

许皓, 赵蓓, 汪洋, 等. 北方某市不同水源及工艺给水系统微生物处理效果比较[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 71-80.

XU H, ZHAO B, WANG Y. Comparison of microbes removal efficacy of different water treatment process systems and different water sources in a northern City [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 71-80.

北方某市不同水源及工艺给水系统微生物处理效果比较

许皓, 赵蓓*, 汪洋, 李相宜, 蔡佳男, 杨杨, 李玉仙

(北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100031)

摘要 【目的】随着我国饮用水水质标准不断完善, 给水微生物安全性和风险管控要求日益提高, 当前对净水工艺各单元微生物去除效果的研究报道较少, 比较各单元对微生物的去除效果可使水厂根据实际情况有针对性地调节各工艺单元。【方法】文章选取北方某市 1 个以地下水为水源的水厂和 2 个采用不同处理工艺的以地表水为水源的水厂, 采集全年 4 个季节全工艺单元出水和这 3 个水厂供水范围内不同输送距离的供水管网水样, 检测了菌落总数、总大肠菌群、大肠埃希氏菌、肠球菌和嗜肺军团菌 5 项指标, 结合浑浊度和溶解性有机碳 (DOC) 等水质指标, 研究水厂常规处理工艺和深度处理工艺在保障微生物安全性方面的作用, 比较各工艺单元对特定微生物的去除效果。【结果】研究发现, 远距离外调水源总大肠菌群和大肠埃希氏菌的检出率高于另 2 个水厂, 经各处理单元, 到主加氯工艺均可实现 100% 去除。预氧化工艺的接触时间对微生物的去除效果有直接影响。煤滤池反洗水检出肠球菌, 建议将肠球菌作为增强检测指标。超滤工艺能在原水和前置工艺出水水质波动时, 保障菌落总数稳定的去除率。【结论】水厂处理各工艺对水源中微生物均有较好的处理效果, 建议加强管网末端游离氯监测, 并在高温季节调节出厂主加氯量等工艺参数, 保障从源头到龙头的微生物安全。

关键词 微生物安全性 净水工艺 供水管网 (DWDS) 氯消毒 超滤

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)04-0071-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.009

Comparison of Microbes Removal Efficacy of Different Water Treatment Process Systems and Different Water Sources in a Northern City

XU Hao, ZHAO Bei*, WANG Yang, LI Xiangyi, CAI Jianan, YANG Yang, LI Yuxian

(Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract [Objective] With the continuous improvement of China's drinking water quality standards, the requirements for microbial safety and risk control in water supply have become increasingly stringent. However, there are limited studies on the microbial removal efficiency of individual units in water treatment processes. Comparing the microbial removal effects of different units can help water plants optimize their process parameters based on actual conditions. [Methods] This study selected one water treatment plants (WTPs) that used groundwater as its source of water and two WTPs with different treatment processes that used surface water as its source of water in a northern City. Water samples were collected from all process units across four seasons, as well as from distribution networks at varying distances from these plants. Five indices were detected, including heterotrophic plate count, total coliform, *Escherichia coli* (*E. coli*), *Enterococcus* and *Legionella pneumophila*, alongside turbidity and dissolved organic carbon (DOC). The study evaluated the roles of conventional and advanced treatment processes in ensuring microbial safety and compared the removal efficiencies of specific microorganisms across process units. [Results] The study found that externally transferred water sources showed higher detection rates of total coliforms and *E. coli* than that in the other two WTPs, and 100% removal could be achieved by the main chlorination process through each treatment unit. Contact time in pre-oxidation processes directly affected microbial removal efficiency. *Enterococcus* was detected in sand filter backwash water, suggesting it should be included as an enhanced

[收稿日期] 2024-05-27

[基金项目] 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室开放基金课题(21K01KLDWST)

[作者简介] 许皓(1994—), 女, 给水排水工程师, 研究方向为供水保障, E-mail: xhft0138@126.com。

[通信作者] 赵蓓(1983—), 女, 博士研究生, 正高级工程师, 研究方向为供水管网水质保障技术, E-mail: zhaobei_10@126.com。

monitoring indicator. Ultrafiltration ensured stable removal of total bacterial count despite fluctuations in raw water quality. [Conclusion] All treatment units effectively reduced microbial risks. It is recommended to strengthen free chlorine monitoring at pipe network endpoints and adjust primary chlorination dosages during high-temperature seasons.

Keywords microbial safety water purification process drinking water distribution system (DWDS) chlorine disinfection ultrafiltration(UF)

联合国指出,全世界约 80%的疾病都与饮用水水质不良有关^[1]。随着饮用水水质标准不断完善,水厂微生物风险管控面临更高的要求。近 5 年来,国内外对净水工艺处理效果的研究侧重于消毒副产物、有机污染物、微塑料和抗生素等新兴污染物,对饮用水微生物风险的研究不多,且多集中在特定工艺或特定组合工艺对微生物的去除效果上。2018 年,葛英亮^[2]对常规净水工艺单元及臭氧-生物活性炭深度处理工艺的微生物风险进行了研究,认为炭滤单元出水中可能存在的常见致病菌和条件致病菌主要来源于该单元进水,相关工艺对其种类影响不明显,但可使部分菌的丰度发生明显变化,特别是反冲洗结束初期,出水有致病菌和条件致病菌丰度增加、消毒负担加重的现象。侯鸾凤^[3]对南方一采用常规处理工艺的水厂进行了微生物多样性分析,认为季节性变化对各处理环节出水的生物量与生物活性无显著影响,炭砂滤池存在潜在生物泄漏隐患。2019 年,胡万超等^[4]研究了快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能,认为快速砂滤池对水质转化的贡献较大。2020 年,韩梅等^[5]对以“南水”为水源及多水源供水的水厂清水池进行了微生物群落结构的解析,提出提高清水池的冲洗频率,加强生物活性炭池反洗强度等措施。蔡广强等^[6]研究了南方一常规处理工艺水厂处理工艺过程中细菌群落的时空分布和动态变化规律,指出常规处理工艺夏季对各水质指标的去除率高于冬季、混凝沉淀和消毒是影响细菌群落多样性的主要工艺单元。

针对供水管网的微生物稳定性,多数研究均无法跟踪实际出厂水在管网中的微生物变化情况。2024 年,朱海龙等^[7]采用生物膜环状反应器模拟实际供水管网,认为金属膜过滤工艺可有效保障供水管网饮用水水质生物稳定性。李成卓^[8]采用生物膜反应器模拟了紫外(UV)-氯消毒对供水管网生物膜的影响。

当前对净水工艺各单元微生物去除效果的研究多以单项工艺为主,缺乏代表性和系统性。文章按

水源、净水工艺、供水管网的顺序,采集北方某市 3 个代表性水厂的水源、处理工艺和供水范围内共 8 个小区的水样,检测菌落总数、总大肠菌群、大肠埃希氏菌、肠球菌和嗜肺军团菌等 5 项微生物指标和浑浊度等多项常规水质参数,以研究全年不同水源和处理工艺的微生物特征和去除效果,分析浑浊度和溶解性有机碳(DOC)等水质指标与微生物的关系,系统性评估净水工艺对微生物的去除效果,并与出厂水在管网中的变化进行关联,为厂网一体化工艺运行参数调控优化及针对性改进提供决策支持。

1 试验材料和方法

1.1 采样点的选取及命名

本文选取北方某市 2 个以地表水为水源的水厂和 1 个以地下水为水源的水厂,地表水厂主要进行常规工艺和深度处理工艺的对比。

1.1.1 J 厂

该厂夏季以外调水为主要水源,其他季节混合本地地表水,混合比例根据水量需求调整。工艺流程采样点共 8 个,每个季度各取 3 次,共 96 个样品,采样点设置及编号如图 1 所示(J-1 为原水;J-2 为预氧化出水;J-3 为斜板沉淀池出水;J-4 为煤滤出水;J-4.1 为煤滤池反洗水;J-5 为活性炭滤池出水;J-5.1 为活性炭池反洗水;J-6 为出厂水)。

按与水厂距离(近、中、远)在 J 厂供水范围内选取 3 个小区,小区取样品,分别命名为 J-A(与水厂距离为 1.9 km)、J-B(与水厂距离为 5.1 km)和 J-C(与水厂距离为 21.5 km),每个小区选择入口近端和远端 2 个采样点,命名分别用后缀-1、-2 区分,夏、冬季各取样 1 次,共 12 个样品。

1.1.2 G 厂

G 厂全年仅以外调水为水源。工艺采样点共 7 个,每个季度各取 3 次,共 84 个样品,采样点设置及编号如图 2 所示(G-1 为原水;G-2 为预氧化出水;G-3 为机加池出水;G-4 为炭砂滤池出水;G-4.1 为炭砂滤池反洗水;G-5 为超滤膜出水;G-6 为出厂水)。

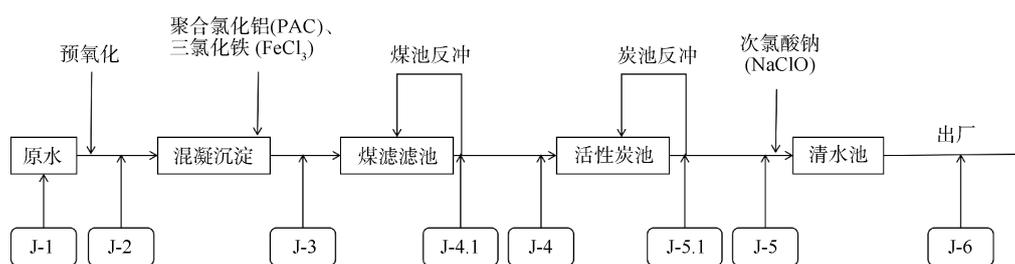


图1 J厂净水工艺

Fig. 1 Water Treatment Process of WTP J

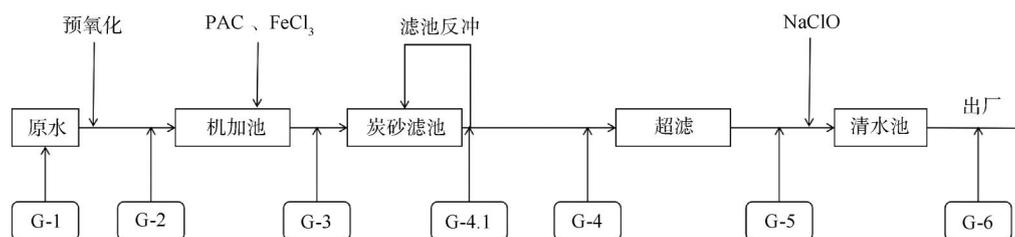


图2 G厂净水工艺

Fig. 2 Water Treatment Process of WTP G

按与水厂距离(近、中、远)在G厂水厂供水范围内选取了3个小区,分别命名为G-A(与水厂距离为0.5 km)、G-B(与水厂距离为4 km)和G-C(与水厂距离为7 km),每个小区选择入口近端和远端2个采样点,命名分别用后缀-1、-2区分,夏、冬季各取样1次,共12个样品。

1.1.3 N厂

N厂是以地下水为水源的水厂,原水加NaClO消毒后出厂。N厂工艺采样点共2个,分别为未消毒的地下水(N-1)和加NaClO消毒后的出厂水(N-2)。每个季度各取3次,共24个样品。

按与水厂距离(近、远)在N厂供水范围内选取2个小区,分别命名为N-A(与水厂距离为0.5 km)、N-B(与水厂距离为7 km),每个小区选择管网近端、远端2个采样点,命名分别用后缀-1、-2区分,夏、冬季各取样1次,共8个样品。

为区分不同季节样品,使用字母区分采样季节,分别为春季(C)、夏季(S)、秋季(A)和冬季(W)。

1.2 样品的采集

水厂样品采自净水工艺各单元,管网样品取自各水厂供水范围内小区。小区内从直接由市政管网供水且正常使用的水龙头采集水样。取样前放水5 min,关水后用酒精棉球擦拭采样龙头内外壁,再放水1 min后采集,以充分排除管中沉积物和停留时间对样品的干扰。对于水厂净水工艺,

若无取样龙头,则将采样器润洗3次后采集。用于测定理化指标的水样使用玻璃瓶和塑料瓶采集;用于微生物检测的样品使用含足量硫代硫酸钠的100 mL灭菌细菌瓶采集。所有样品到实验室后立即检测。

1.3 检测指标的选择与测定方法

现场测定温度、溶解氧和游离氯,在实验室测定浑浊度、pH、电导率、总碱度、总硬度、阴阳离子、营养盐(总磷、总氮、铵根离子)、消毒副产物、有机物指标[溶解性有机碳(DOC)和UV₂₅₄]。各项水质指标按国家生活饮用水标准检验方法和《水和废水监测分析方法》(第四版)中方法进行测定。

根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)选取常规水质指标菌落总数、总大肠菌群、大肠埃希氏菌、肠球菌(附录指标)和嗜肺军团菌5种微生物进行测定。其中,总大肠菌群是水体受粪便污染的指示菌,大肠埃希氏菌是粪便中的主要菌种,对水体受粪便污染的指示性更强。肠球菌属于附录指标,因其在水中存活时间比大肠埃希氏菌长,也可作为粪便指示菌被检测。嗜肺军团菌为广泛引起关注的条件致病菌。菌落总数使用复合酶技术培养基检测,检测试剂采用美国爱德士(IDEXX)公司SimPlate[®],按《水中菌落总数复合酶底物检测方法》(DB44/T 1163—2013)^[9]检测。如遇样品浑浊度过高,则稀释10倍后再遵循上述步骤进行测定。

总大肠菌群和大肠埃希氏菌依照《生活饮用水标准检验方法 第12部分:微生物指标》(GB/T 5750.12—2023)^[10]中的总大肠菌群酶底物法检测,使用IDEXX公司的Colilert[®]试剂和Colisure试剂(水样颜色偏黄时)检测。肠球菌采用固定底物技术酶底物法营养指示剂检测,采用试剂为IDEXX公司的Entelert[®]试剂,按《水质 肠球菌的测定 酶底物法》(DB37/T 4153—2020)^[11]规范操作。嗜肺军团菌的检测基于细菌酶检测技术,采用IDEXX公司的Legiolert[®]试剂进行检测,按《水中嗜肺军团菌检验方法—酶底物法》(T/WSJD 26—2022)^[12]规范操作。除菌落总数单位为MPN/mL外,其余指标的单

位均为MPN/(100 mL)。细菌总数测定采用流式细胞仪(C6, Becton, Dickinson and Company, USA),发射波长为488 nm,荧光染料选用(TO/PI)染料套装,采用绝对计数技术测定细菌数目,其线性值为 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ 个/mL。取水样200 μ L,加入TO和PI各5 μ L,室温避光孵化10 min。采用FL1 (520 nm)和FL3 (630 nm)荧光对细菌总数计数,进样量为100 μ L,检测速度为22 μ L/min。

1.4 预氧化剂与混凝剂种类与投加量

J厂和G厂均采用NaClO和臭氧作为预氧化剂,PAC和FeCl₃作为混凝剂。各季节投加量平均值如表1所示。

表1 2个以地表水为水源的水厂预氧化剂与混凝剂投加量(单位:mg/L)

Tab. 1 Dosages of Pre-Oxidant and Coagulants of Two WTPs Using Surface Raw Water (Unit: mg/L)

季节	预加氯		预臭氧		PAC		FeCl ₃	
	J厂	G厂	J厂	G厂	J厂	G厂	J厂	G厂
春季	1.7	1.8	0.0	0.2	14.0	14.0	4.0	12.0
夏季	1.9	2.9	0.2	0.3	34.7	20.0	10.7	23.7
秋季	2.0	2.0	0.3	0.3	18.7	15.3	8.0	19.3
冬季	1.5	1.1	0.1	0.2	14.0	11.0	0.0	18.0

2 试验结果与讨论

2.1 原水水质特征分析

2.1.1 水质指标

水温能直接或间接地影响微生物生长^[13],影响地表水中的微生物群落和种类;高浑浊度通常与水中存在的胶体、悬浮物等杂质数量和较高水平的致病性微生物具有相关性,且会影

响消毒效果^[14],美国国家环境保护局(EPA)发布的《国家一级饮用水规程》^[14]中将浑浊度列入微生物污染物指标;DOC是表征天然有机物的(NOM)的参数^[15],可反映水体受有机物的污染程度^[13];氨氮可为管网中细菌提供养分并存在转化为亚硝酸盐的风险^[16]。各厂常规水质指标如表2所示。

表2 常规水质指标对比

Tab. 2 Comparison of Conventional Water Quality Indices

指标	项目	N厂	J厂	G厂
水温/°C	平均值	17.5	16.1	16.9
	数值	13.1~23.7	2.6~30.5	2.6~28.2
浑浊度/NTU	平均值	0.265	1.82	5.38
	数值	0.08~0.65	0.65~3.13	1.55~14.1
pH值	平均值	7.80	8.26	8.61
	数值	7.42~8.08	7.60~8.60	8.38~8.91
电导率/(μ S·cm ⁻¹)	平均值	448	367	252
	数值	396~485	227~446	236~268
DOC/(mg·L ⁻¹)	平均值	1.24	3.80	3.09
	数值	0.72~1.69	2.60~4.75	2.59~3.51
氨氮/(mg·L ⁻¹)	平均值	<0.02	0.11(夏季)	<0.02
	数值	<0.02	0.06~0.14(夏季)	<0.02

N厂原水全年水温变化相对较小,2个地表水厂全年原水的水温波动较大。N厂的原水浑浊度全年均低于1 NTU,且不受季节影响;G厂原水全年的浑浊度受季节和降水影响明显,全年浑浊度基本高于J厂;J厂原水基本呈现全年低浊,特别是冬季低温低浊的特点。N厂和G厂原水全年DOC较J厂相对稳定,2个以表水为水源的水厂DOC基本与水温呈负相关。除J厂夏季原水外,其他水厂全年原水氨氮均低于检出限值(<0.02 mg/L,以氮计)。

2.1.2 微生物指标

图3为原水的菌落总数和总大肠菌群的培养结果。N厂菌落总数检出率为50%,均值在5 MPN/mL

以下;2座以地表水为水源的水厂全年均有菌落总数检出,且受温度影响明显。对于总大肠菌群,N厂检出率为67%,最高检出值仅为6.2 MPN/(100 mL),大肠埃希氏菌均未检出,说明不存在粪源大肠杆菌,风险较低;G厂和J厂原水中的总大肠菌群季节差异性明显,全年均有检出,部分样品中检出大肠埃希氏菌,检出率分别为85%和(G厂)和64%(J厂)。相较于地下水,地表水受粪便污染的风险较高。N厂原水均无肠球菌检出;2座以地表水为水源的水厂全年肠球菌各检测6次,检出率分别为83%(G厂)和67%(J厂),季节性规律与总大肠菌群相同。3个水厂的原水全年均未有嗜肺军团菌检出。

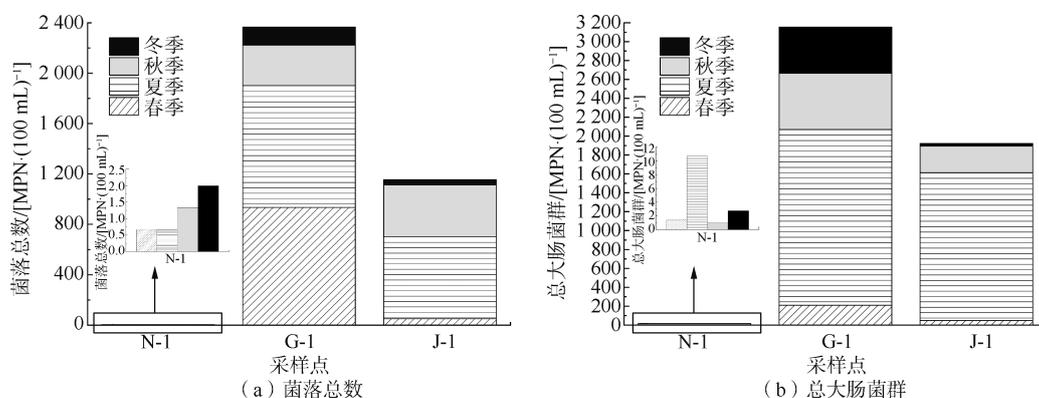


图3 水厂全年原水中菌落总数和总大肠菌群平均值

Fig. 3 Annual Total Number of Colonies and Average Total Coliform in Raw Water of WTPs

综合原水水质特征,由于J厂夏季和秋季原水中菌落总数及总大肠菌群检出率较高,冬季低温低浊使混凝效果下降,后续分析将重点关注J厂冬季低温时期和夏、秋季净水工艺及管网水中微生物指标的变化情况。G厂总大肠菌群、大肠埃希氏菌和肠球菌的检出率均高于J厂,可能与外调水为唯一水源有关,后续将重点关注消毒效果和温度波动时期微生物指标的处理效果。

2.2 净水工艺效果比较

经过加NaClO消毒后,测定的5个微生物指标在N厂出厂水中均无检出,微生物风险较小,因此文章主要对比G厂和J厂2座以地表水为水源的水厂净水工艺的处理效果。

2.2.1 水质指标变化

对于水质指标,水温、电导率和溶解氧在处理流程中较稳定,pH仅在投加混凝剂后略有下降。故分别分析浑浊度和DOC的变化。

(1) 浑浊度

J厂和G厂整体工艺对浑浊度的去除率受温度影响较大,夏、秋季高温时的去除率均略高于春、冬季温度较低时。2座以地表水为水源的水厂全年浑浊度随净水工艺流程的变化如图4所示。

对混凝沉淀工艺,J厂采用斜板沉淀池,高温时该工艺浑浊度平均去除率仅为17%。G厂机械加速澄清池对去除浑浊度起主要作用,全年浑浊度平均去除率为80.4%,冬季仅为其他季节的50%。J厂混凝沉淀工艺对浑浊度去除率低于G厂,除原水全年浑浊度较低且低温季节混凝剂投加量下降外,推测与G厂预氧化投加量略高于J厂有关。研究^[17]表明,化学预氧化技术可以强化混凝,对低温低浊水的处理具有显著作用。因此,可根据混凝沉淀工艺处理效果适当调节J厂低温低浊时期预加氯和预臭氧的投加量。

对过滤工艺,J厂煤滤池对除浊起主要作用,夏

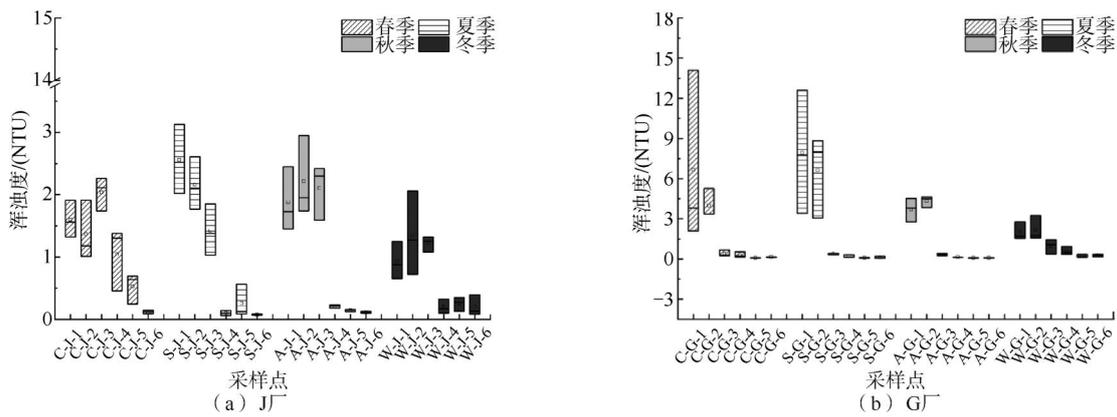


图 4 2 个以地表水为水源的水厂净水工艺全年浑浊度变化

Fig. 4 Annual Turbidity Variation of Two WTPs Using Surface Raw Water in Treatment Process

季和冬季分别出现 2 次活性炭池出水浑浊度高于煤滤池出水的情况。G 厂的炭砂滤池对浑浊度起重要作用,呈现与 J 厂相同的随季节波动的趋势。综上所述,根据全年浑浊度去除情况及夏季高温时微生物活动能力强、生长繁殖速度快的特点,后续将重点关注 J 厂夏、冬季活性炭池出水及滤池反冲水中微生物的种类和富集情况,和 G 厂冬季机械加速澄清池出水微生物的数量和炭砂滤池出水微生物季节变化情况。

(2) DOC

受进水 DOC 浓度影响,全流程总体 DOC 都呈现出温度低时较高的规律,其中 J 厂的 DOC 整体略

高于 G 厂。

2 座以地表水为水源的水厂混凝沉淀工艺对 DOC 的去除率均高于过滤工艺,理论上去除率应为 15%左右^[18],2 座以地表水为水源的水厂除春季外,混凝单元去除率平均值均达到理论值,G 厂炭砂滤池对 DOC 的去除率均高于 J 厂煤滤池,基本与前期试验吻合^[19]。对于 G 厂,超滤也对 DOC 有少量去除作用,特别是出现突然大量降雨造成原水浑浊度增大或工艺运行调整等因素导致前面工艺出水波动时,超滤可有效保障出水稳定,2 座以地表水为水源的水厂全年 DOC 随净水工艺流程的变化如图 5 所示。

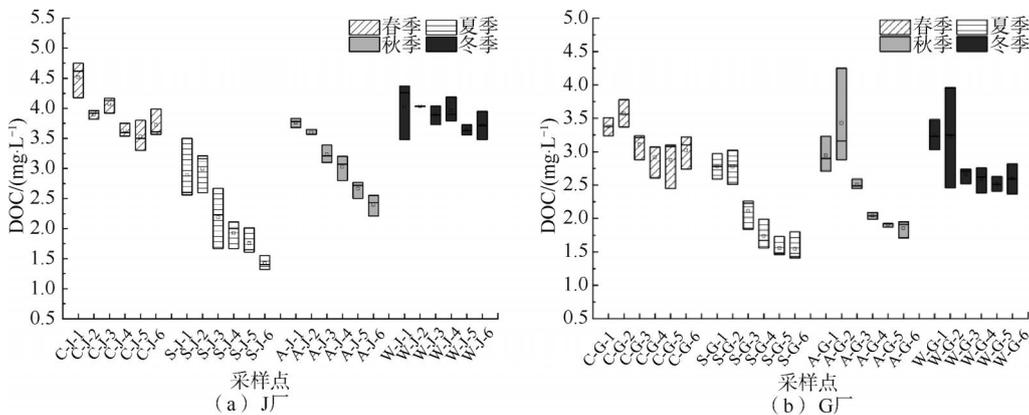


图 5 2 个以地表水为水源的水厂处理工艺全年 DOC 变化

Fig. 5 Annual Removal Rate of DOC of Two WTPs Using Surface Raw Water in Treatment Process

低温季节原水的 DOC 相对较高,净水工艺整体去除率相对较低。因此,需关注低温季节水厂工艺,特别是管网中微生物的数量及变化,必要时可在活性炭池后增加衡量生物稳定性的指标 [同化有机碳 (AOC) 和生物可降解溶解性有机碳 (BDOC)]。此外,建议根据不同季节活性炭池

微生物富集情况,通过进一步试验确定合适的反冲洗周期。

2.2.2 微生物指标变化

(1) 菌落总数

2 个地表水厂菌落总数变化如图 6 所示。对预氧化和混凝沉淀工艺,J 厂预氧化出水的菌落总数

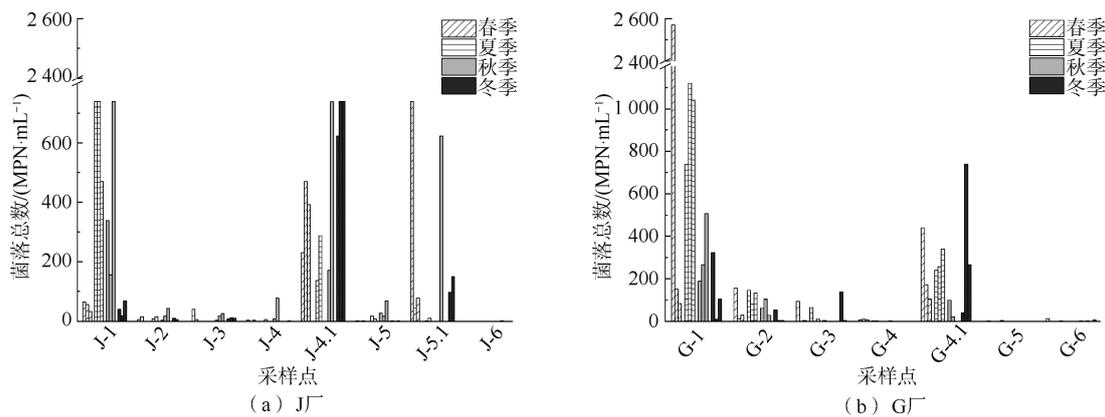


图6 2座以地表水为水源的水厂净水工艺全流程全年菌落总数变化

Fig. 6 Annual Total Number of Microflora of Two WTPs Using Surface Water as Water Source

较原水平平均分别降低了 90.4% 和 84.4%，说明预氧化投加的 NaClO 和臭氧能够杀灭原水中大部分细菌。混凝沉淀在去除浑浊度的同时，也对菌落总数有较稳定去除效果。G 厂预氧化出水和机械加速澄清池出水的菌落总数较原水平平均分别降低了 81.0% 和 97.8%，机械加速澄清池冬季出水有 1 次菌落总数较高的情况，与此前讨论的机械加速澄清池冬季浑浊度去除效果下降结果一致。G 厂次氯酸钠和臭氧的全年投加量与 J 厂相当或略高，但预氧化对菌落总数的灭活效果不如 J 厂，分析原因如下：首先，2 个水厂的预氧化剂投加后至下一工艺的时间不同，J 厂预氧化接触可达 10 min 左右，G 厂仅为 2~3 min；其次，G 厂原水的 pH 相对于较高，可能影响次氯酸钠的消毒效果。因此，可适当增加预氧化接触时间，保证预氧化单元的消毒效果。

对过滤工艺，J 厂的过滤工艺中煤滤池出水除夏季外其他 3 个季节各出现 1 次高于预氯化出水的情况，夏季和秋季分别有 2 次活性炭池菌落总数检出高于煤滤池出水的情况，说明滤池滤料截留和生长的微生物受水流剪切作用随出水进入下个工艺单元^[20]，活性炭在吸附有机物的同时也为微生物生长提供了基质和载体，当生物膜上的微生物随着滤池的稳定运行被冲刷掉落水中时，就出现活性炭处理的出水微生物量增加的情况^[21]。G 厂炭砂滤池出水菌落总数波动较小，且超滤出水的菌落总数较原水平均降低 98.4%（因为炭砂滤池出水多数为 0，故与原水对比），表明超滤工艺可以有效截留水中残余的细菌，稳定保证出水微生物安全性。J 厂煤滤池、活性炭池反冲水和 G 厂炭砂滤池反冲水均有较

高的菌落总数检出，间接反映煤滤池、活性炭池和 G 厂的炭砂滤池不仅可截留大量微生物，而且可能存在微生物生长，需严格控制反冲后初滤水排放，并注意后续主加氯消毒。

2 座以地表水为水源的水厂消毒后清水池出水与上一工艺相比菌落总数均接近 100% 去除，但 G 厂出厂水的菌落总数检出率和值均高于 J 厂。推测这与 G 厂仅采用外调水、水源单一，易形成相对稳定的微生物群落和优势种类有关。研究^[5]表明，对使用纯地表水为水源且处理构筑物末端为生物滤池的水厂，清水池内仍存在抗氯性较强的分支杆菌。

(2) 总大肠菌群和大肠埃希氏菌

预氯化化和主加氯后，J 厂和 G 厂总大肠菌群和大肠埃希氏菌均被有效去除。J 厂总大肠菌群在预氯化单元秋季去除率为 99.26%，其余季节去除率均为 100%；G 厂总大肠菌群在预氯化单元春季去除率为 99.00%，夏季去除率为 99.92%，秋季去除率为 100%，冬季去除率为 97.36%。2 座以地表水为水源的水厂预氯化单元对大肠埃希氏菌的去除率均为 100%。J 厂和 G 厂在进入清水池前的主加氯单元对总大肠菌群和大肠埃希氏菌的去除率均为 100%，有效保障出厂水安全。试验^[22]表明，水温降低和有机物浓度增加会使 NaClO 杀灭大肠埃希氏菌的效果变差，应对低温低浊水时应适当考虑 NaClO 消毒剂的投加。

(3) 肠球菌

预氧化后，J 厂和 G 厂预氧化、混凝沉淀（或机械加速澄清池）出水、反冲洗水中均有肠球菌检出（图 7），因为其在水中存活时间比大肠埃希氏菌长、

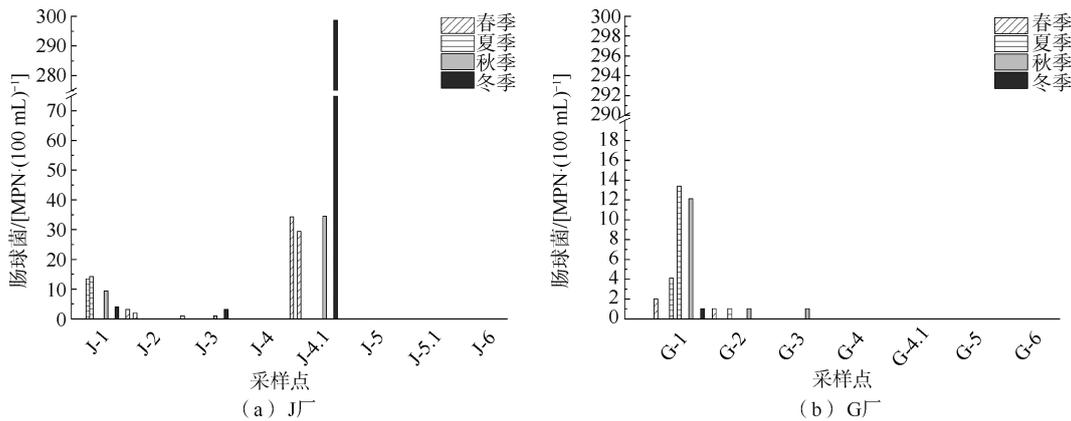


图7 以地表水为水源的水厂全流程全年样品肠球菌结果

Fig. 7 Annual Enterococcus Results of Two WTPs Using Surface Water as Water Source in Each Season

对氯的抵抗力更强。经过J厂煤滤池和G厂炭砂滤池后,肠球菌被有效去除。需注意的是,G厂滤池反冲洗水中无肠球菌检出,而J厂煤滤池反冲洗水中除夏季外均有检出,且值相对较高。因此,建议J厂增加肠球菌作为微生物安全性的检测指标。

(4)嗜肺军团菌

对于3个水厂全年取样周期内,仅J厂春季煤滤池的反洗出水有嗜肺军团菌的检出(1.1 MPN/mL)。

2.3 管网输配水对比

2.3.1 水质指标

管网水样检测的水质指标与水源和水厂工艺相同,本节仅选取随输送距离延长有明显变化的浑浊度、游离氯和溶解氧3个指标进行分析。

对于N厂供水区域,因供水范围相对较小,选取供水边界距水厂较远的管网点时,多次出现与地表水厂混水情况。夏季管网水样浑浊度略高于出厂,游离氯稍有下降,未混入以地表水为水源的水厂

出厂水的近水厂点溶解氧变化不大。除去以地表水为水源的水厂出厂水混入的影响,水质总体稳定。J厂由于输送距离较长,在冬、夏季,管网水样中浑浊度略高于出厂,游离氯和溶解氧有所下降,夏季变化更加明显。G厂供水区域内夏季管网水样浑浊度略高于出厂,游离氯和溶解氧也有所下降,且有些取样点受用户用水量影响,有不同程度的浑浊度上升的情况。地表水供水区域管网水质总体变化大于N厂。

2.3.2 微生物指标

管网水样检测的微生物指标与水源和水厂工艺相同,仅菌落总数有少量检出(2~8 MPN/mL),总大肠菌群、大肠埃希氏菌、肠球菌和嗜肺军团菌均未检出,对于用培养方法检测的细菌,管网中无明显再生长。因此,为更全面地反映管网中微生物数量的变化,采用流式细胞仪计数结果进行讨论,如图8所示。

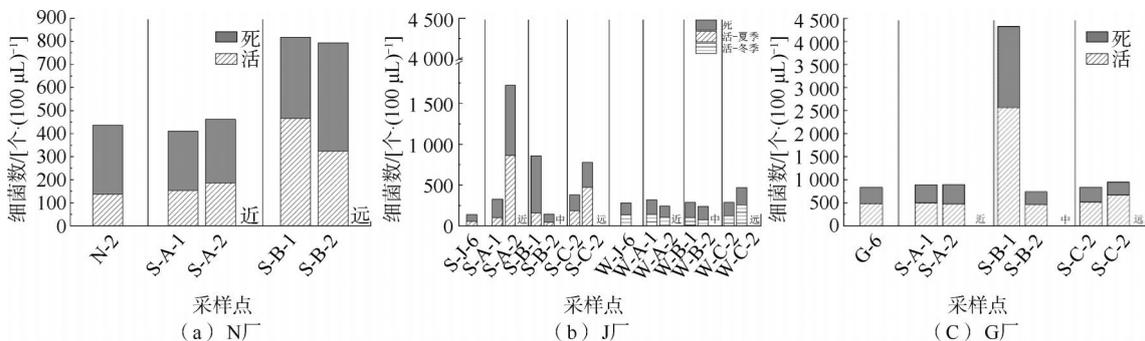


图8 3个水厂管网点细菌数变化

Fig. 8 Changes of Bacterial Number of DWDS of Three WTPs

N厂供水区域内,夏季管网水样中随着游离氯的衰减活菌数有上升,较远取样点细菌总数和活菌

数的增加需考虑以地表水为水源的水厂出厂水混入的影响。对于地表水J厂和G厂供水区域,除受用

户用水情况影响、水力停留时间相对较长的工厂 A 小区管网细菌整体有增加,且夏季增加较明显,冬季无明显增加,但也存在一定量的活菌数,总体管网点中活菌数与游离氯浓度呈负相关(皮尔逊相关系数为 $-0.538, P < 0.05$),说明温度高的季节,游离氯对管网中细菌再生长起重要抑制作用。

综上所述,对于管网输配,可培养细菌除菌落总数少量检出外,无明显再生长,均达到国家饮用水标准,但活菌数与游离氯浓度呈负相关,建议应加强游离氯监测,并根据季节的温度波动,调节出厂主加氯量,以更好地保障用户端水质安全。

3 结论

通过对 3 个水厂的水源、处理工艺和管网的水质和微生物指标分析,各工艺单元去除效果及优缺点与其他文献基本一致,取得主要结论如下。

(1) 对于水源,地下水的微生物风险最低,地表水原水中可培养微生物的检出率和数量均高于地下水,且季节差异性明显。需重点关注以远距离外调水源为唯一水源,原水中总大肠菌群、大肠埃希氏菌和肠球菌的数量和净水工艺处理效果。

(2) 水厂净水工艺各单元对水源中可培养的微生物均有较好的处理效果,特别是超滤工艺能在原水和前置工艺出水水质波动时,有效保障出水的微生物安全和水质稳定。但仍需重视预氧化接触时间及原水中耐氯菌的影响,关注活性炭池和清水池对出厂水生物安全性的影响,并建议有煤滤池的工艺选肠球菌作为大肠埃希氏菌的增强检测。

(3) 管网水样的可培养微生物指标中仅菌落总数有少量检出,但流式细胞仪检测到管网水的活菌数与游离氯浓度呈负相关,建议加强末端游离氯监测,并在高温季节注意根据管网余氯衰减调节出厂主加氯量,使管网末端可保持一定的游离氯,以抑制微生物再生长。

(4) 建议结合分子生物学方法,分析不同工艺中微生物群落演变规律,特别是条件致病菌的丰度变化,为水厂运行参数调控优化及针对性改进提供决策支持。

参考文献

[1] LI L, YANG H R, XU X C. Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: A review [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 1-16. DOI: 10.3389/

fevs.2022.880246.

- [2] 葛英亮. 净水工艺单元微生物群落结构及其生物风险研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
GE Y L. Study on the microbial community structure and biological risk in water purification process unit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [3] 侯鸾凤. 饮用水给水处理系统微生物多样性研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2018.
HOU L F. Study on microbial diversity of drinking water treatment system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [4] 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 等. 饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 [J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3604-3611.
HU W C, ZHAO C, WANG Q J, et al. Metabolic functional analysis of dominant microbial communities in the rapid sand filters for drinking water [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3604-3611.
- [5] 韩梅, 许光, 张瀚中, 等. 水厂清水池菌群结构特征及安全调控策略 [J]. *给水排水*, 2020, 46(1): 9-13.
HAN M, XU G, ZHANG H Z, et al. Microbial community structure characteristics and safety control strategies of clean water tank in the water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(1): 9-13.
- [6] 蔡广强, 张金松, 刘彤宙, 等. 饮用水常规处理工艺中细菌群落的时空分布 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(10): 4402-4410.
CAI G Q, ZHANG J S, LIU T Z, et al. Spatiotemporal distribution bacterial communities in the conventional treatment process of drinking water [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(10): 4402-4410.
- [7] 朱海龙, 刘唯源, 邓博苑, 等. 金属膜过滤工艺保障不同管材供水管网水质生物稳定性的研究 [J]. *水处理技术*, 2024, 50(5): 86-91.
ZHU H L, LIU W Y, DENG B Y, et al. Guarantee of biological stability in drinking water distribution system of different pipe materials by metallic membrane filtration process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(5): 86-91.
- [8] 李成卓. UV-氯消毒后供水管网生物膜的应激反应研究 [J]. *科技通报*, 2024, 40(1): 110-116.
LI C Z. Stress response of biofilm in water supply network to pre-disinfection of sequential UV and chlorine [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2024, 40(1): 110-116.
- [9] 广东省城镇供水协会. 水中菌落总数复合酶底物检测方法: DB44/T 1163—2013 [S]. 广州:广东省标准化研究院, 2013.
Guang Dong Water Supply Association. Multiple enzyme technology to detect heterotrophic plate count (HPC) bacteria in water: DB44/T 1163—2013 [S]. Guangzhou: Guangdong

- Institute of Standardization, 2013.
- [10] 中华人民共和国市场监督管理总局, 中华人民共和国标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法 第12部分: 微生物指标: GB/T 5750.12—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standard Administration of the People's Republic of China. Standard examination methods for drinking water—Part 12: Microbiological parameters: GB/T 5750.12—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [11] 山东省市场监督管理局. 水质 肠球菌的测定酶底物法: DB37/T 4153—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- ShanDong Administration for Market Regulation: Water quality—Determination of enterococcus—Enzyme substrate method: DB37/T 4153—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [12] 中国卫生监督协会. 水中嗜肺军团菌检验方法—酶底物法: T/WSJD 26—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- China Health Inspection Association. Examination method for *Legionella pneumophila* in water—Enzyme substrate method: T/WSJD 26—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [13] 陈晓惠. 地表水常规净化流程单元工艺处理效能实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- CHEN X H. Experimental study of unit process performance in conventional water purification process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [14] United States Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulations [S/OL]. (2023-01-09) [2023-08-29]. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>.
- [15] 王钰, 易滢佳, 史俊, 等. 饮用水中天然有机物的分析与表征方法 [J]. 净水技术, 2021, 40(1): 5-12, 36.
- WANG Y, YI Y J, SHI J, et al. Analysis and characterization methods for natural organic matters in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(1): 5-12, 36.
- [16] 刘珊珊. 某净水厂不同工艺单元净化效果分析及其细菌群落结构研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- LIU S S. Analysis of purification effect and bacterial community structure of different process units in a water purification plant [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [17] 史永浩, 孙东洋, 张怡然, 等. 预臭氧和预氯化在北方典型水质条件下的强化常规作用分析 [J]. 给水排水, 2021, 47(8): 8-14.
- SHI Y H, SUN D Y, ZHANG Y R, et al. Application of pre-ozonation and pre-chlorination for performance enhancement under typical water quality conditions in north China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 8-14.
- [18] 苗毓恩, 丁桓如. 给水处理流程中各处理单元对有机物的去除效率——混凝、澄清、过滤、消毒过程对有机物的去除 [J]. 净水技术, 2012, 31(1): 20-26.
- MIAO Y E, DING H R. Efficiency of organic matters removal of each processing unit in water treatment processes—removal of organic matters through processing units of coagulation, clarification, filtration and disinfection [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(1): 20-26.
- [19] 杨至瑜. 炭砂滤池去除浊度、有机物和氨氮效果的中试研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
- YANG Z Y. Performance of GAC-sand dual media filter on turbidity, organic matters and ammonia removal [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [20] 周常. 净水工艺过程中微生物风险评估与控制技术研究 [D]. 广州: 广州大学, 2018.
- ZHOU C. Study of microbial risk assessment and control technology in water purification process [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.
- [21] 李聪聪, 刘建广, 孙韶华, 等. 饮用水中有机物的生物活性炭工艺处理机理与应用 [J]. 净水技术, 2018, 37(4): 47-52, 70.
- LI C C, LIU J G, SUN S H, et al. Application and mechanism of biological activated carbon process for compounds removal in drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(4): 47-52, 70.
- [22] 王雪娇, 陈越英, 王晓蕾, 等. 次氯酸钠对生活饮用水消毒效果与影响因素研究 [J]. 中国消毒学杂志, 2020, 37(12): 881-883.
- WANG X J, CHEN Y Y, WANG X L, et al. Study on disinfection effect and influencing factors of sodium hypochlorite on drinking water [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2020, 37(12): 881-883.