

饮用水紫外线消毒及细菌暗复活研究

杨 辉,苟德菲,严梦姣

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究浊度、紫外线强度和水力停留时间对紫外线消毒效果及消毒后水体中细菌暗复活的影响. 方法 以广州市西江水为原水,经过混凝、沉淀、过滤后进入紫外消毒器,在不同浊度值、紫外线强度和水力停留时间下,分析紫外线消毒效果及消毒后细菌暗复活. 结果 浊度为0~1.0 NTU、紫外线强度 $>3\,126\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、水力停留时间 $>1\,200\ \text{s}$ 时消毒效果达到100%;当浊度在0~1.0 NTU时,浊度越大,细菌暗复活速率越快;当浊度 $>1.0\ \text{NTU}$ 时,浊度对细菌暗复活影响不明显. 结论 浊度、紫外线强度、水力停留时间对紫外线消毒效果的影响大小依次为:紫外线强度,浊度,水力停留时间;增加紫外强度或水力停留时间能抑制细菌暗复活,而增加浊度会增强细菌暗复活.

关键词 紫外线消毒;暗复活;浊度;紫外线强度;水力停留时间

中图分类号 R187.4 文献标志码 A

Study on Ultraviolet Disinfection of Drinking Water and its Bacterial Dark Resurrection

YANG Hui, GOU Defei, YAN Mengjiao

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The effect of turbidity, ultraviolet intensity and hydraulic retention time on UV disinfection effect and dark resurrection of bacteria was studied in this paper. After coagulation, precipitation and filtration, the water from Xijiang River in Guangzhou was disinfected by ultraviolet through the ultraviolet disinfectant. The effect of UV disinfection and dark resurrection of bacteria after disinfection were analyzed under different turbidity values, UV intensity and hydraulic retention time. The results showed that the disinfection effect reached 100% when turbidity was 0~1.0 NTU, UV intensity $>3\,126\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, hydraulic retention time $>1\,200\ \text{s}$; when the turbidity was 0~1.0 NTU, the greater turbidity was, the faster bacterial dark resurrection rate was; when turbidity $>1.0\ \text{NTU}$, the turbidity had no obvious effect on bacterial dark resurrection. As a result, the influence of turbidity, UV intensity and hydraulic retention time on the UV disinfection effect was follows: UV intensity $>$ turbidity $>$ hydraulic retention time; increasing UV intensity or hydraulic retention time can inhibit

收稿日期:2018-11-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50678041)

作者简介:杨辉(1973—),女,副教授,博士,主要从事水污染控制工程理论与技术、微污染水深度处理方面研究.

the dark resurrection of bacteria,while increasing turbidity will enhance the dark resurrection .
Key words:UV disinfection;dark resurrection;turbidity;UV intensity;hydraulic retention time

100 多年以前,紫外线的杀菌消毒作用就已经被人们发现^[1]. 紫外线消毒主要利用波长为 200 ~ 280 nm 紫外光的杀菌功能,紫外光照射核酸,诱导胸腺嘧啶和胞嘧啶形成嘧啶二聚体,破坏 DNA 分子,阻碍微生物生长或繁殖,也能破坏其他一些生物大分子的结构及功能^[2-4]. 紫外线消毒具有不投加化学药剂,不产生有害物质,安全可靠,并能高效地灭活细菌、病毒和原生动物等优势^[5]. J. L. Clancy 等^[6-7]认为紫外线辐射剂量为 30 J/m² 时,隐孢子虫灭活率可超过 99.9 %. 因紫外消毒不产生消毒副产物的突出优点,欧美很多国家自 90 年代起,推荐紫外消毒技术为给水系统用户末端的首选消毒方法^[8]. 但是,有研究表明,紫外线消毒后,被灭活的细菌存在一定程度的暗复活问题^[9-10],笔者研究不同条件下的紫外消毒效果,分析消毒后细菌暗复活的影响因素,从而提高水中病原微生物的灭活效果,保证饮用水水质安全.

1 试 验

1.1 原水水质

试验以广州市西江水为原水,原水 5、6、7、8 四个月的平均浊度分别为 15 ~ 35 NTU, 15 ~ 35 NTU、129 ~ 663 NTU、21 ~ 36 NTU,受气候影响最高可达 798 NTU. pH 值为 7.3 ~ 7.7,TOC 质量浓度为 0.10 ~ 0.18 mg/L,TN 质量浓度为 2.00 ~ 2.80 mg/L,TP 质量浓度不超过 0.01 mg/L.

1.2 工艺流程及紫外消毒器

(1) 试验于广州市某水厂搭建一个小型的饮用水处理构筑物. 工艺流程如图 1 所示,图中 PAC 为混凝剂聚合氯化铝. 原水经混凝、沉淀、过滤后,浊度为 0.2 ~ 0.8 NTU, pH 值为 7.0 ~ 7.5,细菌浓度 > 738 cfu/mL.

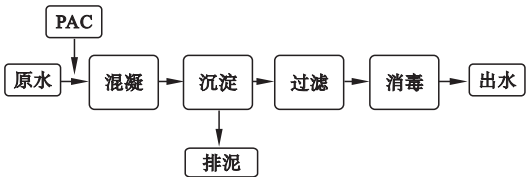


图 1 工艺流程图

Fig. 1 The flow chart of the process

(2) 采用封闭式不锈钢圆柱桶为紫外消毒器(见图 2),桶长 1 600 mm,内径 400 mm,有效容积 201.06 L. 紫外灯管和 214 石英套管均为美国海诺威公司制造. 选用 3 种类型波长为 254 nm 的紫外灯管,分别是长度为 1.15 m、功率为 120 W 的紫外灯管,长度为 0.84 m、功率为 80 W 的紫外灯管,长度为 0.84 m、功率为 40 W 的紫外灯管. 水流从消毒器底部进入,通过平行放置的灯管照射后,从上部角堰溢流入侧向出水管.

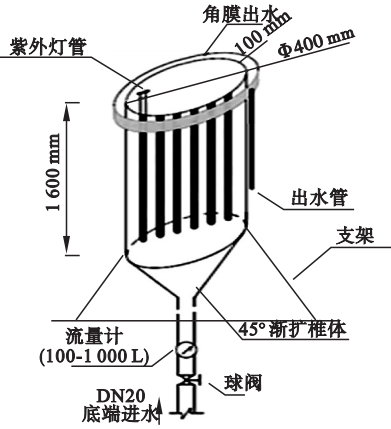


图 2 紫外消毒器结构

Fig. 2 The structure of UV sterilizer

1.3 试验方法

(1) 紫外消毒主要影响因素包括浊度、紫外线强度和水力停留时间(见表 1). 笔者研究这 3 个单因素影响条件下的紫外消毒效果,采用中心组合设计法统计数据并且进行响应面分析,分析 3 种因素交互作用下的消毒效果,确定紫外消毒器的最佳工艺参数. 分析不同原水浊度、紫外线强度和水力停留时

间条件下水中细菌的暗复活情况,找出3种不同因素对细菌暗复活的影响效果.

表 1 紫外消毒主要影响因素

浊度/ NTU	紫外线强度/ ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)	水力停留时间/ s
0.5	554	600
1.0	1 764	1 200
1.5	3 109	2 400
2.0	4 812	3 000
3.0	6 022	4 800

(2)设计3组紫外灯管排列方式(见图3),灯管数量分别为3根,7根,19根,水层厚度分别为109 mm、69 mm、41.5 mm.

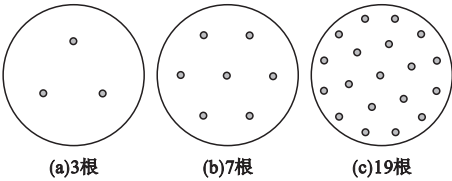


图 3 紫外灯管排列方式图

Fig. 3 The arrangement diagram for UV lamp in UV sterilizer

$$AD = \pi \frac{r_1^2 \int_0^1 \int_0^A dx dy + (r_2^2 - r_1^2) \int_0^l \int_0^B dx dy + (r_3^2 - r_2^2) \int_0^l \int_0^C dx dy}{Y_{\text{总}}}$$

式中:AD为紫外点光源的平均强度, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$;L为灯管长度,m; r_1 、 r_2 、 r_3 分别为a、b、c点处外环半径, $r_1=0.07\text{ m}$; $r_2=0.14\text{ m}$; $r_3=0.21\text{ m}$;A、B、C分别代表a、b和c点处的紫外平均强度, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

根据式(1)计算出紫外点光源的平均强度(见表2).

表 2 外点光源的平均强度

灯管功率/W	灯管数量/支	AD/($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)
120	18	6 022
	7	3 288
	3	1 836
80	18	4 812
	7	2 425
	3	1 037
40	18	3 109
	7	1 764
	3	554

采用美国 Spectronics 公司 AccuMAX 系列数字式 XF-1000 紫外强度计检测水中紫外线强度.分别在a、b、c三点测量灯管紫外线强度,采用十字划线法,取其平均值.取a为中心点,b点与a点距离为10.5 cm,c点与b点距离为7 cm(见图4(a)),探测点半径如图4(b)所示.

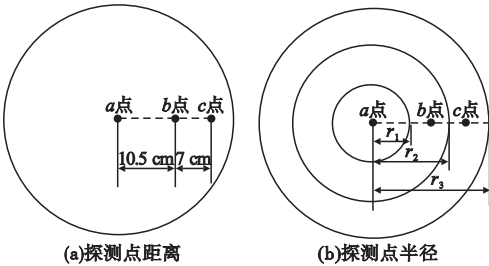


图 4 紫外线强度探测点及辐射半径

Fig. 4 The probe points of UV intensity and the radius of UV irradiation

根据《城市给排水紫外线消毒设备》(GB/T19837—2005)中点光源计算方法,将紫外灯简化为点光源,用点光源累加法计算紫外点光源的平均强度.计算式为

(3)经紫外消毒器灭活后的水样放入棕色瓶,在生化培养箱中进行密闭遮光培养,使用IDEXX试剂盒测量菌落数.

1.4 检测项目及测定方法

1.4.1 pH值和浊度检测

分别采用pH计(SZZX-015-04)和浊度计(CYET-2100ANN)检测水样的pH值和浊度值.

1.4.2 菌落数检测

采用IDEXX试剂检测水体中细菌数量.①在无菌操作台内,将1 mL水样和9 mL无菌蒸馏水放入试剂瓶中,摇匀后倒入IDEXX试剂盘,然后倒置放入37℃的恒温箱内培养48 h后取出.②将取出的试剂盘放入360 nm荧光检测仪中,观察试剂盘亮灯个数,试剂盘的灯总数为84颗,对应细菌浓

度 >73.8 cfu/mL,亮灯数越多表明细菌浓度越大.

2 结果与分析

2.1 紫外消毒效果分析

2.1.1 单因素分析

(1)浊度对紫外消毒效果的影响

浊度值分别为 0.5 NTU、1.0 NTU、1.5 NTU、2.0 NTU、3.0 NTU,紫外线强度为 4 812 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,水力停留时间为 3 000 s 的消毒效果如表 3 所示.结果表明,当浊度为 0~2.0 NTU、紫外线强度为 4 812 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、水力停留时间为 3 000 s 时,细菌灭活率达到 100%;当浊度超过 2.0 NTU 时,紫外线穿透能力下降,导致到达细菌表面的紫外线剂量减少,从而细菌灭活降低. J. C. G. Lingen^[11]等研究证明,浊度从 1 NTU 增加到 10 NTU 时,因紫外线的折射和散射,紫外剂量损失增加 28%. 张轶群^[12]研究得出,当浊度 >3.0 NTU 时,紫外消毒效果明显降低.

表 3 不同浊度的消毒效果

Table 3 UV disinfection effect under different turbidity		
浊度/NTU	亮灯数量/个	细菌浓度/(cfu·mL ⁻¹)
0.5	0	0
1.0	0	0
1.5	0	0
2.0	3	0.6
3.0	10	2.1

(2)紫外线强度对紫外消毒效果的影响

保持浊度 0.5 NTU、水力停留时间 4 800 s 不变,改变紫外线强度分别为 554 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、1 764 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、3 109 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、4 812 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、6 022 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,消毒效果如表 4 所示.随着紫外线强度的增加,细菌的灭活效果明显;当紫外线强度超过 1 764 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,细菌灭活率达到 100%. L. Liu^[13]研究认为,一定的水力停留时间条件下,增加紫外线强度可以提高消毒效果.

表 4 不同紫外线强度的消毒效果

Table 4 UV disinfection effect under different intensity		
紫外强度/ ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)	亮灯数量/ 个	细菌浓度/ (cfu·mL ⁻¹)
554	3	0.6
1 764	0	0
3 109	0	0
4 812	0	0
6 022	0	0

(3)水力停留时间对紫外消毒效果的影响

保持原水浊度 0.5 NTU、紫外线强度 6 022 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 不变,水力停留时间为 600 s、1 200 s、2 400 s、3 000 s、4 200 s,消毒效果如表 5 所示.水力停留时间超过 1 200 s 时,细菌的灭活率可达 100%. 张琳^[14]及张克峰等^[15]研究表明,紫外强度一定时,改变水力停留时间能影响紫外消毒效果.

表 5 不同水力停留时间的消毒效果

Table 5 UV disinfection effect under different hydraulic retention time		
水力停留时间/s	亮灯数量/个	细菌浓度/(cfu·mL ⁻¹)
600	11	2.3
1 200	2	0.4
2 400	0	0
3 000	0	0
4 200	0	0

2.1.2 响应面分析

以水体中细菌浓度变化为依据,通过响应面分析各因素交互作用下的细菌灭活效果.用 x_1 、 x_2 、 x_3 分别表示自变量浊度、紫外强度、水力停留时间,响应变量为细菌浓度.用 0、 ± 1 、 $\pm \alpha$ 代表自变量的水平,以 0 为中值, $\alpha = (F)^{1/4} = 1.68$ 为极值. F 为响应面分析试验因素,取值 3. 试验因素和水平值如表 6 所示.

影响拟合方程的显著性因素分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_2x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 ,方差分析得出相应的回归方程预测模型:

表 6 试验因素和水平值表

Table 6 Test factors and level values

水平	因素		
	x_1/NTU	$x_2/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$	x_3/s
1.68	2.0	6 022	4 800
1	1.55	4 812	3 900
0	1.1	3 288	3 000
-1	0.65	1 764	2 100
-1.68	0.2	554	1 200

$$y = -0.009\,603 + 0.72x_1 - 1.47x_2 - 0.21x_3 - 0.27x_1x_2 - 0.05x_1x_3 + 0.025x_2x_3 + 0.52x_1^2 + 1x_2^2 + 0.17x_3^2. \tag{2}$$

根据回归分析结果,运用 origin 软件绘制响应曲面图.

图 5 为浊度 - 紫外线强度响应曲面图. 水力停留时间不变,即 x_3 水平为 0. 随着紫外线强度增加、原水浊度降低,水中细菌浓度下降,直至降为 0cfu/mL; 原水浊度为 2.0 NTU,即 x_1 水平为 1.68 时,不同紫外强度下的细菌浓度变化幅度最大. 当紫外强度为 6 022 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,即 x_2 水平为较高值 1.68 时,不同浊度下细菌浓度变化幅度小. 说明一定浊度范围内,增加紫外线强度可以弥补胶体颗粒物对紫外光的干扰,使得不同浊度时紫外消毒效果接近. 当浊度值最小为 0.2 NTU时,紫外线强度由 554 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 增加到 6 022 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,消毒后细菌浓度由 4cfu/mL 降为 0cfu /mL,可见当紫外线强度较低时,浊度是影响消毒效果的主要因素.

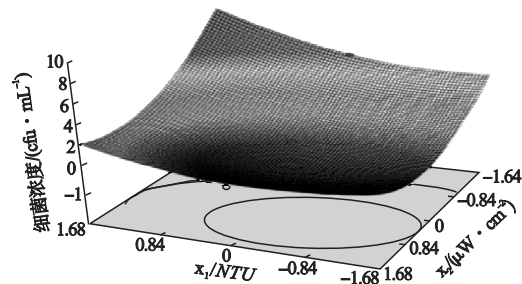


图 5 浊度 - 紫外线强度响应曲面

Fig. 5 The response surface graph of turbidity- UV intensity

图 6 为浊度 - 水力停留时间响应曲面图. 当紫外强度不变,即 x_2 水平为 0. 浊度为 2.0 NTU,即 x_1 水平较高为 1.68,与浊度为 0.2 NTU,即 x_1 水平较低为 -1.68 相比,改变水力停留时间,细菌浓度变化情况基本一致;当水力停留时间为 4 800 s,即 x_3 水平较高为 1.68,与水力停留时间为 1200 s,即 x_3 水平较低为 -1.68 相比,随浊度的变化,前者细菌浓度变化平缓,说明在低紫外剂量下浊度对水体中细菌浓度影响较大.

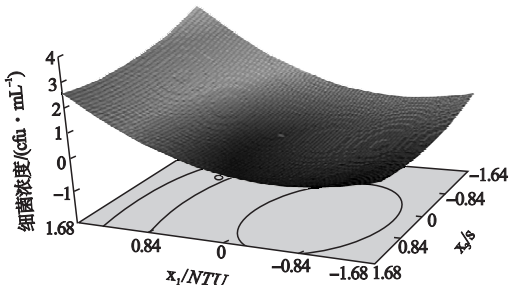


图 6 浊度 - 水力停留时间响应曲面

Fig. 6 The response surface graph of turbidity-hydraulic retention time

图 7 为紫外线强度 - 水力停留时间响应曲面图. 当浊度值不变,即 x_1 水平为 0. 从图中可知,与水力停留时间相比,增加紫外线强度,细菌浓度可以降到 0 cfu/mL,灭活率达到 100%.

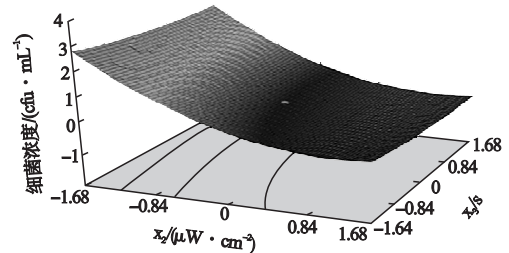


图 7 紫外线强度 - 水力停留时间响应曲面

Fig. 7 The response surface graph of UV intensity- hydraulic retention time

2.2 细菌暗复活影响因素研究

2.2.1 浊度对细菌暗复活的影响

紫外强度为 4 812 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,水力停留时间为 3 000 s,改变水体浊度值分别为 0.2 NTU、0.5 NTU、1.0 NTU、1.5 NTU、2.0 NTU,紫外消毒后,分别进行时间为 0 h、3 h、6 h、

12 h、18 h、24 h、32 h 和 48 h 密闭遮光培养,其细菌暗复活情况如表 7 所示. 由于水中胶体颗粒物保护了微生物受到紫外光照射,当浊度超过 1.0 NTU 时,细菌暗复活不明显.

表 7 不同浊度值细菌暗复活情况

Table 7 The dark resurrection of bacteria under different turbidity

浊度/ NTU	细菌浓度/(cfu·mL ⁻¹)					
	0 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h
0.2	0	0	0	0	1.0	33.9
0.5	0	0	0	0	2.6	>73.8
1.0	0	0	0	0	5.9	>73.8
1.5	0	0	0	1.5	18.9	>73.8
2.0	0	0	0	2.3	22.3	>73.8

表 8 不同紫外线强度细菌暗复活情况

Table 8 The dark resurrection of bacteria under different UV intensity

紫外线强度/ (μW·cm ⁻²)	水力停留时间/ s	细菌浓度/(cfu·mL ⁻¹)					
		0 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h
3 109	1 200	0	0	0	1.5	19.5	>73.8
	2 400	0	0	0	0.6	12.4	>73.8
4 812	1 200	0	0	0	0.4	8.6	>73.8
	2 400	0	0	0	0	3.5	>73.8
6 022	1 200	0	0	0	0	4.8	>73.8
	2 400	0	0	0	0	1.2	17.1

2.2.3 水力停留时间对细菌暗复活的影响

在水力停留时间分别为 600 s、1 200 s、2 400 s、3 000 s、4 200 s,浊度为 0.5 NTU,紫外线强度为 6 022 μW/cm² 消毒后,经过遮光培养后的细菌暗复活情况如表 9 所示. 当紫

2.2.2 紫外线强度对细菌暗复活的影响
设计 3 组紫外线强度分别为 3 109 μW/cm²、4 812 μW/cm² 和 6 022 μW/cm²,水力停留时间为 1200 s、2 400 s,浊度为 0.46 NTU 的条件进行消毒,经过遮光培养后细菌的暗复活情况如表 8 所示.

由表 8 得出,水力停留时间固定时,紫外线强度越高,细菌暗复活时间越长,说明紫外线强度能有效抑制细菌的暗复活. 超过 36 h 时,都出现暗复活现象,且当培养时间达到 48 h 时,细菌浓度都超过 73.8 cfu/mL,此时紫外线强度的抑制效果不明显. C . Shang^[16]研究也得出,紫外线强度越高越能抑制细菌的暗复活速率.

外线强度固定时,随着水力停留时间的增加,细菌暗复活时间也变长. 当紫外强度较低时,增加水力停留时间对细菌暗复活影响不明显^[17].

表 9 不同水力停留时间细菌暗复活情况

Table 9 The dark resurrection of bacteria under different hydraulic retention time

水力停留时间/s	紫外线强度/ (μW·cm ⁻²)	细菌浓度/(cfu·mL ⁻¹)					
		0 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h
1 200	3 109	0	0	0	1.5	19.5	>73.8
	4 812	0	0	0	0.4	8.6	>73.8
	6 022	0	0	0	0	4.8	>73.8
2 400	3 109	0	0	0	0.6	12.4	>73.8
	4 812	0	0	0	0	3.5	>73.8
	6 022	0	0	0	0	1.2	17.1

2.2.4 紫外剂量对细菌暗复活的影响

设计两组紫外剂量相差不大的细菌暗复活试验,紫外剂量分别为7 226 mJ/cm²、7 463mJ/cm²,前者水力停留时间短,大小为1 200 s,紫外线强度高,数值为6 022 μW/cm²,后者水力停留时间长,大小为2 400 s,紫外线强度低,数值为3 109 μW/cm²;以及两组

紫外剂量相差很大的试验,紫外剂量分别为3 731 mJ/cm²、11 549 mJ/cm²,前者水力停留时间为1 200 s,紫外线强度值为3 109 μW/cm²,后者水力停留时间为2 400 s,紫外线强度值为4 812 μW/cm².在此条件下消毒并进行遮光培养后的细菌暗复活情况如表10所示.

表 10 不同紫外剂量细菌暗复活情况

Table 10 The dark resurrection of bacteria under different ultraviolet dose								
紫外剂量/ (mJ·cm ⁻²)	紫外线强度/ (μW·cm ⁻²)	水力停留 时间/s	细菌浓度/(cfu·mL ⁻¹)					
			0 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h
7 226	6 022	1 200	0	0	0	0	4.8	>73.8
7 463	3 109	2 400	0	0	0	0.6	12.4	>73.8
3 731	3 109	1 200	0	0	0	1.5	19.5	>73.8
11 549	4 812	2 400	0	0	0	0	3.5	>73.8

紫外剂量分别为7 226 mJ/cm²、7 463 mJ/cm²相差不大时,出现表10结果的可能原因有:①高紫外强度能抑制细菌的暗复活;②水体经紫外线长时间照射后,由于发生光化学反应,水中有机物会被分解成分子极性更强的小分子有机物.紫外剂量分别为3 731 mJ/cm²、11 549 mJ/cm²相差较大时,紫外剂量能抑制细菌暗复活,紫外剂量越高,细菌暗复活时间就越长.试验结果与孙雯^[18-21]的研究结果相似,其研究得出大肠杆菌的灭活率随着紫外线剂量的增加而提高,且相同剂量下高紫外强度灭活效果好于低紫外强度.

3 结 论

- (1)浊度、紫外线强度、水力停留时间为紫外线消毒的重要影响因素.响应面分析得出浊度、紫外线强度、水力停留时间对紫外消毒效果影响大小依次为:紫外线强度,浊度,水力停留时间.水样浊度为小于1.0 NTU、紫外线强度超过3 126 μW/cm²、水力停留时间超过1 200 s时,细菌灭活率可达到100%.
- (2)在紫外线强度一定时,增加水力停留时间可以抑制细菌的暗复活,水力停留时

间为1 200 s,浊度值为0.46 NTU,增加紫外线强度可以抑制细菌的暗复活.

(3)培养时间达到48 h时,浊度、紫外线强度和水力停留时间对细菌暗复活无明显抑制,水中细菌基本复活.

参考文献

[1] 胡月飞,贺春萍.紫外线消毒的特点及应用[J].中国卫生标准管理,2016,7(10):179-180.
(HU Yuefei,HE Chunping. Features and application of UV disinfection [J]. China health standard management, 2016, 7 (10): 179 - 180.)

[2] ZHANG S H, YE C S, LIN H R, et al. UV disinfection induces a VBNC state in escherichia coli and pseudomonas aeruginosa [J]. Environmental science & tecnology, 2015, 49 (3): 1721 - 1728.

[3] MESSINA G, BURGASSI S, MESSINA D, et al. A new UV-LED device for automatic disinfection of stethoscope membranes [J]. America journal of infection control, 2015, 43 (10): 61 - 66.

[4] 李静,王大宁,曲红梅,等.紫外线对大肠杆菌的损伤机制研究[J].军事医学,2016,40(9):725-728.
(LI Jing, WANG Daning, QU Hongmei, et al. Mechanism of escherichia coli injury under UV disinfection [J]. Military medicine, 2016, 40 (9): 725 - 728.)

[5] 徐海梅,许鹏程,王小昌,等.紫外线消毒对大肠杆菌的损伤及复苏的研究[J].中国环境科学,2017,37(7):2639-2645.
(XU Haimei, XU Pengcheng, WANG Xi-

- aochang, et al. Studies on the injury and reactivation of *Escherichia coli* under ultraviolet disinfection [J]. *China environmental science*, 2017, 37(7): 2639 – 2645.)
- [6] CLANCY J L, HARGY T M, MARSHALL M M, et al. UV light inactivation of *Cryptosporidium* oocysts [J]. *Journal of the American water works association*, 1998, 90(9): 92 – 102.
- [7] CLANCY J L, BUKHARI Z, HARGY T M, et al. Using UV to inactivate *cryptosporidium* [J]. *Journal of the American water works association*, 2000, 92(9): 97 – 104.
- [8] BROWNELL S A, CHAKRABARTI A R, KASER F M, et al. Assessment of a low-cost, point-of-use, ultraviolet water disinfection technology [J]. *Journal of water health*, 2008, 6(1): 53 – 65.
- [9] 矫彩山, 孙晓宇, 邓国政. 紫外线消毒中的光复活作用 [J]. *环境科学与管理*, 2007, 31(9): 125.
(JIAO Caishan, SUN Xiaoyu, DENG Guozheng. Photoreactivation of bacteria following UV disinfection [J]. *Environmental science and management*, 2007, 31(9): 125.)
- [10] LAZAROVA V, SAVOYE P, JANEX M, et al. Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives [J]. *Water science and technology*, 1999, 40(4/5): 203 – 213.
- [11] LINGEN J C G. How particles affect UV light in the UV disinfection of unfiltered drinking water [J]. *Journal of the American water works association*, 2003, 95(4): 179 – 189.
- [12] 张轶群. 紫外线消毒技术在饮用水中的应用的影响因素研究 [J]. *城镇供水*, 2011(4): 35 – 36.
(ZHANG Yiqun. Study on the influencing factors of UV disinfection technology in drinking water [J]. *Urban water supply*, 2011(4): 35 – 36.)
- [13] LIU L, CHU X, CHEN P, et al. Effects of water quality on inactivation and repair of *microcystisviridis* and *tetraselmisuecica* following medium-pressure UV irradiation [J]. *Chemosphere*, 2016, 163: 209 – 216.
- [14] 张琳. 高梯度磁分离 – 紫外法灭活压载水中微生物的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
(ZHANG Lin. Study on the inactivation of microbe in ballast water by high gradient magnetic separation – UV combined process [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.)
- [15] 张克峰, 潘春雨, 徐展, 等. 污水处理紫外线消毒的影响因素 [J]. *净水技术*, 2018, 37(5): 62 – 66.
(ZHANG Kefeng, PAN Chunyu, XU Zhan, et al. Influencing factors of ultraviolet (UV) disinfection for sewage treatment [J]. *Water purification technology*, 2018, 37(5): 62 – 66.)
- [16] SHANG C, CHEUNG L M, Ho C M, et al. Repression of photoreactivation and dark repair of coliform bacteria by TiO_2 -modified UV-C disinfection [J]. *Applied catalysis B: environmental*, 2009, 89(3/4): 536 – 542.
- [17] SHAW J P, WILLOUGHBY M S A. International water supply effects of UV irradiation on organic matter [J]. *Journal of the American water works association*, 2000, 92(4): 157 – 167.
- [18] 孙雯. 紫外线消毒对水中微生物灭活及生物稳定性研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009.
(SUN Wen. Effect of ultraviolet disinfection on drinking water microbial inactivation and biological stability [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2009.)
- [19] CORIN N, WIKLUND T, BACKLUND P. Bacterial growth in humic waters exposed to UV – radiation and simulated sunlight [J]. *Chemosphere*, 1998, 36(36): 1947 – 1958.
- [20] 汪喜生, 吕瑞滨, 沈怡雯, 等. 污水中耐红霉素细菌的复活特性研究 [J]. *安全与环境工程*, 2018, 25(4): 70 – 75.
(WANG Xisheng, LU Ruibin, SHEN Yiwen, et al. Reactivation characteristic of erythromycin resistant bacteria in wastewater after UV disinfection [J]. *Safety and environmental engineering*, 2018, 25(4): 70 – 75.)
- [21] 杨纪超. 深圳污水处理厂紫外消毒的影响因素及改进对策 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
(YANG Jichao. Influencing factors of ultraviolet disinfection and strategies for the improvement in SHENZHEN wastewater treatment plant [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)