

李柱. 水厂 HACCP 体系的关键控制点确定及在臭氧投加控制中的应用实践[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 72-76,93.

LI Z. Application practice of CCPs determination and ozone dosing control in HACCP system of WTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 72-76,93.

水厂 HACCP 体系的关键控制点确定及在臭氧投加控制中的应用实践

李 柱*

(上海城投水务<集团>有限公司制水分公司,上海 200086)

摘 要 文章介绍了危害分析和关键控制点(HACCP)体系的基本原理及其在城市供水系统中应用进展,为建立稳定的制水全过程控制方法和预防为先的风险管控手段,上海某水厂引入了 HACCP 体系,并详细论述其体系建立、贯标和实施的全过程,详细阐述了关键控制点(CCPs)的辨识确立过程以及闭环控制措施,并以水厂过程工艺 CCPs 后臭氧投加量为例,通过全光谱分析仪作为在线实时检测手段,有效实现臭氧投加与过程水水质的反馈闭环控制,达到了实时纠偏并即时验证效果,余臭氧值稳定控制在 0.07~0.10 mg/L,较传统液氧投加成本下降 5.1%,体现了 HACCP 体系在水厂生产过程中的质量管控和降低安全风险的重要性,为水厂精细化管理提供了参考,并提出了进一步结合先进的数字化技术及数学模型赋能提高 CCPs 的预测和预警能力的设想。

关键词 危害分析和关键控制点(HACCP)体系 关键控制点 水厂 水质 纠偏

中图分类号: TU991 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2024)10-0072-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.10.009

Application Practice of CCPs Determination and Ozone Dosing Control in HACCP System of WTP

LI Zhu*

(Water Production Branch, Shanghai Chengtou Water <Group> Co., Ltd., Shanghai 200086, China)

Abstract This paper introduces the basic principles of the hazard analysis and critical control point (HACCP) system and its application progress in urban water supply systems. In order to establish a stable control method for the entire water production process and a risk control method that prioritizes prevention, a water treatment plant(WTP) in Shanghai has introduced the HACCP system and elaborated on the entire process of its establishment, standardization, and implementation. It also elaborates on the identification and establishment process of critical control points(CCPs) and closed-loop control measures. Taking the ozone dosage after the key point of process control in the WTP as an example, a full spectrum analyzer is used as an online real-time detection method. The effective implementation of feedback closed-loop control between ozone addition and process water quality has achieved real-time correction and verification effects. The residual ozone value is stably controlled between 0.07~0.10 mg/L, which is a 5.1% reduction in cost compared to traditional liquid oxygen addition. This reflects the importance of HACCP system in quality management and reducing safety risks in the production process of WTPs, providing a reference for refined management of WTPs. And it proposes the idea of further combining advanced digital technology and mathematical models to empower and improve the prediction and early warning capabilities of key control points.

Keywords hazard analysis and critical control point(HACCP) system critical control point(CCP) water treatment plant (WTP) water quality corrective deviation

危害分析和关键控制点(hazard analysis and

critical control point,HACCP)是以科学为基础,作为鉴别、评价和控制对食品安全至关重要的危害的一种当前比较通用型管理体系,它确保食品在生产、加工、制造、准备和食用等过程中的安全。该体系于

[收稿日期] 2022-12-10

[通信作者] 李柱(1980—),男,高级工程师,主要从事水厂运维管理与数字化转型工作,E-mail:lizhu992@126.com。

1994年用于城市给水系统,按照 HACCP 体系的应用程序,以控制微生物污染为目标,对城市给水系统流程进行了探索性的分析和评价。随着经济的发展、人民生活水平的提高,国内目前也已经有不少城市在供水系统中引入 HACCP 体系,在上海水源地的管理中也引入了 HACCP 体系,为水源地的精细化管理拓展了思路^[1]。上海城投水务集团下属的某水厂自引入 HACCP 体系后实施至今已逾两年,该厂建立了稳定的制水全过程控制方法和预防为先的风险管控手段,特别在臭氧投加管控方面显著提升了过程水水质管理和抗风险能力。

本文选取了上海某水厂 HACCP 体系中辨识出来的后臭氧投加量关键控制点(CCPs)为案例,按照体系的应用程序分析总结实践经验和成熟做法。

1 HACCP 体系构建过程

1.1 水厂 HACCP 体系框架

该水厂遵照《危害分析与关键控制点(HACCP)体系 食品生产企业通用要求》(GB/T 27341—2009)、《食品生产通用卫生规范》(GB 14881—2013)及《危害分析与关键控制点(HACCP)体系认证补充要求 1.0》为认证依据,并结合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)、上海市《生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2018)等水质标准开展体系构建工作。水厂体系建设与管理从体系的策划、体系运行实施、审核验证及持续改进方面着手,贯穿净水生产与运维全过程,围绕危害分析、评价危害并确定 CCPs、建立所确定 CCPs 的限值、对 CCPs 进行监控、建立纠偏程序、建立有效的记录及保存系统、建立验证程序 7 个原理展开。并在企业原有的质量、职业健康安全和环境标准化体系中增加了企业的食品安全方针,即至诚制水(包括树立食品质量安全意识、遵法守则、崇道尚德、诚实守信,将食品质量安全标准贯彻落实到制水生产运行全过程)和安全卫生(高度重视制水全过程食品安全卫生,树立良好的食品安全卫生质量意识,杜绝制水安全卫生事故,保证出厂水的安全卫生)。该水厂在企业原有的标准化体系文件中增加了《食品防护计划及控制规程》《危害分析控制规程》等 8 个管理规程以及 6 类记录表单,并定期开展体系审核工作。

1.2 水厂 CCPs 确定方法与计算

在确定 CCPs 前要做好 3 个方面工作:一是对

最终提供的自来水(出厂水)的描述,主要从生物、化学、物理特性,包装方式,预期用途,保质期,顾客/消费者期望等方面论证终产品的必备条件;二是对与产品加工生产所接触的原材料、辅料的描述,主要包括原水、活性炭、石英砂、混凝剂、消毒剂、管材等方面;三是开展工艺描述,要涵盖净水处理、污水收集、污泥脱水、药剂配置及尾气排放等全流程^[2]。

危害分析工作是 CCPs 排摸和确定的关键环节,通过不同专业背景 HACCP 体系小组成员的评定和分析,以工艺步骤为主线,从“生物性、化学性、物理性”3 个要素来分析可能引入的危害物以及来源^[3],并可以通过风险矩阵分析法(LS)确定风险系数和危害程度,从而评定出显著危害。对于显著危害要进一步分析可采取的控制措施,通过采用国际食品法典委员会推荐的决策树分析技术确定 CCPs^[4]。危害程度分析中风险系数计算如式(1),危险分析表以原水水质、后臭氧和消毒 3 个工艺环节为例进行分析计算,结果如表 1 所示。根据危害程序分析结果,确定相应控制措施分类,其实显著危害项目采用 CCPs 控制,其他非显著危害项目通过前提方案(PRP)控制。

$$P = LS \quad (1)$$

其中: P ——风险系数,水厂设置 $P \geq 4$ 为显著危害;

L ——风险发生可能性;

S ——风险发生的严重性。

1.3 CCPs 分析与控制

鉴于臭氧含量不足或过量臭氧气体与原料中的溴化物反应引入溴酸盐的风险,同时次氯酸钠投加过量引起在生物性和化学性两方面的风险。故通过危害分析和 CCPs 辨识,该水厂确定了两个 CCPs,其一是后臭氧投加环节,其二是消毒环节。

水厂对于两个 CCPs 点从关键限值、监控(对象、方法、频率、人员)、纠偏行为、记录、验证 5 个环节加强对 CCPs 点的控制。后臭氧投加量根据原水水质一般控制在 0.2~2.5 mg/L,余臭氧控制目标设定在 0.05~0.10 mg/L。次氯酸钠一般投加量控制在 0.5~3.0 mg/L,硫酸铵加注量为 0.2~0.7 mg/L,余氯控制目标为 0.5~2.0 mg/L。控制措施通过投加量曲线监控、取样检测余量、投诉回顾、记录评审

等方式确保 CCPs 点控制有效。以后臭氧控制方案 为例来论述投加系统优化控制方法,如表 2 所示。

表 1 危害分析
Tab. 1 Hazard Analysis

工艺步骤	被引入、增加或控制的危害		危害来源	危害程度分析				本步骤控制措施	后续控制措施	措施分类 CCPs/PRP
				L	S	P	是否显著危害			
青草沙 原水	生物性	水生物、大肠杆菌等	原水中引入	1	3	3	否	定期对原水水质进行检测、设施设备定期维护	消毒	PRP
	化学性	无	无	1	1	1	否	无	无	PRP
	物理性	异物	原水引入、管道破损	1	1	1	否	格栅拦截	砂滤	PRP
后臭氧	生物性	虫害、致病微生物	外部环境、人员引入	2	2	4	是	安装盖板,定期清洗维护	炭滤、消毒	CCPs
	化学性	溴酸盐	臭氧含量不足或过量 臭氧气体与原料中的 溴化物反应引入	2	3	6	是	严格根据原水流量与过程水中 余臭氧浓度调整臭氧投加量, 并实时监控	无	CCPs
	物理性	塑料、金属等 异物	设备损坏,管道破损	1	1	1	否	定期维护设备与管道	炭滤	PRP
消毒	生物性	虫害、致病微生物	人员、外部环境引入, 消毒剂添加不足引入	2	3	6	是	加强巡检,定期清洗构筑物,安 装防虫设备,严格按照流量比 例投加,实时监控余氯浓度	无	CCPs
	化学性	游离氯过高	消毒剂投加过量	2	3	6	是	严格按照流量比例投加,实时 监控余氯浓度	无	CCPs
	物理性	异物	外部环境、人员引入、 设备损坏	1	1	1	否	加强巡检,定期清洗和维护池 体与机泵设备	无	PRP

表 2 后臭氧控制方案
Tab. 2 Scheme of Post-Ozone Control

指标	方案
CCPs	后臭氧
显著危害	化学性危害:毒性有机物残留或过高臭氧含量导致致癌性臭氧副产物溴酸盐产生
关键限值	后臭氧投加量为 0.2~2.5 mg/L(实际投加量根据待处理水的水质状况并结合试验结果和投加后水中剩余臭氧反馈量确定)
监控	对象 后臭氧自动投加量 方法 自动读数 频率 连续 人员 在线仪表
纠偏行动	如果投加量不满足要求,臭氧系统发生报警,并自动调整臭氧加注量至可接受水平,受影响的产品经过评估后报废排空处置,不允许进入下一工序
记录	臭氧系统运行曲线
验证	①运行工程师每 4 h 复核后臭氧投加量;②出厂水质检测及第三方检测;③监视测量设备的年度校准;④日常记录评审、投诉回顾等

2 后臭氧投加系统优化控制

2.1 臭氧投加系统介绍

水厂采用臭氧生物活性炭联用深度处理工艺,臭氧的作用主要是氧化分解有机物、减少可溶性有机碳(DOC)和 UV_{254} 等的浓度,将大分子有机物降

解为小分子有机物,有利于活性炭吸附,并提高可同化有机碳(AOC)的含量^[5],在后臭氧投加环节若是过量,可能导致甲醛、溴酸盐等消毒副产物生成,并会杀灭生物活性炭池中的微生物。2018年,上海市《生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2018)中,

将溴酸盐限值下调至《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中限值的 1/2,为 0.005 mg/L,也是《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中限值 0.01 mg/L 的 1/2。一旦发生溴酸盐超标,对于深度处理水厂而言会加大后续进一步分解处理和追踪分析的难度,造成不必要的经济损失,故对于臭氧生物活性炭水厂,精准控制后臭氧投加量十分必要。

2.2 余臭氧检测方式比较及全光谱分析仪应用

目前,余臭氧检测主要采用手工测定和在线监测,臭氧在水中的稳定性差,半衰期短,故传统的在线监测方法中很难实现精准检测,使用臭氧投加的水厂往往面临余臭氧仪维护要求高、数值反馈易受干扰,受限检测点位和取样点位的物理距离限制难以精确检测等困难,难以实时在线提供准确的投

加工艺指导。臭氧投加多采用经验数据或过量投加,既造成过程水生产控制隐患也会带来物料的过度消耗,一旦发生原水水质突变等情况,人工经验调整往往难以及时有效调整臭氧加量,对出厂水水质带来不可控风险。该水厂结合技术改造,采用全光谱扫描光度法对一条产线的后臭氧投加开展管控和监测试验。针对全光谱扫描光度法测定低质量浓度臭氧(≤ 0.2 mg/L)具有测定灵敏度高、响应速度快的特点^[6],水厂通过原位安装保证其取样点与检测点水力时程控制在 3 min 以内,流通式进水以及配置超声波清洗器实现就地实时检测功能。经一个月连续与便携式余臭氧检测仪器取样对比分析,线性相关系数 R^2 达到 0.83(图 1),具备臭氧投加系统控制的工程可行性。

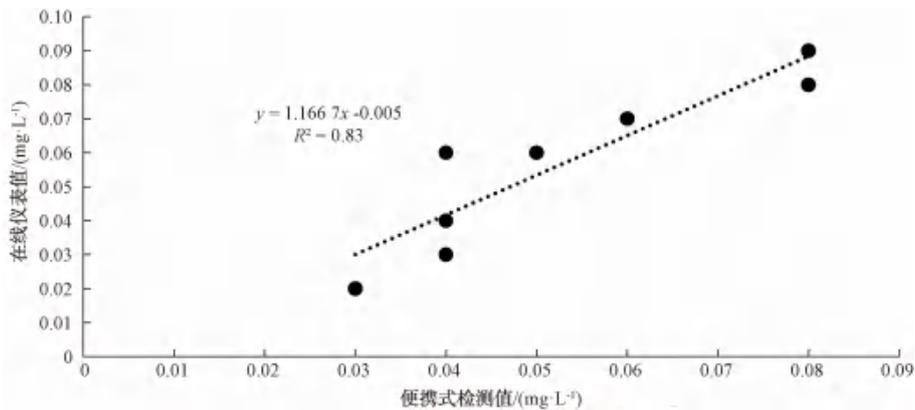


图 1 便携式与在线式检测数据线性分析

Fig. 1 Linear Analysis of Portable and Online Detection Data

该水厂臭氧投加系统通过 PID 程序采集全光谱在线监测仪的数据,并优化调整控制参数,其中 set point(SP)设定 0.08 mg/L, process value(PV)设定 0.09 mg/L, output(Out)设定 93%,通过 4 月数据采集与监视控制(SCADA)系统的持续跟踪,余臭氧质量浓度可以稳定控制在 0.07~0.10 mg/L(图 2)。

同时液氧的投加量因为精准化控制减少了过度投加,制水液氧单耗同比从 10.52 kg/km³ 下降至 9.98 kg/km³,动态药剂成本下降率 5.1%左右。

2.3 后臭氧 CCPs 纠偏与验证

采取全光谱在线监测仪后仍需要验证反馈控制的有效性以及在触发 CCPs 临界点后的纠偏能力。

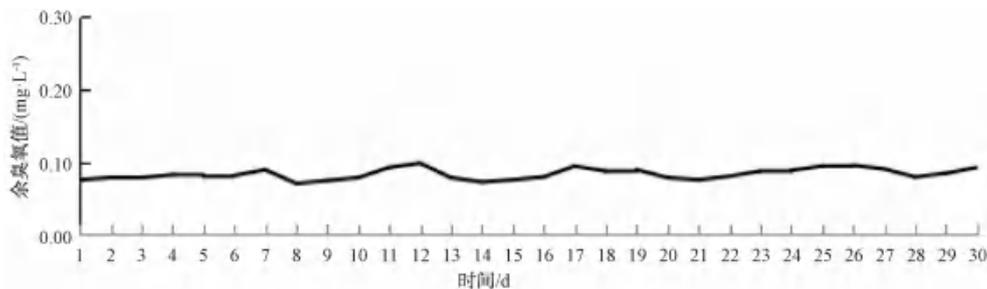


图 2 余臭氧在线控制

Fig. 2 Online Control of Residual Ozone

故在产线大检修期间,在供水水质可控情况下,水厂进行了生产性实践,将臭氧加注率从 0.25 mg/L 逐步调整至 0.45 mg/L。过程水监测表明,在进水量维持不变的情况下,后臭氧出水中的余臭氧质量浓度 0.01 mg/L 逐渐升高至 0.06 mg/L,并无进一步

升高。随着进水水量的下降,余臭氧浓度同时出现下降,至试验结束下降至 0.01 mg/L 左右,由此可知,余臭氧浓度的变化与后臭氧加注率的变化呈正相关,相关系数为 0.85(图 3)。

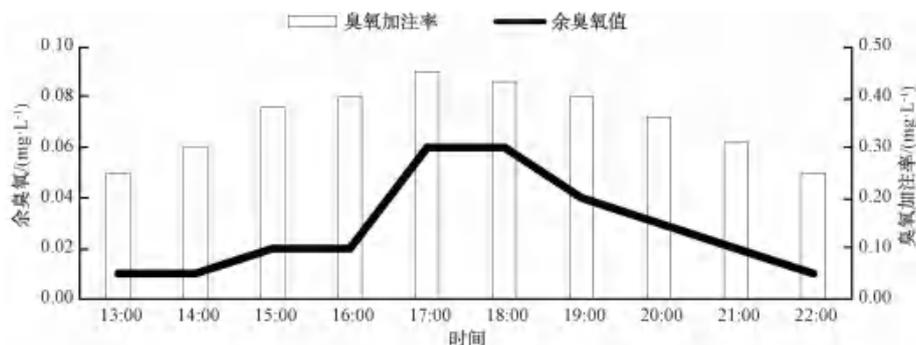


图 3 在线监测有效性验证

Fig. 3 Effectiveness Validation of Online Monitoring

水厂自 2020 年 1 月正式采用全光谱在线监测仪参与臭氧投加控制,有效地优化了投加量,通过使用前后 3 个月的水质检测报告表明,溴酸盐

值 <0.0020 mg/L,三氯甲烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三卤甲烷(总量)指标均有所下降(表 3)。

表 3 相关水质指标前后对比

Tab. 3 Comparison of Related Water Quality Indices

水质指标	三氯甲烷	一氯二溴甲烷	二氯一溴甲烷	三卤甲烷(总量)
2019 年 10 月—2019 年 12 月均值	0.006 59 mg/L	0.002 05 mg/L	0.003 34 mg/L	0.203 67
2020 年 1 月—2021 年 3 月均值	0.005 14 mg/L	0.001 77 mg/L	0.003 14 mg/L	0.175 67
下降幅度	22.00%	13.66%	5.99%	13.75%

通过全光谱在线监测仪的精准检测、合理设置 PLC 控制程序的参数,在确保余臭氧保持在合理的范围后还能有效地降低臭氧的投加量,在生产成本控制方面也发挥了较好的作用,据生产数据统计臭氧消耗量下降约 8%。

3 结论与建议

(1)该水厂将 HACCP 体系应用到水厂生产全过程管控环节中,围绕体系构建原理和步骤简要介绍了结合水厂特点认证的过程,并应用风险矩阵分析法和决策树分析技术建立了 CCPs,并列出了关键限值、控制方案和监控措施等。

(2)该水厂将全光谱在线检测仪应用于检测余臭氧值并实现与投加系统的闭环反馈控制,通过参数的优化和调整,实现了余臭氧的控制精准化和生产成本的下降,为深度处理工艺水厂的臭氧活性炭工艺管理提供了参考和借鉴。

(3)HACCP 体系主要从食品安全的角度来约

束企业生产行为,作为一种安全管控手段,能够实现事前安全控制,适应范围广泛,但要充分与企业的质量管理体系、职业健康安全管理体系等现行标准充分融合,在制度编制、台账记录和实时管控方面可以相互补充、互为一体。

(4)HACCP 体系是实现自来水直饮、提升人民健康水平的重要的管理手段,应进一步结合当前数字化转型以及数学模型赋能的大趋势,提高 CCPs 的预测和预警能力,从而可以进一步提升精细化、智能化的控制水平。

参考文献

- [1] 顾晨. HACCP 体系在上海水源地管理中的创新与应用[J]. 净水技术, 2023, 42(7): 1-7.
GU C. Innovation and application of HACCP system in Shanghai water source management [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7): 1-7.

(下转第 93 页)

- permeable polyester loose nanofiltration membranes tailored by natural carbohydrates for effective dye/salt fractionation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126716. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126716.
- [7] ZHU X, SUN Z, TAN F, et al. Xylitol-based polyester loose nanofiltration membranes with outstanding water permeance and efficient dye desalination performance [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 334: 126048. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.126048.
- [8] 郝文冉, 来存贤, 朱学武, 等. 超滤-纳滤双膜工艺深度净化天然雨水试验[J]. *净水技术*, 2024, 43(1): 74-80.
HAO W R, LAI C X, ZHU X W, et al. Experiment of UF-NF hybrid membrane process of advanced purification for natural rainwater[J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(1): 74-80.
- [9] SUN Z, ZHU X, TAN F, et al. Poly(vinyl alcohol)-based highly permeable TFC nanofiltration membranes for selective dye/salt separation[J]. *Desalination*, 2023, 553: 116479. DOI: 10.1016/j.desal.2023.116479.
- [10] ZHU X, SUN Z, TAN F, et al. Tailoring high-performance polyester loose nanofiltration membrane for selective separation of salt/dyes; The equilibrium of condensation and hydrolysis[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 333: 125848. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125848.
- [11] ZHU X W, SUN Z Y, XU J T, et al. Poly(vinyl alcohol)-based polyester nanofiltration membranes for fractionation of dye/salt mixtures; Alcoholysis degree matters [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 328: 125076. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125076.
- [12] 朱学武, 党敏, 甘振东, 等. 超滤-纳滤双膜工艺深度处理南四湖水中试研究[J]. *给水排水*, 2018, 44(3): 28-32.
ZHU X W, DANG M, GAN Z D, et al. Pilot study on advanced treatment of Nansi Lake water by UF-NF hybrid membrane process[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(3): 28-32.
- [13] FAN Q, CHENG X, ZHU X, et al. Secondary wastewater treatment using peroxymonosulfate activated by a carbon nanofiber supported Co_3O_4 ($\text{Co}_3\text{O}_4 @ \text{CNF}$) catalyst combined with ultrafiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 287: 120579. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.120579.
- [14] LIAN J, CHENG X, ZHU X, et al. Mutual activation between ferrate and calcium sulfite for surface water pre-treatment and ultrafiltration membrane fouling control[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159893.
- [15] LAI C, ZHU X, LI J, et al. pH-regulated interfacially polymerized nanofiltration membranes to achieve high separation of NOM and moderate desalination for purifying ground water [J]. *Desalination*, 2022, 544: 116148. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116148.
- [16] 樊庆水. 纳米碳负载钴型催化剂活化过硫酸盐协同膜滤净化二级出水研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
FAN Q S. Study on purification of secondary effluent by nano-carbon supported cobalt catalysts activated peroxymonosulfate coupled with UF membrane [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [17] WANG J, CHENG X, LI P, et al. Activation of peroxymonosulfate with biochar-supported CuO ($\text{CuO} @ \text{BC}$) for natural organic matter removal and membrane fouling control[J]. *Chemosphere*, 2023, 341: 140044. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140044.
- [18] CHENG X, LIAN J, REN Z, et al. Coupling sodium percarbonate (SPC) oxidation and coagulation for membrane fouling mitigation in algae-laden water treatment [J]. *Water Research*, 2021, 204: 117622. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117622.

(上接第 76 页)

- [2] 农晋琦, 张金松, 李悦. HACCP 体系在制水生产全流程的构建与应用[J]. *供水技术*, 2022, 16(5): 162-169.
NONG J Q, ZHANG J S, LI Y. The HACCP system construction and application in the whole process of water production [J]. *Water Technology*, 2022, 16(5): 162-169.
- [3] 刘立. HACCP 体系在自来水生产和输送过程中的应用[J]. *科技创新与技术*, 2020(33): 160-161.
LIU L. The application of HACCP system in the production and transportation of tap water [J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(33): 160-161.
- [4] 孙傅, 陈吉宁, 曾思育. HACCP 体系用于给水处理厂浊度控制的研究[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(13): 1-6.
SUN F, CHEN J N, ZENG S Y. Application of HACCP system to turbidity control in conventional waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(13): 1-6.
- [5] 董秉直, 张佳丽, 何畅. 臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1837-1844.
DONG B Z, ZHANG J L, HE C. Influencing factors of assimilable organic carbon (AOC) formation in drinking water during ozonation process[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1837-1844.
- [6] 尹铁凤, 蒋增辉, 江文华. 水中臭氧全光谱扫描光度法在线监测系统比对和应用研究[J]. *供水技术*, 2021, 15(2): 19-22.
YIN Y S, JIANG Z H, JIANG W H. Comparison and application of online monitoring system for ozone in water by full spectrum scanning spectrophotometry [J]. *Water Technology*, 2021, 15(2): 19-22.