

崔小东, 张焕, 石秀花, 等. 超滤-纳滤联用工艺处理新疆高硬度地下水工程案例[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 173–180.

CUI X D, ZHANG H, SHI X H, et al. Case of combined UF-NF process for high-hardness groundwater treatment in Xinjiang[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 173–180.

超滤-纳滤联用工艺处理新疆高硬度地下水工程案例

崔小东*, 张 焕, 石秀花, 孔德强

(新疆巴州和硕县某水厂, 新疆巴音郭楞蒙古自治州 841700)

摘 要 【目的】针对新疆某水厂地下水水源硬度和溶解性总固体(TDS)偏高,影响口感和居民健康的实际问题,文章提出高效、可行的工艺优化方案,提升饮用水质量和用水体验。【方法】项目设计并实施了“超滤-纳滤”联用膜分离工艺,优化原水处理流程。超滤作为预处理单元去除水中悬浮颗粒物和微生物,保障纳滤系统的稳定运行。纳滤工艺则用于深度去除原水中的硬度离子和TDS,同时保留适量有益矿物质,以改善出水口感。项目配套建设了次氯酸钠消毒系统确保配水安全,并通过优化运行参数提升整体效率。【结果】超滤单元有效降低原水浑浊度与细菌指标,纳滤系统则显著降低了水的硬度和TDS,改善了水的口感并使其符合健康饮水要求。消毒系统运行稳定,配水水质安全可靠。整个处理流程运行高效、能耗合理,在保障出水水质的基础上兼顾经济性与可持续性。【结论】“超滤-纳滤”联用工艺在新疆某水厂水质提标改造中应用效果良好,显著提升了出水品质和供水安全性,具备良好的环境效益与经济可行性。该技术路径可为类似地区水厂的改造升级提供有益借鉴与工程示范价值。

关键词 水质提标 超滤(UF) 纳滤(NF) 硬度 溶解性总固体(TDS)

中图分类号: TU991 文献标志码: B 文章编号: 1009-0177(2025)08-0173-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.022

Case of Combined UF-NF Process for High-Hardness Groundwater Treatment in Xinjiang

CUI Xiaodong*, ZHANG Huan, SHI Xiuhua, KONG Deqiang

(Heshuo County Water Plant, Bayingoleng Mongolian Autonomous Prefecture, Bayingolin Mongolian Autonomous, Prefecture 841700, China)

Abstract [Objective] In response to the issues of high groundwater hardness and elevated total dissolved solids (TDS) at a water treatment plant in Xinjiang, which affect taste and residents' health, an efficient and feasible process optimization plan is proposed to improve drinking water quality and enhance the user experience. [Methods] A combined ultrafiltration-nanofiltration (UF-NF) membrane treatment process is proposed and implemented to improve the existing water treatment scheme. UF is employed as a pretreatment step to effectively remove suspended solids and microbial contaminants, thereby ensuring the stable performance of the downstream NF unit. The NF system is applied to significantly reduce water hardness and TDS while retaining beneficial minerals to improve palatability. A sodium hypochlorite disinfection system is incorporated to ensure distribution safety, and system operating parameters are optimized to enhance overall efficiency. [Results] UF unit significantly reduced turbidity and microbial levels in the raw water. The NF process effectively decreases hardness and TDS concentrations, thereby improving taste and meeting health-based drinking water guidelines. The disinfection system operates reliably, ensuring the microbiological safety of distributed water. The overall process exhibits high operational stability, moderate energy consumption, and favorable economic and environmental performance. [Conclusion] The UF-NF integrates membrane process is successfully applied in the Xinjiang water treatment plant. It substantially improves water quality and supply safety, providing a technically feasible and economically viable solution. This approach can serve as a valuable reference for the renovation and upgrading of water plants in similar regions.

Keywords water quality upgrading ultrafiltration(UF) nanofiltration(NF) hardness total dissolved solids(TDS)

[收稿日期] 2025-04-01

[通信作者] 崔小东(1985—),男,硕士研究生,研究方向为市政工程,E-mail:306505145@qq.com。

饮用水质量与安全直接关系到人民群众的健康和社会稳定。新疆某县供水系统长期以来依赖地下水作为主要水源,虽然整体水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)^[1],但地下水硬度较高、溶解性总固体(TDS)偏高,导致水质口感较差,长期饮用可能对人体健康产生一定影响^[2]。此外,该供水系统缺乏消毒措施,存在一定的安全隐患,影响供水的可靠性。

水质硬度过高会对人体健康造成不良影响,尤其是对肾结石、心血管疾病患者更加不利,同时也会影响居民洗浴、炊事等日常用水体验^[3]。此外,过高的TDS含量会加速管道和设备的结垢,增加供水系统的维护成本^[4]。为了有效改善供水质量,提高居民生活水平,优化水资源利用,实施水质提标工程势在必行。

近年来,膜分离技术凭借其高效、节能、环保的特点,在供水深度处理领域得到了广泛应用。相比传统的化学软化和混凝沉淀工艺,膜分离技术能够更精准地去除水中悬浮物、细菌、有机污染物及特定离子,同时减少化学试剂的使用量,减少二次污染^[5]。其中,超滤(UF)作为一种高精度物理过滤技术,其孔径在1~100 nm,可有效截留水中的悬浮颗粒和微生物,可作为纳滤(NF)、反渗透(RO)等深度处理的预处理工艺,确保后续工艺的稳定性^[6]。NF膜作为一种选择性分离膜,可去除水中的钙、镁离子,降低总硬度,同时保留适量矿物质,优化口感,使水质更加适合长期饮用^[7]。

本项目基于新疆某水厂的现状与水质特点,采用UF-NF联用工艺优化供水质量,提高居民用水体验。通过UF预处理,降低原水浑浊度,延长NF膜的使用寿命;再通过NF工艺,有效去除水中硬度和TDS,确保出水水质优于国家标准。此外,配套建设次氯酸钠消毒系统,进一步提升供水安全性。本研究围绕工艺流程设计、环境影响与经济效益评价等方面展开分析,探讨该工艺在水质提升中的可行性,为类似地区的供水系统改造提供技术支持。

1 项目概况

1.1 区域概况

该水厂位于新疆巴音郭楞蒙古自治州,地处天山南麓、焉耆盆地东北缘,属暖温带大陆性干旱气候,年均降水量为70~150 mm,蒸发量高达2 000 mm以

上,水资源较为匮乏。县域内饮用水主要水源为地下水。地下水资源总量约为2.23亿m³,年可开采量为1.47亿m³,现状开采量为0.95亿m³。由于地下水矿化度较高,硬度和TDS偏高,提升供水水质成为改善居民生活质量的重要任务。

1.2 原水厂供水规模

水厂始建于1967年,最初采用水塔供水方式,供水管线总长约为60 km,年均供水量为350万m³。随着供水需求的增长,水厂经历多次升级改造,目前供水规模已近1.3万m³/d,供水管线延伸至130余km,年均供水量约为450万m³,现已成为该区域唯一的供水保障点。为优化供水质量,本项目拟新建深度处理设施,设计处理规模为2万m³/d,以满足未来供水需求并改善水质。

1.3 原水厂供水水质及改造提升目标

原水厂供水水质整体满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),水质指标如表1所示。原供水水质总硬度为376 mg/L,主要由钙离子和镁离子构成,其中以钙硬度为主;TDS的质量浓度为538 mg/L,其中硫酸盐质量浓度为153 mg/L,高于世界卫生组织建议的健康水硬度(50~200 mg/L)和TDS(即质量浓度≤300 mg/L)^[8]。虽然水厂供水符合国家标准,但水质口感较差,长期饮用仍可能导致肾结石、胃肠不适等健康问题,同时影响生活用水体验。原供水水质细菌总数检测值为4 CFU/mL,说明出水微生物指标良好。这主要是由于本供水系统的水源为地下水,相较于地表水,地下水受外部污染的影响较小,通常具有较好的微生物学水质。然而,配水过程仍可能发生二次污染,主要来源可能为配水管网系统,如管道老化、渗漏。因此,在改造过程中,除了优化水处理工艺外,还需对末端采用消毒措施,确保配水安全。

为提升供水质量,本项目采用UF-NF膜处理工艺,目标水质为总硬度质量浓度≤150 mg/L、TDS质量浓度≤300 mg/L、硫酸盐质量浓度≤100 mg/L。此外,增加出厂水消毒处理,确保微生物安全。

2 工艺流程

本项目水处理工艺由3个单元组成,包括预处理系统、软化系统和消毒系统。工艺流程如图1所示。厂区总体布置如图2所示。

根据原水水质与目标产水水质要求,本研究采

表 1 改造前水厂出水水质
Tab. 1 Finished Water Quality before WTP Reconstruction

水质参数	数值	GB 5749—2022 限值
pH 值	7.27	6.5~8.5
总硬度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	376	450
TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	538	1 000
耗氧量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.62	4
氯化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	74.9	250
细菌总数/($\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$)	4	100
硝酸盐氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.70	10
氟化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.66	1.0
硫酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	153	250
重碳酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	297	200
二氧化硅/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	12.0	50

用勾兑工艺,即将 NF 产水与 UF 产水按照特定比例进行混合,在满足出水水质标准的同时有效降低投资成本。根据水厂出厂水总规模($20\,000\,\text{m}^3/\text{d}$)及设计出厂水总硬度指标($150\,\text{mg}/\text{L}$),计算得出的 UF 产水与 NF 产水的最优混合比例为 2 : 5。实际运行中,根据水质在线监测结果灵活调整掺混比例,能够进一步提升经济性并延长膜系统的使用寿命。

混合后水中的硫酸盐含量预计可降至原水中的 40%。此外,通过调节 UF 和 NF 装置加压泵的频率,可适当减少 UF 产水量并提高 NF 产水量,使混合水的总硬度在 $150\,\text{mg}/\text{L}$ 的基础上略有降低,最终控制在 $130\sim 140\,\text{mg}/\text{L}$ 。最终确定勾兑用 UF 产水 $7\,258\,\text{m}^3/\text{d}$,勾兑用 NF 产水 $12\,742\,\text{m}^3/\text{d}$,勾兑后的水质满足硬度质量浓度 $<150\,\text{mg}/\text{L}$,TDS 质量浓度 $<300\,\text{mg}/\text{L}$,硫酸盐质量浓度 $<100\,\text{mg}/\text{L}$ 。

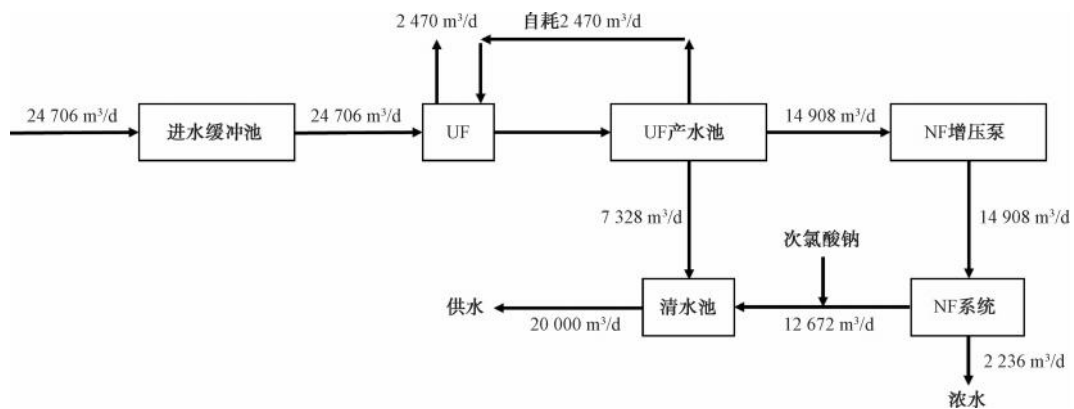


图 1 工艺流程

Fig. 1 Process Flow

2.1 预处理工艺

与传统活性炭过滤相比,本项目采用孔径为 $0.01\,\mu\text{m}$ 的 UF 膜技术,不仅能去除大颗粒悬浮物和微生物,而且能够减少滤料更换频率,运行维护更为便捷。UF 系统的运行流程包括多个阶段。水源井抽取的原水首先经增压泵输送至原水池,然后由 UF 增压泵(运行频率为 30 Hz)加压送入 UF 系统,系统进水压力稳定在 $0.07\,\text{MPa}$,进水浑浊度为 $0.227\,\text{NTU}$,pH 值为 6.98。UF 系统采用自动化控制运行,其运行步骤包括开机冲洗、正常产水、正冲洗、加气正冲及系统反洗等过程,以保证膜通量稳定及膜污染的有效控制。开机时,系统首先进行 30 s 的冲洗,随后进入正常产水阶段,单台 UF 膜组件产水量可达 $206.49\,\text{m}^3/\text{h}$,产水浑浊度降至 0.071

NTU,氧化还原电位(ORP)为 $371\,\text{mV}$,每次产水时间为 60 min。产水周期结束后,系统依次进行正冲洗(30 s)、加气正冲(30 s,气压为 $0.21\,\text{MPa}$)、系统反洗(30 s),以去除膜表面附着的污染物,保持系统长期稳定运行。

UF 系统的所有阀门均采用气动控制,气动压力为 $0.56\,\text{MPa}$,停机关阀延时 5 s。系统运行依赖 UF 水池液位自动控制启停,当液位达到 $3.4\,\text{m}$ 时,仅启动 2 台 UF 装置,液位降至 $2.6\,\text{m}$ 时增加至 4 台,液位降至 $1.2\,\text{m}$ 时启动 6 台,确保水量供应稳定。此外,系统每 120 min 轮换一次,均衡膜组件的使用时间,延缓膜污染速率。当原水池液位低于 $0.7\,\text{m}$ 时,系统自动停止运行,以防止设备因水源不足而空转损坏。

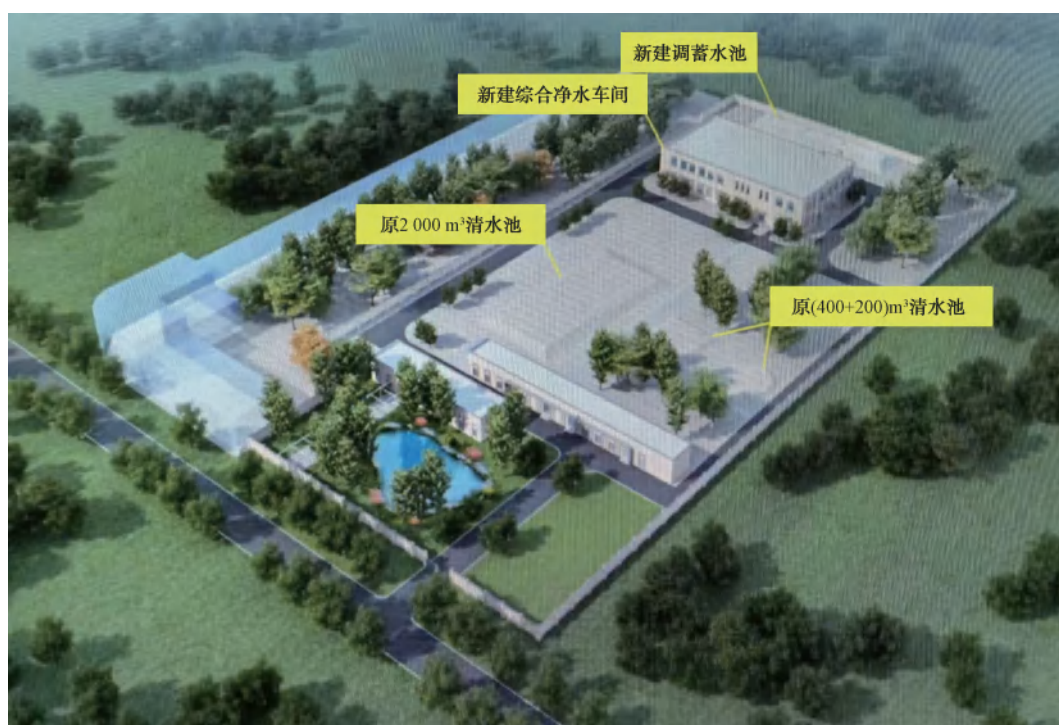


图2 改造后厂区总体布置

Fig. 2 General Layout of WTP after Reconstruction

采用 UF 作为预处理工艺,使得进水水质达到后续 NF 系统的要求,为软化工艺提供了稳定可靠的水质保障。UF 系统的自动化运行模式不仅提高了水厂的运行效率,而且降低了人工干预的需求,确保系统能够长期稳定运行,为优化供水水质提供了坚实的基础。

2.2 软化工艺比较与选择

本项目水源为地下水,水质硬度较高,TDS 含量偏高。因此,需采用适宜的软化工艺,以降低水中钙、镁离子的含量,提高出水水质,使其满足优质饮用水标准。目前,水处理工艺中常见的软化方式包括 RO、超低压反渗透(ULPRO)和 NF,它们均能有效去除水中溶解性盐类和硬度离子,但在运行成本、水质优化及系统稳定性方面存在差异。RO 及 ULPRO 具有较高的脱盐率,可去除 99% 以上的 TDS,但也会去除水中的有益矿物质,影响口感,且运行压力较高、能耗较大,以及废水排放量较多。NF 技术在去除钙、镁离子的同时,能有效降低 TDS 和硫酸盐含量,并保留部分有益矿物质,使水质更适宜长期饮用。相比 RO,NF 的运行压力更低(0.3~0.7 MPa),能耗更小,水资源利用率更高,具有较好的经济性和可持续性。

经技术比选,本项目采用 NF 作为核心软化工艺,NF 系统设计处理水量为 $14\,908\text{ m}^3/\text{d}$,NF 膜元件采用高脱盐率 NF 膜,去除水中 95% 以上的硬度离子。NF 单元如图 3 所示。本系统采用一级两段式 NF 系统,NF 浓水回收率设定为 85%,以减少废水排放,提高水资源利用率。NF 系统出水水质可达到总硬度质量浓度 $\leq 150\text{ mg/L}$,TDS 质量浓度 $\leq 300\text{ mg/L}$,满足项目水质要求。

本项目 NF 系统运行时,UF 产水池的水通过 NF 增压泵进入 NF 系统,进水设计流量为 $14\,908\text{ m}^3/\text{d}$ 。系统采用三级增压运行模式,第一段 NF 高压泵运行频率设定为 41 Hz,进水压力为 0.46 MPa,浓水压力为 0.35 MPa,产水电导率为 $27.5\text{ }\mu\text{S/cm}$;浓水经二级增压泵(41 Hz)进入第二段 NF 系统,进水压力为 0.50 MPa,浓水压力为 0.38 MPa,产水电导率为 $45\text{ }\mu\text{S/cm}$;二级浓水再经三级增压泵(40 Hz)进入第三段,进水压力为 0.47 MPa,浓水压力为 0.19 MPa。最终,NF 系统产水量为 $12\,672\text{ m}^3/\text{d}$,浓水排放量为 $2\,236\text{ m}^3/\text{d}$,系统总产水电导率为 $42.91\text{ }\mu\text{S/cm}$,pH 值为 7.13,出水硬度和 TDS 含量均达到优质饮用水标准。

NF 系统的运行采用自动化控制,运行步骤包括



图3 NF单元设计

Fig. 3 Design of NF Unit

开机冲洗(2 min)、正常产水(720 min)、大水量冲洗(10 min)。系统的4套NF设备轮换运行,轮换时间设定为718 min,确保设备均衡使用,延长膜寿命。NF系统启停由清水池液位控制,当液位达到2.9 m时,系统全部停止运行;当液位低于2.6、2.2、2.0 m或1.6 m时,分别启动1~4套NF设备,以保证供水需求和系统运行的稳定性。

2.3 消毒工艺比选及安全性

常见的消毒工艺包括液氯、二氧化氯、紫外线和次氯酸钠。综合考虑消毒效果、安全性、运行成本及维护便捷性,本项目选择次氯酸钠消毒工艺。相比液氯和二氧化氯,次氯酸钠无毒性挥发物,储存和使用更安全,且可通过电解食盐水现场制备,避免外购化学药剂带来的运输和存储风险。此外,紫外线消毒虽然能高效灭菌,但无法提供管网持续消毒能力,不适用于本项目。

本项目消毒系统由产氯量为2 kg/h的次氯酸钠发生器、投加泵及在线监测仪表组成,投加量根据出水流量和余氯浓度动态调整,以确保消毒效果的稳定性。以2万 m³/d的水厂进行测算,平均加氯量为2 mg/L,最大加氯量为3 mg/L。在安全性管理方面,系统配备自动控制与在线监测功能,实时监测出水余氯浓度,并与供水流量联动调节投加量,确保水质安全达标,同时避免消毒剂过量投加而导致的消毒副产物(如三卤甲烷、卤乙酸)超标风险。此外,消毒剂储存与投加装置均采用密封防护设计,降低人员接触风险,提高运行安全性。

2.4 浓水处理

为有效降低浓水对环境的影响,本项目在NF工艺设计中充分考虑了浓水的特性与资源化利用途径。NF装置正常运行时,浓水平均排量约为2 236

m³/d。本工程主要目标是去除硬度和TDS,浓水TDS相对较高。为实现资源节约与生态利用,浓水与经酸碱中和处理的系统废水及UF反冲洗废水混合,经调控后使混合水的TDS质量浓度降至2 000 mg/L以内。该水质可满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)中干旱地区绿化灌溉用水的限值要求,具备较好的环境兼容性和再利用价值。

浓水的回用途径主要包括以下3类。南向供水:浓水混合液通过接入水厂南侧绿化主管网,用于提升营区北部片区绿化灌溉能力。西向输送:经由西段新敷设管线,供水至围墙外林带及沿线鱼塘,用于生态补水。东向调蓄:输水至东侧污水处理站中水池,补充东门林带、通信鱼塘及生态园的灌溉需求,同时解决冬季废水排放问题。

该浓水回用方案可有效降低直接排放量,避免二次污染,提升系统整体生态效益与资源利用效率。

3 NF单元出水水质

目前,该项目已进入实际运行阶段。NF单元出水水质如表2所示。

NF系统对原水中钙、镁等硬度离子的去除效率极高,产水总硬度质量浓度降至6.03 mg/L,TDS质量浓度降至107.2 mg/L,硫酸盐质量浓度降至48 mg/L,表明NF具有优异的脱盐和硫酸盐截留性能。氟化物质量浓度由0.66 mg/L降至0.14 mg/L,远低于国家标准限值,说明NF技术对氟化物的去除效果显著,降低了饮水性氟中毒的风险,但仍需关注氟的适量补充以维持人体健康。硝酸盐氮质量浓度由0.7 mg/L略微上升至1.05 mg/L,这可能与膜污染有关,仍远小于国家饮用水标准(10 mg/L)。综上,NF单元在降低水中硬度、去除TDS及控制硫酸盐等关键污染物方面表现卓越,为后续与UF产

表2 改造后水厂 NF 单元出水水质

Tab. 2 Treated Water Quality of NF Unit after WTP Reconstruction

水质参数	数值	GB 5749—2022 限值
pH 值	7.87	6.5~8.5
色度/度	5	15
臭和味	无	无异臭、异味
浑浊度/NTU	1	1
肉眼可见物	无	无
总硬度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	6.03	450
TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	107.2	1 000
高锰酸盐指数/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.23	3
氯化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	21.9	250
总大肠菌群/[MPN·(100 mL ⁻¹)]	未检出	不应检出
细菌总数/(CFU·mL ⁻¹)	4	100
大肠埃希氏菌/[MPN·(100 mL ⁻¹)]	未检出	不应检出
氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.025	0.5
硝酸盐氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.05	10
氰化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.002	0.05
六价铬/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.004	0.05
氟化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.14	1.0
硫酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	48	250
汞/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.000 1	0.001
砷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.001	0.01
总 α 放射性/(Bq·L ⁻¹)	<2.0×10 ⁻²	0.5
总 β 放射性/(Bq·L ⁻¹)	0.054	1
铜/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.2	1.0
锌/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.05	1.0
铅/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.002 5	0.01
镉/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.000 5	0.005
铁/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.3	0.3
锰/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.1	0.1
铝/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.01	0.2
溴酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.005	0.01
亚氯酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.04	0.7
氯酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.23	0.7
二氯乙酸/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.005	0.05
三氯乙酸/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.01	0.1
三氯甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<3.2×10 ⁻⁵	0.06
一氯二溴甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<1.6×10 ⁻⁵	0.1
二氯一溴甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<1.5×10 ⁻⁵	0.06
三溴甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<4.1×10 ⁻⁵	0.1
三氯甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<3.2×10 ⁻⁵	0.06
一氯二溴甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<1.6×10 ⁻⁵	0.1
二氯一溴甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<1.5×10 ⁻⁵	0.06
三溴甲烷/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<4.1×10 ⁻⁵	0.1

水勾兑提供了高品质基础水源。

4 环境影响与经济效益

4.1 环境影响评价

本项目的建设和运行对环境可能产生一定影响。在施工阶段,主要影响因素为土石方开挖、管道敷设、设备安装等作业带来的扬尘、噪声及施工废水排放。为降低施工期对环境的影响,本项目采取洒水降尘、合理安排施工时间、设置围挡等措施,并严格按照环保法规进行废水和固体废弃物的处理。

项目运行阶段,对环境的影响主要体现在能源消耗、浓水排放及噪声控制。本项目采用 UF-NF 工艺,运行过程中主要能耗来源于增压泵、NF 高压泵及消毒设备,但相比传统软化技术,该工艺在水资源利用率和能耗控制方面更具优势。运行设备采取低噪声设计,并对关键区域进行隔音降噪,确保对周边环境的影响降至最低。此外,水厂内合理规划绿化和雨水回收系统,以提高生态环境质量。

本项目的 NF 系统运行过程中会产生一定量的浓水排放,浓水中主要含有高浓度的钙、镁离子及部分硫酸盐。为减少浓水对环境的影响,本项目采取浓水资源化利用措施,部分浓水回用于绿化和道路冲洗,剩余部分排入市政污水管网,经污水处理厂进一步处理后达标排放。此外,UF 系统的反洗废水及定期膜清洗废液需进行收集,并按照环保要求进行中和处理后排放,确保不会对水环境造成二次污染。

4.2 运行成本

项目的运行成本主要涉及电力消耗、膜更换维护、药剂投加及人工管理等。UF 系统的运行能耗主要来源于 UF 增压泵(运行频率为 30 Hz),NF 系统则依赖高压泵的电力消耗。预计整个系统的年运行耗电约为 120 万 kW·h,按电费为 0.6 元/(kW·h)计算,年电力成本约为 72 万元。此外,UF 膜和 NF 膜需定期进行反冲洗和化学清洗,每 120 min 轮换一次,膜的更换周期预计为 3~5 年,年均维护成本约为 35 万元。次氯酸钠消毒系统的运行成本主要包括食盐原料采购及设备维护,年均消毒剂成本约为 15 万元。人工管理成本预计每年 50 万元,用于系统运维、日常巡检及管理调度。经核算,本项目的制水成本约为 1.10 元/m³,经济性优势显著。

本项目通过智能化控制系统优化运行策略,如根据清水池液位自动调节 NF 系统启停,当液位达

到 2.9 m 时停止运行,低于 1.4 m 时启动全部设备,从而降低不必要的能耗,提升系统运行的经济性。综合考虑建设投资、运行成本及长期维护费用,本项目在供水安全性、经济性和可持续性之间实现了合理平衡,为后续供水系统的优化提供了技术与管理经验。

4.3 社会效益

本项目的实施对于提升居民生活质量、增强城市供水安全性以及未来在其他地区的推广应用具有重要意义。

通过优化水处理工艺,该项目有效降低供水水质的硬度、TDS 及硫酸盐含量,提高了水的感官质量,使居民能够获得更优质的饮用水。本项目的 NF 软化工艺能够显著降低水中钙、镁离子的含量,从而减少结石病等相关疾病的发生,提升居民的健康水平。同时,改善后的水质在日常使用中减少了管道、水壶、热水器等设备的水垢沉积,提高了生活用水的便利性。

本项目在城市供水安全方面发挥了重要作用。原水厂供水系统存在消毒措施不足,容易受到外部污染因素的影响。通过新增的次氯酸钠消毒系统,供水水质的微生物安全性得到了有效保障,避免了水媒疾病的传播风险。此外,采用自动化控制系统,确保供水水质得到实时监测,提升了供水系统的管理水平。优化后的水处理工艺增强了水厂的抗风险能力,确保了供水的稳定性和安全性,为城市供水基础设施的现代化升级提供了有力支持。

5 结论与建议

本研究针对新疆某水厂供水水质硬度、TDS、硫酸盐等含量偏高及消毒措施不足等问题,提出并实施了 UF-NF 联用软化及深度处理工艺,并配套次氯酸钠消毒系统,以确保供水水质达到更优标准。传统的混凝—沉淀—过滤—消毒处理工艺在除硬降盐方面能力有限,本项目的膜分离工艺在深度处理、特定离子去除、运行自动化程度等方面具有明显优势,尤其适用于处理高硬度、高 TDS 的地下水。项目的亮点主要体现在采用 UF 作为预处理,提高 NF 膜运行稳定性和寿命;通过 NF 去除硬度离子并保留适量矿物质,使水质更加适宜长期饮用。同时,UF 和 NF 的分质供水模式,可根据出水水质目标动态调整 UF 与 NF 的产水比例,有效控制运行成本。此外,

项目采用自动化调控系统,根据清水池液位灵活启停设备,避免高能耗连续运行;对浓水的资源化回用,进一步提升了整体系统的经济效益与可持续性。

尽管本研究的工艺优化具有良好的效果,但仍存在可进一步提升的空间。在浓水处理及资源化利用方面,当前浓水主要通过排放或回用于绿化、道路冲洗,未来可探索蒸发结晶、膜浓缩回收等技术,提高水资源利用率。NF 工艺在去除硬度和 TDS 的同时,仍会产生一定量的膜污染,未来可研究优化膜清洗周期、选择抗污染膜材料,以延长膜寿命、降低运行维护成本。

本研究的成果对其他地区供水水质提升具有重要借鉴意义。对于水质硬度高、TDS 超标的地区,UF-NF 组合工艺提供了一种高效、低能耗、可持续的水处理解决方案,能够有效提升供水质量,同时降低传统化学软化工艺的药剂使用和废水排放。特别是在缺乏集中水源、地下水为主要供水来源的城镇或农村地区,该工艺可作为区域性水厂升级改造或农村安全饮水工程的可行技术路线,为提升供水安全性和居民健康水平提供有力支撑。综上,本研究在优化水处理工艺、提升供水质量方面具有较强的应用价值,并为后续水处理技术的发展和推广应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [2] 胡大洲, 李亚南, 朱利英, 等. 北方典型地区地下水化学特征及其成因分析[J]. 给水排水, 2022, 48(12): 8–17.
HU D Z, LI Y N, ZHU L Y, et al. Analysis of chemical characteristics and causes of groundwater in typical northern regions[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(12): 8–17.
- [3] 高彦林. 硫酸根和总硬度微超标水源饮用水处理方案分析[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 135–138.
GAO Y L. Case analysis of treatment process for sulfate radical, total hardness overproof in drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 135–138.
- [4] 李红瑞, 袁梓屹, 王昆朋, 等. 饮用水口感及影响因素分析综述[J]. 给水排水, 2022, 48(2): 143–151.
LI H R, YUAN Z Y, WANG K P, et al. A review of the

- influence factors on flavor of drinking water [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(2): 143–151.
- [5] 王美莲, 朱学武, 成小翔, 等. 饮用水电化学和膜分离除氟技术发展展望[J]. *给水排水*, 2017, 43(11): 112–122.
WANG M L, ZHU X W, CHENG X X, et al. Development of defluoridation of drinking water by electrochemical and membrane process[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(11): 112–122.
- [6] SAUVET-GOICHON B. Ashkelon desalination plant—A successful challenge [J]. *Desalination*, 2007, 203 (1/2/3): 75–81. DOI: 10.1016/j.desal.2006.03.525.
- [7] 沈利清, 徐百龙, 张捷, 等. 超滤+纳滤组合工艺深度处理饮用水的中试研究[J]. *给水排水*, 2023, 49(s2): 573–578.
SHEN L Q, XU B L, ZHANG J, et al. A pilot study of UF + NF membrane process for advanced drinking water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(s2): 573–578.
- [8] 世界卫生组织. 饮用水水质准则[M]. 4 版. 上海供水调度监测中心, 上海交通大学, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
World Health Organization. Guidelines for drinking water quality [M]. 4th ed. Shanghai Water Supply Dispatching and Monitoring Center, Shanghai Jiao Tong University, translated. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011.

(上接第 163 页)

- CHEN R X, XIAO Q, ZHU Z W. Study on the carbon emission structure and emission reduction path of urban sewage system: Taking Shenzhen as an Example [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2025, 51(1): 49–54.
- [12] 刘诗月, 朱幸运, 梁爽, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算及减排路径分析;以沈阳市某污水厂为例[J/OL]. *环境科学*, 1–15. (2024–09–26) [2025–07–09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202405139>.
LIU S Y, ZHU X Y, LIANG S, et al. Carbon emission accounting and emission reduction path analysis of urban wastewater treatment plants: A case of a wastewater treatment plant in Shenyang City[J/OL]. *Environmental Science*, 1–15. (2024–09–26) [2025–07–09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202405139>.
- [13] 章易博, 柴文波, 王长智, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算与基于 BioWin 的减污降碳模拟[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(9): 427–438.
ZHANG Y B, CHAI W B, WANG C Z, et al. Carbon emission accounting of urban wastewater treatment plants and simulation of pollution and carbon reduction based on BioWin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(9): 427–438.
- [14] 刘善军, 马雪研, 刘雪洁, 等. 济南市某污水处理厂碳排放评估与分析[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(12): 1732–1736, 1742.
LIU S J, MA X Y, LIU X J, et al. Carbon emission accounting and analysis for a wastewater treatment plant in Jinan City [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(12): 1732–1736, 1742.
- [15] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
China Urban Water Association. Technical guide for carbon accounting and emission reduction path of urban water system [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2022.