

王泽民, 郎华伟, 张晓晨, 等. 华北地区工业供水管网水质控制评价及建议[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 64-71.

WANG Z M, LANG H W, ZHANG X C, et al. Evaluation and suggestions of water quality control for industrial water supply pipeline networks in north China[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 64-71.

华北地区工业供水管网水质控制评价及建议

王泽民¹, 郎华伟¹, 张晓晨^{2,*}, 刘艳辉², 葛金田¹

(1. 唐山市曹妃甸供水有限公司, 河北唐山 063200; 2. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘 要 【目的】我国供水行业中, 水体对金属管网的腐蚀问题普遍存在, 北方管网又多采用铸铁管材, 发生“红水”的风险高。而我国华北地区多采用多水源供水或长距离调水, 季节性变化明显, 进水水质波动频繁, 加剧了输水风险, 管网的供水安全管理难度大。因此, 对供水管网进行水质评价, 有利于供水企业更好地调控水质, 降低管网运行风险。【方法】文章以华北地区某工业供水系统的进厂水水质监测数据为基础, 根据水源、气候等特点, 筛选了3个符合地方水源特征的水质稳定性指标朗格利尔饱和指数(LSI)、碳酸钙沉淀势(CCPP)、Larson 比率(LR)进行计算和水质稳定性分析。【结果】进厂水 LSI > 0、CCPP > 4, 进厂水进入管网呈现结垢倾向; LR 在 1 上下波动, 水体本身同时存在轻微腐蚀倾向。但总体来说, 结垢倾向大于腐蚀倾向, 有利于管网保护, 但由于华北地区四季温差、降雨变动较大, 也会引起水质的不稳定。【结论】华北地区为重碳酸盐型水体, 水体的日夜波动不大, 水质相对稳定, 运行中以轻微结垢倾向为主, 有利于管网的稳定运行, 但受季节变化影响明显, 尤其夏秋季节有可能发生管网铁溶出, 存在发生“红水”的风险, 需在日常监测中予以重点关注。

关键词 供水管网 水质评价 铁释放 管网腐蚀 化学稳定性

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0064-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.008

Evaluation and Suggestions of Water Quality Control for Industrial Water Supply Pipeline Networks in North China

WANG Zemin¹, LANG Huawei¹, ZHANG Xiaochen^{2,*}, LIU Yanhui², GE Jintian¹

(1. Tangshanshi Caofeidian Water Supply Co., Ltd., Tangshan 063200, China;

2. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR<Tianjin>, Tianjin 300192, China)

Abstract [Objective] In water supply industries of China, the corrosion of metal pipe network is widespread, and the cast iron pipe network is mostly used in the northern pipe network, so the risk of "red water" is high. In north of China, multi-source water supply and long-distance water diversion are mostly used, the seasonal changes are obvious, the inflow water quality fluctuates frequently, so the water supply safety management of pipe network is difficult. In order to the better control of the water quality and reduce the risk of the pipe network operation, the water quality assessment of the water supply pipe network is conducive of the water supply enterprises. [Methods] This paper used the data of water quality monitoring in north China industrial water supply system, chose the water quality stability indices [Langelier index (LSI), calcium carbonate precipitation potential (CCPP), Larsen index (LR)] of local water characteristics, conduct calculation and water quality stability analysis. [Results] Through calculation and analysis, the result showed that the LSI more than 0, CCPP more than 4, the inflow tended to scale after entering the pipeline network. The LR fluctuated around 1, the inflow also had a slight corrosion tendency. Overall, however, the tendency of scaling was greater than that of corrosion, which was beneficial for the protection of the pipeline network. But due to the large temperature differences and rainfall variations throughout the four seasons in north China, it could also cause unstable water quality. [Conclusion] The water quality of north China is bicarbonate type, and the water quality is relatively stable with little fluctuation day and night. Minor scale formation tendency is mainly used in the

[收稿日期] 2024-11-13

[基金项目] 河北建设投资集团项目: 海水淡化安全入网控制技术与开发 (jtkx22063)

[作者简介] 王泽民(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事供水公司运营管理和工程管理工作, E-mail: wangzemin21188@163.com。

[通信作者] 张晓晨(1987—), 女, 工程师, 研究方向为水处理理论与技术等, E-mail: qiyuemengxiang@163.com。

operation, which is conducive to the stable operation of the pipe network, but affected by seasonal changes, especially in summer and autumn season may dissolve. It has the risk of "red water", attention should be paid in daily monitoring.

Keywords water supply network water quality assessment iron release pipeline corrosion chemical stability

我国供水行业中,普遍存在水体对金属管网的腐蚀问题,给供水企业带来了许多问题:一是管网在长期的腐蚀作用下导致管道漏水以及由腐蚀产物积聚造成的水力损失;二是腐蚀产物进入水中引起的水质变化。铸铁管由于具有强度高、价格低廉等优势,目前是我国北方地区供水管网使用的主要管材,在使用过程中出现的最大问题是“红水”现象,这是管道内壁的“腐蚀瘤”发生了严重的铁释放导致的。供水企业通常会选取一些水质指标用于分析管网的腐蚀和结垢情况,如碱度、硬度、温度、pH、溶解氧(DO)等。Imran 等^[1]的研究表明,控制铁释放现象可以通过提高水体碱度来实现(通常控制碱度大于 80 mg/L 时,铁释放速率会明显减小),但是 Pisigan 等^[2]的研究显示,提高水体碱度的同时会使电导率和总溶解性固体(TDS)的升高,而离子强度升高并不能抑制水体中的铁释放,所以用碱度来控制铁释放的效果并不理想。方伟^[3]在相关研究中提出了针对铸铁管材管网的水质条件要求:pH 值为 7.0~8.5;碱度为 10~25 mg/L(北欧建议碱度 ≥ 25 mg/L);存在钙离子;DO ≥ 2 mg/L;必须含有少量的有机物。因此,我国北方供水企业需要更全面有效的方法协同判别水体的稳定性。

我国华北地区多采用双水源或多水源供水,华北地区明显的季节性变化和长距离调水可能导致进厂水水质突变,影响管网稳定性^[4]。郑少博^[5]以北京市政管网为研究对象,分析了供水管网“黄水”现象的产生机制;陈德俊等^[6]分析了大港油田的供水数据,分析了水源切换带来的水质化学稳定性变化。对于不同水源地,需综合诸多因素建立完善的化学稳定性指标体系,评价水质化学稳定性,确定管网的腐蚀、结垢倾向,为水质调控提供理论依据,以确保管网供水安全。

1 水质数据及评价方法

1.1 供水概况

文章中供水系统来水由双水源地水源混合,2 个水源地均为我国华北地区地表水,水源 1 取水通过约 95 km 的双线管道引至水厂,水源 2 取水在约 60 km 处汇集到双线管道引至水厂,水源流程如图 1

所示。其中,进厂水为两股水源混合后水源,向工业用户供水。通常,混合后水源指标控制情况如表 1 所示。

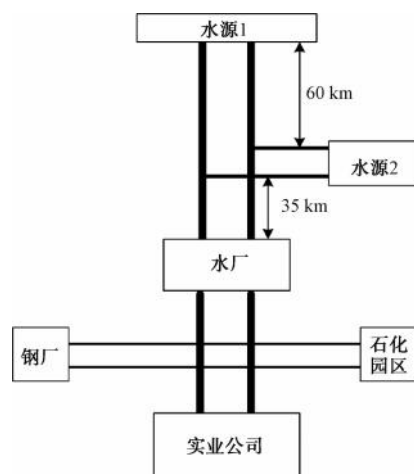


图 1 水源流程

Fig. 1 Process Flow of Water Sources

表 1 两水源掺混后指标控制要求

Tab. 1 Control Requirement Indices after Mixture of Two Sources of Raw Water

项目	数值
电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	<1 100.0
氨(以 N 计)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<0.5
高锰酸盐指数/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	<4.5
pH 值	7.0~8.5

如遇到水质生化条件不达标,通常采取调整水源 1 与水源 2 取水比例、调整次氯酸钠投加量(水源 1 次氯酸钠投加量为 1.5~2.0 mg/L,水源 2 不投加次氯酸钠)控制水质达到表 1 中要求。

1.2 水质监测数据

2023 年对进厂水水质进行以下指标的监测:温度、pH、硫酸盐、氯化物、铁、DO、总碱度、总硬度,水质监测结果如表 2 所示。

1.3 评价方法

给水管道的水质稳定性判断一般需要通过通过对水体的腐蚀性和结垢性进行综合考虑,目前没有特定的一种参考方法判定水质的稳定性,评价水质稳定性需通过对水质化学稳定性的判定指数进行分析。

水质化学稳定性的判定指数主要包括基于碳酸钙(CaCO_3)溶解平衡的稳定性指数和基于其他水

表2 进厂水水质监测数据
Tab. 2 Water Quality Monitoring Data of Inflow Raw Water

项目	温度/℃	pH 值	硫酸盐/ (mg·L ⁻¹)	氯化物/ (mg·L ⁻¹)	铁/ (mg·L ⁻¹)	DO/ (mg·L ⁻¹)	总碱度/ (mg·L ⁻¹)	总硬度/ (mg·L ⁻¹)
2023 年 1 月	8.00	8.23	75.70	26.90	<0.10	8.00	198.00	280.00
2023 年 2 月	10.00	8.31	81.60	31.30	<0.10	9.00	199.00	290.00
2023 年 3 月	10.00	8.27	97.40	45.20	<0.10	8.90	194.00	300.00
2023 年 4 月	20.00	8.30	70.60	23.20	<0.10	8.00	190.00	265.00
2023 年 5 月	19.50	8.33	94.70	28.90	<0.10	7.60	168.00	240.00
2023 年 6 月	20.20	7.95	93.92	31.75	<0.30	6.67	139.00	272.20
2023 年 7 月	26.60	7.98	89.92	32.74	<0.30	7.28	122.00	272.00
2023 年 8 月	27.20	7.98	94.60	41.80	<0.10	6.78	113.00	207.00
2023 年 9 月	25.20	8.39	81.00	36.40	<0.10	6.78	120.00	219.00
2023 年 10 月	20.20	8.44	127.00	46.00	<0.10	6.98	135.00	242.00
2023 年 11 月	16.50	7.95	91.15	44.31	<0.30	11.68	146.00	274.20
2023 年 12 月	7.00	8.23	48.80	18.30	<0.10	7.10	153.00	250.00
平均值	17.53	8.20	87.20	33.90	<0.30	7.90	156.00	259.00
历史最大值	28.80	8.50	100.06	270.00	<0.30	11.30	213.00	446.00
历史最小值	1.50	7.20	48.80	18.30	<0.10	1.00	90.00	176.00

质参数的指数 2 种。前者包括朗格利尔饱和指数 (LSI)、CaCO₃ 沉淀势 (CCPP)、雷纳兹稳定指数 (RSI)、侵蚀指数 (AI) 等,其中 LSI 应用最早也最为广泛^[7]。但 LSI 有 2 个弊端,一是对 2 个同样的 LSI 值不能进行水质化学稳定性的比较,二是当 LSI 值在 0 附近时,容易得出与实际相反的结论。因此,本文选取 LSI 与 CCPP 配合使用,来进行水质的化学稳定性分析。此外,由于以 CaCO₃ 溶解平衡理论为基础的水质稳定性判别方法没有考虑电化学过程,更没有考虑到水中胶体的影响,将 CaCO₃ 作为缓蚀剂又作为水垢^[8]。因此,除以上 2 个指数外,文章还引入了考察 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 对管网腐蚀影响的 Larson 比率 (LR) 作为评价指数,以确保水质评价更为客观。

1.3.1 LSI

LSI 是指水体的实际 pH 与该水体在 CaCO₃ 饱和时的 pH 差值,以此来反映 CaCO₃ 是否会结晶析出,并判断水的结垢或腐蚀趋势^[7]。其定义如式 (1)。

$$L = P_{\text{pH}} - P_{\text{pH}_s} \quad (1)$$

其中: L ——LSI 值;

P_{pH} ——水体的实测 pH;

P_{pH_s} ——CaCO₃ 饱和平衡时水体的 pH。

其中 P_{pH_s} 计算过程如式 (2) ~ 式 (6)。

$$P_{\text{pH}_s} = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (2)$$

$$A = (\lg T - 1) / 10 \quad (3)$$

$$B = -13.2 \times \lg(t + 273) + 34.55 \quad (4)$$

$$C = \lg C_{\text{Ca}^{2+}} - 0.4 \quad (5)$$

$$D = \lg A_{\text{总}} \quad (6)$$

其中: A ——TDS 常数;

T ——TDS 值,mg/L;

B ——温度常数;

C ——钙硬度常数;

$C_{\text{Ca}^{2+}}$ ——Ca²⁺ 质量浓度 (以 CaCO₃ 计), mg/L;

D ——总碱度常数;

t ——温度,℃;

$A_{\text{总}}$ ——总碱度 (以 CaCO₃ 计),mg/L。

LSI 判定原理:随着使用年限的推移,城市供水管网内壁逐渐形成 CaCO₃ 保护层,可防止水体的侵蚀,其判定方法如表 3 所示。

表3 LSI 的判定方法

Tab. 3 Determination Methods of LSI	
LSI	水质稳定性
LSI<0	溶解 CaCO ₃ 倾向
LSI=0	CaCO ₃ 达到平衡
LSI>0	形成 CaCO ₃ 倾向

LSI 可以对 CaCO_3 溶解性进行有效预测,以此来判断水体的腐蚀结垢倾向,在《反渗透海水淡化产品水水质要求》(GB/T 43230—2023)中要求,进入市政管网的水体 LSI 值控制为 $-0.5 \sim 0.5$,可有效预防管网的腐蚀。但 LSI 对判别水体腐蚀的绝对性具有较大误差,其值的正负不能绝对地判断水体结垢和腐蚀,只能起到预测腐蚀可能发生的作用。相关学者根据一系列的研究^[9],认为 CaCO_3 层的形成与 LSI 并没有很大关联性,并且当 LSI 数值在 0 左右时,数值正负得出的结论可能与实际情况相反,需要结合其他水质稳定性指标共同判别水体稳定性。

1.3.2 CCPP

CCPP 是评价自来水对管道腐蚀倾向的重要指标,是根据水中 CaCO_3 的平衡计算得到每升水中需要溶解或沉淀的 CaCO_3 量^[10]。CCPP 是根据水体的酸碱度和 Ca^{2+} 浓度确定的,虽说 CaCO_3 经历溶解平衡反应和沉淀平衡反应,但水源初始酸碱度不会受到反应与否的影响,原则上总碱度与 Ca^{2+} 浓度保持一定的差值。多数水质化学稳定性判别指标只能定性地判别水体的腐蚀或结垢倾向,而 CCPP 能定量分析 CaCO_3 在水体中的溶解或沉淀趋势的具体数值,便于更加科学揭示水体水质的腐蚀或结垢倾向。所以 CCPP 更能把握本质,理清关系,能更为准确地判断水质的化学稳定性[式(7)]。

$$C_{\text{CCPP}} = 50\,000 \times (A_i - A_{\text{eq}}) \quad (7)$$

其中: A_i ——水体未达到 CaCO_3 平衡时的碱度,为水体初始状态的碱度,mg/L(以 CaCO_3 计),可以通过检测得到;

A_{eq} ——水体达到 CaCO_3 平衡时的碱度,mg/L(以 CaCO_3 计);

C_{CCPP} ——CCPP,mg/L(以 CaCO_3 计)。

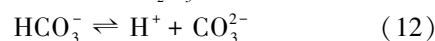
CCPP 理论上是指过饱和的水体中沉淀 CaCO_3 ,或在不饱和的水体中溶解 CaCO_3 的量值,因此,主要涉及碳酸平衡和 CaCO_3 沉淀 2 个过程。这个平衡系统中只考虑 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 OH^- 、 H^+ 和 Ca^{2+} ,忽略其他影响组分(SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 Mg^{2+} 等)。其平衡过程涉及 4 个反应并可分别计算得到对应的解离常数[式(8)~式(15)]。



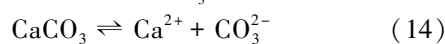
$$K'_w = C_{\text{H}^+} C_{\text{OH}^-} \quad (9)$$



$$K'_1 = \frac{C_{\text{H}^+} C_{\text{HCO}_3^-}}{C_{\text{H}_2\text{CO}_3^*}} \quad (11)$$



$$K'_2 = \frac{C_{\text{H}^+} C_{\text{CO}_3^{2-}}}{C_{\text{HCO}_3^-}} \quad (13)$$



$$K'_s = C_{\text{Ca}^{2+}} C_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (15)$$

上式结合碳酸盐系统总碱度公式,如式(16)。

$$A_{\text{总}} = C_{\text{HCO}_3^-} + 2C_{\text{CO}_3^{2-}} + C_{\text{OH}^-} - C_{\text{H}^+} \quad (16)$$

可得式(17)。

$$C_{\text{CO}_3^{2-}} = \left(A + C_{\text{H}^+} - \frac{K'_w}{C_{\text{H}^+}} \right) \frac{K'_w}{2K'_2 + C_{\text{H}^+}} \quad (17)$$

其中: K'_w ——特定温度和离子强度下水的解离常数;

K'_1 、 K'_2 ——特定温度和离子强度下碳酸的 1、2 级解离常数;

K'_s ——特定温度和离子强度下 CaCO_3 溶度积常数;

$C_{\text{H}_2\text{CO}_3^*}$ ——碳酸的浓度, mol/L;

C_{H^+} —— H^+ 的浓度, mol/L;

C_{OH^-} —— OH^- 的浓度, mol/L;

$C_{\text{HCO}_3^-}$ —— HCO_3^- 的浓度, mol/L;

$C_{\text{CO}_3^{2-}}$ —— CO_3^{2-} 的浓度, mol/L。

式(11)和式(13)联立得到 Ca^{2+} 平衡浓度,如式(18)。

$$(C_{\text{Ca}^{2+}})_{\text{eq}} = \frac{K'_s [(C_{\text{H}^+})_{\text{eq}} + 2K'_2]}{K'_2 \left[\frac{A_{\text{eq}}}{C_{\text{H}^+}} + (C_{\text{H}^+})_{\text{eq}} - \frac{K'_w}{(C_{\text{H}^+})_{\text{eq}}} \right]} \quad (18)$$

在 CCPP 计算中认为沉淀溶解前后总碱度 $-2C_{\text{Ca}^{2+}}$ 为常数,因此,得式(19)。

$$2[(C_{\text{Ca}^{2+}})_i - (C_{\text{Ca}^{2+}})_{\text{eq}}] = A_i - A_{\text{eq}} \quad (19)$$

结合式(14)可得式(20)。

$$2(C_{\text{Ca}^{2+}})_i - A_i = \frac{K'_s [(C_{\text{H}^+})_{\text{eq}} + 2K'_2]}{K'_2 \left[\frac{A_{\text{eq}}}{C_{\text{H}^+}} + (C_{\text{H}^+})_{\text{eq}} - \frac{K'_w}{(C_{\text{H}^+})_{\text{eq}}} \right]} - A_{\text{eq}} \quad (20)$$

同时沉淀溶解前后总酸度 (A_{Acy}) 保持不变,如式(21)~式(22)。

$$A_{Acyi} = A_{Acyeq} \quad (21)$$

$$A_{Acy} = 2C_{H_2CO_3^*} + C_{HCO_3^-} + C_{H^+} - C_{OH^-} \quad (22)$$

将式(11)~式(13)、式(15)~式(16)和式(21)联立可得到平衡碱度计算公式,如式(23)。

$$A_{Acyeq} = \frac{K'_1 A_{Acyi} - (C_{H^+})_{eq} + \frac{K'_w}{(C_{H^+})_{eq}}}{(C_{H^+})_{eq} [2(C_{H^+})_{eq} + K'_1]} \times [2K'_2 + (C_{H^+})_{eq}] - (C_{H^+})_{eq} + \frac{K'_w}{(C_{H^+})_{eq}} \quad (23)$$

其中: $(C_{Ca^{2+}})_i$ —— Ca^{2+} 的初始浓度, mol/L;

$(C_{Ca^{2+}})_{eq}$ —— Ca^{2+} 的平衡浓度, mol/L;

$(C_{H^+})_{eq}$ —— H^+ 的平衡浓度, mol/L;

A_{Acy} ——总酸度, mol/L;

A_{Acyi} ——初始总酸度, mol/L;

A_{Acyeq} ——平衡总酸度, mol/L。

根据式(19)和水体初始状态碱度的实测值 A_i 可计算出 CCPP。

CCPP 水质化学稳定性判定方法为: CCPP>10, 水体具有严重结垢倾向; 4<CCPP<10, 水体具有轻微腐结垢倾向; 0<CCPP<4, 水体基本稳定; -5<CCPP<0, 水体具有轻微腐蚀性; -10<CCPP<-5, 水体具有中度腐蚀性; CCPP<-10, 水体具有严重腐蚀性。在世界卫生组织 (WHO) 相关文件^[11]中, 4<CCPP<10 可确保水体不具有腐蚀性。

1.3.3 LR

Larson 等^[12]致力于管网铁腐蚀的研究, 于 1957 年通过大量的资料研究和试验发现, 水体腐蚀与 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 有着直接的关系, 根据试验数据的研究与分析, 水体腐蚀性与 SO_4^{2-} 和 Cl^- 成正相关关系, 与 HCO_3^- 成负相关关系, 并提出了 LR 的概念, 其定义如式(24)。

$$L = \frac{C_{Cl^-} + 2C_{SO_4^{2-}}}{C_{HCO_3^-}} \quad (24)$$

其中: L ——LR;

C_{Cl^-} —— Cl^- 浓度, mol/L;

$C_{SO_4^{2-}}$ —— SO_4^{2-} 浓度, mol/L。

根据定义式可看出, Cl^- 和 SO_4^{2-} 使水体具有腐蚀性, HCO_3^- 对水体腐蚀具有缓蚀性, LR 可以定量地分析水质化学稳定性, 但是其判定标准存在争议, 参考文献^[13]中当 $LR<0.2$ 时, 水质稳定, 铁制管材基本无腐蚀; 当 $0.2<LR<1.0$ 时, 水质基本稳定, 有轻微腐蚀; 当 $LR>1.0$ 时, 会产生严重腐蚀。Imran 等^[1]认为 $LR<0.5$ 即可接受。宛云杰等^[14]的研究中则认为 $LR<0.3$, 水体基本稳定; $0.3 \leq LR \leq 0.7$, 水体轻微腐蚀; $LR>0.7$, 水体严重腐蚀。因此, 目前 LR 并没有一个统一的判定标准, 作为评价指标仍需要根据实际水质条件进行辩证地分析, 总体来说 LR 控制在 1 以内, 不会对管材造成严重的腐蚀。由于华北地区地表水本身具有高硬度的特点, 对管网有着天然的缓冲作用。因此, 对 LR 的判定不需要过于保守, 在文章针对华北地区供水的讨论中选取 1 作为判定水体是否会造成严重腐蚀的临界值。

2 结果与讨论

2.1 管网水质分析

结合水源 1、水源 2 混合后的碱度、硬度指标来看, 水源 1 和水源 2 的溶解物以重碳酸盐、钙、镁离子及硫酸盐、氯化物为主, 属于高硬度和碱度的重碳酸盐、硫酸盐型水体, 符合我国华北地区自然水体的典型特征。进厂水硬度普遍高于碱度, 且碱度历史最小值 ≥ 90 mg/L, 说明原水中永久硬度 (非碳酸盐硬度) 和暂时硬度 (碳酸盐硬度) 共存, 无钠盐 (负) 硬度, 水体 pH 日夜波动幅度不大, 出现硬度突降现象的概率也较小, 稳定性较好。该水源硬度较天津、青岛等地的南水北调水偏高, 具备较强的缓冲能力, 有利于保持市政输水管网的稳定性。

从表 2 水质监测数据可以看出, 氯化物和硫酸盐的季节性变化不大, 而高硬度的重碳酸盐随季节出现波动, 这是自然水体与大气二氧化碳组分的溶解平衡过程所致, 由此产生了水质条件的季节性变化。每年夏季 6 月—8 月, 随着气温升高, 自然水体碱度有下降趋势, 叠加季节性降雨量增大效应, 使华北地区自然水体碱度下降幅度较大, 水体 pH 值降至 8.0 以下, 从而使水中铁离子水解沉淀不充分, 进厂水存在一定铁含量超标风险, 需要重点关注该季节水质变化。

此外,针对各水质指标的历史极值问题需要具体分析成因,如进厂水中 Cl^- 历史极值高达 270 mg/L, DO 质量浓度历史极值仅为 1 mg/L,这些情况表明水质出现重大变化,或有违规排污以及水患暴发等情况出现,不仅对后续水厂处理有影响,也会增加输水管网的水质稳定性风险。

2.2 水质稳定性评价

综合 1.3 小节中 3 个水质评价指标的评价方法,对水质稳定性判定方法总结如表 4 所示。

表 4 LSI 稳定性指数的判定方法

Tab. 4 Determination Method of LSI Stability Index

指标	计算结果	判定方法
LSI 判定方法 ^[7]	LSI<0	具有腐蚀倾向
	LSI=0	水质基本稳定
	LSI>0	具有结垢倾向
CCPP 判定方法 ^[10]	10<CCPP<15	具有严重结垢倾向
	4<CCPP<10	具有轻微结垢性
	0<CCPP<4	基本稳定
	-5<CCPP<0	具有轻微腐蚀性
	-10<CCPP<-5	具有中度腐蚀性
	CCPP<-10	具有严重腐蚀性
LR 判定方法 ^[14]	LR>1	严重腐蚀
	LR≤1	不腐蚀或轻微腐蚀

2.2.1 LSI

按表 2 中进厂水水质监测数据,根据 1.3 小节中评价方法计算得到进厂水 LSI 随时间变化如图 2 所示。从图 2 变化趋势看,LSI 指数基本>0.5,符合华北地区地表水源高硬度、高碱度的水质特点,进入管网对增加管网内壁结垢沉积、降低管网腐蚀和稳定水质有正面作用。值得注意的是,文章对监测的极值情况进行了计算,结果显示,历史最小值(温度为 1.5℃)的 LSI 为-0.137 左右,也就是说冬季的低温条件存在管网铁溶出的风险,需及时调控。另外,监测数据的 LSI 值在 0.6~1.2,尤其是 6 月—8 月、11 月、12 月 LSI 值相对较低(小于 1.0),处于 LSI 水质评估的争议区间,还需结合其他评价方法进行验证。

2.2.2 CCPP

根据进厂水水质监测数据,计算得到 CCPP 结果如图 3 所示。

从计算结果看,除 8 月,进厂水的 CCPP 都在 4

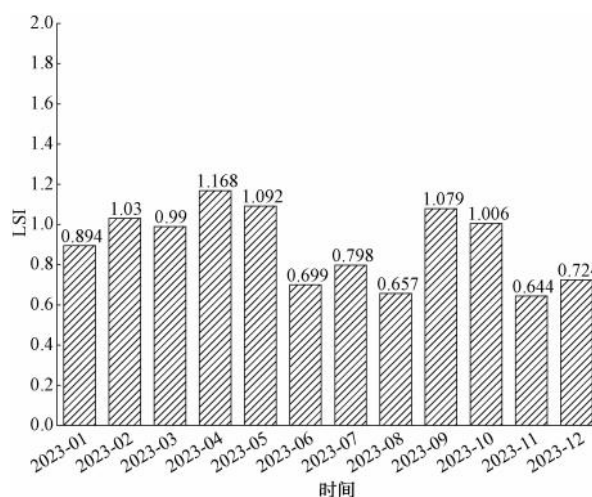


图 2 进厂水 LSI 计算值

Fig. 2 Calculated Values of LSI in Inflow

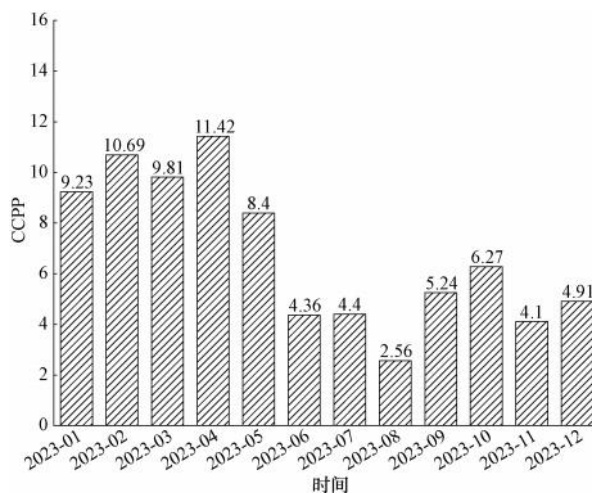


图 3 进厂水 CCPP 计算值

Fig. 3 Calculated Values of CCPP in Inflow

以上,与高硬度、高碱度水质特性相符,水体进入管网呈现结垢倾向,对管网起到一定的保护作用;冬季结垢倾向明显高于夏季;由于 8 月份华北地区正处夏季和雨季,水温保持在较高水平,蒸发作用强烈,同时雨季带来的地表径流会导致硬度、碱度大幅度波动,CCPP 值也波动较大,水样监测值计算得到 CCPP 仅为 2.56,此时应该是降雨过后地表水碱度、硬度较低;但是在数据统计过程中发现,水质监测的月检最大值(温度为 28.5℃)对应的 CCPP 计算值为 19.14,按照北方气候特点推测,应该是取样日前后高温且干旱,夏季高温的蒸腾作用在缺少降雨的补充下,导致水体碱度、硬度过高,使进厂水呈现强烈的结垢倾向,这种夏季水体碱度、硬度的大幅波动

也会带来较大的管网冲击,需要根据当地的天气条件变化(高温、降雨、干旱)及时监测,并进行针对性的调控。对于高温、干旱导致的碱度、硬度升高,除对进厂水及时投加沉淀药剂,水厂还可根据自身设备条件对进厂水进行纳滤等前处理,或结合配套设备进性水体掺混。

2.2.3 LR

LR 计算去除了前文重点分析的重碳酸盐、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对水体的稳定作用,只考虑 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 HCO_3^{2-} 影响,根据进厂水水质监测数据计算得到 LR 结果如图 4 所示。

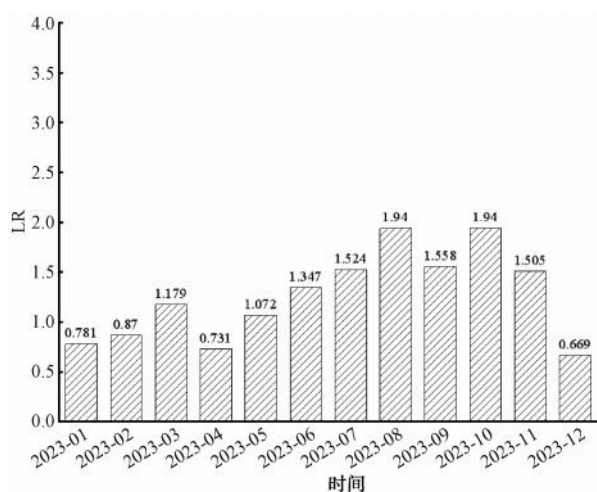


图 4 进厂水 LR 计算值

Fig. 4 Calculated Values of LR in Inflow

从计算结果看,在不考虑重碳酸盐、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 稳定水质的情况下,进厂水 LR 季节性波动较明显(春夏季 LR 升高至 1 以上),说明水体本身具有一定腐蚀性,春夏季温度升高腐蚀性有所增强。但在水厂日常运行中极少监测到管网腐蚀的发生,结合华北地区水质特点(总硬度全年 $\geq 100 \text{ mg/L}$),说明地表水中较高的重碳酸盐水平带来的结垢倾向对输水管道起到一定作用的保护,但 LR 水平较高也意味着华北地区管网存在水体腐蚀的风险,实际运行监测中需要关注 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的波动情况。

2.2.4 水质稳定性指数对比分析

对 LR、LSI、CCPP 3 个水质稳定性指标数据进行对比,对比结果如图 5 所示。

如图 5 所示,综合分析 LSI、CCPP 和 LR 3 个指标,进厂水 $\text{LSI} > 0$ 、 $\text{CCPP} > 4$,是高硬度、高碱度的水体,水体进入管网呈现结垢倾向; Cl^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子

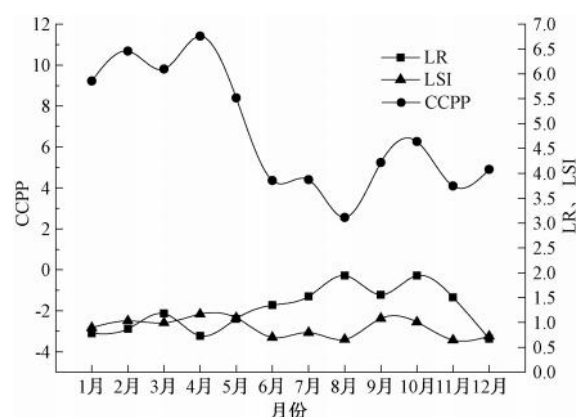


图 5 进厂水稳定性指数对比

Fig. 5 Comparison of Stability Indexes of Inflow

浓度高,水体 LR 在 1 上下波动,水体同时存在轻微腐蚀倾向。综合评估,体现结垢倾向的 CCPP 数值整体较高,冬季结垢倾向更强,而体现腐蚀倾向的 LR 在 1 附近波动,冬季略低于夏季,因此,冬季管网结垢沉积趋势更为稳定。水体的结垢倾向高于腐蚀倾向,水体总体趋向于水解沉积、结垢状态,保护管网不出现加速腐蚀的问题,但也需要注意水质变化避免出现腐蚀性升高的情况。

特别需要注意的是,由于华北地区四季鲜明,受降雨量季节性变化、温度等自然条件的影响,水体 LSI、CCPP 和 LR 指标的季节性变化较为显著:夏秋季节(6 月—10 月)气温升高,LR 指数逐渐升高,预示着水体腐蚀性加剧;而夏季(6 月—8 月),由于升温 and 降雨量增大等因素,水体碱度下降导致 LSI、CCPP 指数显著降低,说明此时水体的沉积、结垢倾向减弱;两方面效应叠加,在夏秋季节出现管网水质恶化的概率有所增加,应予以重点监测、及时控制,对于降水引起的碱度、硬度降低需根据监测数据,及时调整水厂再矿化工艺参数,增加二氧化碳投加量,防止“红水”发生。在智慧水务建设中,可以考虑增加水质在线监测系统,掌握进厂水的重碳酸盐、硬度、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等变化,及时应对水质变化,降低水源波动对供水管网的冲击。

3 结论

(1)重碳酸盐型水体一般受气温的影响较大,由此产生水质条件的季节性变化,高温会导致进厂水存在一定铁含量超标风险,需要按温度划分季节,重点关注原水对管网冲击。进厂水符合我国华北地区自然水体的典型特征。水中永久硬度(非碳酸盐

硬度)和暂时硬度(碳酸盐硬度)共存,水体 pH 日夜波动幅度不大,稳定性好。华北地区地表水硬度较高,具备较强的缓冲能力,有利于保持市政供水管网的稳定性。

(2)从水体溶解性矿物质种类、浓度以及 LSI、CCPP、LR 指数计算结果来看,自然水体的水质季节性变化特征显著,夏秋季节源水 LR 指数显著增加、LSI 和 CCPP 指数明显降低,说明水体腐蚀性有所增强而沉积结垢倾向被削弱,溶解铁的水解沉淀速率明显降低,出现水质不稳定情况的概率有所增加,在日常监测中应予以关注。

(3)对于进厂水的碱度、硬度升高,水厂可结合厂区条件进行药剂投加,采用纳滤或水体掺混的措施,降低管网结垢倾向;对于降水引起的碱度、硬度降低,需及时调整在矿化加药量,防止“红水”发生。

(4)针对各水质指标的历史极值问题需要具体分析成因,如进厂水中氯化物历史极大值高达 270.0 mg/L,DO 历史极小值仅 1 mg/L,这些情况表明源水水质出现重大变化,或有违规排污、水患暴发等因素存在,不仅对后续水厂处理有影响,也会增加输水管网的水质稳定性风险。

参考文献

- [1] IMRAN S A, DIETZ J D, MUTOTI G, et al. Red water release in drinking water distribution systems [J]. American Water Works Association, 2005, 97(9): 93-100.
- [2] PISIGAN R A, SINGLEY J E. Calculating the pH of calcium carbonate saturation [J]. American Water Works Association, 1985, 77(10): 83-91.
- [3] 方伟. 城市供水系统水质化学稳定性及其控制方法研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2007.
- FANG W. The research on water chemical stabilization and control methods in the urban water supply system [D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [4] 米子龙, 张晓健, 陈超, 等. 水源切换期用户水质跟踪监测及铁稳定性分析 [J]. 给水排水, 2012, 38(3): 151-155.
- MI Z L, ZHANG X J, CHEN C, et al. Analysis of water quality monitoring and iron stability in drinking water distribution system among water source switch [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(3): 151-155.
- [5] 郑少博. 南水北调原水水源对北京供水管网水质的影响及控制技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- ZHENG S B. The South to North Water Diversion Project water source of raw water impact on Beijing water supply network and control technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [6] 陈德俊, 刘婷婷, 宋媛. 大港油田供水管网系统水质化学稳定性与变化规律 [J]. 供水技术, 2020, 14(6): 5-8.
- CHEN D J, LIU T T, SONG Y. Variation rule of chemical stability of water in the Dagang Oilfield water supply network system [J]. Water Technology, 2020, 14(6): 5-8.
- [7] LANGEIER W F. The analytical control of anti-corrosion water treatment [J]. American Water Works Association, 1936, 28(10): 1500-1521.
- [8] 崔小明. 水质稳定性指数判定法简析 [J]. 净水技术, 1998, 16(2): 21-24.
- CUI X M. Analysis of determination method of water quality stability index [J]. Water Purification Technology, 1998, 16(2): 21-24.
- [9] 胡小佳. 水质变化对供水管网铁释放的影响及其机理研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2012.
- HU X J. Study on the impact and mechanism of water quality changes on iron release of water supply networks [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [10] 方伟, 许仕荣, 徐洪福, 等. 城市供水管网水质化学稳定性研究进展 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(14): 10-13.
- FANG W, XU S R, XU H F, et al. Research progress of water chemical-stability in urban water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(14): 10-13.
- [11] Public Health and the Environment World Health Organization. Guidance for the health and environmental aspects applicable to desalination [R]. Geneva: World Health Organization, 2007.
- [12] LARSON T E, SKOLD R V. Corrosion and tuberculation of cast iron [J]. American Water Works Association, 1957, 49(10): 1294-1302.
- [13] SCHOCK M R. Internal corrosion and deposition control [M]. Boston: McGraw-Hill Companies, 1990: 1-17, 109.
- [14] 宛云杰, 鲁智礼, 石宝友, 等. 调节拉森指数和碳酸钙沉淀势对管网铁释放的影响 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(19): 1-7.
- WAN Y J, LU Z L, SHI B Y, et al. Effects of Larson ratio and calcium carbonate precipitation potential adjustment with different chemicals on iron release in distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(19): 1-7.