

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.18.003

## “双碳”目标下给水厂紫外线消毒设备运行管理模式分析

刘超然<sup>1</sup>, 翟元鑫<sup>1</sup>, 薛雅内<sup>2</sup>, 孙文俊<sup>2</sup>, 皮浩然<sup>1</sup>, 刘文硕<sup>1</sup>

(1. 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100031; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 近年来,二氧化碳排放对环境和人类生活产生的影响越来越显著。目前,从中央到地方都在加紧编制碳达峰行动方案。通过对北京市给水厂紫外线消毒设备的运行数据分析,确认了电力消耗、设备维护维修材料投入及材料运输过程是设备运行环节的碳排放源,且电力消耗在其中占绝大部分。对此,可通过对紫外线消毒设备的运行优化,有效降低碳排放量。此外,开展了套管结垢系数、灯管老化系数试验,并分析了材料投入和运输环节的碳排放情况。分析发现,随着运行时间的增加,灯管的老化系数衰减情况比较明显;而且高负荷运行会导致碳排放量增加,此时应结合设备购置成本等因素,通过更换灯管等方式实现节能减排。

**关键词:** 碳排放; 给水厂; 紫外线消毒设备

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)18-0015-07

## Analysis of Operation Management Mode of Ultraviolet Disinfection Equipment in Waterworks under the Goals of Carbon Peak and Carbon Neutrality

LIU Chao-ran<sup>1</sup>, ZHAI Yuan-xin<sup>1</sup>, XUE Ya-nei<sup>2</sup>, SUN Wen-jun<sup>2</sup>, PI Hao-ran<sup>1</sup>,  
LIU Wen-shuo<sup>1</sup>

(1. Beijing Water Group Co. Ltd., Beijing 100031, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In recent years, the growing impact of carbon dioxide emissions on the environment and human life has become increasingly evident. At present, the central and local governments are intensifying efforts to develop carbon peak action plans. It is confirmed that the power consumption, equipment maintenance and repair material input and material transportation process are the carbon emission sources of equipment operation, with electricity consumption representing the majority. Analyzing operational data from ultraviolet (UV) disinfection equipment at Beijing Waterworks confirms this. Optimizing the operation of UV disinfection equipment offers an effective means to reduce carbon emissions. Furthermore, this study was conducted to investigate the scaling coefficient, lamp aging coefficient, following an analysis of carbon emissions related to material input and transportation. It was observed that the aging coefficient of lamp attenuation becomes more pronounced with the increase of operating time. Moreover, operating at high loads correlates with higher carbon emissions. Therefore, decisions regarding lamp replacement should consider factors such as equipment purchase costs, prioritizing energy efficiency and consumption reduction under current circumstances.

通信作者: 孙文俊 E-mail: wsun@tsinghua.edu.cn

**Key words:** carbon emissions; waterworks; UV disinfection equipment

紫外线消毒工艺具有消毒迅速、无化学试剂添加、设备占地少、操作管理安全方便等优点,且可以高效灭活水中大多数致病性原生动物、细菌、病毒和囊性微生物<sup>[1]</sup>,尤其对耐氯的贾第鞭毛虫和隐孢子虫有很好的灭活效果<sup>[2-5]</sup>。近15年来,我国多个城市的新建地表水给水厂相继在清水池进水前加设了紫外线消毒工艺。为此,针对给水厂紫外线消毒设备运行管理过程中可能产生二氧化碳的几种因素,分析讨论不同工况下运行所产生的碳排放量及维护维修对碳排放的影响,并提出碳减排方案,以期给水厂紫外线消毒设备的使用提供减排降耗的低碳运行管理策略。

## 1 核算方法

《工业企业温室气体排放核算和报告通则》(GB/T 32150—2015)规定,温室气体排放核算边界应包括燃料燃烧排放、过程排放、购入的电力热力产生的排放、输出的电力热力排放等。《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020—93)规定,生活饮用水水源水质应高于二级标准,水源水中氨氮、硝酸盐等可能在处理环节产生温室气体的物质较少,直接排放的二氧化碳可忽略不计。给水厂运行维护过程中排放的主要温室气体源于电力热力消耗、运输、材料投入和服务、资产和副产品处置等环节<sup>[6]</sup>,根据美国某给水厂碳排放研究,因电力消耗导致的碳排放量占总体碳排放量的97%<sup>[7]</sup>。考虑到紫外线消毒设备使用周期长达20年,因此主要分析紫外线消毒设备在投入运行后的电力消耗、设备维护维修材料投入及材料运输过程所产生的碳排放。紫外线消毒设备碳排放研究范围如图1所示。

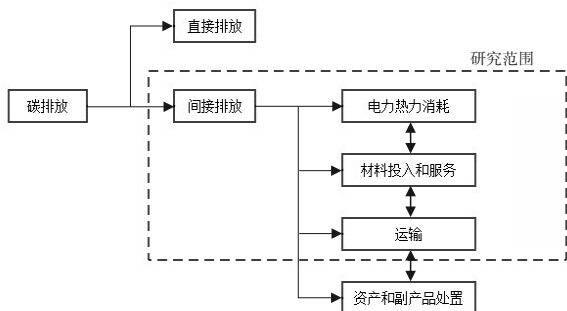


图1 紫外线消毒设备碳排放研究范围

Fig.1 Scope of research on carbon emissions of ultraviolet disinfection equipment

### 1.1 电力消耗产生的碳排放

电力消耗是紫外线消毒设备正常运行时最主要的碳排放源,设备运行时电力消耗导致的碳排放强度核算公式<sup>[6]</sup>及全年碳排放强度计算公式<sup>[8]</sup>如下:

$$CES_d = (E_d \times EF_d) / Q \quad (1)$$

$$TCE_d = Q \times PY_d \times EF_d \quad (2)$$

式中:  $CES_d$  为运行维护消耗购入电力产生的碳排放强度,  $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$ ;  $E_d$  为评价年内运行总耗电量,  $\text{kW} \cdot \text{h/a}$ ;  $Q$  为评价年内总处理水量,  $\text{m}^3/\text{a}$ ;  $EF_d$  为该地区电力排放因子,  $\text{kgCO}_2\text{-eq}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $TCE_d$  为全年碳排放总量,  $\text{kgCO}_2\text{-eq/a}$ ;  $PY_d$  为处理单方水需要消耗的电能,  $\text{kW} \cdot \text{h/m}^3$ 。

### 1.2 材料投入产生的碳排放

紫外线消毒设备在日常运行中需定期对已经达到使用寿命终点的灯管和套管进行更换,涉及的材料主要包括石英套管、紫外灯管。材料投入导致的碳排放强度核算公式<sup>[6]</sup>如下:

$$CES_{cl} = \sum_{i=1}^n (M_{cl,i} \times EF_{cl,i}) \quad (3)$$

式中:  $CES_{cl}$  为消耗材料产生的碳排放量,  $\text{kgCO}_2\text{-eq/a}$ ;  $M_{cl,i}$  为第  $i$  种材料使用量,  $\text{t/a}$  或  $\text{m}^3/\text{a}$ ;  $EF_{cl,i}$  为第  $i$  种材料的排放因子,  $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$  或  $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$ ;  $n$  为总计使用  $n$  种材料。

### 1.3 运输产生的碳排放

紫外线消毒设备的运输过程间接排放的二氧化碳主要是由维护维修所需的材料运送至水厂所产生,运输产生的碳排放计算公式<sup>[6]</sup>如下:

$$CES_{ys} = \sum_{m=1}^k \sum_{j=1}^l (M_{ys,m,j} \times L_{ys,m,j} \times EF_{ys,j}) \quad (4)$$

式中:  $CES_{ys}$  为材料运输环节所产生的碳排放量,  $\text{kgCO}_2\text{-eq/a}$ ;  $M_{ys,m,j}$  为第  $m$  次运输中,使用第  $j$  种方式的运输材料总量,  $\text{t/a}$ ;  $L_{ys,m,j}$  为第  $m$  次运输中,使用第  $j$  种方式的运输距离,  $\text{km}$ ;  $EF_{ys,j}$  为第  $j$  种运输方式排放因子,  $\text{kgCO}_2\text{-eq}/(\text{t} \cdot \text{km})$ ;  $k$  为评价年内总计进行  $k$  次运输;  $l$  为第  $m$  次运输中,总计采用了  $l$  种运输方式。

## 2 紫外线消毒设备碳排放核算

以北京市某水厂(A水厂)紫外线消毒设备作为

主要研究对象,与其他3座水厂(B、C、D水厂)同品牌同型号设备进行对比试验研究。A水厂紫外线消毒设备于2015年安装完毕并投入运行。其中,2015年4月—2017年12月设备连续运行,2018年后改为根据水质情况间断运行。除个别套管和灯管因故障必须更换外,A水厂仍采用初始安装的灯管和套管运行。截至2022年7月,A水厂套管使用时间为70 000 h,灯管运行时长约34 000 h。

## 2.1 电力消耗

设备电力消耗主要与运行流量和紫外线穿透率(Ultraviolet transmittance, UVT)有关。在可调节范围内,设备运行功率与流量成正比,与UVT成反比。根据相同型号紫外线设备运行数据推导得出的生物验证剂量(Reduction Equivalent Dose, RED)公式<sup>[9]</sup>,A水厂紫外线设备RED计算公式如下:

$$RED = 10^{-0.20} \times \left( \lg \frac{1}{T} \right)^{-0.34} \times P^{0.78} \times Q_1^{-0.57} \quad (5)$$

式中: $T$ 为紫外线穿透率,%; $P$ 为紫外线消毒设备的输出功率,mW; $Q_1$ 为处理水量, $m^3/h$ 。

以A水厂处理能力为 $40 \times 10^4 m^3/d$ 、UVT设定为90%为例。在8台设备全部开启的常规运行工况下,电力消耗碳排放参数取值如下:考核年处理水量为 $1.46 \times 10^8 m^3/a$ , $EF_d$ 为 $0.9419 kgCO_2-eq/(kW \cdot h)$ , $PY_d$ 为 $0.011 kW \cdot h/m^3$ 。将各参数值代入式(2),计算可得A水厂紫外线消毒设备运行产生的全年碳排放总量约为 $145.90 tCO_2-eq$ 。

## 2.2 套管更换

石英套管材质属于刚玉,耐用性较好。根据厂家设备说明,石英套管有效寿命保证在10年以上。

### 2.2.1 材料碳排放

以A水厂每次更换全部48根套管为例。材料碳排放参数取值如下: $n$ 为1, $M_{cl,1}$ 为 $0.2 t$ , $EF_{cl,1}$ 为 $1017 kgCO_2-eq/t$ 。将各参数值代入式(3),计算可得每次采购的套管因生产而产生的碳排放量约为 $203.40 kgCO_2-eq/a$ ,即 $0.20 tCO_2-eq/a$ 。

### 2.2.2 运输碳排放

水厂使用的紫外线消毒设备为进口,所有维护维修的材料均需通过海运至天津港口,然后再陆运至水厂。运输碳排放参数取值如下: $k$ 、 $l$ 分别取1和2, $M_{ys,1,1}$ 、 $M_{ys,1,2}$ 均取 $0.2 t$ , $EF_{ys,1}$ 、 $EF_{ys,2}$ 分别为 $0.015$ 、 $0.334 kgCO_2-eq/(t \cdot km)$ , $L_{ys,1,1}$ 、 $L_{ys,1,2}$ 分别为 $23000$ 、 $170 km$ 。将各参数值代入式(4),计算得每次

因套管运输而产生的碳排放量约 $80.36 kgCO_2-eq/a$ ,即 $0.080 tCO_2-eq/a$ 。

## 2.3 灯管更换

### 2.3.1 材料碳排放

因灯管构造材质相对复杂,计算灯管的材料碳排放时按其主要材质(占比>90%)石英管进行估算。以A水厂每次更换全部48根灯管为例。材料碳排放参数取值如下: $n$ 为1, $M_{cl,1}$ 为 $0.2 t$ , $EF_{cl,1}$ 为 $1017 kgCO_2-eq/t$ 。将各参数值代入式(3),计算可得每次采购的灯管因生产而产生的碳排放量约为 $203.40 kgCO_2-eq/a$ ,即 $0.20 tCO_2-eq/a$ 。

### 2.3.2 运输碳排放

运输碳排放参数取值如下: $k$ 为1, $l$ 为2, $M_{ys,1,1}$ 为 $0.2 t$ , $L_{ys,1,1}$ 为 $23000 km$ , $EF_{ys,1}$ 为 $0.015 kgCO_2-eq/(t \cdot km)$ , $M_{ys,1,2}$ 为 $0.2 t$ , $L_{ys,1,2}$ 为 $170 km$ , $EF_{ys,2}$ 为 $0.334 kgCO_2-eq/(t \cdot km)$ 。将各参数值代入式(4),计算可得每次因灯管运输而产生的碳排放量约为 $80.36 kgCO_2-eq/a$ ,即 $0.080 tCO_2-eq/a$ 。

## 3 碳减排措施

### 3.1 运行参数优化

#### 3.1.1 调整单台设备运行流量

根据《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019)规定,当紫外线消毒用于生活饮用水时,在峰值流量和紫外灯运行寿命终点前,紫外线有效剂量不应低于 $40 mJ/cm^2$ 。A水厂在将单台紫外线消毒设备UVT设定为90%、目标剂量为 $40 mJ/cm^2$ 的条件下,通过手动输入设备处理流量,记录了1000~3000  $m^3/h$ 流量范围内设备的运行功率和实际的紫外线投加剂量(见图2)。在流量处于1000~1900  $m^3/h$ 区间内,设备运行功率始终为设备最低运行功率(21 kW),紫外线的实际投加剂量高于目标剂量。而且流量越低,紫外线实际投加剂量越高,吨水耗电量越高,碳排放强度越高,此时设备处于高能耗运行状态。当流量处于1900~3000  $m^3/h$ 区间时,设备运行功率高于最低功率,此时设备可通过自动调整紫外线设备功率使实际投加剂量略高于目标剂量,在保证消毒效果的同时尽可能减少电量消耗,此区间内设备运行碳排放强度趋向稳定。

在生产运行过程中,当运行负荷较低时,可通过减少总运行设备数量、提升单台设备处理水量的方式减少碳排放量。以A水厂为例,当处理水量为



$20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,设备运行数量对碳排放的影响如图3所示。在UVT设定为90%的情况下,通过调整设备的开启数量,在保证运行安全的条件下使每台投入运行的设备的处理流量达到最大,此时紫外线消毒设备全年碳排放总量可由138.62 t  $\text{CO}_2\text{-eq}$ 减少至72.53 t  $\text{CO}_2\text{-eq}$ ,降低了47.68%。

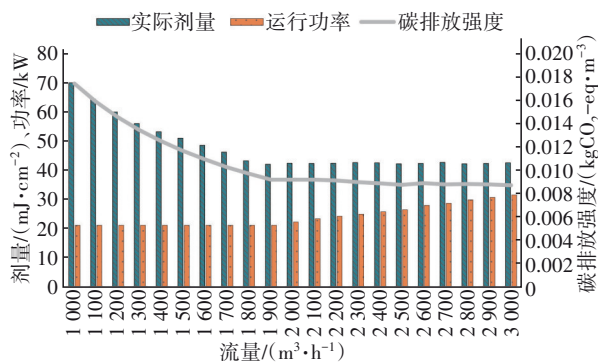


图2 不同流量下紫外线实际剂量-运行功率-碳排放强度对比

Fig.2 Comparison of actual dose of UV-power-carbon emission intensity at different flow rates

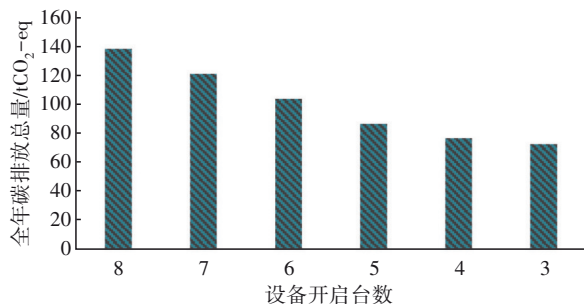


图3 设备运行数量对碳排放的影响

Fig.3 Impact of the number of equipment operating on carbon emissions

### 3.1.2 调整UVT设定值

紫外线的穿透能力不强,UVT的大小与水的色度、浊度、肉眼可见物及其他杂质有关。UVT的计算公式如下:

$$\text{UVT} = \frac{I_2}{I_1} \times 100 \quad (6)$$

式中: $I_1$ 为穿过测试水样后的紫外线强度, $\text{mW}/\text{cm}^2$ ;  $I_2$ 为穿过去离子水后的紫外线强度, $\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

对北京市4座地表水水厂混凝沉淀工艺出水、紫外线进水的浊度及UVT进行检测发现,4座水厂紫外线进水浊度均保持在0.13 NTU以下,UVT均高于96%,高于设计条件中紫外线进水UVT不低于

90%的要求。通过对比不同浊度下UVT读数变化趋势(见图4)可发现,浊度和UVT成反比,水样浊度越高,UVT值越低。

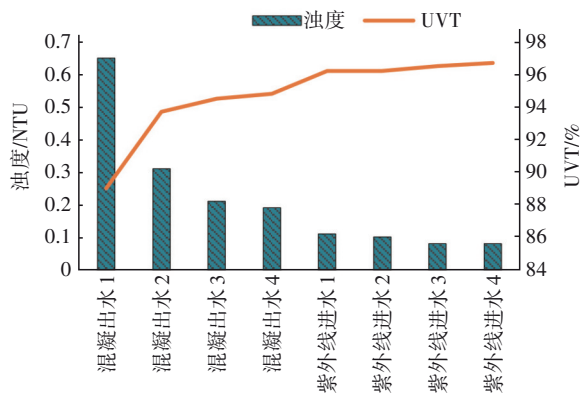


图4 不同浊度下UVT的变化

Fig.4 Variation of UVT under different turbidity

UVT分别设定为90%和95%,不同流量下紫外线消毒设备的运行功率对比如图5所示。当单台设备处理流量 $\leq 1900 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,设备在最低功率下运行,此时提高UVT设定值并不能减少设备运行耗电量。当流量 $> 1900 \text{ m}^3/\text{h}$ 后设备运行功率可进行调整时,可通过提高UVT设定值降低设备运行功率。流量在 $2000 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内,设备的运行功率减少比率从6.67%增加至23.91%,碳排放强度随功率的减小同步减小。由此可见,流量越大,通过提高UVT设定值所产生的碳减排效果越明显。

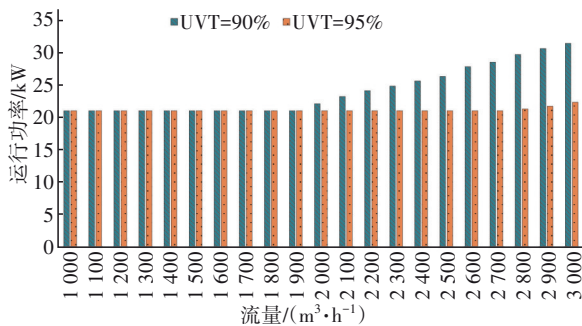


图5 不同流量下紫外线消毒设备的运行功率

Fig.5 Operating power of UV equipment at different flow rates

当紫外线设备未安装UVT自动检测装置时,可将紫外线设备进水浊度作为调整UVT设定值的参考依据之一。当浊度明显升高时,应对紫外进水UVT进行检测并及时降低UVT设定值,以保证紫外线消毒设备的实际剂量达到 $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ,使水体能够充分消毒;当浊度降低时,可适当提高UVT设定值,

从而达到减少电力消耗、降低碳排放量的效果。UVT调整值应根据实际的检测值确定。

3.1.3 综合优化

将A水厂优化前(8台设备全部开启,UVT设定为90%)的碳排放总量设为100%,优化前后不同处理水量下紫外线消毒设备全年产生的碳排放强度变化见图6。

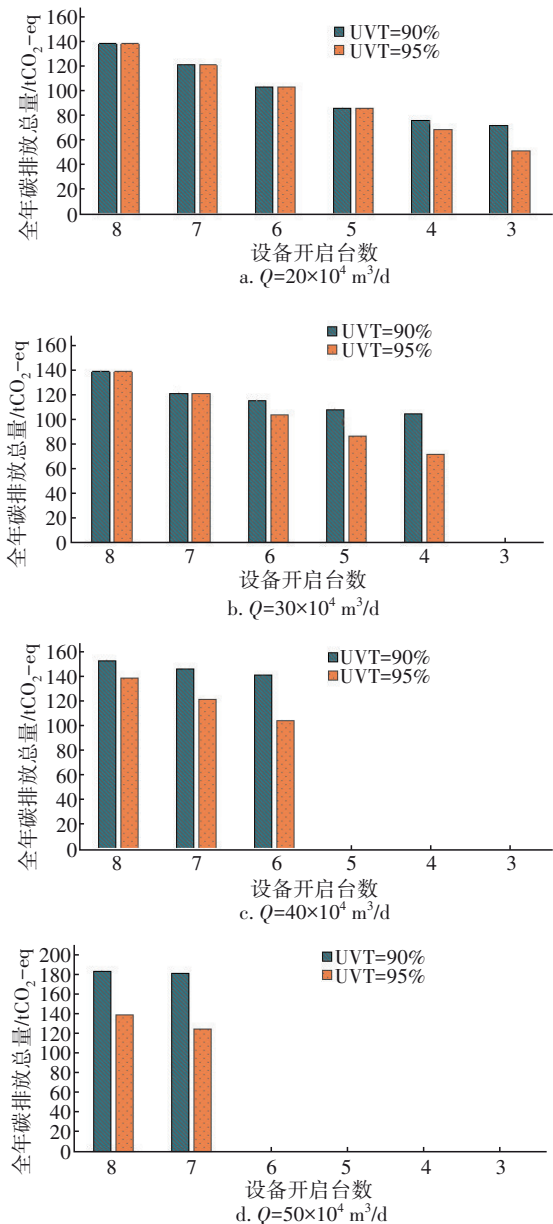


图6 不同运行条件下全年碳排放总量

Fig.6 Total annual carbon emissions under different operating conditions

在处理流量较低时,由图6(a)、(b)可知,8台设备全部开启后已在最低功率下运行,通过调整UVT

值对碳排放量的减少无帮助,此时应在保证供水安全的情况下,通过调整运行设备数量、提高单台设备运行水量的方式降低总电耗。当功率可调后,根据水质情况调整UVT值,可使设备运行状态达到最优水平,碳排放总量达到最小。在处理流量较高时,由图6(c)、(d)可知设备运行功率高于最低功率,设备已经根据水量自动调整了运行功率,从而达到降耗的目的。此时通过调整设备开启数量降低的碳排放量较少,且高流量运行时可调整的设备数量范围较小,故应考虑优先调整UVT来降低能耗,减少全年碳排放总量。通过综合调整设备运行参数,A水厂在处理水量为(20~50)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d的范围内,可将年碳排放总量降低32.33%~62.55%。

3.2 灯管更换

在运行水量、水质、设备UVT设定值等参数基本相同的情况下,对2016年1月—3月及2020年1月—3月A水厂紫外线消毒设备运行功率进行了对比,结果见图7。可知,在处理流量基本相同的情况下,2020年的设备运行功率高于2016年。

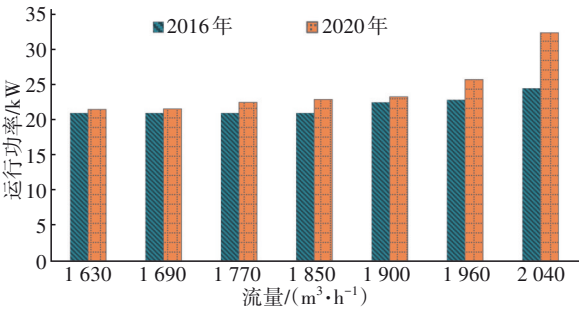


图7 2016年与2020年运行功率对比

Fig.7 Comparison of operating power in 2016 and 2020

为减少设备传感器误差、套管结垢、水质等因素导致的试验结果偏差,将A、B、C、D水厂各一台紫外线消毒设备的6根灯管取出,统一运送至C水厂进行灯管老化系数检测。4座水厂紫外线设备信息见表1。

表1 水厂紫外线设备概况

Tab.1 Overview of ultraviolet equipment for waterworks

水厂	设计规模/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	设备数量/ 台	设备安装 年份	运行时长(截至 2022年5月)/h
A	50	8	2014	33 000
B	50	6	2014	1 300
C	18	3	2019	16 000
D	50	8	2021	100

参考《紫外线水消毒设备 紫外线剂量测试方法》(GB/T 32091—2015),紫外线灯管老化系数计算公式如下:

$$AF = \frac{T_1}{T_2} \times 100 \quad (7)$$

式中:AF为灯管老化系数,%; $T_1$ 为测试灯管紫外线光强; $T_2$ 为新灯管(运行100 h后)紫外线光强。

测试中将D水厂紫外灯管视为新灯管(老化系数为100%),将A、B、C水厂灯管的紫外线光强与D水厂灯管进行对比,结果如图8所示。忽略不同批次的灯管质量对检测结果的影响,A、B、C水厂的紫外灯管均有一定程度的老化,且使用时间越长,老化系数越低,在可调节范围电耗越大。

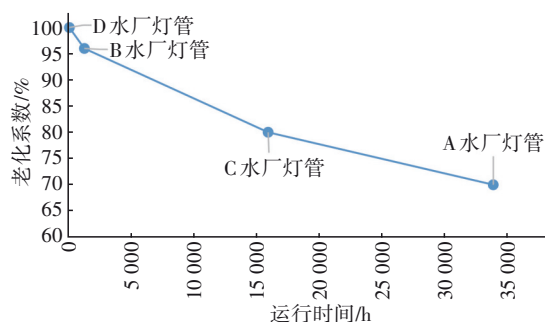


图8 不同运行时间的灯管老化系数

Fig.8 Lamp aging coefficients for different operating times

在不同流量下将A水厂的设备开启数量调整至最优,当UVT分别设定为90%和95%时,老化系数对设备全年碳排放总量的影响见图9。

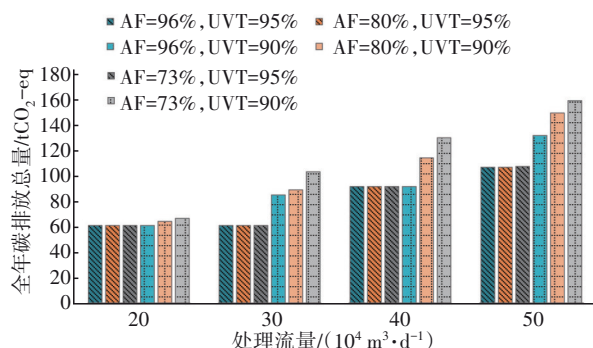


图9 不同流量下老化系数对设备碳排放强度的影响

Fig.9 Effect of aging coefficients on carbon emission intensity of equipment at different flow rates coefficients

当UVT设定为95%、灯管老化系数为73%时,设备运行功率仍保持在最低功率状态运行。此时灯管老化对设备运行的全年碳排放总量无影响,可不进行灯管更换。当UVT设定为90%时,全年碳排

放总量随灯管老化系数的降低而增加,且老化的增加量远大于灯管采购和运输的增加量,单从碳排放角度考虑,则应对灯管进行更换。实际应用时,还应综合考虑灯管采购及运输成本。

### 3.3 套管结垢

对停用超半年的紫外线消毒设备进行套管结垢试验,套管清洁度对功率的影响如图10所示。当单台设备水量设定为2 000 m<sup>3</sup>/h时,未经在线清洗时设备运行功率明显高于经过在线清洗后的设备运行功率,多次在线清洗对设备运行功率影响不大。在取出套管进行人工酸洗后,设备运行功率可进一步降低。

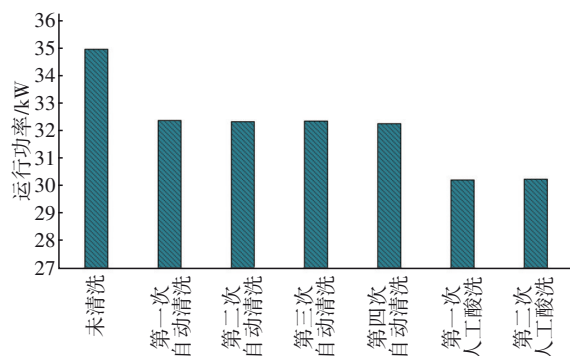


图10 套管清洁度对功率的影响

Fig.10 Effect of sleeve cleanliness on power

为进一步研究套管结垢对UVT的影响,选取全新套管及使用时长为70 000 h的套管进行结垢系数检测,检测结果如表2所示。

表2 不同工况下套管穿透率检测情况

Tab.2 Detection of sleeve penetration rate under different working conditions

套管编号	使用时长/h	套管使用情况	套管结垢系数/%
1	0	进行人工酸洗1次	
2	70 000	设备停机半年后未经过清洗	58.90
4	70 000	设备停机半年后自动化学清洗1次	92.90
3	70 000	设备停机半年后人工酸洗1次	96.20

停机半年的紫外线消毒设备其套管结垢明显,在进行人工酸洗的情况下,套管结垢情况明显有所改善,套管结垢系数约为96.20%,透光率良好,且对设备运行功率影响相对较小,结合套管成本,在未出现破损的情况下可不进行更换。对使用时长相同的设备分别进行自动化学清洗、人工酸洗,比较发现人工酸洗效果明显好于在线自动清洗,在开



启长时间停机的紫外线设备之前,应考虑对套管进行人工酸洗,以减少因套管结垢导致运行功率增大、碳排放增加的情况发生。

#### 4 结语

通过对给水厂紫外线消毒设备碳排放源的分析,在设备运行期间,电力消耗占比超过99%,是设备运行维护中主要的碳排放环节。根据水厂负荷情况,通过优化运行设备台数及UVT参数可使碳排放量降低32.33%~62.55%。水厂低负荷运行时,建议优先调整运行设备台数。水厂高负荷运行时,通过调整UVT参数,减碳效果更为明显。以上操作均应在保证设备运行安全和水质安全的情况下进行。

对紫外线灯管老化系数、套管结垢系数的分析表明,套管在保持清洁的条件下对设备运行的影响较低,设备运行时应考虑增加套管自动清洗装置或定期人工手动清洗,在运行长时间停止使用的紫外线消毒设备前应对套管进行人工化学清洗。在运行功率可调节的范围内,设备运行的碳排放量随着灯管老化系数的降低而增加,通过对灯管进行更换可减少因灯管老化所产生的碳排放增加量。

#### 参考文献:

- [1] 洪觉民. 现代化净水厂技术手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.  
HONG Juemin. Technical Manual of Modern Water Purification Plant [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013(in Chinese).
- [2] 方远航,李嘉妮. 贾第虫和隐孢子虫检测及灭活方法研究现状[J]. 辽宁化工,2017,46(4):399-401.  
FANG Yuanhang, LI Jiani. Research status of detection and inactivation methods of *Giardia* and *Cryptosporidium* [J]. Liaoning Chemical Industry, 2017, 46(4): 399-401 (in Chinese).
- [3] 徐宏平. 单一紫外及紫外协同超声灭活隐孢子虫的研究[D]. 广州:广州大学,2015.  
XU Hongping. Research on Inactivation of *Cryptosporidium* by UV and UV Synergistic US [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015(in Chinese).
- [4] 冉治霖. 水源水中隐孢子虫和贾第虫灭活方式及机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
RAN Zhilin. Research on the Inactivation Methods and Mechanism of *Cryptosporidium* and *Giardia* in Source Water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [5] 孙文俊. 饮用水紫外线消毒生物安全性研究[D]. 北京:清华大学,2010.  
SUN Wenjun. Study on the Biological Safety of Drinking Water Following UV Disinfection [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010(in Chinese).
- [6] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.  
China Urban Water Association. Guidelines for Carbon Accounting and Emission Reduction in the Urban Water Sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022(in Chinese).
- [7] ZIB L, BYRNE D M, MARSTON L T, et al. Operational carbon footprint of the U. S. water and wastewater sector's energy consumption [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128815.
- [8] ZUO Q, ZHANG Z, MA J, et al. Carbon dioxide emission equivalent analysis of water resource behaviors: determination and application of carbon dioxide emission equivalent analysis function table [J]. Water, 2023, 15(3):431.
- [9] 刘超然,张达,侯宇,等. 给水厂紫外线消毒设备运行效果及节能降耗研究[J]. 给水排水,2022,48(7):21-26.  
LIU Chaoran, ZHANG Da, HOU Yu, et al. Study on application effect, energy saving and consumption reduction of ultraviolet disinfection equipment in water plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48 (7):21-26(in Chinese).

作者简介:刘超然(1991-),女,北京人,本科,高级工程师,主要研究方向为现代给水厂运行优化、紫外线消毒、智慧水厂建设等。

E-mail:andrearan@qq.com

收稿日期:2023-02-23

修回日期:2023-09-12

(编辑:丁彩娟)