

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.002

建筑管道直饮水系统臭氧衰减模型及生产运行调控

柯水洲¹, 张春雨¹, 欧阳林², 陶策², 陈佳², 黎思云²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙水思源产业发展有限公司,
湖南 长沙 410017)

摘要: 为优化臭氧消毒工艺和确保管道直饮水安全,以正在运行的管道直饮水系统作为研究基地,进行了臭氧浓度衰减静态和动态试验。在净水箱中臭氧浓度随时间的衰减符合二项式拟合曲线,半衰期约为30~45 min;当净水箱中臭氧初始浓度分别为0.06、0.12、0.18 mg/L时,静置120 min后臭氧残留浓度均在0.01 mg/L以上。净水箱中臭氧投加量分别为0.06、0.12、0.18 mg/L时,在不循环、不出水工况下,用水点的臭氧浓度先随时间增加而增加,一段时间后开始下降,150 min后均小于0.01 mg/L;在出水、不循环工况下,随着出水流量或臭氧投加量的增加,用水点的臭氧浓度降低到0.01 mg/L以下所需时间相应增加;开启循环后,出水流量越大或臭氧投加量越大,末端臭氧浓度达到0.01 mg/L所需时间越短。循环消毒制度优化试验表明,对菌落总数和铜绿假单胞菌检出的影响程度为臭氧投加量>每日循环次数>每次循环时间。当臭氧投加量达到0.13~0.18 mg/L、每日循环8次、每次循环15 min时,可以确保用水点检测到的铜绿假单胞菌数基本为0。

关键词: 管道直饮水; 臭氧衰减; 铜绿假单胞菌; 循环消毒; 正交优化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0009-07

Ozone Attenuation Model and Operation Control of Building Pipeline Direct Drinking Water System

KE Shui-zhou¹, ZHANG Chun-yu¹, OUYANG Lin², TAO Ce², CHEN Jia², LI Si-yun²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Changsha Shuisiyuan Industrial Development Co. Ltd., Changsha 410017, China)

Abstract: In order to optimize the ozone disinfection process and ensure the safety of pipeline direct drinking water, the static and dynamic tests of ozone concentration attenuation were carried out. The results showed that the attenuation model of ozone concentration in clean water tank with time conformed to the binomial fitting curve, and the half-life was about 30–45 min. When the initial concentration of ozone in the clean water tank was 0.06 mg/L, 0.12 mg/L and 0.18 mg/L respectively, the residual concentration of ozone was above 0.01 mg/L after standing for 120 min. When the ozone dosage in the clean water tank was 0.06 mg/L, 0.12 mg/L and 0.18 mg/L respectively, the ozone concentration at the water point first increased with the increase of time under the condition of no circulation and no effluent, and began to decrease after a period of time, and was less than 0.01 mg/L after 150 min. Under the condition of effluent and non-circulation, with the increase of outflow or ozone dosage, the time required for the ozone concentration at the water point to decrease to below 0.01 mg/L increased

通信作者: 柯水洲

E-mail: ksz@hnu.edu.cn;

欧阳林

E-mail: 53183610@qq.com

correspondingly. After opening the cycle, the greater the outflow or the ozone dosage, the shorter the time required for the terminal ozone concentration to reach 0.01 mg/L. The optimization test of circulating disinfection system showed that the degree of influence on the total number of colonies and the detection of *Pseudomonas aeruginosa* was as follows: ozone dosage > number of daily cycles > time of each cycle. When the ozone dosage reached 0.13–0.18 mg/L, cycling 8 times a day and 15 min each cycle, the number of *Pseudomonas aeruginosa* detected at the water point could be basically ensured to be zero.

Key words: pipeline direct drinking water; ozone attenuation; *Pseudomonas aeruginosa*; circulating disinfection; orthogonal optimization

目前我国自来水用水点的水质状况一时还难以与发达国家水质标准接轨,在无法满足多层次净水消费需求的情况下,管道直饮水是一种很好的补充^[1-4]。管道直饮水的消毒灭菌是非常必要的,如何保持水在管网中不产生细菌或将细菌指标控制在标准范围内,是一项重要且艰巨的工作,选用消毒设备不但要考虑其杀菌速度和效果,而且还要考虑是否会产生消毒副产物等二次污染^[5]。铜绿假单胞菌作为管道生物膜中的优势菌种,其能够附着在管壁上存活,并随水流冲刷进入水中,在特定情况下可引起呼吸系统和胃肠道等多种急性和慢性感染^[6]。臭氧因对多种微生物灭活能力强、无氯味等优点而备受青睐^[7]。但是臭氧的持续消毒效果差,而且能将水中大分子有机物氧化成易生物降解的小分子有机物,造成管网中微生物再次生长和繁殖,影响水质并威胁用户健康^[8]。因此,研究建筑管道直饮水系统中臭氧浓度随时间、管网长度的衰减规律,对优化臭氧消毒工艺等具有重要意义。

根据《湖南省城市管道直饮水系统技术标准》(DBJ 43/T 382—2021)的要求,铜绿假单胞菌在250 mL水样中不得检出,管网末梢水的臭氧浓度不小于0.01 mg/L。笔者以正在运行的管道直饮水系统作为研究基地,选择铜绿假单胞菌作为控制指标进行管道直饮水系统生产运行试验,研究臭氧衰减模型,优化消毒方案及循环消毒制度,为建筑管道直饮水系统臭氧消毒的设计及运行提供参考。

1 项目概况

试验场地为学校建筑管道直饮水系统(见图1,①~⑨为取样点编号),采用下行上给的供水方式。管道直饮水系统1为大主管开支路供水模式,为4栋教学楼(1#~4#)、1栋综合办公楼(6#)和操场(7#)提供42台饮水终端机和4个户外饮水平台,通过主管

道进行供水和回水,每栋教学楼采用单独的支管供水,总管网长度约2 550 m。管道直饮水系统2为大串联式布置,为四层教学楼设置了9台饮水终端机,2~4层每层各设置3台,管网长度约260 m。

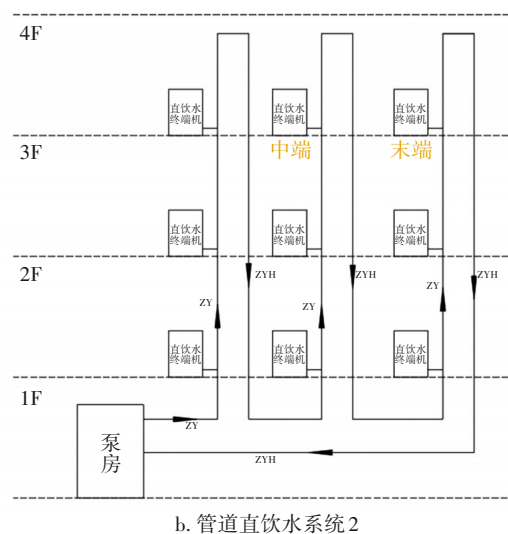
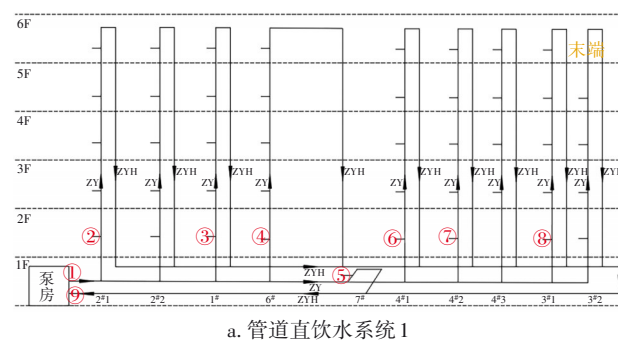


图1 管道直饮水系统示意

Fig.1 Pipeline direct drinking water system

直饮水以自来水为原水制备,依次经过石英砂过滤、活性炭过滤、精滤、纳滤、口感调节器处理后进入净水箱。在净水箱投加臭氧,经过紫外消毒后由恒压变频水泵打入循环配水管道。未使用的直饮水经过精滤处理后,回流至净水箱。

2 生产性运行试验方案

2.1 检测方法

在净水箱出口处安装传感器,通过臭氧在线监测系统实时读取净水箱中的臭氧浓度。臭氧在线监测系统如图2所示。在饮水终端机的检测点取样以后,使用臭氧检测仪进行检测,从而得到用水点的臭氧浓度。百灵达 RW 7 型便携式多参数水质检测仪检测臭氧时量程为 0.01~3.00 mg/L,当臭氧浓度<0.01 mg/L 时用 0.005 mg/L 表示。铜绿假单胞菌采用滤膜法检测,将 250 mL 水样用 0.45 μm 滤膜过滤,并将滤膜移至 CN 琼脂培养基上,于 (36±1) °C 恒温箱中培养 48 h,观察形成的菌斑数量。



图2 臭氧在线监测系统

Fig.2 On-line ozone monitoring system

2.2 臭氧浓度衰减试验

2.2.1 静态试验

净水箱中水位在最高设计液位,在不进水、不出水、不循环的工况下,通臭氧曝气一段时间后,分别在 0、5、10、15、20、25、30、45、60、90、120、150 min 时测定臭氧浓度。设置 3 批试验,初始臭氧浓度分别为 0.06、0.12、0.18 mg/L。

2.2.2 动态试验(含管道系统)

A. 净水箱中水位为 1.40 m,在不循环、不出水 ($Q=0$) 工况下,于管网最不利末端用水点采样,分别在 0、5、10、15、20、25、30、45、60、90、120、150 min 时测定臭氧浓度。

B. 在不循环、出水的工况下,改变出水流量 (Q_1 、 Q_2 、 Q_3 , 分别代表最小、平均和最大流量),于管网最不利末端用水点采样,定时测定臭氧浓度,记录末端用水点的臭氧浓度<0.01 mg/L 的时间(t)。

C. 开启循环,在不同出水流量 (Q_1 、 Q_2 、 Q_3) 下,于末端用水点采样,每隔一段时间测定臭氧浓度。

动态试验 B、C 共设置 9 组,即在不同臭氧投加

量下改变出水流量进行测试。其中,臭氧投加量分别为 0.03~0.07、0.08~0.12、0.13~0.18 mg/L, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为 14、30、46 mL/s。

2.3 循环消毒制度优化试验

以铜绿假单胞菌作为控制指标,设置臭氧投加量、每日循环次数以及每次循环时间三因素三水平正交试验,研究对铜绿假单胞菌的杀灭效果,并分析各个因素的影响程度(见表1)。

表1 正交试验设计

Tab.1 Orthogonal experiment design

工况	臭氧投加量/ (mg·L ⁻¹)	每日循环次数/次	每次循环时间/min
一	0.03~0.07	4	15
二	0.03~0.07	8	60
三	0.03~0.07	12	30
四	0.08~0.12	4	60
五	0.08~0.12	8	30
六	0.08~0.12	12	15
七	0.13~0.18	4	30
八	0.13~0.18	8	15
九	0.13~0.18	12	60

3 结果与讨论

3.1 臭氧浓度衰减静态试验

净水箱的长、宽、高分别为 1.50、1.50、2.00 m,最高设计水位为 1.40 m。在静置状态下,净水箱中的臭氧浓度随着时间的增加而衰减,在初期 1 h 内臭氧衰减较快,后期则变缓(见图3,以 0.06 mg/L 的臭氧浓度为例)。

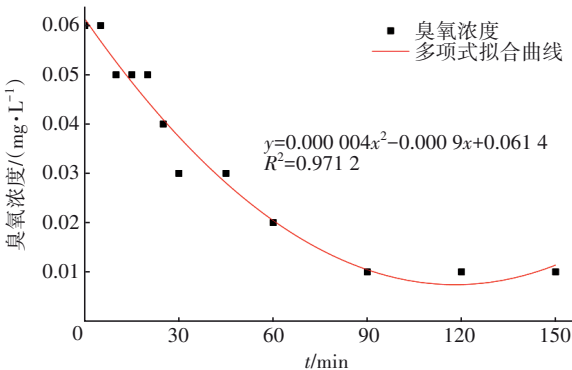


图3 臭氧浓度随时间的变化

Fig.3 Change of ozone concentration with time

臭氧浓度随着时间的衰减均符合二项式拟合曲线,初始臭氧浓度分别为 0.06、0.12、0.18 mg/L 时, R^2 分别为 0.971 2、0.989 2、0.971 4,臭氧浓度半衰

期约为30~45 min。臭氧浓度为0.12、0.18 mg/L时的拟合结果见式(1)和(2)。

$$y=0.000\ 005x^2-0.001\ 5x+0.119\ 2 \quad (1)$$

$$y=0.000\ 011x^2-0.002\ 6x+0.185\ 4 \quad (2)$$

3.2 臭氧浓度衰减动态试验 A

管道直饮水系统1末端采样点距离泵房的管道长度为300 m。为了解臭氧浓度沿管道长度的变化趋势,在管道直饮水系统2的中端和末端设置两个采样点,距离泵房的管道长度分别为163、252 m。每个采样点各设置3批试验,臭氧投加量分别为0.06、0.12、0.18 mg/L,结果如图4所示。

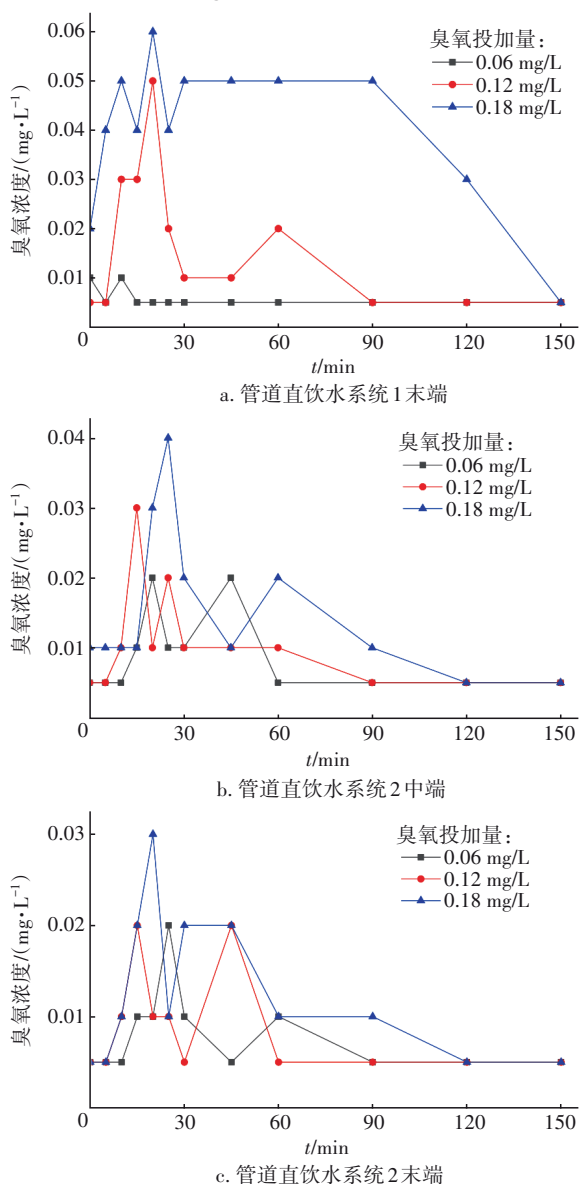


图4 用水点臭氧浓度随时间的变化

Fig.4 Change of ozone concentration at water point with time

从图4(a)可知,当泵房内管网起点臭氧投加量较低(0.06 mg/L)时,管网最不利末端用水点的臭氧浓度在150 min内一直保持着较低的水平(<0.01 mg/L);当臭氧投加量达到0.12 mg/L时,检测点的臭氧浓度在90 min后开始小于0.01 mg/L;当臭氧投加量为0.18 mg/L时,前120 min内末端的臭氧浓度保持在0.02~0.06 mg/L,150 min时开始小于0.01 mg/L。在臭氧投加量为0.12和0.18 mg/L两种情况下,检测点的臭氧浓度均在20 min时达到最高。

从图4(b)和(c)可知,当臭氧投加量相同时,管网中端和末端两个用水点的臭氧浓度在150 min内的变化趋势基本一致,且中端与末端用水点的臭氧浓度相差很小。管道直饮水系统2与系统1相比,臭氧浓度随时间的变化趋势大体一致,但不稳定且峰值偏低,臭氧峰值浓度差距为0.02~0.03 mg/L左右。在不循环、不出水工况下,用水点的臭氧主要来自泵房净水箱中臭氧的扩散作用,直饮水管道系统布置方式的不同可能是造成峰值差距的主要原因。系统2采用的是大串联布置方式,而系统1采用的是大主管开支路的布置方式。在大串联模式下,由于主管网流动边界的变化更加复杂,所需克服的阻力更大,故在一定程度上降低了臭氧的传质效率。

3.3 系统1臭氧浓度衰减动态试验 B、C

臭氧投加量为0.03~0.07 mg/L时,三种不同流量下末端用水点的臭氧浓度随时间的变化见图5。

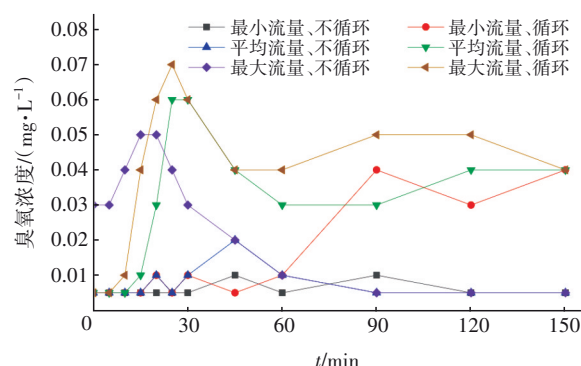


图5 臭氧投加量为0.03~0.07 mg/L时末端用水点臭氧浓度随时间的变化

Fig.5 Change of ozone concentration at the end water point with time at the ozone dosage of 0.03~0.07 mg/L

当出水流量最小时,不循环工况下末端用水点的臭氧浓度一直保持在0.01 mg/L以下,开启循环1 h后臭氧达到0.03~0.04 mg/L。当出水流量最大

时,不循环工况下末端用水点的初始臭氧浓度为 0.03 mg/L , $15\sim 20 \text{ min}$ 时达到峰值 0.05 mg/L , 60 min 后开始小于 0.01 mg/L ;开启循环 10 min 后臭氧浓度即可达到 0.01 mg/L 以上。平均流量时,不循环工况下的末端臭氧浓度与最小流量时相似,臭氧浓度只在 45 min 时达到 0.02 mg/L ,其余时间均不高于 0.01 mg/L 。开启循环后,末端臭氧浓度随时间的变化情况与最大流量时较为接近, 15 min 后臭氧浓度就达到 0.01 mg/L 以上,且均在 30 min 左右时达到峰值,随后在臭氧投加范围内波动。

臭氧投加量为 $0.08\sim 0.12 \text{ mg/L}$ 时,三种不同流量下末端用水点的臭氧浓度随时间的变化如图6所示。在不循环工况下,最小流量与平均流量时末端用水点臭氧浓度随时间的变化与臭氧投加量为 $0.03\sim 0.07 \text{ mg/L}$ 时一致,最大流量时臭氧浓度开始小于 0.01 mg/L 的时间延后到 2 h 。在循环工况下,最小流量时末端臭氧浓度达到 0.01 mg/L 的时间提前到 25 min ,最大流量时提前到 5 min 。

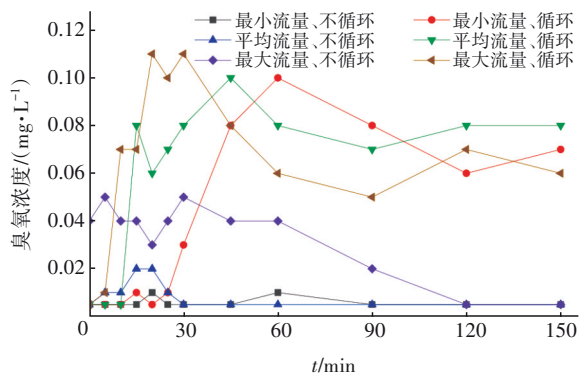


图6 臭氧投加量为 $0.08\sim 0.12 \text{ mg/L}$ 时末端用水点臭氧浓度随时间的变化

Fig.6 Change of ozone concentration at the end water point with time at the ozone dosage of $0.08\sim 0.12 \text{ mg/L}$

臭氧投加量为 $0.13\sim 0.18 \text{ mg/L}$ 时,三种不同流量下末端用水点的臭氧浓度随时间的变化情况如图7所示。在不循环工况下,当出水流量最小时末端用水点的臭氧浓度仍一直保持在 0.01 mg/L 以下;平均流量时, 45 min 以后臭氧浓度开始小于 0.01 mg/L ;最大流量时,臭氧浓度开始小于 0.01 mg/L 的时间延长到 150 min 。开启循环后 $5\sim 10 \text{ min}$,三种流量下末端用水点的臭氧浓度均已经达到 0.01 mg/L 。

综合图5~7,在循环工况下,末端点位的臭氧浓度受出水流量影响较小,均能够在 30 min 左右维持

稳定的臭氧浓度。

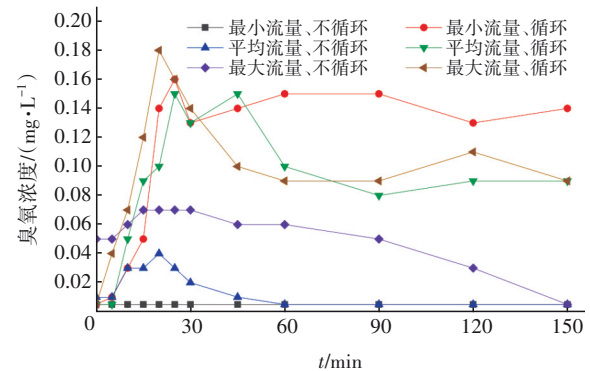
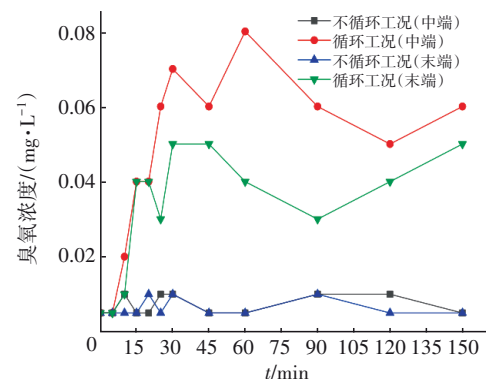


图7 臭氧投加量为 $0.13\sim 0.18 \text{ mg/L}$ 时末端用水点臭氧浓度随时间的变化

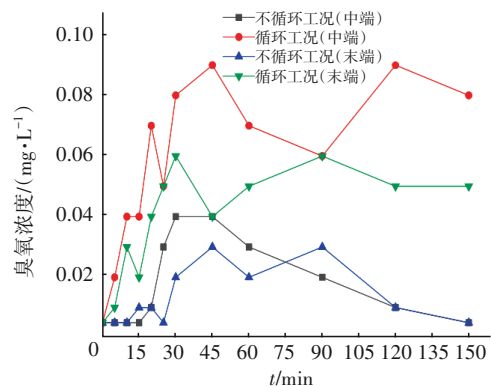
Fig.7 Change of ozone concentration at the end water point with time at the ozone dosage of $0.13\sim 0.18 \text{ mg/L}$

3.4 系统2臭氧浓度衰减动态试验B、C

管道直饮水系统2在上述三种臭氧投加量及不同流量下,中端和末端采样点的臭氧浓度随时间的变化趋势相似。在臭氧投加量为 $0.13\sim 0.18 \text{ mg/L}$ 条件下,中端和末端采样点的臭氧浓度随时间的变化如图8所示。其中,在最大流量、不循环工况下中端用水点臭氧浓度降到 0.01 mg/L 以下所需时间可以延长至 180 min 。



a. 最小流量(14 mL/s)



b. 平均流量(30 mL/s)

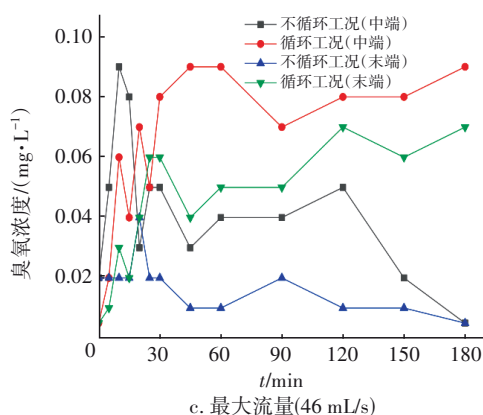


图8 臭氧投加量为0.13~0.18 mg/L时用水点臭氧浓度随时间的变化

Fig.8 Change of ozone concentration at water point with time at the ozone dosage of 0.13~0.18 mg/L

从图8可以看出,在不循环工况下,除了最大流量时中端用水点的臭氧浓度降到0.01 mg/L以下需要180 min外,其他条件下均在150 min内。循环工况下,最大流量与平均流量时用水点的臭氧浓度相差不大,均比最小流量时的臭氧浓度高。比较中端和末端两个用水点的臭氧浓度可以发现,随着管网长度的增加,臭氧浓度会有所降低,且在不循环工况下,臭氧投加量相同时,出水流量越大,中端和末端用水点的臭氧浓度相差越多。循环工况下,随着时间的增加,中端用水点的臭氧浓度较末端波动更大,甚至降低后又升高到接近峰值浓度。这是因为中端距离泵房更近,能达到的峰值浓度更高,但水流流向中端的同时又流向末端,臭氧随水流扩散到末端,造成一定损耗使浓度降低,水体流动更为复杂,导致整体波动较大。

另外,随着臭氧投加量增加,用水点的臭氧浓度也会相应提高。但开启循环后,与管道直饮水系统1相比,用水点臭氧浓度的峰值明显偏低,即使投加量达到0.13~0.18 mg/L,用水点的臭氧浓度也没有超过0.10 mg/L。分析原因,一是直饮水管道系统布置成“大串联”式,转角较多可能会导致循环不彻底,而且转角处也不利于臭氧的扩散;二是饮水终端机均布置在走廊,且背靠不完整的墙面,进行试验时室外温度达到30~35℃,温度较高会加快臭氧的衰减,导致检测出的臭氧浓度偏低。

3.5 循环消毒制度优化试验

在管道直饮水系统1设置①~⑨取样点,分别代表泵房总出水口、2栋2楼东头走廊饮水平台、2栋2

楼西头走廊饮水平台、6栋2楼东头走廊饮水平台、7栋操场饮水平台、4栋2楼东头走廊饮水平台、4栋2楼中间走廊饮水平台、3栋2楼东头走廊饮水平台、泵房回水管。检测结果见表2。

表2 循环消毒制度优化试验结果

Tab.2 Results of optimization test of circulating disinfection system

工况	铜绿假单胞菌/(CFU·250 mL ⁻¹)	菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	臭氧浓度/(mg·L ⁻¹)	取样点
一	0	0~26	0.04~0.01	①③
	1	15~38	0.02~0.01	②⑥
	2	48	0.01	⑤
	3	57	0	⑦
	4	19	0	④
	6	46	0	⑧
	13	85	0	⑨
二	0	0~20	0.06~0.01	①③⑤⑦
	1	6~25	0.04~0.02	②④⑥
	3	34	0.02	⑧
	6	38	0.02	⑨
三	0	0~17	0.06~0.03	①②③④⑥⑦
	2	12~28	0.03	⑤⑧
	3	25	0.03	⑨
四	0	0~9	0.09~0.02	①②③⑥
	1	12	0.04	⑤
	2	5~7	0.04~0.03	④⑦
	4	6	0.05	⑧
	13	49	0.02	⑨
五	0	0~4	0.11~0.05	①②③④⑥⑦
	1	5	0.07	⑤
	2	12	0.06	⑧
	3	8	0.05	⑨
六	0	0~8	0.11~0.07	①③④⑥⑦
	1	14	0.04	⑧
	2	25	0.08	⑨
	3	0~2	0.07~0.06	②⑤
七	0	0~3	0.14~0.08	①②③④⑥⑦⑨
	1	5	0.14	⑤
	2	0	0.07	⑧
八	0	0~3	0.16~0.11	①②③⑥⑦⑧⑨
	1	0~4	0.13~0.09	④⑤
九	0	0~2	0.17~0.12	①②③④⑥⑦⑧⑨
	1	0	0.13	⑤

由表2可知,所有工况下泵房总出水口均无铜绿假单胞菌检出,相反,泵房回水管中检测到的铜绿假单胞菌最多。随着臭氧投加量的增加,菌落总数和铜绿假单胞菌有所减少,无铜绿假单胞菌检出的用水点随之增多,且用水点的臭氧浓度更高。除

了臭氧投加量为0.03~0.07 mg/L、每日循环4次、每次循环15 min的工况一,菌落总数均在限值50 CFU/mL内。通过对比工况三和工况四,发现增加循环次数也可以有效控制铜绿假单胞菌。工况三、工况五和工况六中,9个取样点检测出的铜绿假单胞菌总数少于10 CFU/250 mL,工况七、工况八和工况九更是接近于0。总体来看,对菌落总数和铜绿假单胞菌检出的影响程度为臭氧投加量>每日循环次数>每次循环时间。

4 结论

① 净水箱中臭氧浓度随时间的衰减符合二项式拟合曲线,静态条件下净水箱中臭氧浓度随时间衰减的半衰期约为30~45 min。净水箱中臭氧初始浓度分别为0.06、0.12、0.18 mg/L时,静置120 min后臭氧残留浓度均在0.01 mg/L以上。

② 净水箱中臭氧投加量分别为0.06、0.12、0.18 mg/L时,在不循环、不出水工况下,用水点的臭氧浓度先随时间增加而增加,一段时间后开始下降,150 min后均小于0.01 mg/L。

③ 大主管开支路供水模式的管道直饮水系统1,在出水、不循环工况下,随着出水流量或臭氧投加量的增加,用水点的臭氧浓度降低到0.01 mg/L以下所需的时间相应增加。开启循环后,出水流量越大或臭氧投加量越大,末端臭氧浓度达到0.01 mg/L所需的时间越短。

④ 对菌落总数和铜绿假单胞菌检出的影响程度为臭氧投加量>每日循环次数>每次循环时间。当臭氧投加量达到0.13~0.18 mg/L、每日循环8次、每次循环15 min时,用水点检测到的铜绿假单胞菌数基本为0。

参考文献:

- [1] KHAN S, SHAHNAZ M, JEHAN N, *et al.* Drinking water quality and human health risk in Charsadda District, Pakistan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 60: 93-101.
- [2] 方芳. 大学校园管道直饮水系统的设计和运行效果 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(24): 71-75.
- FANG Fang. Design and operation performance of

pipeline direct drinking water system in university campus [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(24): 71-75 (in Chinese).

- [3] 苏利明. 某小区直饮水系统设计与经济效益分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- SU Liming. Design and Economic Benefit Analysis of Direct Drinking Water System in a Residential Area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021 (in Chinese).
- [4] 张尧钧. 管道直饮水系统分析与工程应用 [J]. *智慧城市*, 2021, 7(2): 53-54.
- ZHANG Yaojun. Analysis and engineering application of pipeline direct drinking water system [J]. *Intelligent City*, 2021, 7(2): 53-54 (in Chinese).
- [5] GALL A M, MARINAS B J, LU Y, *et al.* Waterborne viruses: a barrier to safe drinking water [J]. *PLoS Pathogens*, 2015, 11(6): e1004867.
- [6] NEWMAN J N, FLOYD R V, FOTHERGILL J L. Invasion and diversity in *Pseudomonas aeruginosa* urinary tract infections [J]. *Journal of Medical Microbiology*, 2022, 71(3): 001458.
- [7] 刘满苍, 刘行刚, 谢薇, 等. 饮用水臭氧消毒生物稳定性影响因素及其控制 [J]. *中国农村水利水电*, 2019 (12): 115-117, 123.
- LIU Mancang, LIU Xinggang, XIE Wei, *et al.* Factors affecting biological stability of ozone disinfection of drinking water and its control [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019 (12): 115-117, 123 (in Chinese).
- [8] 鄢元波, 贾燕南, 丁昆仑, 等. 臭氧消毒对村镇饮用水生物稳定性的影响 [J]. *中国农村水利水电*, 2016 (3): 100-103, 106.
- YAN Yuanbo, JIA Yannan, DING Kunlun, *et al.* Effect of ozone disinfection on biological stability of drinking water in villages and towns [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(3): 100-103, 106 (in Chinese).

作者简介: 柯水洲(1964—), 男, 湖北鄂州人, 硕士, 教授, 主要研究方向为给水与废水处理技术、给排水系统优化等。

E-mail: ksz@hnu.edu.cn

收稿日期: 2024-01-29

修回日期: 2024-03-11

(编辑: 李德强)