

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.012

给水厂生产废水回流前后水质化学稳定性分析

童祯恭¹, 陈哲炜¹, 章瞳瞳¹, 王舒琪¹, 许莉²

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省水务水科学检测研发有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 针对夏季赣江南昌段水源水,采用饱和指数等指标综合分析区域水质化学稳定性。同时,基于赣江沿岸两座给水厂,研究生产废水回流至常规处理工艺中对水质化学稳定性的影响。结果表明,夏季赣江南昌段水源水具有腐蚀倾向,其饱和指数 <0 ,稳定指数 >7.5 ,拉森指数 >0.2 ,侵蚀指数介于 $9\sim 11$,碳酸钙沉淀势 $<-5\text{ mg/L}$ 。与无生产废水回流时的出厂水相比,当回流10%生产废水时,出厂水饱和指数降低8.59%,稳定指数上升0.39%,拉森指数上升10.53%,侵蚀指数下降1.49%,碳酸钙沉淀势下降6.74%。通过相关性分析可知,pH、碱度、硬度和腐蚀性阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)是回流生产废水后影响水质化学稳定性的主要因素。进一步的方差分析揭示,处理工艺和生产废水回流比均会对化学稳定性定量指标产生影响,且随回流比的增加,水质化学稳定性降低。给水厂生产性试验证明,回流生产废水会降低水质化学稳定性,增大出厂水的腐蚀风险。

关键词: 给水厂; 生产废水回流; 水质化学稳定性; 赣江南昌段水源水

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0084-06

Chemical Stability of Water Quality before and after Reflux of Production Wastewater in Waterworks

TONG Zhen-gong¹, CHEN Zhe-wei¹, ZHANG Tong-tong¹, WANG Shu-qi¹, XU Li²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Water Science and Development Co. Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: The chemical stability of source water quality in Nanchang section of the Ganjiang River during summer season was systematically evaluated using parameters such as saturation index. Additionally, based on data from two waterworks along the Ganjiang River, the influence of the reflux of production wastewater into conventional treatment process on the chemical stability of the water quality was investigated. During summer, the source water of Nanchang section of the Ganjiang River exhibited a tendency towards corrosion, characterized by the saturation index below 0, the stability index exceeding 7.5, the Larsen index greater than 0.2, the erosion index ranging from 9 to 11, and the calcium carbonate precipitation potential lower than -5 mg/L . Compared with the effluent without production wastewater reflux, when 10% of production wastewater was recirculated, the saturation index of the effluent decreased by 8.59%, the stability index increased by 0.39%, the Larsen index increased by 10.53%, the erosion index decreased by 1.49%, and the calcium carbonate precipitation potential decreased by 6.74%.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52060006); 自然资源部大湖流域国土空间生态保护修复工程技术创新中心开放课题基金资助项目(JXCXZX2024006)

通信作者: 陈哲炜 E-mail: 18357017520@163.com

Through correlation analysis, it could be determined that pH, alkalinity, hardness, and corrosive anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) were the primary factors influencing the chemical stability of water quality after reflux of production wastewater. Further analysis of variance indicated that both treatment process and the reflux ratio of production wastewater exerted measurable effects on quantitative stability indicators. Specifically, as the reflux ratio increased, the chemical stability of the treated water decreased. Full-scale trials at the waterworks confirmed that the reflux of production wastewater compromised the chemical stability of the effluent, thereby increasing its risk of corrosion.

Key words: waterworks; reflux of production wastewater; chemical stability of water quality; source water of Nanchang section of the Ganjiang River

为了实现废水零排放目标,保障出水水质安全,许多给水厂采取生产废水回流的方法。给水厂生产废水的水量较大,但利用率不足20%^[1],其中对排泥水的处理包括调节、浓缩、脱水、处置四道工序^[2]。生产废水回流后会影响到给水厂水质指标,如pH、浊度、总碱度等,但同时回流废水又会起到强化混凝作用^[3-5];另外,回流废水中的无机物能够增强水体导电性,可能会对出厂水的化学稳定性造成冲击^[6]。而出厂水化学稳定性差易导致供水系统腐蚀或结垢,引发黄水等问题。因此在废水零排放的新模式下,回流生产废水对常规处理工艺出水化学稳定性的影响是一个值得关注的问题。夏季赣江南昌段水源水温度高、pH低,出厂水易呈现出腐蚀倾向,为此,以南昌段沿江两座给水厂为研究对象,探讨其原水水质的化学稳定性,以及常规处理工艺下

生产废水回流前后水质的化学稳定性变化,以进一步提高区域供水水质安全性。

1 材料与方法

1.1 水质化学稳定性判别方法

在供水系统中水质化学稳定性差常表现为腐蚀等问题。作为综合性指标,化学稳定性在给水厂运行中受多种因素影响,例如:pH、总碱度、氯离子、硫酸盐等。目前,化学稳定性判定指标主要分为两类:一类是基于碳酸钙溶解平衡理论的指标,包括饱和指数Langelier(I_L)、稳定指数Ryznar(I_R)等;另一类是基于其他类别水质参数提出的指标,包括拉森指数(LR)、Riddick指数等^[7]。由于pH、总碱度、硫酸盐等常规指标是影响水质化学稳定性的重要因素^[8],所以在评判水质化学稳定性时,应采用多个指标进行综合评价,具体评价标准见表1。

表1 水质化学稳定性评价标准

Tab.1 Evaluation criteria for chemical stability of water quality

| 评价指数 | 评价标准 |
|-------------|--|
| 饱和指数 I_L | $I_L=0$,水质稳定; $I_L>0$,水质有结垢倾向; $I_L<0$,水质有腐蚀倾向 |
| 稳定指数 I_R | $I_R=4.0\sim 5.0$,严重结垢; $I_R=5.0\sim 6.0$,轻度结垢; $I_R=6.0\sim 7.0$,基本稳定; $I_R=7.0\sim 7.5$,轻微腐蚀; $I_R=7.5\sim 9.0$,严重腐蚀; $I_R>9.0$,极严重腐蚀 |
| 拉森指数 LR | $LR<0.2$,水质稳定; $LR=0.2\sim 0.6$,水质轻微腐蚀; $LR>0.6$,水质严重腐蚀 |
| 侵蚀指数 AI | $AI\leq 10$,水质高度腐蚀; $AI=10\sim 12$,水质中度腐蚀; $AI\geq 12$,水质无腐蚀 |
| 碳酸钙沉淀势 CCPP | $CCPP<-10\text{ mg/L}$,严重腐蚀; $CCPP=-10\sim -5\text{ mg/L}$,中度腐蚀; $CCPP=-5\sim 0\text{ mg/L}$,轻微腐蚀; $CCPP=0\sim 4\text{ mg/L}$,基本稳定; $CCPP=4\sim 10\text{ mg/L}$,轻度结垢; $CCPP=10\sim 15\text{ mg/L}$,中度结垢; $CCPP>15\text{ mg/L}$,严重结垢 |

1.2 研究对象及检测方法

以赣江南昌段沿岸一南一北A、B两座给水厂为研究对象,A水厂平均供水量为 $9\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用常规处理工艺;B水厂平均供水量为 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,水厂分为三期,一期回流生产废水,二期、三期均不回流,均采用常规处理工艺。两座给水厂均采用聚合氯化铝(PAC)混凝剂和次氯酸钠消毒剂。

试验通过检测给水厂沿程水质来评判水处理过程中的化学稳定性,具体指标包括:pH、总碱度、硫酸盐、氯化物等,以上指标均采用国家标准方法进行检测,碳酸钙沉淀势采用Phreeqc软件计算。

2 水质情况

2.1 原水水质

两座给水厂的原水水质见表2。

表 2 夏季期间两座给水厂原水水质

Tab.2 Raw water quality of two waterworks during summer

| 项目 | pH | 水温/°C | 氯化物/(mg·L ⁻¹) | 硫酸盐/(mg·L ⁻¹) | 溶解氧/(mg·L ⁻¹) | 碱度/(mg·L ⁻¹) |
|------|---------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| A 水厂 | 6.2~7.1 | 17.2~24.6 | 9.8~13.0 | 3.60~4.10 | 7.11~7.91 | 45.2~50.3 |
| B 水厂 | 6.7~7.8 | 16.3~25.5 | 9.5~12.0 | 3.55~4.30 | 7.20~7.85 | 40.5~43.6 |

2.2 回流生产废水水质

A 水厂的生产废水分别取自沉淀池的排泥水和滤池的反冲洗水, B 水厂的生产废水取自浓缩池后的混合回流水。生产废水水质指标经多次测量后取平均值, 具体水质情况见表 3。

表 3 两座给水厂回流生产废水水质

Tab.3 Quality of recycled production wastewater in two waterworks

| 项目 | pH | 浊度/NTU | 总硬度/(mg·L ⁻¹) | 碱度/(mg·L ⁻¹) | 氯化物/(mg·L ⁻¹) | 硫酸盐/(mg·L ⁻¹) | 溶解性总固体/(mg·L ⁻¹) |
|--------|------|--------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 沉淀池排泥水 | 7.04 | 2 000 | 74.69 | 69.86 | 7.65 | 18.41 | 101 |
| 滤池反冲洗水 | 7.25 | 188 | 41.83 | 38.58 | 7.26 | 9.24 | 96 |
| 混合回流水 | 7.38 | 32 | 42.39 | 28.20 | 8.21 | 11.27 | 51 |

3 结果与讨论

3.1 原水的化学稳定性

A 水厂原水取自赣江南昌段沿岸, B 水厂原水取水口位于 A 水厂下游。在夏季对两座给水厂原水取样后测定其化学稳定性, 结果见表 4。可知, 两座给水厂原水的饱和指数均小于 0, 稳定指数均大于 7.5, 拉森指数均大于 0.2, 侵蚀指数均介于 9~11, 碳酸钙沉淀势均小于 -5 mg/L。表明夏季赣江(南昌段)原水水质总体呈现腐蚀倾向。

表 4 夏季给水厂原水的化学稳定性

Tab.4 Chemical stability of raw water in two waterworks

| 项目 | 饱和指数 | 稳定指数 | 拉森指数 | 侵蚀指数 | 碳酸钙沉淀势/(mg·L ⁻¹) |
|------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|------------------------------|
| A 水厂 | -0.67~ -0.85 | 8.97~9.76 | 0.58~ 0.65 | 10.25~ 10.68 | -6.31~-5.47 |
| B 水厂 | -1.52~ -1.78 | 10.27~ 10.83 | 0.60~ 0.71 | 9.92~ 10.14 | -7.36~-6.59 |

3.2 A 水厂回流生产废水试验研究

A 水厂工艺流程见图 1, 生产废水回流后水质化

学稳定性的变化采用小试进行分析, 分别对混凝沉淀、过滤、消毒后的水质化学稳定性进行研究。生产废水设置为排泥水与反冲洗水按 1:1 混合后回流, 回流比分别设置为 0、4%、10%, 混凝剂投加量设置为 15 mg/L, 消毒剂次氯酸钠投加量设置为 3 mg/L, 回流前后水质化学稳定性变化情况见表 5。

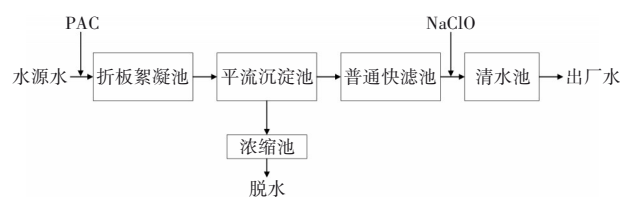


图 1 A 水厂处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of water treatment process in A waterworks

表 5 回流生产废水前后 A 水厂水质化学稳定性的变化

Tab.5 Change in chemical stability of water quality in A waterworks before and after reflux of production wastewater

| 项目 | 回流比/% | 饱和指数 | 稳定指数 | 拉森指数 | 侵蚀指数 | 碳酸钙沉淀势/(mg·L ⁻¹) |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|------------------------------|
| 沉淀池出水 | 0 | -1.07 | 9.83 | 0.59 | 10.26 | -5.48 |
| | 4 | -1.18 | 9.92 | 0.60 | 10.17 | -6.09 |
| | 10 | -1.32 | 10.02 | 0.65 | 10.02 | -5.73 |
| 砂滤池出水 | 0 | -1.36 | 10.29 | 0.61 | 9.96 | -5.55 |
| | 4 | -1.38 | 10.36 | 0.63 | 9.84 | -6.34 |
| | 10 | -1.41 | 10.39 | 0.68 | 9.76 | -5.85 |
| 出厂水 | 0 | -1.28 | 10.22 | 0.57 | 10.10 | -5.64 |
| | 4 | -1.35 | 10.24 | 0.59 | 9.97 | -6.55 |
| | 10 | -1.39 | 10.26 | 0.63 | 9.95 | -6.02 |

由表 5 可知, 原水经混凝沉淀处理后, 饱和指数为 -1.07, 回流 4% 和 10% 的生产废水后分别使其降至 -1.18 和 -1.32, 这是因为夏季水源水中的碳酸氢根浓度较低, 不能有效中和 PAC 水解生成的 H⁺, 而回流的生产废水中含有部分未完全水解的 PAC, 使得回流后的 pH 降低, 化学稳定性下降。消毒后饱和指数均上升, 研究表明次氯酸钠消毒产生的 NaOH 使 pH 增大, 降低了水体腐蚀倾向^[9]。回流 10% 的生产废水后出厂水的饱和指数较未回流时

降低了8.59%。稳定指数的变化与饱和指数类似,也呈负面影响,回流10%生产废水时出厂水的稳定指数较未回流时升高了0.39%。

原水经混凝沉淀处理后,拉森指数为0.59,回流生产废水后拉森指数上升,主要原因是回流生产废水后,pH降低的同时水体碱度降低、硫酸盐等无机物浓度升高,使得水质化学稳定性降低。消毒后,拉森指数均下降,表明水质化学稳定性有所改善。回流10%生产废水时出厂水的拉森指数较未回流时升高了10.53%。

原水经混凝沉淀处理后,侵蚀指数为10.26,回流4%和10%生产废水后分别降至10.17和10.02,表明回流生产废水会降低水质化学稳定性,且回流比例越高,水质化学稳定性越差。经过滤后,回流生产废水的出水化学稳定性仍劣于未回流,最终回流10%生产废水时出厂水的侵蚀指数较未回流时下降了1.49%。

原水的碳酸钙沉淀势在常规处理工艺中沿程递减,且回流生产废水后水质腐蚀倾向加剧,最终回流10%生产废水时出厂水的碳酸钙沉淀势较未回流时下降了6.74%。

综上所述,回流生产废水会降低水质化学稳定性。

3.2.1 影响因素相关性分析

为明确回流生产废水后水质化学稳定性的影响因素,进行了相关性分析,结果如图2所示(*表示 $p \leq 0.05$)。

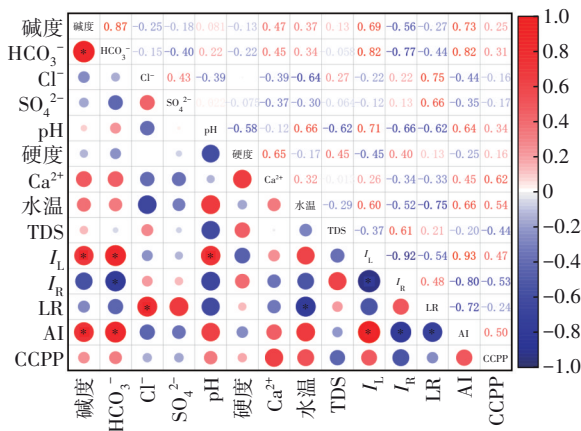


图2 水质化学稳定性的影响因素相关性分析

Fig.2 Correlation between chemical stability of water quality and influencing factors

以饱和指数 I_L 为例,pH、碱度、水温等与其呈显

著正相关(相关系数分别为0.71、0.69、0.60),而与硬度和溶解性总固体(TDS)呈负相关(相关系数分别为-0.45、-0.37),故对于饱和指数,pH和碱度与其关联度较高。相关性分析主要表现为pH、碱度减小,饱和指数、侵蚀指数降低,稳定指数增大,水体腐蚀倾向更强。而硬度、TDS的增大能够降低水体的腐蚀程度;同时碳酸氢根离子浓度的降低,氯离子与硫酸根离子浓度的增大,均能促使拉森指数升高。所以在研究时应重点关注pH、碱度以及腐蚀性阴离子的变化,以优化水质化学稳定性。

3.2.2 影响因素的多元逐步回归模型建立

通过上述分析可知,化学稳定性指标受多重因素影响,采用SPSS软件,以影响因素为因变量,对各个指数建立多元逐步回归模型。以饱和指数为例,与其相关的pH(X_1)、碱度(X_2)、总硬度(X_3)、TDS(X_4)、水温(X_5)作为自变量,建立模型,如表6所示,可知第2个模型的拟合度较高($R^2=0.902$),因变量饱和指数与自变量之间存在显著线性相关性;根据表7的模型参数可知,该模型检验统计量 $F=38.009$,远大于0.001,表明因变量与自变量间线性关系显著;根据表8中的非标准化参数,将其代入后得到回归方程: $Y_{\text{饱和指数}}=0.627X_1+0.029X_2-6.759$ 。

表6 饱和指数回归模型

Tab.6 Regression model for saturation index

| 模型 | R | R ² | 调整后R ² | 标准估算误差 |
|----|-------|----------------|-------------------|----------|
| 1 | 0.864 | 0.746 | 0.710 | 0.057 92 |
| 2 | 0.963 | 0.927 | 0.902 | 0.033 56 |

表7 饱和指数回归模型参数

Tab.7 Parameters of saturation index regression model

| 模型 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | 显著性 |
|----|-------|-----|-------|--------|--------|
| 回归 | 0.086 | 2 | 0.043 | 38.009 | <0.001 |
| 残差 | 0.007 | 6 | 0.001 | | |
| 总计 | 0.092 | 8 | | | |

表8 饱和指数多元回归分析系数

Tab.8 Multiple regression analysis coefficients of saturation index

| 模型 | 非标准化参数 | | 标准系数 | | |
|-------|--------|-------|----------|--------|--------|
| | B | 标准误差 | 标准化偏回归系数 | t | Sig |
| 常数 | -6.759 | 1.226 | | -5.511 | 0.001 |
| X_1 | 0.627 | 0.163 | 0.428 | 3.853 | 0.008 |
| X_2 | 0.029 | 0.003 | 0.906 | 8.164 | <0.001 |

同理得到其余化学稳定性指标的回归模型如下： $Y_{\text{稳定指数}} = -0.055X_2 + 11.687$ (X_2 为碱度)； $Y_{\text{拉森指数}} = -1.149.326X_6 + 1.937.72X_7 + 1.761.976X_8 + 0.615$ (X_6 为碳酸氢根、 X_7 为氯化物、 X_8 为硫酸盐)； $Y_{\text{侵蚀指数}} = 0.015X_1 + 0.029X_2 + 0.969X_9 + 1.988$ (X_1 为 pH、 X_2 为碱度、 X_9 为钙硬度)。

3.2.3 定量指标多因素方差分析

以不同回流比和处理单元为变量，对拉森指数、侵蚀指数、碳酸钙沉淀势进行多因素方差分析。结果表明，两者均显著影响 3 个化学稳定性定量指标。以拉森指数为例，由表 9 可知，回流比和处理单元均对其有显著影响 (Sig<0.05)。根据表 10 的数据分析可知，生产废水回流比为 10% 时拉森指数最高，表明回流比增大，化学稳定性会降低，其余两个指标也表现出同样的规律。因此，回流生产废水时需关注回流比对化学稳定性的影响。

表 9 拉森指数主体间效应检验

Tab.9 Larsen index inter entity benefit check

| 源 | Ⅲ类平方和 | 自由度 | 均方 | F | Sig |
|------|-------|-----|-------|---------|--------|
| 处理单元 | 0.003 | 2 | 0.001 | 86.000 | <0.001 |
| 回流比 | 0.006 | 2 | 0.003 | 194.000 | <0.001 |

注： $R^2=0.993$ (调整后 $R^2=0.986$)。

表 10 回流比对拉森指数的影响子集

Tab.10 Influence degree of different reflux ratios on Larsen index

| 回流比/% | N | 子集 | | |
|-------|---|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 3 | 0.590 0 | | |
| 4 | 3 | | 0.606 7 | |
| 10 | 3 | | | 0.653 3 |

注：显著性均为 1.000。

3.3 B 水厂回流生产废水试验研究

B 水厂的排泥水与反洗水混合，经浓缩池处理后，上清液回流，污泥添加聚丙烯酰胺 (PAM) 后离心脱水。生产废水均回流至一期，工艺流程见图 3。

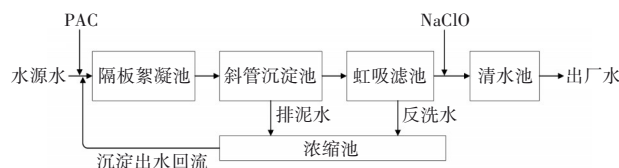


图 3 B 水厂处理工艺流程

Fig.3 Flow chart of water treatment process in B waterworks

生产废水回流前后水质化学稳定性变化情况

见表 11。可知，原水经混凝沉淀处理后，饱和指数由 -1.50 降至 -1.64 (回流) 和 -1.62 (不回流)。回流生产废水导致饱和指数更低，说明回流降低了水质化学稳定性，这主要是因为回流生产废水后 pH 降低。稳定指数的变化与饱和指数相似。

表 11 回流生产废水前后 B 水厂水质化学稳定性的变化

Tab.11 Change in chemical stability of water quality in B waterworks before and after reflux of production wastewater

| 项目 | 饱和指数 | 稳定指数 | 拉森指数 | 侵蚀指数 | 碳酸钙沉淀势/(mg·L ⁻¹) | |
|----------|-------|-------|-------|------|------------------------------|-------|
| 一期 (回流) | 原水 | -1.50 | 10.27 | 0.60 | 10.13 | -7.04 |
| | 沉淀池出水 | -1.64 | 10.36 | 0.71 | 9.98 | -7.65 |
| | 砂滤出水 | -1.68 | 10.40 | 0.66 | 9.91 | -7.99 |
| | 出厂水 | -1.56 | 10.28 | 0.63 | 9.96 | -8.02 |
| 二期 (不回流) | 原水 | -1.50 | 10.27 | 0.60 | 10.13 | -7.04 |
| | 沉淀池出水 | -1.62 | 10.31 | 0.65 | 10.01 | -7.33 |
| | 砂滤出水 | -1.65 | 10.38 | 0.63 | 9.95 | -7.82 |
| | 出厂水 | -1.54 | 10.22 | 0.61 | 9.98 | -7.93 |

原水的拉森指数为 0.60，混凝沉淀后分别升至 0.71 (回流) 和 0.65 (不回流)，表明回流生产废水降低了该阶段的水质化学稳定性，主要是因为回流的生产废水中含有硫酸盐等无机物，回流后增强了水体导电性。经过滤消毒后，回流工况相比不回流工况的拉森指数更高，表明出厂水的化学稳定性更差，易损坏供水管道内壁钝化膜。

原水的侵蚀指数为 10.13，混凝沉淀后分别降至 9.98 (回流) 和 10.01 (不回流)，经过滤消毒后，回流工况的侵蚀指数较不回流工况的要小，是因为回流的生产废水含有未完全水解的聚合氯化铝，导致 pH 和碱度略有下降。另外，两期的碳酸钙沉淀势在混凝沉淀、砂滤、消毒后，均有所下降，且回流工况更低，说明回流生产废水会降低水质化学稳定性，增强水体腐蚀倾向。

4 结论与建议

① 夏季赣江南昌段水源水呈现腐蚀倾向，其饱和指数 < 0，稳定指数 > 7.5，拉森指数 > 0.2，侵蚀指数介于 9~11，碳酸钙沉淀势 < -5 mg/L。

② 夏季水源水中碳酸氢根浓度较低，不能有效中和聚合氯化铝水解生成的 H⁺，故生产废水中未完全水解的聚合氯化铝会降低回流后水体的 pH 和碱度，从而降低水质化学稳定性。回流 10% 生产废水后，出厂水的饱和指数降低 8.59%，稳定指数上

升0.39%,拉森指数上升10.53%,侵蚀指数下降1.49%,碳酸钙沉淀势下降6.74%。

③ 相关性分析表明,pH、碱度减小,饱和指数、侵蚀指数降低,稳定指数增大,则水体腐蚀倾向更强;而硬度、TDS的增大能够降低水体的腐蚀程度;同时,碳酸氢根离子浓度的降低、氯离子与硫酸根离子浓度的升高会促使拉森指数升高。定量指标方差分析表明,处理单元和生产废水回流比对水质化学稳定性有显著影响,且高回流比更可能降低水质稳定性,增加水质腐蚀风险。

④ 小试与实际生产均证明,生产废水回流会降低水质化学稳定性,增加腐蚀风险。因此,生产实践中需重视该问题,并可通过投加碱剂、再矿化技术等改善。各给水厂应结合自身水质条件,对生产废水回流浓度与回流比进行深入优化研究。

参考文献:

- [1] 杨燕华,周夏海,朱先富. 水厂排泥水的控制和处理[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 40-44.
YANG Yanhua, ZHOU Xiahai, ZHU Xianfu. Control and treatment of sludge water in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(18): 40-44 (in Chinese).
- [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, 39(8): 35-40.
GUO Wenjuan, XI Yanqiu. The current status and development direction of sludge water treatment technology in water purification plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(8): 35-40 (in Chinese).
- [3] 童祯恭, 钟赐龙, 刘卓尧, 等. 微涡流协同排泥水回流混凝增效中试研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(10): 75-79.
TONG Zhengong, ZHONG Cilong, LIU Zhuoyao, et al. Pilot-scale study on coagulation synergism of micro-vortex synergistic sludge water reflux [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(10): 75-79 (in Chinese).
- [4] 童祯恭, 吴哲帅, 钟赐龙. 排泥水回流混凝安全性实验研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(8): 85-89.
TONG Zhengong, WU Zheshuai, ZHONG Cilong. Experimental study on the safety of sludge water reflux coagulation [J]. Technology of Water Treatment, 2020,

46(8): 85-89 (in Chinese).

- [5] 陈婷, 崔福义, 徐叶琴, 等. 净水厂生产废水回用强化混凝处理低浊水及安全性[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 21-25.
CHEN Ting, CUI Fuyi, XU Yeqin, et al. Drinking water treatment plant streams recycle for strengthening coagulation efficiency of low turbidity water and its water quality safety evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 21-25 (in Chinese).
- [6] 许仕荣, 方伟, 徐洪福. 城市供水系统的水质化学稳定性变化规律研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(11): 5-7.
XU Shirong, FANG Wei, XU Hongfu. Research on change regularity of water chemical stability in urban water supply systems [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(11): 5-7 (in Chinese).
- [7] 张守凤. 城乡统筹区域供水管网的水质化学稳定性及影响因素研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHANG Shoufeng. Research on the Chemical Stability and Influencing Factors of Water Quality in Urban and Rural Coordinated Regional Water Supply Networks [D]. Nanjing: Southeast University, 2016 (in Chinese).
- [8] 代雪宁, 李伟英, 李悦, 等. 中国南北两城市饮用水水质化学稳定性对比研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(1): 39-44.
DAI Xuening, LI Weiyong, LI Yue, et al. Comparison of drinking water quality chemical stability between a northern city and a southern city in China [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(1): 39-44 (in Chinese).
- [9] 刘志刚, 徐巧, 周正协, 等. 供水系统水质化学稳定性变化及调控策略[J]. 中国给水排水, 2022, 38(21): 45-50.
LIU Zhigang, XU Qiao, ZHOU Zhengxie, et al. Water quality chemical stability of water supply system and its control strategy [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(21): 45-50 (in Chinese).

作者简介:童祯恭(1972-),男,福建武平人,博士,教授,主要从事给水处理理论与技术研究。

E-mail: zgzgtt@126.com

收稿日期:2024-07-07

修回日期:2024-08-22

(编辑:刘贵春)