供排水企业运行及管理成果专栏

钱俊娟, 祝嘉禄, 李柱, 等. 基于水厂运行数据的二氧化碳智能投加系统建模[J]. 净水技术, 2026, 45(10): 196-202,216.
Qian J J, Zhu J L, Li Z, et al. Modeling of intelligent carbon dioxide dosing system based on WTP operation data[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(10): 196-202,216.

基于水厂运行数据的二氧化碳智能投加系统建模

钱俊娟[1,*],祝嘉禄[2],李 柱[1],周 全[1],王建平[1]
(1. 上海城投水务<集团>有限公司制水分公司,上海 200086;2. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司,上海 200082)

摘 要 **【目的】** 针对我国部分水库水源地富营养化加剧导致原水 pH 升高、铝盐混凝效能下降、出厂水铝超标的问题,以及传统人工经验投加二氧化碳粗放、不经济、难应对水质突变的现状,本文旨在构建精准的二氧化碳智能投加模型,实现 pH 有效调控与药耗降低,为水厂智能化运行提供技术支撑。**【方法】** 以上海某水厂中 20 万 m^3/d 的系统为研究对象,基于二氧化碳-碳酸平衡体系,结合温度、离子强度修正构建二氧化碳投加量计算模型,通过与同理论基础下经工程验证的 STASOFT 软件进行多工况对比验证模型准确性。基于历史运行数据确定投加过程损耗的温度修正系数,并将智能投加模式与人工经验模式对比,从药耗和 pH 稳定性评估模型效能。**【结果】** 理论验证中,模型与相同理论框架下的工程软件计算结果吻合良好,平均误差约 3%;经温度修正后,模型推荐投加量与实际投加量偏差缩小至 10%以内;现场测试显示,模型投加后出水 pH 实测值与目标值偏差小于 1%。相比人工经验投加,智能投加模式使二氧化碳平均投加量由 6.02 mg/L 降至 5.78 mg/L,且 pH 控制稳定性显著提升,具备水质突变的适应能力。**【结论】** 该模型能够实现二氧化碳精准投加与 pH 的精准、稳定与高效调控。该模型不仅为降低铝盐混凝剂残留风险、保障饮用水安全提供了关键技术支撑,其节能降耗的效果也契合水厂精细化与智能化管理的发展方向。

关键词 二氧化碳; 智能投加模型; pH 调控; 二氧化碳-碳酸平衡体系; 投加量计算
中图分类号: TU991 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)10-0196-08
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.10.022

Modeling of Intelligent Carbon Dioxide Dosing System Based on WTP Operation Data

Qian Junjuan[1,*], Zhu Jialu[2], Li Zhu[1], Zhou Quan[1], Wang Jianping[1]
(1. *Water Production Branch, Shanghai Chengtou Water <Group> Co., Ltd., Shanghai* 200086, *China*;
2. *Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai* 200082, *China*)

Abstract [**Objective**] In response to increasing eutrophication in reservoir water sources at home, which leads to elevated pH in raw water, compromised coagulation efficiency of aluminum salts, and elevated aluminum concentrations in finished water, as well as the limitations of traditional manual carbon dioxide dosing - being inefficient, costly, and insufficiently responsive to sudden water quality changes - this paper aims to develop an intelligent and precise carbon dioxide dosing model. The goal is to achieve effective pH control and reduce chemical consumption, thereby providing technical support for the intelligent operation of WTP. [**Methods**] A 200 000 m^3/d system in a Shanghai WTP was selected as the research object. A calculation model for carbon dioxide dosing was developed based on the carbon dioxide-carbonate equilibrium system, incorporating corrections for temperature and ionic strength. The accuracy of the model was verified by comparing its result across multiple operating conditions with those from the STASOFT software, which shares the same theoretical foundation and has been validated in engineering applications. Based on historical operational data, a

[**收稿日期**] 2025-11-04
[**基金项目**] 上海城投科技创新计划启明星专项(CTKY-PTRC-2024-002-001-002)
[**通信作者**] 钱俊娟(1994—),女,工程师,主要从事水厂日常生产管理等工作,E-mail: qianjunjuan@shanghaiwater.com。

temperature correction factor for process loss during dosing was determined. The intelligent dosing mode was compared with the manual experience-based mode, and the model's effectiveness was evaluated in terms of chemical consumption and pH stability. [**Results**] In the theoretical validation, the model exhibits excellent consistency with the calculation result of engineering software under the identical theoretical framework, with an average error of approximately 3%. After temperature correction, the deviation between the model-recommended dosage and the actual dosage was reduced to within 10%. Field tests showed that the deviation between the measured effluent pH and the target value was less than 1% after implementing the model-based dosing. Compared with manual experience-based dosing, the intelligent dosing mode reduced the average carbon dioxide dosage from 6.02 mg/L to 5.78 mg/L, significantly improved the stability of pH control, and demonstrated adaptability to sudden water quality changes. [**Conclusion**] The model enables precise carbon dioxide dosing and accurate, stable, and efficient regulation of pH levels. It not only provides key technical support for reducing the risk of residual aluminum-based coagulants and ensuring drinking water safety, but its energy-saving and consumption-reducing effects also align with the development direction of refined and intelligent management in WTP.

Keywords carbon dioxide (CO_2); intelligent dosing model; pH control; CO_2-carbonate (H_2CO_3) equilibrium system; dosage calculation

随着我国部分水库水源地富营养化程度加剧,藻类季节性大量繁殖已成为某些水厂普遍面临的现实问题。藻类通过光合作用消耗水中溶解的二氧化碳(CO_2),破坏水体碳酸盐平衡,导致原水 pH 值显著升高,最高可超过 9.0[1]。在高 pH 条件下,铝盐混凝剂如聚氯化铝(PAC)易水解生成可溶性的偏铝酸根(AlO_2^-),造成沉淀与过滤困难,致使出厂水铝质量浓度升高,甚至超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的 0.2 mg/L 限值。

传统 pH 调控方法(如投加盐酸或硫酸)虽然能在一定程度上降低 pH,但存在设备腐蚀、引入阴离子副产物、控制不稳定等问题[2]。相比之下,二氧化碳调节技术作为一种安全、环保的替代方案,近年来在全国多地水厂得到应用[3]。目前,主流的投加方式包括“气/液投加”和“液/液投加”,2 种方式的二氧化碳利用率均较高[4]。二氧化碳溶于水后形成碳酸(H_2CO_3),可温和而有效地降低原水 pH,促进铝盐水解生成易于沉淀的形态,从而减少水中残留铝含量。

目前,水厂二氧化碳投加量主要依赖人工经验调节,易在出厂水铝含量达标情况下出现二氧化碳过量投加,虽保障了水质,却既不经济也不环保。这种粗放调控模式难以应对突发水质污染,且存在残余铝含量超标的隐患。在智慧城市建设推动下,引入“智能水厂”理念与技术,结合物联网、云计算、大数据等新一代信息技术,实现二氧化碳精准智能投加,已成为提升供水系统自动化、智能化及运行可靠性的关键方向。黄涛[5]提出了基于可编程逻辑控制器(PLC)的“后馈控制法”,实现了二氧化碳的智能投加;吴雪飞[6]分析了二氧化碳工艺在国内某水厂的应用效果,证明了其在节能降耗与提升供水水质方面的潜力。然而,现有二氧化碳投加控制方法多基于设备自动化,投加量控制主要依赖后端 pH 监测反馈与人工经验判断,仅凭流量、pH 等单一参数调节加注量,存在明显滞后性,未能系统考虑水质、流量、温度等多因素的影响,应对突发事件的能力不足。

为此,本文以上海市某水厂为对象,构建了一套基于原水水质参数和“二氧化碳-碳酸”平衡体系的投加量计算模型,旨在实现二氧化碳的“前馈控制”和精准投加。研究重点在于验证该模型的有效性,以期在保障出厂水质稳定达标的前提下,有效降低二氧化碳消耗、节约运行成本,为水厂的智能化运营管理提供新路径。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本文研究对象为上海市某大型水厂,其总设计供水规模达 100 万 m^3/d,原水取自陈行水库。该水厂核心工艺运行依赖于自动化控制系统,关键工艺参数由 PLC 通过在线监测系统进行实时采集与自动控制,整体工艺流程如图 1 所示。2023 年,水厂引进二氧化碳调节 pH 工艺,共配备 3 台二氧化碳投加设备,分别服务于 1/3 系统(40 万 m^3/d)、2 系统(40 万 m^3/d)和 4 系统(20 万 m^3/d)。本文重点针对 4 系统展开。

1.2 试验方法

本文系统收集了 4 系统的历史运行数据与现场测试数据,形成建模与验证的基础数据集。在此基

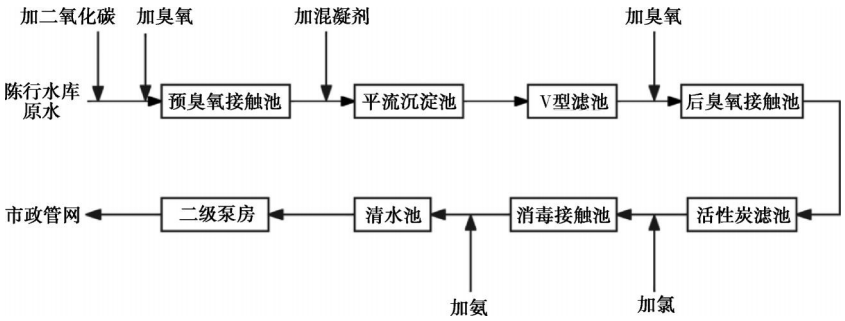


图 1　水厂工艺流程

Fig. 1　WTP Process Flow

础上,构建了以“二氧化碳-碳酸平衡体系”为核心的理论计算模型,并采用 Python 编程完成其求解过程。

2　智能模型构建

2.1　理论基础

天然水体是一个复杂的缓冲体系,其中碳元素大部分以溶解的二氧化碳、碳酸、碳酸氢根(HCO_3^-)和碳酸根(CO_3^{2-})离子形态存在。这些组分与水中的氢离子(H^+)、水分子及固相碳酸盐之间形成动态化学平衡,构成二氧化碳-碳酸平衡系统,该体系是决定水体 pH 和碱度的核心。该系统涉及一系列动态平衡,各阶段平衡公式和电离平衡常数如下。

1)水的自偶电离平衡

水本身也会电离,产生氢离子和氢氧根离子(OH^-)。这个平衡与碳酸系统相互作用,共同决定水体的 pH,平衡公式如式(1)所示。

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^- \tag{1}$$

2)二氧化碳的溶解/水合生成碳酸

溶解在水中的二氧化碳分子与水反应生成碳酸,平衡公式如式(2)所示。

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \tag{2}$$

3)碳酸的一级电离平衡

碳酸是一个弱酸,发生第一步电离,释放出 1 个质子(H^+),形成碳酸氢根离子。这一步是控制天然水体 pH 的关键,平衡公式如式(3)所示。

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+ \tag{3}$$

一级电离平衡常数(K_1)计算公式如式(4)所示。

$$K_1 = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \tag{4}$$

其中:$[H^+]$——氢离子浓度,mol/L;

$[HCO_3^-]$——碳酸氢根离子浓度,mol/L;

$[H_2CO_3]$——碳酸的浓度,mol/L。

4)碳酸的二级电离平衡

碳酸氢根离子进一步电离,释放出第二个质子,形成碳酸氢根离子,平衡公式如式(5)所示。

$$HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H^+ \tag{5}$$

二级电离平衡常数(K_2)计算公式如式(6)所示。

$$K_2 = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \tag{6}$$

其中:$[CO_3^{2-}]$——碳酸根离子浓度,mol/L。

5)碳酸钙($CaCO_3$)的溶解-沉积平衡

这是与地质圈相互作用的重要环节。以最常见的碳酸钙为例,平衡公式如式(7)所示。

$$CaCO_3(s) \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-} \tag{7}$$

碳酸钙溶解-沉积平衡常数(K_s)计算公式如式(8)所示。

$$K_s = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] \tag{8}$$

其中:$[Ca^{2+}]$——钙离子浓度,mol/L。

向原水中投加二氧化碳,实质上是向该系统引入碳酸,促使碳酸的电离平衡向右移动,消耗氢氧根离子并生成碳酸氢根离子,从而降低 pH。此过程将水体的碳酸盐碱度(主要由碳酸氢根离子和碳酸离子构成)转化为对 pH 变化具有更强缓冲能力的碳酸氢盐体系,且在整个投加过程中体系的总碱度保

持不变。

2.2 二氧化碳理论投加量计算模型

为精确计算将原水从初始 pH 调节至目标 pH 所需的二氧化碳投加量，本文构建了基于质量守恒和电离平衡的二氧化碳-碳酸平衡系统计算模型。由于平衡常数受温度和水体离子强度影响显著，在精确计算中需根据实际水体的理化条件对上述常数进行修正。本文结合现有的 STASOFT 手册[7]，确定了关键参数的修正公式。

2.2.1 关键参数与修正

1）温度修正

经温度修正的一级电离平衡常数 $K_1(T)$ 和二级电离平衡常数 $K_2(T)$ 的计算公式如式（9）、式（10）所示。

$$K_1(T) = -356.31 - 0.061 \times T + \frac{21\,834.37}{T} + 126.83 \times \log T - \frac{1\,684\,915}{T^2} \tag{9}$$

其中：T——温度，℃。

$$K_2(T) = -107.89 - 0.032 \times T + \frac{5\,151.79}{T} + 38.93 \times \log T - \frac{563\,713.9}{T^2} \tag{10}$$

2）离子强度修正

经离子强度修正的一级电离平衡常数 K_1' 和二级电离平衡常数 K_2' 的计算公式如式（11）~式（14）所示。

$$K_1' = K_1(T) - \frac{1.825 \times 10^6}{(78.3 \times T)^{1.5}} \times \left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\mu}+1} - 0.2 \times \mu\right) \tag{11}$$

$$K_2' = K_2(T) - \frac{1.825 \times 10^6}{(78.3 \times T)^{1.5}} \times 4 \times \left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\mu}+1} - 0.2 \times \mu\right) \tag{12}$$

$$\mu = \frac{1.68 \times A_{ES}}{1 \times 10^5} \tag{13}$$

$$\mu = \frac{2.5 \times B_{TDS}}{1 \times 10^5} \tag{14}$$

其中：μ——离子强度修正系数；

A_{ES}——电导率，μS/cm；

B_{TDS}——总溶解性固体物质质量浓度，mg/L。

2.2.2 理论加注量计算流程

在计算二氧化碳理论投加量的过程中，需综合以下关键水质参数：原水 pH、原水总碱度、温度、离子强度及目标 pH。基于上述参数，构建了二氧化碳投加量的理论计算模型，具体采用 Python 程序实现，主要步骤如下：

1）依据式（13）~式（14）计算离子强度修正系数 μ。

2）根据原水总碱度和阴、阳离子电荷平衡关系，计算投加前体系内阴离子和阳离子的总浓度，如式（15）所示。

$$[\text{Cation}] - [\text{Anion}] = \frac{\rho(CaCO_3)}{10^5} \tag{15}$$

其中：[Cation]——除氢离子外阳离子总浓度，mol/L；

[Anion]——除氢氧根离子、碳酸氢根离子、碳酸根离子外阴离子总浓度，mol/L；

$\rho(CaCO_3)$——碳酸钙质量浓度，mg/L。

3）结合温度和修正系数 μ，计算碳酸的一级电离常数 K_1' 和二级电离常数 K_2'。

4）基于原水 pH，计算二氧化碳投加前体系中除氢氧根外的阴离子浓度以及除氢离子以外的阳离子浓度。在此过程中，假设上述浓度仅与碳酸根、碳酸氢根以及钙离子相关，分别按式（16）与式（17）进行估算。

$$[\text{Anion}] - [OH^-] = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] \tag{16}$$

$$[\text{Cation}] - [H^+] = 2[Ca^{2+}] \tag{17}$$

5）将步骤 4 所得关系式与碳酸一级、二级电离平衡方程联立，求解投加前平衡体系中碳酸根和碳酸氢根的摩尔浓度。

6）计算投加前平衡状态下的碳酸质量浓度，如式（18）所示。

$$\rho(H_2CO_3) = 10^{-\left[pH - K_1' + 0.944 + \log_{10}\left(\frac{\rho(CaCO_3)}{10}\right)\right]} \tag{18}$$

其中：$\rho(H_2CO_3)$——碳酸质量浓度，mg/L。

7）在假设总碱度不变的条件下，根据目标 pH 重复步骤（4）~步骤（6）的计算流程，确定二氧化碳

投加后平衡体系中的碳酸质量浓度,以及钙离子、碳酸根和碳酸氢根的浓度。

8)计算投加前后碳酸、钙离子、碳酸根和碳酸氢根的浓度变化量,依据上述各组分浓度变化量,计算出二氧化碳的理论投加量,计算表达式如式(19)所示。

$$[CO_2]_{理论}=\Delta\rho(H_2CO_3)+44\times1\ 000\times(\Delta[HCO_3^-]+\Delta[CO_3^{2-}]+\Delta[Ca^{2+}]) \quad (19)$$

2.3　模型修正

理论模型虽能精确计算水中化学平衡所需的二氧化碳量,但在实际投加过程中,存在因接触时间不足、混合效率问题以及液/气相间传质损失而导致的二氧化碳逸散。为量化这一过程损失,本文基于水厂 2024 年 5 月—11 月的历史运行数据,对理论计算值进行了系统性分析。水厂实际投加量与理论计算投加量的对比如图 2 所示。

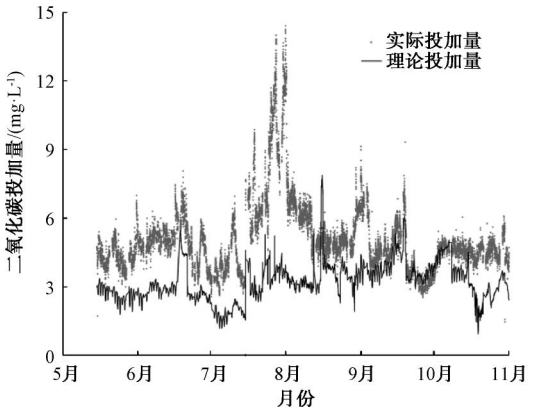


图 2　实际投加量与理论计算投加量对比

Fig. 2　Comparison between Actual and Theoretical Calculation Dosages

初步对比发现,该时期的理论计算投加量为(3.21±0.85) mg/L,而水厂实际投加量为(5.07±1.57) mg/L,理论值与水厂实际投加量相比偏低约 36.7%。投加过程中的二氧化碳逸散、混合不均等实际因素都将造成实际过程的损耗。当前,水厂采用预溶解/碳酸化水技术,将二氧化碳溶解于水形成碳酸再注入介质水中,实现均质混合[8]。鉴于二氧化碳在水中的溶解度与逸散速率均与温度密切相关,温度升高导致二氧化碳在水中溶解度下降、逸散速率加快[9]。基于 2024 年历史运行数据,对比不同工况条件下实际投加量和理论投加量的差异,建立理论投加量与实际投加量随温度变化的经验关系,从而得出一系列温度分段修正系数,对理论值进行补偿,如表 1 所示。

表 1　温度修正系数对应关系

Tab. 1　Correspondence of Temperature Correction Factors

温度/℃	修正系数	温度/℃	修正系数
≤13	0.90	20~24	0.75
13~16	0.85	24~28	0.70
16~20	0.80	>28	0.68

理论加注量修正公式如式(20)所示。

$$[CO_2]_{实际}=[CO_2]_{理论}/修正系数 \quad (20)$$

3　结果与讨论

3.1　理论验证(基于相同理论框架的基准对比)

为验证本文构建的二氧化碳理论投加量模型的准确性,选用在工程实践中广泛应用且基于相同理论体系的专业软件 STASOFT 作为计算结果的参照基准[10-11]。

试验设置了 7 组涵盖不同水质条件与目标 pH 值的典型工况,如表 2 所示,分别采用本模型与 STASOFT 软件进行计算对比。结果如图 3 所示,2 者计算结果高度基本一致,平均相对误差为 3%。这表明本模型在化学平衡计算及关键参数修正方面具有良好的准确性,能够可靠支撑二氧化碳投加量的理论计算。

表 2　建立的工况情景及计算对标结果

Tab. 2　Established Working Condition Scenarios and Calculation Benchmarking Results

序号	原水 pH 值	原水温度/℃	原水总碱度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg·L⁻¹)	原水总溶解性固体物质/(mg·L⁻¹)	目标 pH 值
1	9.0	30	85	230	8.0
2	9.0	30	85	230	7.2
3	8.5	20	50	100	6.5
4	10.0	25	75	300	7.0
5	8.7	10	200	50	7.5
6	8.0	30	85	230	7.2
7	7.5	30	85	230	7.0

3.2　模型修正效果评估

经温度修正后,二氧化碳推荐投加量均值提升至 4.60 mg/L(标准差为 1.25 mg/L)。如图 4 所示,修正后的推荐投加量与历史实际投加量曲线吻合度显著提高,两者之间的平均偏差缩小至

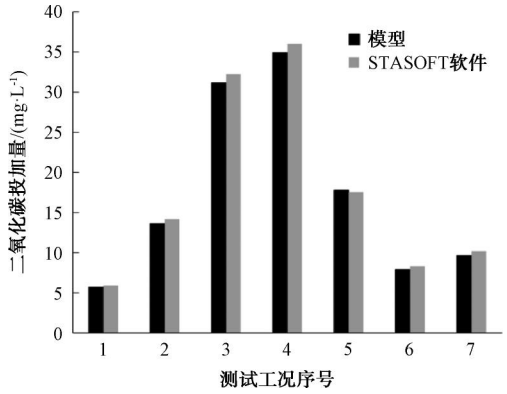


图 3　理论计算投加量与 STASOFT 软件计算投加量对比

Fig. 3　Comparison of Theoretical Calculation and STASOFT Software Simulation Dosages

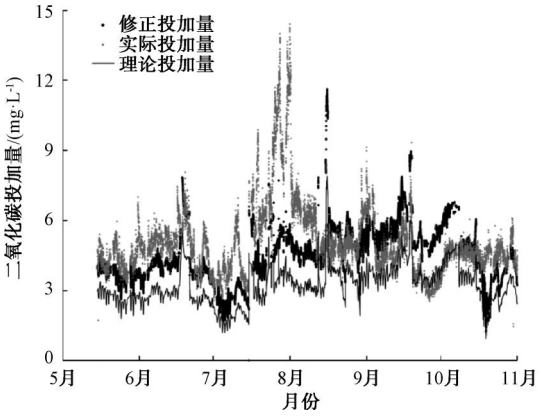


图 4　经修正加注量、理论加注量、实际加注量间对比

Fig. 4　Comparison among Corrected, Theoretical and Actual Dosage Rates

10%以内。

为验证智能投加模型在真实生产环境中的控制精度与稳定性,本文在水厂 4 系统进行了现场测试,选择预臭氧池进水管处为实测 pH 的取样点。测试选取了不同日期和不同水质条件,设定了不同的目标 pH,并对比了模型推荐投加量与实际执行投加量下的 pH 调节效果,测试数据如表 3 所示。

表 3　智能模型系统应用测试结果

Tab. 3　Application Test Results of Intelligent Model System

日期	原水 pH 值	原水温度/℃	原水总碱度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg·L^{-1})	原水电导率/(μS·cm^{-1})	目标 pH 值	理论投加量/(mg·L^{-1})	实际投加量/(mg·L^{-1})	实测 pH 值	目标与实测偏差
5 月 16 日	8.19	23.4	102	400	7.7	3.2	4.3	7.76	0.8
5 月 16 日	8.17	23.4	102	400	7.5	5.4	7.2	7.53	0.4
5 月 16 日	8.16	23.5	102	401	7.3	8.9	11.9	7.34	0.5
7 月 17 日	8.12	31.3	98	338	7.3	7.9	11.6	7.27	−0.4
7 月 17 日	8.21	32.9	98	335	7.5	5.1	7.5	7.45	−0.7
7 月 17 日	8.13	33.7	98	337	7.7	2.6	3.9	7.75	0.6
8 月 7 日	8.39	32.6	96	341	7.5	5.8	8.6	7.56	0.8
8 月 7 日	8.41	33.8	96	344	7.3	9.0	13.2	7.32	0.3
8 月 7 日	8.38	35.1	96	345	7.4	7.1	10.5	7.45	0.7
8 月 12 日	8.33	31.7	100	346	7.4	7.2	10.6	7.36	−0.5
8 月 12 日	8.35	32.8	100	350	7.5	5.9	8.6	7.54	0.5
8 月 12 日	8.45	33.8	100	349	7.6	5.2	7.7	7.66	0.8
9 月 10 日	8.34	27.8	102	374	7.4	7.6	10.8	7.35	−0.7
9 月 22 日	8.36	28.8	102	370	7.6	4.9	7.2	7.65	0.7
10 月 10 日	8.22	27.3	106	354	7.4	7.3	10.4	7.45	0.7
10 月 17 日	8.13	26.1	108	351	7.9	1.3	1.9	7.95	0.6
10 月 20 日	8.36	21.2	106	340	7.6	5.3	7.0	7.56	−0.5
10 月 27 日	8.48	18.2	106	288	7.8	4.0	4.9	7.87	0.9

应用测试结果表明,依据模型推荐值投加二氧化碳后,出水 pH 的实测值与预设目标值非常接近。在所有测试案例中,目标 pH 值与实测 pH 值的偏差均小于 1%。

3.3　系统应用与效能分析

该水厂共设有 3 套二氧化碳投加系统,其投加点均位于各预臭氧接触池前的进水原水管道上。由于各系统在同一时间所面对的原水水质情况基本一致,为对比测试创造了可靠条件。本文选取其中 2 套系统进行试验,以控制 pH 值在 7.7 左右为目标:一组沿用人工经验模式,即根据流量变化预设定二氧化碳投加值,为水厂日常运行的常规投加量;另一组则采用基于智能投加模型输出的建议值,每 30 min 更新 1 次,并作为 PLC 控制系统比例-积分-微分控制(PID)调节的目标设定值。2 种模式下,二氧化碳的实际投加量与投加后 pH 值的实时变化情况分别如图 5~图 6 所示。

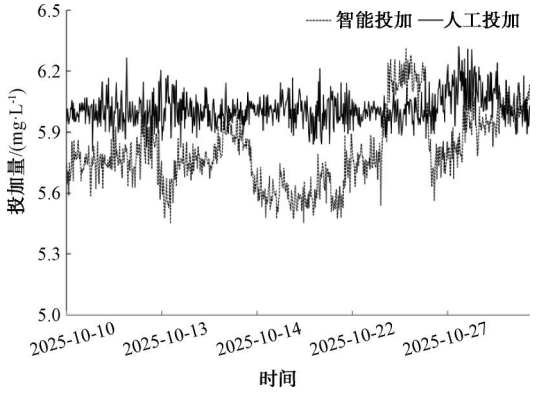


图 5　人工投加和智能投加的二氧化碳投加量对比

Fig. 5　Comparison of Carbon Dioxide Dosages between Manual and Intelligent Dosing

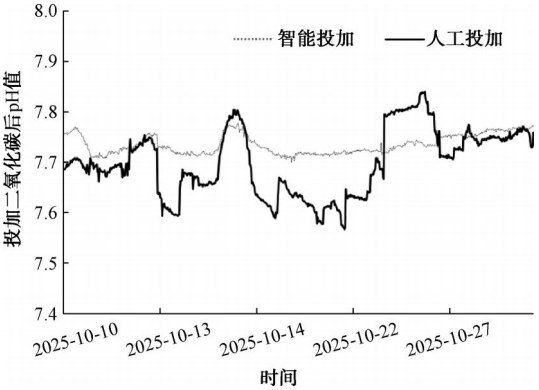


图 6　人工投加和智能投加的 pH 值对比

Fig. 6　Comparison of pH Values between Manual and Intelligent Dosing

由图 5 可知,采用智能投加模型建议值作为 PID 目标设定值时,系统实际消耗的二氧化碳量更低。在为期 5 d 的测试期内,人工经验投加模式下的平均二氧化碳投加量约为 6.02 mg/L,而智能投加模式下的平均值为 5.78 mg/L,节省了约 3.8%的药剂。此外,如图 6 所示,智能投加模式下的投加后 pH 值表现更为稳定,基本维持在 7.7~7.8 之间。这一结果表明,所建立的智能投加模型在面对水质波动时,具备更优的调节能力,能够有效维持出水 pH 的稳定性。

4　结论与建议

(1)本文基于二氧化碳-碳酸平衡体系核心逻辑,结合温度修正构建了二氧化碳投加量计算模型,并通过理论验证与现场试验证明了其可靠性。理论验证中,以同一理论基础下经工程验证的工具为基准,模型计算结果与之平均误差约为 3%,验证了理论计算模型的准确性;引入温度修正后,模型推荐投加量与实际投加量的偏差进一步缩小至 10%以内。现场应用中,出水 pH 实测值与目标值的偏差均小于 1%,表明模型能够实现对 pH 的精确控制,为高藻原水水厂的 pH 调节提供了可靠的技术支撑。

(2)在水厂 4 系统的现场测试中,采用该模型支撑的智能投加模式相较于传统人工经验模式展现出明显优势。智能模式下二氧化碳平均投加量约为 5.78 mg/L,低于人工模式的 6.02 mg/L,降低药剂消耗 3.8%,实现运行成本的节约。同时,智能模型可实现对 pH 的“前馈控制”,相对于人工经验加药,通过模型辅助加药控制,使出水 pH 值稳定维持在目标范围内,具备更强的抗水质波动能力,克服了人工投加存在的粗放性与调控滞后问题,显著提升了供水水质的稳定性。

(3)针对当前模型基于水质稳定数据构建的局限性,后续在典型藻类暴发期(如 7 月—8 月)开展水质剧变模拟试验。通过设置 pH 骤升、碱度与电导率同步上升、温度骤升等多组突变情景,以实际监测数据为基础,系统验证模型在突变条件下的响应速度、控制精度和投加稳定性。为优化温度、离子强度等修正系数的动态适配性提供关键数据支撑,提升模型在不同水质特征水厂中的全面应用能力。

参考文献

[1]　李冰, 张立尖. 给水厂二氧化碳投加工艺应用及运行分析[J]. 给水排水, 2025, 51(6): 21-25.
Li B, Zhang L J. Application and operation analysis of carbon dioxide dosing technology in water treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(6): 21-25.

(下转第 216 页)

1862844.

[15] 王晓昌, 丹保宪仁. 絮凝体形态学和密度的探讨(Ⅱ)——致密型絮凝体形成操作模式[J]. 环境科学学报,2000,20(4):385-390.
Wang X C, Tambo N. A study on the morphology and density of flocs Ⅱ. Operation modes for compact floc formation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(4): 385-390.

[16] 宋学峰, 吴越强, 许成君, 等. 水平管沉淀池处理高藻水库水的应用研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 41-45, 50.
Song X F, Wu Y Q, Xu C J, et al. Application of horizontal tube sedimentation tank to treatment of reservoir water with high algae[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 41-45, 50.

(上接第 202 页)

[2] 张艳. 水厂二氧化碳精准调节 pH 工艺的运行评估[J]. 净水技术, 2025, 44(增刊 1): 41-47.
Zhang Y. Operation evaluation of precise pH adjustment process with carbon dioxide in WTP[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(S1): 41-47.

[3] Lee G S, Kim M C, Kwon J K, et al. Effect of pH adjustment by CO_2 on coagulation and aluminum elution in water treatment[J]. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 2013, 35(1): 17-22.

[4] 陈德放, 李梅, 张华军, 等. 投加二氧化碳控制出厂水铝含量的生产性试验[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 9-14.
Chen D F, Li M, Zhang H J, et al. Controlling aluminum content in finished water of waterworks by dosing carbon dioxide [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 9-14.

[5] 黄涛. 二氧化碳调节高 pH 原水投加量计算及自动控制方法[J]. 城镇供水, 2025(4): 1-3,6.
Huang T. Calculation and automatic control method for the dosage of high-pH raw water regulated by carbon dioxide[J]. City and Town Water Supply, 2025(4): 1-3,6.

[6] 吴雪飞. 二氧化碳投加在水厂处理高 pH 原水上的应用及效果[J]. 净水技术, 2022, 41(增刊 1): 40-44, 249.
Wu X F. Application and effect of carbon dioxide dosing on high pH value of raw water in WTP[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(S1): 40-44, 249.

[7] Bisweswar G, Al-Hamairi A, Jin S. Carbonated water injection: An efficient EOR approach. A review of fundamentals and prospects[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2020, 10: 673 - 685. DOI: 10.1007/s13202-019-0738-2.

[8] G V R Loewenthal R E. STASOFT: A user-friendly interactive computer program for softening and stabilisation of municipal waters[J]. Water SA, 1988, 14(3): 159-162.

[9] 刘爱贤, 刘鹏, 孙强, 等. 二氧化碳在水中扩散系数的实验测定和计算[J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25(6): 5-9.
Liu A X, Liu P, Sun Q, et al. The experimental and modeling studies on the diffusion coefficient of CO_2 in pure water[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2012, 25(6): 5-9.

[10] 许仕荣, 赵伟, 王长平, 等. 碳酸钙沉淀势理论计算模型及其应用[J]. 给水排水, 2012, 38(5):157-160.
Xu S R, Zhao W, Wang C P, et al. Theoretical calculation model of calcium carbonate precipitation potential and its application[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(5): 157-160.

[11] Loewenthal R E, Morrison I, Wentzel M C. Control of corrosion and aggression in drinking water systems[J]. Water Science and Technology, 2004, 49(2): 9-18.