

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.24.001

## 新冠疫情控制期间供水厂消毒效果影响因素及其控制范围

张杰<sup>1</sup>, 邱文心<sup>1</sup>, 陈超<sup>2</sup>, 鲍洁<sup>1</sup>

(1. 武汉市水务集团有限公司, 湖北 武汉 430015; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 为了确保新冠疫情控制期间自来水厂的有效病毒灭活率,满足饮用水微生物安全性的要求,研究了净水工艺中消毒效果影响因素和新冠疫情期间外部需求对净水工艺的影响情况。研究表明,在原水水温、pH值一定的情况下,可通过实时在线仪表监控出厂水浊度、清水池水位、水厂水量、出厂水余氯等指标,在确保出厂水浊度 $\leq 0.3$  NTU(满足混凝-沉淀-过滤工艺对病毒2-lg去除率)基础上,实时调整清水池CT值在适宜范围内,既满足消毒工艺对病毒4-lg灭活率又同时降低消毒副产物的风险,最终使供水厂处理工艺达到6-lg以上的病毒削减率,满足疫情控制期间饮用水的生物安全性要求并留有充足安全余量。

**关键词:** 新冠肺炎; 供水厂; 消毒效果

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)24-0001-05

## Discussion on Influencing Factors and Control Range of Disinfection Effect in Waterworks during the COVID-19 Outbreak

ZHANG Jie<sup>1</sup>, QIU Wen-xin<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>2</sup>, BAO Jie<sup>1</sup>

(1. Wuhan Water Group Company Limited, Wuhan 430015, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper studied the influencing factors of disinfection effect in water purification process and the influence of external demand on the water purification process to ensure that the effective virus inactivation rate of waterworks can meet the requirements of microbiological safety during the COVID-19 outbreak. The results showed that the effluent turbidity should be no more than 0.3 NTU to meet the requirements of coagulation sedimentation filtration process for virus 2-lg removal rate under the condition of the fixed source water temperature and pH value. On the basis of the above, with the monitoring of the effluent turbidity, water level of clean water tank, water quantity of waterworks and residual chlorine by real-time online instruments, the CT value of the clean water tank was controlled and adjusted within an appropriate range in real time, so that it not only met the 4-lg virus inactivation rate but also reduced the risk of disinfection by-products. Finally, a virus reduction rate of above 6-lg was achieved with the treatment process of waterworks, which could meet the biological safety requirements of drinking water during the epidemic, and have a sufficient safety margin.

**Key words:** COVID-19; waterworks; disinfection effect

新型冠状病毒(SARS-CoV-2)传染力远大于同类冠状病毒(如SARS、MERS等),有报道称在粪

便及尿中可分离到新冠病毒,提示需严防该病毒介水传播。不同病毒在环境介质中的存活能力以及对

水净化过程及消毒剂的耐受力不尽相同,新冠病毒是一个新发病毒,现在水处理行业中还没有对其去除/灭活的相关研究报道,也没有对应的规程或指南。

疫情控制期间,武汉市需水量的大幅下降导致供水管网水龄延长,加上供水区域内火神山、雷神山医院的建设启用,以及 142 家方舱医院、隔离点的相继投用,武汉市水务集团有限公司(简称武水集团)将饮用水的微生物安全作为首要水质安全目标,采取了有效的消毒措施。由于武水集团以次氯酸钠为消毒剂,故以氯消毒为例,讨论病毒去除和灭活的效果。

## 1 消毒效果评价方法

冠状病毒属于有包膜的亲脂类病毒,按照目前人类认知的微生物对消毒处理的抗力大小,有包膜的病毒相对容易被消毒剂灭活。有研究<sup>[1]</sup>表明,SARS 冠状病毒在污水中对消毒剂的抵抗力比大肠杆菌 8099 和大肠杆菌 f<sub>2</sub> 噬菌体都低,冠状病毒相比大肠菌群更易被消毒剂灭活。

目前供水企业不具备检测水中冠状病毒的能力,当水质检测中大肠菌群结果为未检出时,可以判断消毒剂已将冠状病毒灭活,即我国的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中微生物指标能对冠状病毒灭活起到指示作用。

微生物检测结果虽然可以表明新冠病毒被有效去除,但是由于微生物检测耗时长(至少需要 24 h),且无法实现连续监测,检测结果的滞后给水厂出厂水水质安全带来风险。因此,需要寻求一种能够通过在线监测数据及时判断病毒灭活效果的途径,以保障饮用水微生物安全。

在水厂生产过程中,可以通过控制 CT 值(消毒剂剩余浓度和接触时间的乘积)实现对微生物的灭

活,达到消毒效果。

## 2 CT 值控制范围的确定

### 2.1 饮用水中病毒削减的指标要求

通过研究《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)、WHO《饮用水水质准则》、美国《饮用水水质标准》以及欧盟等国家和地区的饮用水水质标准,武水集团确定了在疫情高风险期间供水厂的消毒要求,即病毒削减要求:滤后水浊度 < 0.3 NTU,确保病毒去除率可达 99% (2-lg),清水池消毒效果即 CT 值达到病毒的灭活率不低于 4-lg (即 99.99%),最终病毒通过去除和灭活的总削减率为 6-lg (即 99.999 9%)。

考虑到疫情高发期最大程度地避免人们因饮食或饮水安全发生疾病就医的情况,武水集团不仅将出厂水菌落总数限值要求为不得检出,同时将管网水菌落总数限值提升为 20 CFU/mL,尽可能提高微生物安全性。

### 2.2 影响病毒灭活 CT 值限值的因素分析

有文献<sup>[2-3]</sup>对国内外饮用水标准中病毒指标的控制要求进行了讨论,并就各类标准中不同消毒剂对病毒灭活的 CT 值进行了论述,表明温度和 pH 值是供水厂消毒效果的重要环境影响因素。

在实际应用中,供水厂需要确定特定清水池的游离氯灭活病毒 CT 值,期望可以直接根据游离氯含量、水温、pH 值,查到对应 99.99% (4-lg) 以上病毒灭活率的 CT 值,就如美国环保局 (USEPA) 制定的 40 CFR 141 - *National Primary Drinking Water Regulations* 中的 CT 表:可以直接根据游离氯、水温、pH 值,查到对应的 99.9% (3-lg) 以上贾第鞭毛虫灭活率的游离氯消毒 CT 值(见表 1,部分摘录)。

表 1 不同 pH 值和水温条件下游离氯灭活 99.9% 的蓝氏贾第鞭毛虫囊的 CT 值

Tab. 1 CT values of 99.9% *Giardia lamblia* sacs inactivated by free chlorine under different pH value and water temperature conditions

余氯/ (mg · L <sup>-1</sup> )	CT 值(0.5 ℃)/(mg · min · L <sup>-1</sup> )							CT 值(5 ℃)/(mg · min · L <sup>-1</sup> )						
	pH ≤ 6.0	pH = 6.5	pH = 7.0	pH = 7.5	pH = 8.0	pH = 8.5	pH ≤ 9.0	pH ≤ 6.0	pH = 6.5	pH = 7.0	pH = 7.5	pH = 8.0	pH = 8.5	pH ≤ 9.0
≤0.4	137	163	195	237	277	329	390	97	117	139	166	198	236	279
0.6	141	168	200	239	286	342	407	100	120	143	171	204	244	291
0.8	145	172	205	246	295	354	422	103	122	146	175	210	252	301
1.0	148	176	210	253	304	365	437	105	125	149	179	216	260	312
1.2	152	180	215	259	313	376	451	107	127	152	183	221	267	320

若 pH 值或温度在表 1 中所列 pH 值或温度之间,CT 值可以通过线性插值法计算确定。如果不使

用插值法,则可选择最不利状态,即较低温度和较高 pH 值的 CT 值。虽然表 1 是游离氯灭活蓝氏贾第

鞭毛虫囊 99.9% 的 CT 值表,但是环境条件对消毒影响的原理是一致的。由表 1 可见,要确定特定水厂某个清水池的灭活病毒 CT 值同样可根据该清水池出水余氯浓度、水温、pH 值数据确定。

清水池出水游离氯浓度主要由供水管网系统需求决定。疫情控制期间,由于用水量大幅减少,管网水龄比往年同期明显延长,余氯消耗也相应增大。图 1 是某大型水厂 2019 年和 2020 年疫情控制期间(1 月—4 月)供水量的同期对比结果。

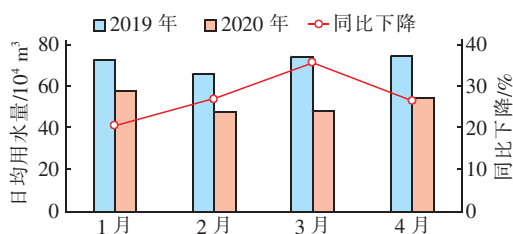


图 1 某大型水厂 2019 年和 2020 年 1 月—4 月用水量对比

Fig. 1 Comparison of the water consumption of a large-scale waterworks from Jan. to Apr. 2019 and 2020

从图 1 可见,2020 年 3 月同比用水量日均减少 35%,相同供水区域的水龄明显延长,同样环境条件下管网余氯消耗量会明显增大。火神山医院明确提出管网余氯量 $\geq 0.2$  mg/L 的要求,以保证管网供水安全。为了确保疫情高风险期间管网水微生物安全,保证各方舱医院以及火神山医院、雷神山医院的供水水质,武汉市中心城区供水厂出厂水游离氯控制在 1.0~1.2 mg/L,管网余氯量 $\geq 0.2$  mg/L。

### 2.3 CT 值下限的确定

USEPA 的原始文献资料中给出了不同温度和 pH 值范围的灭活病毒所需 CT 值,具体见表 2。

表 2 游离氯灭活病毒 CT 值

Tab. 2 CT values to inactivate virus through free chlorine residual

温度/ ℃	CT 值/(mg · min · L <sup>-1</sup> )					
	2-lg 灭活率		3-lg 灭活率		4-lg 灭活率	
	pH = 6~9	pH = 10	pH = 6~9	pH = 10	pH = 6~9	pH = 10
0.5	6	45	9	66	12	90
5	4	30	6	44	8	60
10	3	22	4	33	6 <sup>a</sup>	45
15	2	15	3	22	4	30
20	1	11	2	16	3	22
25	1	7	1	11	2	15

表 2 数据是在宽 pH 值(6~9)下的 CT 值,没有再细化,由于武汉地区水厂出厂水 pH 值为 7.5~

8.5,还需要更多的试验数据来确定具体值,根据 USEPA 文献可知表 2 中的 6<sup>a</sup> 是余氯浓度 $\leq 0.4$  mg/L 的结果。

在现有数据有限的情况下,可以考虑采用最不利情况,即使用较低温度和较高 pH 值下灭活病毒的 CT 值。因此,疫情高风险期间武水集团结合实际情况并参考表 1 的数据对表 2 进行了修正。在温度均为 0.5℃ 时,有:

$$CT_{a1} = CT_{a2} \frac{CT_{b1}}{CT_{b2}} \quad (1)$$

式中:CT<sub>a1</sub>为 pH=8.5、余氯=1.2 mg/L 时病毒灭活率达到 4-lg 所对应的 CT 值;CT<sub>a2</sub>为 pH=7、余氯 $\leq 0.4$  mg/L 时病毒灭活率达到 4-lg 所对应的 CT 值;CT<sub>b1</sub>为 pH=8.5、余氯=1.2 mg/L 时贾第鞭毛虫灭活率在 3-lg 以上对应的 CT 值;CT<sub>b2</sub>为 pH=7、余氯 $\leq 0.4$  mg/L 时贾第鞭毛虫灭活率在 3-lg 以上对应的 CT 值。

按照式(1)修正后,在水温为 0.5℃、pH 值为 8.5、余氯为 1.2 mg/L 条件下,武水集团供水厂清水池的病毒灭活率不低于 4-lg 的 CT 值下限为 23 mg · min/L。

### 2.4 CT 值上限的确定

各类水质标准中要求的 CT 值是确保微生物安全的下限值。本次疫情是相对长期的公共卫生安全事件,这就要求既确保消毒灭活病毒效果又要保证消毒副产物达标,即必须保证 CT 值在合适的范围。

疫情控制期间,由于供水厂水量大幅下滑且供水厂游离氯消毒余氯量同比处于一个较高范围,CT 值同比明显变大。根据经验公式计算某水厂疫情控制期间的 CT 值,清水池低水位高水量时间段和高水位低水量时间段的 CT 值分别为 252~270 和 335~360 mg · min/L,是设计水量 CT 值(95 mg · min/L)的 2.7 和 3.8 倍。表 3 为某水厂分别在高、低 CT 值时段的三氯甲烷增量连续对比结果。

由表 3 可知,该水厂高 CT 值时间段的三氯甲烷增量比低 CT 值时间段高 50% 左右。可见在同样环境和水质条件下,随着 CT 值的增大,消毒副产物超标风险增大。因此 CT 值并不是越大越好,应以消毒副产物不超标为上限。由于消毒副产物的影响因素较多,不同水厂需要根据实际情况制定清水池 CT 值的上限值,武水集团设定以长江水为水源的供水厂在疫情高风险期清水池 CT 值上限为 300



mg · min/L。

表 3 某水厂滤池高、低 CT 值时间段三氯甲烷检测数据

Tab. 3 Detection data of chloroform in the high and low CT value periods of a filter in waterworks

项目	低 CT 值时间段三氯甲烷			高 CT 值时间段三氯甲烷		
	滤后水	出库水	增加量	滤后水	出库水	增加量
水样 1	0.017	0.035	0.018	0.018	0.046	0.028
水样 2	0.018	0.041	0.023	0.027	0.051	0.024
水样 3	0.023	0.033	0.010	0.021	0.048	0.027
水样 4	0.019	0.036	0.017	0.022	0.048	0.026

mg · L<sup>-1</sup>

### 3 评价消毒效果的在线监测指标

#### 3.1 控制 CT 值的在线指标

有研究<sup>[4]</sup>表明,在计算 CT 值时,接触时间  $T$  不能以清水池的理论水力停留时间即  $T = V/Q$  ( $V$  为清水池体积,  $Q$  为清水池流量) 来计算,一般以  $t_{10}$  即接触时间来计算  $Ct_{10}$ 。由于  $t_{10}$  无法直接测定或计算,应根据示踪试验或计算流体力学 (CFD) 软件计算,所以计算时一般用  $t_{10}/T$  作为修正系数。 $t_{10}/T$  代表短流程度,其值越高,清水池内流态越好,越接近 1,水力特性越好,流态越接近理想推流。根据国内研究文献<sup>[4-7]</sup>,影响  $t_{10}/T$  的主要因素有清水池水流廊道的总长宽比、廊道的转弯数和形式、池型、进出口条件等。 $t_{10}/T$  是衡量清水池水力效率的重要参数<sup>[4]</sup>,可通过下式计算:

$$t_{10}/T = 0.185 \ln L/W - 0.0439 \quad (2)$$

式中:  $\ln L/W$  为清水池流道总长宽比对数。

从式(2)可看出,清水池总长宽比是最主要的影响因素。

根据  $t_{10}/T$  和清水池参数 (长  $L$ 、宽  $W$ 、水位  $H$ ) 及流量 ( $Q$ ), 即可计算出清水池的 CT 值:

$$Ct_{10} = C \cdot \frac{t_{10}}{T} \cdot \frac{V}{Q} = \frac{C(0.185 \ln L/W - 0.0439) LWH}{Q} \quad (3)$$

由式(3)可知,在清水池池型参数已固定,即  $t_{10}/T$  已定的情况下,CT 值主要与余氯浓度  $C$ 、清水池水位  $H$ 、清水池出水流量  $Q$  相关。而余氯浓度、清水池水位、清水池出水流量均可在线监测,即可通过在线监测指标的调控,控制 CT 值在合适范围内,从而达到控制消毒效果的目的。

#### 3.2 工艺流程控制

在疫情控制期间,供水厂通过实时监测余氯浓

度、清水池水位、清水池出水流量,在  $C$  值不变或稍微增大且水量明显大幅下滑的情况下,调控清水池水位来调控 CT 值,即需要在确保最低水位的情况下调控清水池水位。因此,在净水工艺中,可依据式(3),利用实时监测数据及时实现疫情控制期间的工艺流程控制 (见图 2)。

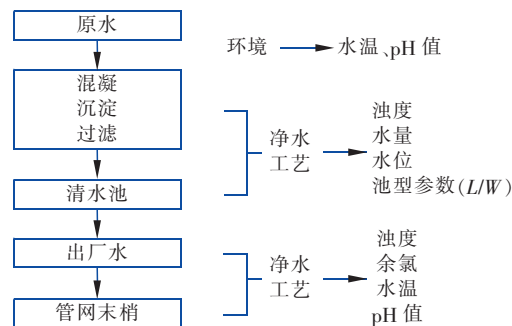


图 2 工艺流程参数控制

Fig. 2 Schematic diagram of process parameter control

在水厂生产运行中,通过在线仪表实时监测原水和出厂水中水温和 pH 值、清水池水量水位、各阶段游离氯、浊度等对灭活病毒有影响的各项指标。通过表 1 和表 2 得到满足 4-lg 病毒灭活率 CT 值下限,再确定消毒副产物超标风险的 CT 值上限。根据预设的清水池 CT 值范围来设定生产运行控制指标,再依据控制指标组织生产。

### 4 结论

综上所述,水厂出厂水首先应确保浊度在 0.3 NTU 以下,满足混凝-沉淀-过滤工艺对病毒 2-lg 的去除率;在此基础上,将水温、pH 值、水位、水量、出厂水余氯等实时在线仪表监控值参与计算,确定既能满足 4-lg 病毒灭活率又能降低消毒副产物风险的适宜的清水池 CT 值范围。目前在标准没有明确对应灭活新冠病毒的 CT 值的情况下,宜采用在较低温度和较高 pH 值等不利条件下使用灭活肠道病毒的 CT 值,并根据游离余氯浓度适当上浮。由于疫情控制期间出现供水量的下滑以及供水管网系统对余氯浓度要求的提升,应对清水池  $Ct_{10}$  值进行计算,必要时监测清水池 CT 值对消毒副产物的影响。由于消毒副产物的影响因素较多,不同水厂需要根据本厂实际生产情况结合环境温度制定清水池 CT 值上限。

为了确保疫情高风险期间饮用水微生物安全,武水集团供水厂控制滤后水浊度在 0.2 NTU 左右,并要求出厂水浊度  $\leq 0.3$  NTU。同时,综合考虑管

网余氯需求,控制出厂水游离氯消毒余量在  $1.0 \sim 1.2 \text{ mg/L}$ ,并实时在线监控水温、pH 值、水位、水量、出厂余氯等来参与计算调控供水厂清水池 CT 值,使其在既满足 4-lg 病毒灭活率又降低消毒副产物风险的适宜范围。以上措施确保了疫情高风险时期武汉市中心城区饮用水水质安全。

#### 参考文献:

- [1] 王新为,李劲松,金敏,等. SARS 冠状病毒的抵抗力研究[J]. 环境与健康杂志,2004,21(2):67-71.  
WANG Xinwei, LI Jinsong, JIN Min, *et al.* Study on the resistance of SARS-coronavirus [J]. Journal of Environment and Health, 2004, 21(2): 67-71 (in Chinese).
- [2] 高圣华,张晓,张岚. 饮用水中病毒的健康危害与控制[J]. 净水技术,2020,39(3):1-8.  
GAO Shenghua, ZHANG Xiao, ZHANG Lan. Health hazards and control of viruses in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(3): 1-8 (in Chinese).
- [3] 解跃峰,马军. 饮用水厂肠道病毒去除与控制[J]. 给水排水,2020,46(3):1-3.  
XIE Yuefeng, MA Jun. Virus removal and control in drinking water plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(3): 1-3 (in Chinese).
- [4] 金俊伟,刘文君,刘丽君,等. 影响清水池  $t_{10}/T$  值的因素试验研究[J]. 给水排水,2004,30(12):36-39.  
JIN Junwei, LIU Wenjun, LIU Lijun, *et al.* Study on the influencing factors on  $t_{10}/T$  in clear water tank [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(12): 36-39 (in Chinese).
- [5] 刘文君,张金松,刘丽君,等. 清水池设计改进原理和应用[J]. 给水排水,2004,30(5):10-12.  
LIU Wenjun, ZHANG Jinsong, LIU Lijun, *et al.* Improvement on design of clear water tank [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(5): 10-12 (in Chinese).
- [6] 柳清,刘文君,高京伟,等. 中试清水池水力条件对氯消毒效率的影响[J]. 环境科学,2009,30(9):2550-2554.  
LIU Qing, LIU Wenjun, GAO Jingwei, *et al.* Impacts of the hydraulic characteristics of pilot clear well on chlorine disinfection efficiency [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2009, 30(9): 2550-2554 (in Chinese).
- [7] 刘丽君,焦中志,刘文君,等. 给水厂常规消毒工艺的优化技术与应用[J]. 中国给水排水,2005,21(1):5-8.  
LIU Lijun, JIAO Zhongzhi, LIU Wenjun, *et al.* Optimization of disinfection technology and its application in water treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(1): 5-8 (in Chinese).

**作者简介:**张杰(1971—),男,湖北武汉人,本科,高级工程师,武汉市水务集团水质监测中心(国家城市供水水质监测网武汉监测站)副站长和技术负责人,湖北省住建厅供水专家库成员,长期从事与供排水水质、水处理剂、污泥检测和给排水处理工艺相关的研究工作,主要研究方向为水处理工艺、水处理剂和水质监测交叉研究,多次参与省内水源污染事件应急处理工作。

**E-mail:**983693669@qq.com

**收稿日期:**2021-01-18

**修回日期:**2021-02-03

(编辑:丁彩娟)

**节水就是开源,就是增效,就是减排,就是降损**