

鲁永辉, 李伟英, 张琛, 等. 水厂生产废水回用的安全性评估及工艺优化[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 47–54, 74.

LU Y H, LI W Y, ZHANG C, et al. Safety evaluation and process optimization of reuse of production wastewater in WTP[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 47–54, 74.

水厂生产废水回用的安全性评估及工艺优化

鲁永辉¹, 李伟英^{1,2,*}, 张琛¹, 江潇龙³

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要 【目的】 水厂生产废水的回用不仅能够节约水资源、减少污染物排放, 还可降低药剂消耗及污泥处理成本, 实现低碳减排, 具有重要的环保意义。然而生产废水中污染物成分复杂, 其回用后水质可能存在安全问题, 因此, 需要开展水厂生产废水的安全回用及其工艺参数优化的研究。【方法】 基于西南某水厂生产性试验结合实验室小试试验, 对比常规工艺与均质回流工艺各单元水质变化特性, 探讨水厂生产废水回用的可行性及回用参数优化方案。【结果】 生产废水回流时, 沉淀池对浊度等常规指标去除率均高于无废水回流时; 过滤工艺对浊度、高锰酸盐指数、溶解性有机碳、氨氮的去除率分别为 84%、11%、4.6%、4.8%, 而沉淀工艺对其去除率分别为 31%、22%、11.2%、48.4%, 净水工艺对浊度、氨氮、高锰酸盐指数、溶解性有机碳的去除贡献为过滤>沉淀。出厂水中, 铝、锰、铜、锌、砷、铅各项金属指标 (60.77、9.70、22.78、16.10、12.70、11.51 $\mu\text{g/L}$) 均高于无废水回流时 (3.80、0.65、6.73、0.66、5.75、1.37 $\mu\text{g/L}$)。结合正交试验分析, 提出生产废水回用工艺最佳工况参数为排泥水回流比为 3%、PAC 投药量为 16 mg/L、砂滤池反冲洗废水回流比为 6%。【结论】 生产废水回流可达到强化混凝沉淀效果, 但可能伴随一定程度的金属元素富集现象, 然而, 水厂出水指标总体上仍满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 的相关要求。在最佳工况下, 生产废水回用工艺可减少混凝剂投加量超过 5 mg/L, 节约率达 30% 以上。因此, 水厂废水回用不仅可保障水厂水质安全可靠, 还践行了清洁生产、低碳减排政策, 具有理论与实践应用价值。

关键词 水厂 生产性试验 废水回用 强化混凝 最佳回流比

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)12-0047-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.006

Safety Evaluation and Process Optimization of Reuse of Production Wastewater in WTP

LU Yonghui¹, LI Weiyong^{1,2,*}, ZHANG Chen¹, JIANG Xiaolong³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract [Objective] The reuse of wastewater from water treatment plants not only conserves water resources and reduces pollutant discharge but also decreases chemical consumption and sludge treatment costs, contributing to low-carbon emission reduction and significant environmental benefits. However, due to the complex composition of pollutants in production wastewater, its reuse may pose potential water quality safety concerns. Therefore, research on the safe reuse of wastewater from water treatment plants and the optimization of process parameters is necessary. [Methods] This paper was based on operational experiment at a water treatment plant in southwest China and laboratory-scale tests. It compared water quality variations in different treatment units between conventional processes and homogenized recirculation, exploring the feasibility of wastewater reuse and optimizing its operational parameters. [Results] During wastewater recirculation, the sedimentation tank achieved a higher removal efficiency for turbidity and

[收稿日期] 2025-03-16

[基金项目] 国家自然科学基金(52470012); 校企合作项目(kh0040020250130)

[作者简介] 鲁永辉(1996—), 男, 研究方向为水厂生产废水回用, E-mail: 1394909254@qq.com。

[通信作者] 李伟英(1968—), 女, 教授, 研究方向为饮用水安全保障理论与技术研究、水中新污染物智能识别与高品质饮用水等, E-mail: 1231wyktz@tongji.edu.cn。

other conventional indicators compared to conditions without wastewater recirculation. Specifically, under recirculation conditions, the filtration process removed turbidity, permanganate index, dissolved organic carbon, and ammonia nitrogen at rates of 84%, 11%, 4.6%, and 4.8%, respectively, while the sedimentation process achieved removal rates of 31%, 22%, 11.2%, and 48.4%, respectively. The contributions of different treatment processes to turbidity, ammonia nitrogen, permanganate index, and dissolved organic carbon removal followed the order of filtration > sedimentation. The concentrations of metals such as aluminum, manganese, copper, zinc, arsenic, and lead in the finished water (60.77, 9.70, 22.78, 16.10, 12.70, 11.51 $\mu\text{g/L}$) were higher than those without wastewater recirculation (3.80, 0.65, 6.73, 0.66, 5.75, 1.37 $\mu\text{g/L}$). Based on orthogonal experiments, the optimal operational parameters for wastewater reuse included a sludge water recirculation ratio of 3%, a PAC dosage of 16 mg/L, and a sand filter backwash water recirculation ratio of 6%. [**Conclusion**] The recirculation of production wastewater enhances the coagulation and sedimentation process; however, it leads to the accumulation of metal elements. Nevertheless, the effluent quality of the water treatment plant generally complies with the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022). Under optimal operating conditions, the reuse of production wastewater reduces coagulant dosage by more than 5 mg/L, achieving a savings rate of over 30%. Therefore, the reuse of wastewater in water treatment plants not only ensures water quality safety and reliability but also aligns with clean production and low-carbon emission reduction policies, demonstrating both theoretical significance and practical application value.

Keywords water treatment plant (WTP) production experiment wastewater reuse enhanced coagulation optimal recirculation ratio

水资源是不可替代的重要自然资源,水厂在运行过程中会产生占供水量 3%~10% 的生产废水,这一过程在净水处理中难以避免。然而,由于我国对水厂生产废水处理的研究起步较晚,加之水资源短缺、低碳意识普及程度有限、废水处理设施建设复杂、投资成本较高以及回用水安全性问题较为突出等多重因素^[1]。国内配备较完善排泥水处理设施的水厂占比不足 10%^[2]。大量未经处理的生产废水直接排入水体,不仅导致水资源浪费,还加剧了受纳水体的水质恶化,进而破坏生态系统。因此,对生产废水进行合理的处理与回用,是水厂控制水体污染、推动低碳减排的重要发展方向。

研究^[3]发现,水厂生产废水主要包括絮凝池、沉淀池的排泥水以及滤池的反冲洗水。排泥水和反冲洗水中含有大量的絮凝颗粒及未充分水解利用的混凝剂,这些颗粒物具有较强的吸附和再絮凝能力,可净化水中的杂质。生产废水的回用不仅能够节约水资源,还可改善混凝效果,降低药剂消耗,尤其在低温低浊水处理过程中表现出显著优势^[4-6]。然而,生产废水成分复杂多样,不同类型废水的水质特性存在较大差异。回流工艺能显著影响水质特性,如果无法准确评估相关风险并采取有效技术手段进行控制,生产废水的回用可能对净水工艺造成污染并对人体健康构成潜在威胁。姚夏等^[7]发现,在合理控制回流比条件下,基于水厂工程工艺的排泥水回用安全可行。陈停^[3]的研究表明,当排泥水回用

时,最佳混合水浑浊度为 40~60 NTU,相应的节约率为 16.5%~39.5%;当排泥水与反冲洗水同时回用时,最佳混合水浑浊度为 125~175 NTU,相应的节约率为 13.0%~30.5%。因此,探究生产废水回用工艺的水质特性变化及其最佳回流比对于生产废水安全高效回用具有重要的现实意义。

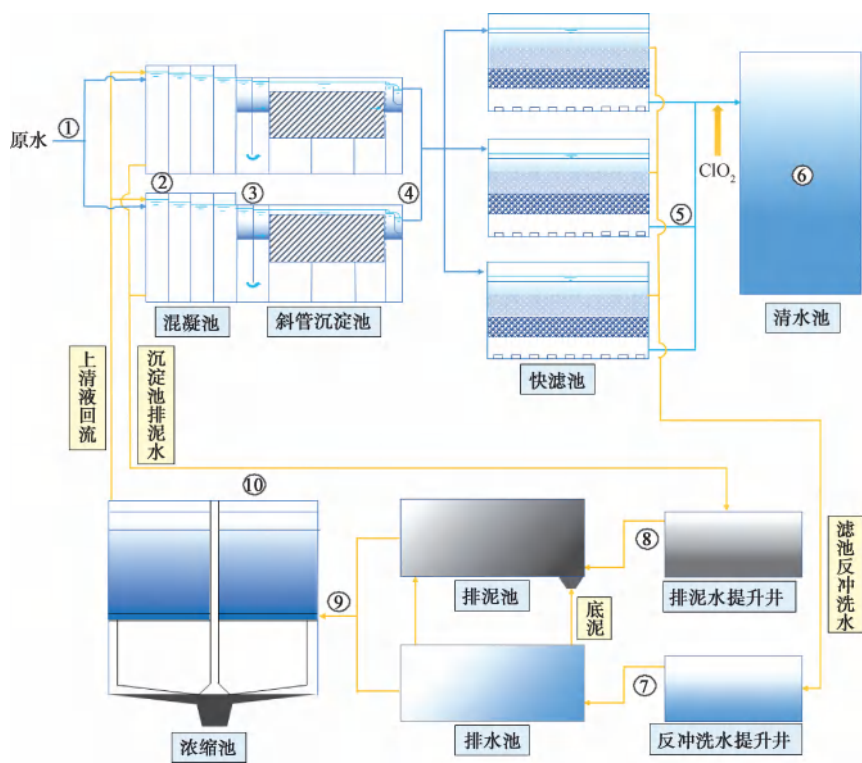
以往的研究多集中于通过实验室小试或中试试验探究生产废水回用工艺出水的水质安全研究,对于实际工程中回用工艺与常规工艺各处理流程出水水质变化对比研究较少。因此,本文基于西南某净水厂生产性试验,探讨生产废水回用对净水工艺各过程水质的影响,并通过实验室小试试验,研究其最佳回流比,为水厂回用工艺改进优化提供理论及技术支持。

1 研究方法

1.1 水厂工艺概况

西南某水厂分两期,水处理规模共为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,本次试验研究对象为二期工艺,由网格絮凝池、斜管沉淀池、快滤池组成。净水工艺混凝、沉淀由 2 组平行的生产线组成,2 组沉淀池出水在溢流槽汇集后通向 3 组快滤池。其中,原水和生产废水在网格反应池进水处混合,其流程工艺如图 1 所示。

其生产废水处理流程由调节池(包括排水池、排泥池)、浓缩池、平衡池、污泥脱水设备组成。考虑到系统整体的稳定性和处理效率,控制进水水质,减少处理负担,本试验采用均质回流方式。沉淀池



注:序号①~⑩代表取样点。

图 1 水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of WTP

排泥水、滤池反冲洗水在提升井短暂停留后,分别进入排泥池、排水池。排泥水与滤池反冲洗水混合后,泥水经提升进入浓缩池。浓缩池中投加聚合氯化铝(PAC),经过斜管沉淀后,上清液回流至排水池中设置的缓冲井,后回流至混凝池与原水混合。

1.2 试验方案

(1)在本次生产性试验中,分别在净水工艺与废水处理工艺各构筑物进出水口设置①~⑩共计10个取样点,如图1所示。在水厂正常运行的情况下进行采样与指标测定,之后关停试验生产线的废水回流工艺,并严格调整其他条件与生产废水回流时相同,进行采样与指标测定。

(2)选用水厂生态缸取样口出水作为小试试验原水,根据水厂实际投药量为10~20 mg/L 选取投药量5、10、15、20、25、30 mg/L 6个梯度进行试验,确定2个最佳投药量,而后2个投药量间再以1 mg/L 梯度进行进一步试验,从而精确确定最佳投药量。

(3)根据水厂运行中生产废水回流量,选定1%~11%作为回流比例梯度进行试验,并设置回流

比为0作为空白对照,使用六联混凝搅拌机(梅宇, MY3000-6A)模拟水厂混合、反应与沉淀过程(混凝参数如表1所示),取液面下3 cm 处水样测定其水质指标,进行各项指标的测定与分析。在步骤(2)测定的最佳投药量条件下,选定1%~11%作为回流比例梯度进行试验。

表 1 混凝参数一览表
Tab. 1 Overview of Coagulation Parameters

混凝阶段	时间/min	转速/(r·min ⁻¹)
阶段 1	1	200
阶段 2	5	120
阶段 3	20	60
阶段 4	20	0

1.3 试验材料与研究方法

在本次试验中,水厂运行采用的混凝剂为PAC。PAC是一种常用的铝基高分子混凝剂,具有良好的混凝效果。故小试仍选用PAC作为混凝剂。药剂来源为水厂用的PAC。

检测指标主要包括理化指标(温度、pH、浑浊度、颗粒数、氨氮等)、有机物指标[高锰酸盐指数、

紫外吸光值(UV_{254})、溶解性有机碳(DOC)、金属指标(铜、铝、锰、锌、砷、铅)。部分检测仪器及方法如表2所示。

表2 检测仪器及方法
Tab. 2 Detection Instruments and Methods

水质指标	检验方法	检验仪器
浑浊度	散射法	哈希 2100Q 浊度仪
高锰酸盐指数	酸性高锰酸钾 滴定法	—
UV_{254}	吸光度检验法	Thermo 紫外可见分光光度计
DOC	—	OI 公司 1030W 型 TOC 测定仪
铝、锰等	质谱法 ^[8]	电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)

2 结果分析与讨论

2.1 生产废水回用水质安全风险研究

2.1.1 生产废水回用对常规水质指标的影响

为探究生产废水回用对净水工艺产生的具体影响,对生产废水回流与无生产废水回流时的各项水质指标进行检测。试验期间水温为 19.3~23.5℃,均值为 22.7℃,pH 值为 6.5~8.0。浑浊度、色度、 UV_{254} 、高锰酸盐指数、DOC、氨氮分析结果如图2所示。

在回流条件下,沉淀-过滤工艺对浑浊度的去除率为 38.6%,显著高于无回流时的 15.8%[图2(b)]。其原因可能在于:生产废水中含有的密实颗粒或较大尺寸的絮体在与原水混合后,能够有效结合水中的胶体颗粒,形成更大的矾花,从而加速沉淀分离过程^[9]。沉淀过程中,高锰酸盐指数的去除率在生产废水回流条件下达到 16.9%,远高于无回流时的 1.6%,表明生产废水回流强化了原水的混凝效果,提高了沉淀池对高锰酸盐指数的去除能力。 UV_{254} 和 DOC 在各处理单元中的变化趋势相近,相较于无废水回流条件,生产废水回流时工艺出水 UV_{254} 由 0.099 mg/L 降至 0.086 mg/L,DOC 质量浓度由 4.86 mg/L 降至 4.62 mg/L,因此,就有机物指标而言,生产废水回流未表现出明显的富集作用。此外,净水工艺对氨氮的去除效果较差,混凝沉淀过程对氨氮的去除贡献并不明显,氨氮主要集中在过滤阶段得以去除。这可能是由于氨氮被裹挟在颗粒或絮体内部,在过滤过程中被孔隙较小的滤料截留。总体而言,从净水流程看:过滤工艺对浑浊度、高锰酸盐指数、溶解性有机碳、氨

氮的去除率分别为 84%、11%、4.6%、4.8%,而沉淀工艺对其去除率分别为 31%、22%、11.2%、48.4%,过滤处理对浑浊度、高锰酸盐指数、DOC、氨氮的去除贡献大于沉淀过程;生产废水回流时沉淀池对各项指标的去除率均高于无回流时,且水厂出水水质指标均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的限值。这表明生产废水回流能有效增强混凝沉淀效果,提高净水工艺的整体处理效率。

2.1.2 生产废水回用对重金属指标的影响

试验期间,对于生产废水回流与否中的各工艺出水常见一般金属指标及毒理金属指标进行了测定,检测结果如图3所示。

由图3可知,生产废水回流时,净水工艺出水铝、锰、铜、锌含量均有所增长,表明存在金属元素富集的现象;混凝池出水铝含量显著下降(去除率为 39%),但锰和锌的含量变化较小。这是因为在混凝阶段,铝与水中的杂质发生混凝反应,形成絮体,并在样品处理时被有机膜截留,导致其测定含量减小。沉淀池对铝的去除率约为 50%,而锰和锌的含量变化较小。滤池出水铝、锰、锌的含量均有显著下降,去除率分别为 93.47%、98.78%、59.63%,表明滤池对其去除效果较好;出厂水铝、锰、铜、锌分别为 60.77、9.70、22.78、16.10 $\mu\text{g/L}$,回流工艺对其总去除率分别为 6.98%、-86.11%、4.86%、1.58%,相对于无废水回流时(3.80、0.65、6.73、0.66 $\mu\text{g/L}$)略有升高,但均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中相应的限值要求。

由图4可知,废水回流工艺中,原水中砷和铅的质量浓度分别为 9.64~13.16 $\mu\text{g/L}$ 和 10.60~11.66 $\mu\text{g/L}$,回流时砷和铅的含量变化均较小,净水工艺对其去除率分别为-4.79%、-7.19%,这表明废水回流并未显著增加净水工艺进水中砷和铅的含量。生产废水回流时,沉淀后砷和铅的含量分别升高了 40.90%和 5.44%,其原因可能是水力因素导致斜管中吸附的部分污染物脱附。回流时,过滤工艺对砷和铅的去除率分别为 4.79%、7.19%。试验时出厂水砷和铅的质量浓度分别为 5.74~14.35 $\mu\text{g/L}$ 和 1.37~11.91 $\mu\text{g/L}$ (均值分别为 12.70、11.51 $\mu\text{g/L}$),部分时期略微超出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中相应的限值要求,高于无废水回流时的含量(5.75、1.37 $\mu\text{g/L}$),表明其存在

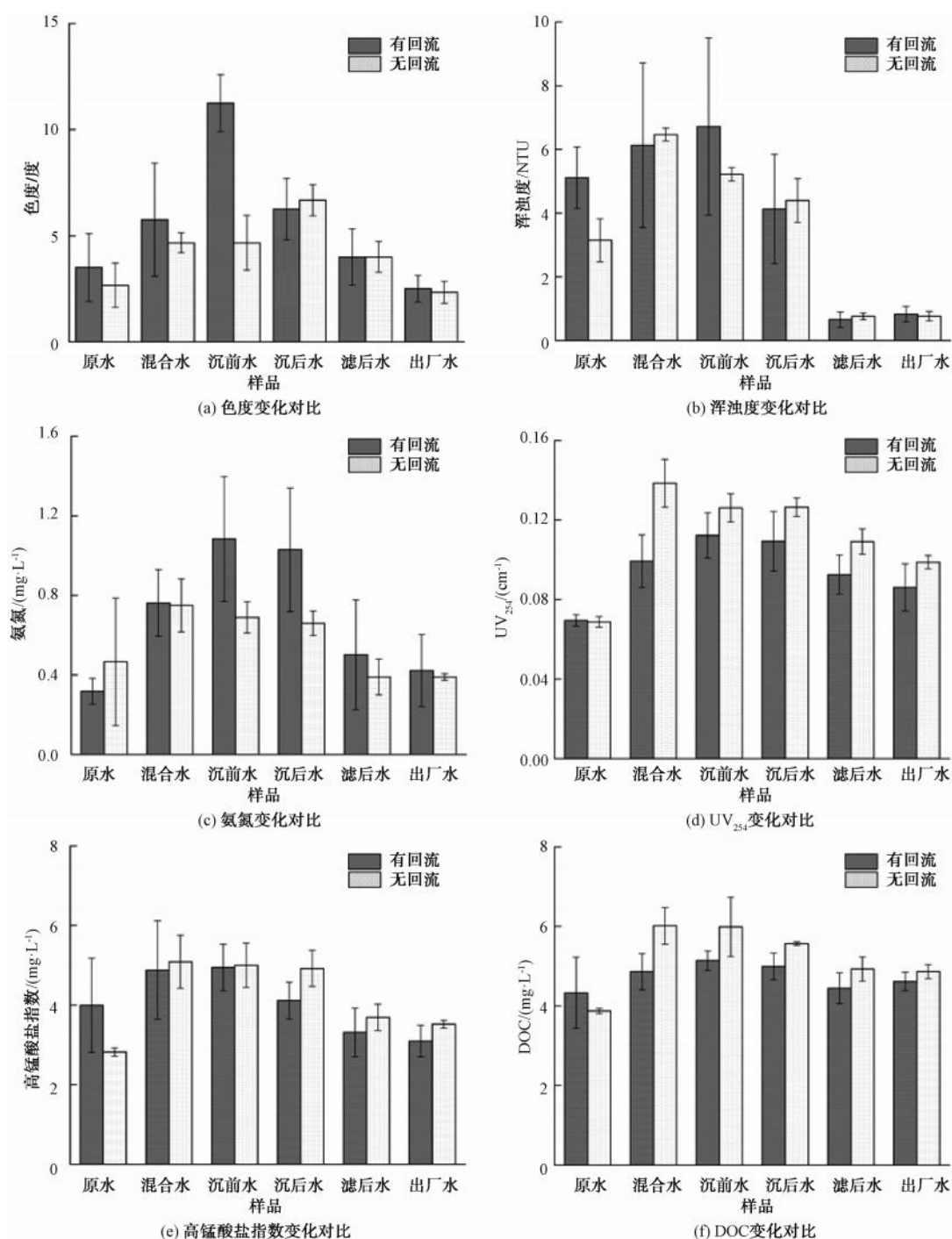


图2 生产废水回流与否水质常规指标对比

Fig. 2 Comparison of Conventional Water Quality Indices with or without Wastewater Recirculation

一定的富集现象。研究^[10-11]表明,水处理中絮凝剂在水中水解为金属氢氧化物,其很强的吸附能力导致其能够吸附许多污染物,如金属和有机物。尽管美国环境保护局推荐的毒性特征浸出程序认为较为稳定且无害^[11],但在厌氧发酵后,部分金属(如锰、镉等)的不稳定性显著增加^[11-13]。因此,在废水回

流过程中,由于提升井、调节池的贮存作用,加之夏季较高的温度,沉积底泥中的重金属经过发酵后可能会重新释放进入生产废水,再通过回流过程在净水工艺中富集。

因此,废水回用工艺对原水中重金属指标的去除效果提升有限,建议在对工艺前端原水中重金属

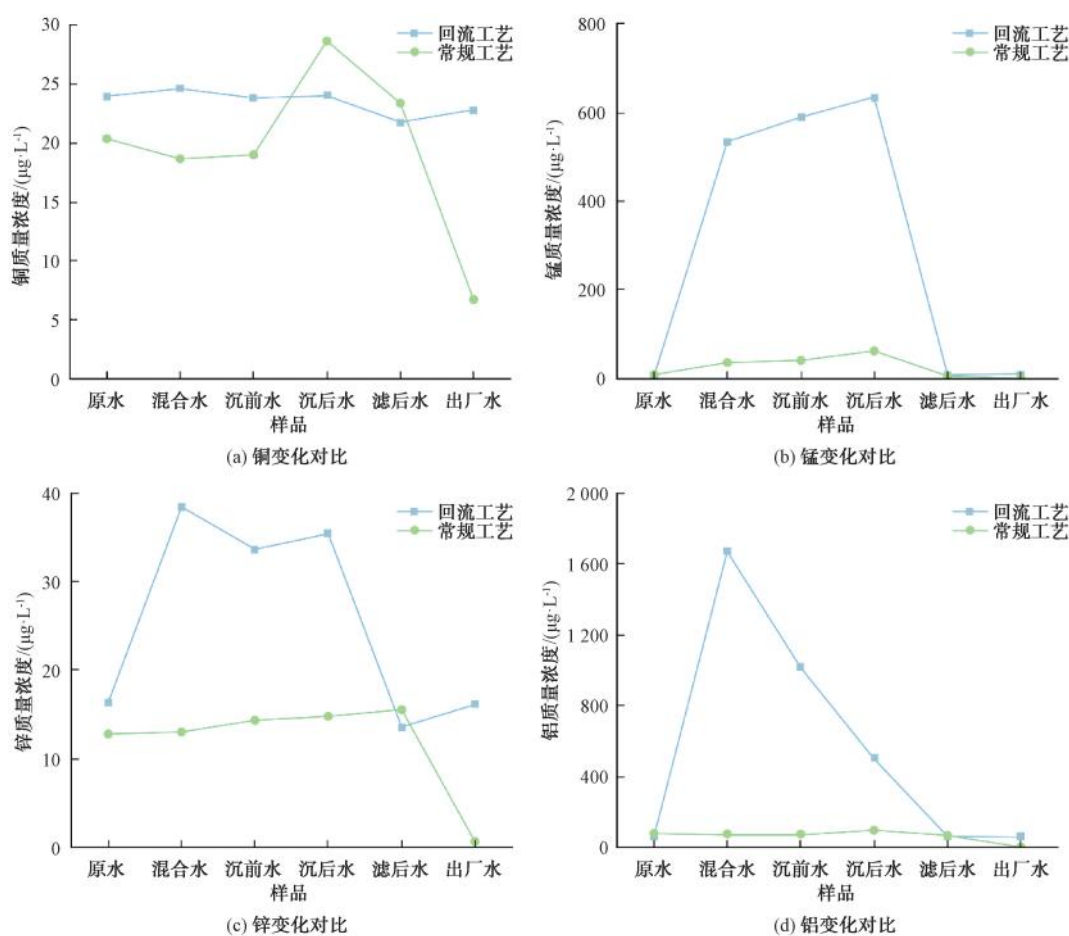


图3 生产废水回流与否水质一般金属指标对比

Fig. 3 Comparison of General Metal Indices with and without Wastewater Recirculation

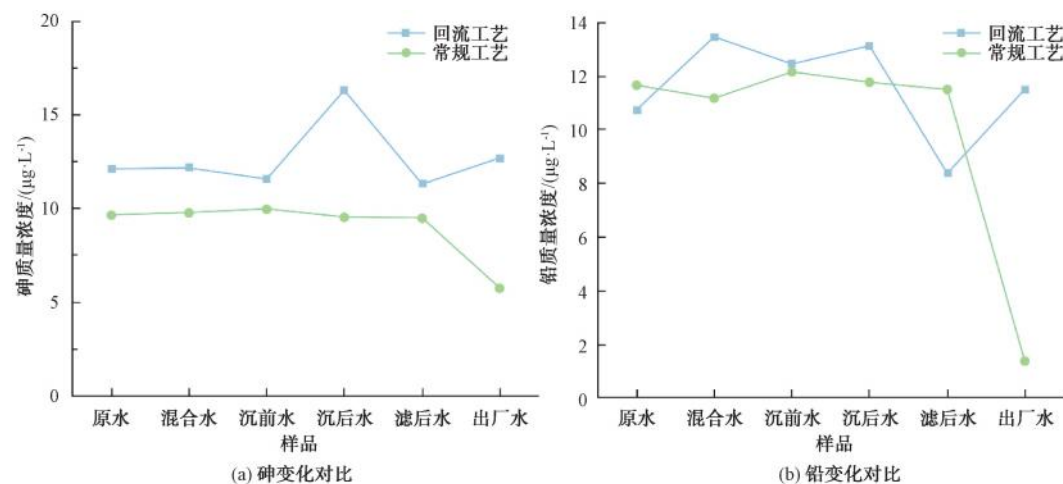


图4 生产废水回流与否水质毒理重金属指标对比

Fig. 4 Comparison of Toxic Heavy Metal Indices in Water Quality with or without Wastewater Recirculation

含量设定合理限值,或增设针对性处理单元以有效控制重金属指标的变化,应特别关注由于生产废水长期停放所导致的污染,并加强相关污染物的监测与控制。

2.2 生产废水回用运行参数优化

2.2.1 不同投药量小试试验

投药量小试试验每设置3组平行试验,取其均值作为试验结果,其试验结果如图5所示。

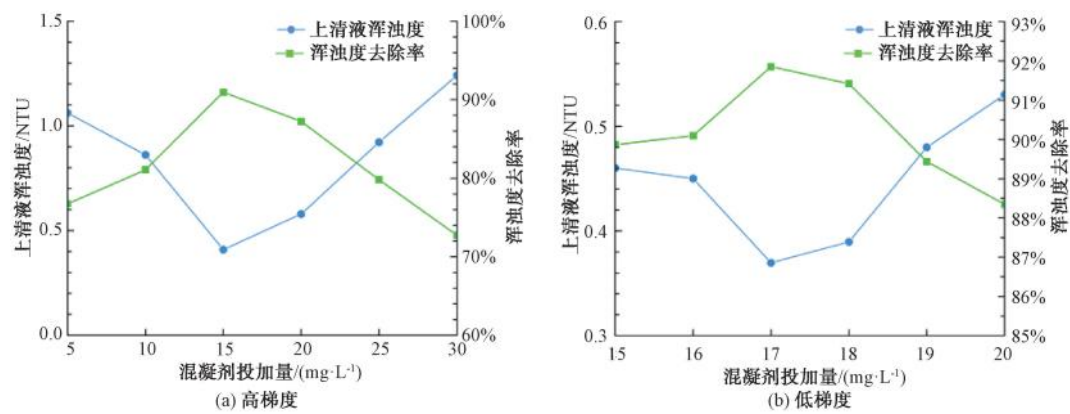


图 5 最佳投药量搅拌试验

Fig. 5 Stirring Test of Optimal Dosage

由图 5 可知, 原水经混凝沉淀后, 上清液浑浊度随投药量的增加先降低后上升。在混凝剂投加量为 15 mg/L 和 20 mg/L 时, 其上清液浑浊度为同组最低的 2 个值。进一步试验表明, 原水在混凝剂投药量为 17 mg/L 时, 上清液浑浊度达到最低 (0.362 NTU)。这表明根据水厂实际情况, 在此原水条件下, 混凝剂的最佳投药量为 17 mg/L。

2.2.2 正交试验

为了评判各因素对处理效果影响的主次性, 寻求各因素综合最优参数, 进行正交试验。在净水工艺中, 回流工况较为复杂, 对于出水效果的影响因素较多^[6, 14-15]。由于本次试验与水厂原水一致, 考虑工程实际的可操作性以及可靠性, 选定混凝剂投药量、排泥水回流比、滤池反冲洗水回流比作为试验控制因素^[16], 采用 3 因素 3 水平进行正交试验分析。根据水厂运行情况及投药量试验结果, 选定混凝剂投药量的水平分别为 12、16、20 mg/L; 选定排泥水回流比的水平分别为 2%、3%、4%, 选定反冲洗水回流比的水平分别为 4%、6%、8%。正交试验结果如表 3 所示。

根据正交试验结果 R 的大小可以判断出各因素的主次性。 R 越大对试验结果的影响越大, 因此, 影响出水浑浊度去除率的因素依次为排泥水回流比>PAC 投药量>反冲洗水回流比。试验结果显示, 各因素中 K_2 的值最高, 所以生产废水回流最佳运行工况为排泥水回流比为 3%, PAC 投药量为 16 mg/L, 反冲洗废水回流比为 6%。

投药量小试试验结果表明: PAC 最佳投药量为 17 mg/L, 沉淀出水浑浊度最低值为 0.362 NTU。

表 3 L9(3³) 正交结果

Tab. 3 L9(3³) Orthogonal Results

项目	投药量/ (mg·L ⁻¹)	排泥水 回流比	反冲洗水 回流比	上清液浑 浊度/NTU	浑浊度 去除率
1	12	2%	4%	0.488	89.27%
2	12	3%	6%	0.364	92.00%
3	12	4%	8%	0.46	89.89%
4	16	2%	6%	0.402	91.16%
5	16	3%	8%	0.348	92.35%
6	16	4%	4%	0.382	91.60%
7	20	2%	8%	0.409	91.01%
8	20	3%	4%	0.397	91.27%
9	20	4%	6%	0.442	90.29%
K_1	90.39	90.48%	90.72%		
K_2	91.71	91.88%	91.15%		
K_3	90.86	90.59%	91.08%		
R	1.32	1.39%	0.43%		

注: K_1 、 K_2 、 K_3 为各因素不同水平下对应浑浊度去除率的平均值; 极差 R 为各因素最大 K 值与最小 K 值之差。

正交试验结果表明: 在投药量为 16 mg/L, 生产废水回流比和为 11% (排泥水 3%、反冲洗水 8%) 时, 沉淀出水浑浊度为 0.348 NTU, 相比无生产废水回流时浑浊度进一步降低, 与投药量试验结果结论一致, 即在低浊度原水处理过程中, 生产废水回流可强化混凝沉淀效果, 降低出水浑浊度。在 PAC 投加量为 12 mg/L, 生产废水回流比为 9% (排泥水 3%、反冲洗水 6%) 时, 其出水浑浊度为 0.364 NTU, 与最佳投药量 (17 mg/L) 工况下出水浑浊度较为一致, 表明在生产废水回用在此运行条件下, 节药量约为

5 mg/L。

3 结论

(1)结果表明,本次试验条件下,水厂生产废水回流最佳运行工况:排泥水回流比为3%,PAC投药量为16 mg/L,反冲洗废水回流比为8%。在最佳工况下,生产废水回用工艺可减少混凝剂投加量超过5 mg/L,节约率达30%以上。在低浊度原水处理过程中,生产废水回流可强化混凝沉淀效果,降低出水浑浊度,为低温低浊水的处理提供了新的技术方案与思路。

(2)生产废水回流时,沉淀工艺的出水浑浊度、色度、高锰酸盐指数、 UV_{254} 和DOC均低于无生产废水回流时,且出厂水常规水质指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,表明生产废水回流可达到强化混凝沉淀过程,提高污染物去除效果。此外,研究结果未显示生产废水回流对有机物存在明显的富集作用,进一步验证了其在保障出水水质安全方面的可行性。该研究为水厂优化生产废水回用工艺、降低运行成本及实现低碳减排提供了理论支撑与技术参考。

(3)原水进入混凝池与生产废水混合后,铝、锰、铜、锌、砷、铅等金属指标略高于无废水回流时,表明其存在金属元素富集的现象。在回流工艺下,出厂水铝、锰、铜、锌含量均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,但当原水重金属含量较高时,部分样品结果砷、铅含量超出该标准限值,这可能是由于提升井、调节池的贮存作用,加之夏季温度较高,沉积底泥中的重金属经过发酵后重新释放进入生产废水,随后通过回流在净水工艺中富集。因此,在废水回用工艺中,应加强对重金属污染物的监测与控制,并特别关注生产废水长期停放所导致的污染。

参考文献

- [1] 李政伟,高小涛,马浩. 净水厂排泥水处理现状及展望[J]. 水处理技术, 2024, 50(6): 15-20.
LI Z W, GAO X T, MA H. Present situation and prospect of water treatment residuals in water purification plant [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(6): 15-20.
- [2] 郭文娟,鄢燕秋. 净水厂排泥水处理工艺现状及发展方向[J]. 给水排水, 2013, 49(8): 35-40.
GUO W J, QIE Y Q. Present situation and development direction of sludge discharge water treatment technology in water purification plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 49(8): 35-40.
- [3] 陈停. 净水厂生产废水回用强化低浊水混凝及水质安全性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
CHEN T. Research on drinking water plant (DWP) streams recycle for strengthen of low turbidity water coagulation efficiency and water quality safety [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [4] 朱世俊,徐勇鹏,陈停,等. 净水厂生产废水回用优化调试的中试研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(7): 54-57.
ZHU S J, XU Y P, CHEN T, et al. Optimization of recycling sludge in drinking water treatment: pilot-scale study[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(7): 54-57.
- [5] 彭伟,刘耀群,丁仕林,等. 低温低浊水处理的研究现状[J]. 辽宁化工, 2021, 50(5): 637-640.
PENG W, LIU Y Q, DING S L, et al. Research status of low temperature and low turbidity water treatment [J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(5): 637-640.
- [6] 朱艳旭,李孟,包宇飞,等. 沉淀池污泥回流强化低浊水处理研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(5): 124-127.
ZHU Y X, LI M, BAO Y F, et al. Effects of the returned sludge on the enhanced treatment of low-turbidity water[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(5): 124-127.
- [7] 姚夏,张莉平,钱林,等. 净水厂沉淀池排泥水回用及其生物稳定性[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 73-80.
YAO X, ZHANG L P, QIAN L, et al. Reuse and bio-stability of sludge water from sedimentation tank in water treatment plant [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(6): 73-80.
- [8] GONG T T, LIU J F, LIU X X, et al. A sensitive and selective sensing platform based on Cd Te QDs in the presence of L-cysteine for detection of silver, mercury and copper ions in water and various drinks[J]. Food Chemistry, 2016, 213: 306-312. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.06.091.
- [9] 童楨恭,奚志成,陈文秀,等. 净水厂沉淀池排泥水直接回用的可行性研究[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 646-650.
TONG Z G, XI Z C, CHEN W X, et al. Feasibility study on direct reuse of sludge water from sedimentation tank in water purification plant [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(2): 646-650.
- [10] PUNAMIYA P, SARKAR D, RAKSHIT S, et al. Effectiveness of aluminum-based drinking water treatment residuals as a novel sorbent to remove tetracyclines from aqueous medium [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(5): 1449-1459.
- [11] LIN L, XU X S, PAPELIS C, et al. Sorption of metals and metalloids from reverse osmosis concentrate on drinking water treatment solids[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 134: 37-45. DOI: 10.1016/j.seppur.2014.07.008.

(下转第74页)

明显水垢生成。水厂可根据实际情况,可将硬度作为出厂水控制指标,适当增加地表水比例,调整兑水方案,提高用户感官体验。

另外,通过改变水中碳酸的存在形式将直接影响水垢生成量,酸性条件下碳酸主要以 CO_2 形式存在于水中,水垢生成较少。水厂也可通过进行 CO_2 曝气同时调节 pH 至碱性促进水垢生成,以达到去除水中 Ca^{2+} 的目的,从而减少用户端水垢生成。

参考文献

- [1] 王志强. 酸碱平衡曝气除垢工艺的酸量模型及新型酸阻垢剂的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
WANG Z Q. Acid-alkali balanced aeration scale removal process acid amount model and new acid scale inhibitor[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [2] 李静芸. 终端烧水联合砂滤对水垢的截留效能与机制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
LI J Y. Study on the efficacy and mechanism of scale retention by combined sand filtration of end-fired water[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2024.
- [3] 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, National Standardization Administration. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: Standard Press of China, 2022.
- [4] 徐丹. 离子色谱法测定水中总硬度[J]. 现代农业科技, 2019(14): 170–171.
XU D. Determination of total hardness in water by ion chromatography [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(14): 170–171.
- [5] 杨念, 况守英, 岳蕴辉. 几种常见无水碳酸盐矿物的红外吸收光谱特征分析[J]. 矿物岩石, 2015, 35(4): 37–42.
YANG N, KUANG S Y, YUE Y H. Infrared spectra analysis of several common anhydrous carbonate minerals [J]. Mineralogy and Petrology, 2015, 35(4): 37–42.
- [6] 张琨, 张昭, 郭红丹, 等. 碳化法制备均一文石晶须的研究及机理探讨[J]. 中国粉体技术, 2002(2): 46–48.
ZHANG L, ZHANG Z, GUO H D, et al. Studies on preparation of uniform aragonite whisker by carbonation process and mechanism [J]. China Powder Science and Technology, 2002(2): 46–48.
- [7] KOJIMA Y, SADOTOMO A, YASUE T, et al. Control of crystal shape and modification of calcium carbonate prepared by precipitation from calcium hydrogen carbonate solution [J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 1992, 100(1165): 1145–1153.
- [8] 邵明浩, 傅敏, 魏晓平, 等. 文石碳酸钙晶须的制备与应用进展[J]. 材料导报, 2007(9): 33–35, 47.
SHAO M H, FU M, WEI X P, et al. Preparation and application progress of aragonite calcium carbonate whisker [J]. Materials Review, 2007(9): 33–35, 47.
- [9] 张旭. 电厂循环冷却水垢晶体分析及阻垢机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2013.
ZHANG X. Study on crystal analysis of scale of power plant circulating cooling water and mechanism of scale inhibition [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2013.
- [10] 张飞. 漂浮与奇特毛细系统的平衡与稳定性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
ZHANG F. Equilibrium and stability of floating and exotic capillary systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

(上接第 54 页)

- [12] DU X, HONG M, YANG Y, et al. Removal mechanisms of aqueous $\text{Cr}(\text{VI})$ by anaerobic fermentation sludge [J]. Environmental Technology, 2023, 44(26): 3975–3987.
- [13] WANG L, LIU C, FAN X, et al. Methane promotion of waste sludge anaerobic digestion: Effect of typical metal meshes on community evolution and electron transfer [J]. Water, 2022, 14(19): 3129–3129.
- [14] 黄卓. 城市净水厂生产废水回用安全性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
HUANG Z. Research on safety of wastewater reuse in municipal water treatment plants [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [15] 童祯恭, 吴哲帅, 钟赐龙. 赣江南昌段净水厂排泥水回用混凝增效实验研究[J]. 应用化工, 2019, 48(10): 2300–2303, 2307.
TONG Z G, WU Z S, ZHONG C L. Experimental study on coagulation and synergistic effect of sludge water reuse in Nanchang water treatment plant of Ganjiang River [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(10): 2300–2303, 2307.
- [16] 吴哲帅. 净水厂排泥水回流参数及安全性试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
WU Z S. Experimental study on parameters and safety of sludge water reflow in water treatment plant [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2019.