption coefficients of liquid water and aqueous solutions in the far ultraviolet [J]. Radiation Research, 1963, 19(3): 559-567.
- [ 15 ] THOMSON J, RODDICK F A, DRIKAS M. Vacuum ultraviolet irradiation for natural organic matter removal [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, 2004, 53(4): 193-206.