

刘成, 徐文蕙, 周卫东, 等. 饮用水中碳酸氢根的意义和控制目标探讨[J]. 净水技术, 2023, 42(8):1-9.

LIU C, XU W H, ZHOU W D, et al. Discussion on the significance and control objectives of  $\text{HCO}_3^-$  in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(8):1-9.

## 饮用水中碳酸氢根的意义和控制目标探讨

刘成<sup>1,\*</sup>, 徐文蕙<sup>1</sup>, 周卫东<sup>2</sup>, 范佩<sup>2</sup>, 周克梅<sup>2</sup>, 李长庚<sup>1</sup>, 单铭港<sup>1</sup>, 陈卫<sup>1</sup>

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 南京水务集团有限公司, 江苏南京 210091)

**摘要** 碳酸氢根( $\text{HCO}_3^-$ )是水中最常见的阴离子之一,能直接影响饮用水的水质,并对饮用水的典型净化工艺的效能和处理出水的水质稳定性产生影响。论文总结了天然水体中 $\text{HCO}_3^-$ 的来源和存在形式,系统分析了其含量对管道寿命、饮用水水质稳定性、舒适健康性的意义,以及对混凝、消毒等水处理工艺净化过程和出水水质的影响,在此基础上进一步探讨了饮用水处理过程中 $\text{HCO}_3^-$ 的适宜控制目标。论文内容可为水厂及供水管网中 $\text{HCO}_3^-$ 的合理控制、供水安全的保障提供一定的参考。

**关键词** 饮用水 碳酸氢根 水质稳定性 水质与健康 管网输送 水质净化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)08-0001-09

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.08.001

## Discussion on the Significance and Control Objectives of $\text{HCO}_3^-$ in Drinking Water

LIU Cheng<sup>1,\*</sup>, XU Wenhui<sup>1</sup>, ZHOU Weidong<sup>2</sup>, FAN Pei<sup>2</sup>, ZHOU Kemei<sup>2</sup>, LI Changgang<sup>1</sup>, SHAN Minggang<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Water Group Co., Ltd., Nanjing 210091, China)

**Abstract** Bicarbonate radical ( $\text{HCO}_3^-$ ) is one of the most common anions in water, which directly affects the water quality of drinking water. At the same time, it also affects the efficiency of the typical purification process and the water quality stability of the evolved effluent. Paper summarizes the origin and existence form of  $\text{HCO}_3^-$  in natural water bodies, systematic analysis of its content on the pipeline life, the significance of drinking water quality stability, comfort, health, and for water treatment processes such as coagulation, disinfection purification process and the influence of water quality. On this basis, the suitable control target of  $\text{HCO}_3^-$  in the process of water treatment is discussed. The content of this paper can provide some reference for the reasonable control of  $\text{HCO}_3^-$  and the guarantee of water supply safety in water treatment plant and water supply network.

**Keywords** drinking water bicarbonate radical ( $\text{HCO}_3^-$ ) water quality stability water quality and health pipe network transportation water purification



刘成,河海大学教授,博士生导师。主要研究方向为特殊水质原水安全高效处理、城市给排水处理、污水资源化利用及水环境改善等领域的技术开发及应用,获得授权发明专利50余项,其中饮用水除硬度、除硝酸盐、除硫酸盐、除氟以及污水资源化利用等方面的关键技术已在国内30余个水处理工程中获得应用。

[收稿日期] 2023-07-17

[基金项目] 国家重点研发计划项目:定向去除抗生素等的氧化-生物协同技术研发与示范(2022YFC3203702)

[通信作者] 刘成,男,教授,研究方向为特殊水质原水处理技术研发及应用,E-mail:liucheng8791@hhu.edu.cn.

碳酸氢根( $\text{HCO}_3^-$ )是天然水体中普遍存在的阴离子之一,是天然水碱度的主要组分。据不完全统计,天然水体中的 $\text{HCO}_3^-$ 质量浓度一般为 $100 \sim 400 \text{ mg/L}$ ,其中华北地区、东北地区和华南地区的大部分饮用水中 $\text{HCO}_3^-$ 含量较低,而西南地区、西北地区部分地区饮用水中 $\text{HCO}_3^-$ 含量较高,宁夏等地区的部分地下水中 $\text{HCO}_3^-$ 质量浓度甚至超过 $400 \text{ mg/L}$ ,而其含量对水的类型划分、使用用途及其处理过程均有一定的影响。在水的自然循环过程中, $\text{HCO}_3^-$ 对调控碳在生物圈、岩石圈、大气圈和海洋圈之间的流动,以及维持水体的pH、保障水生动植物正常生长具有重要的意义。在水的社会循环过程中, $\text{HCO}_3^-$ 则直接影响供水管道的腐蚀和结垢、典型水处理工艺净化效能及饮用水水质健康性。近年来,优质水以及高品质水的概念在饮用水处理领域广受关注<sup>[1]</sup>,即在保障水质合格、安全的基础上,进一步提升水的健康性、便利性以及口感等,而这与 $\text{HCO}_3^-$ 也有一定的关联。但《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中未对水中 $\text{HCO}_3^-$ 提出限值要求,且目前针对 $\text{HCO}_3^-$ 对于饮用水水质稳定性、水质健康性及其处理、输送的影响和意义的系统阐述尚需进一步完善。因此,本文将在分析水中 $\text{HCO}_3^-$ 来源基础上,系统阐述其对饮用水水质、处理过程及其

输送过程的意义,并初步探讨饮用水中 $\text{HCO}_3^-$ 含量的适宜控制目标。

## 1 水中 $\text{HCO}_3^-$ 的来源及存在形式

### 1.1 水中 $\text{HCO}_3^-$ 的来源

天然水体中存在着大量的碳元素,除少部分以有机态存在外,大多数以溶解在水中的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等无机态存在,且各无机形态的比例与水的pH直接相关。天然水的pH值一般为 $6.5 \sim 8.5$ ,水体中的碳酸化合物主要以碳酸氢盐的形式存在。天然水体中的 $\text{HCO}_3^-$ 的主要来源(图1)包括:①大气中的 $\text{CO}_2$ 溶解于水体中<sup>[2]</sup>;②水生动物和植物新陈代谢产生的 $\text{CO}_2$ 溶解于水体中<sup>[3]</sup>;③岩石及土壤中的碳酸盐被溶解进入水体<sup>[4-5]</sup>;④动物的排泄物、腐败的有机物或工业排水中含有的 $\text{HCO}_3^-$ 进入水体<sup>[6]</sup>。因此,水体中 $\text{HCO}_3^-$ 的含量与降雨、蒸发、淡水输入、海冰融化、人类生产生活等密切相关。而全球 $\text{CO}_2$ 水平的升高将会导致水体中溶解性 $\text{CO}_2$ 浓度增加, $\text{HCO}_3^-$ 含量升高,进而对水生生物的新陈代谢产生影响<sup>[3,6-7]</sup>。国内60个水厂(地表水厂和地下水厂各30个)水源水中阴离子当量浓度的组成比例的统计结果(图2)表明,大部分地区地下水源水和地表水源水离子组成比例相近,

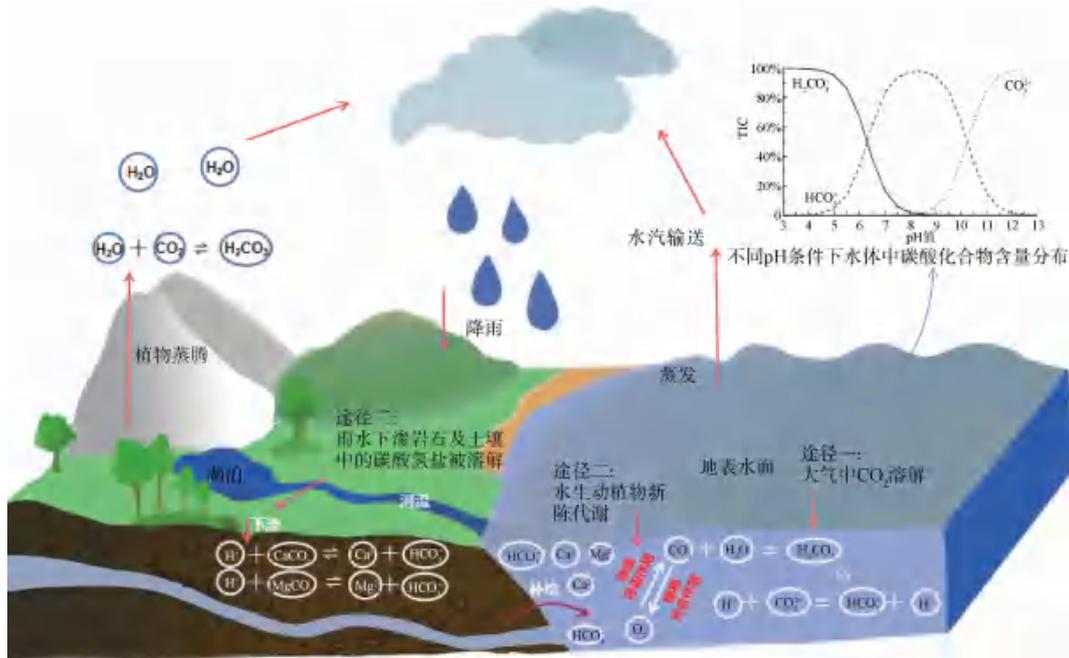


图1 天然水体缓冲体系形成及缓冲过程

Fig. 1 Buffer Systems Formation and Buffering Process of Natural Water

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为主要的阴离子之一。需注意的是,盐碱水的缓冲能力较差,大都具有 pH 高、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占比较低的特点<sup>[7-8]</sup>。此外,造纸、印染、化工、电镀等行业排放的废水及农业面源污染都会对水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的含量产生影响。目前我国许多地区由于地下水资源过度开采,水中钙硬度和碱度(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)也呈现增加的趋势<sup>[9]</sup>。

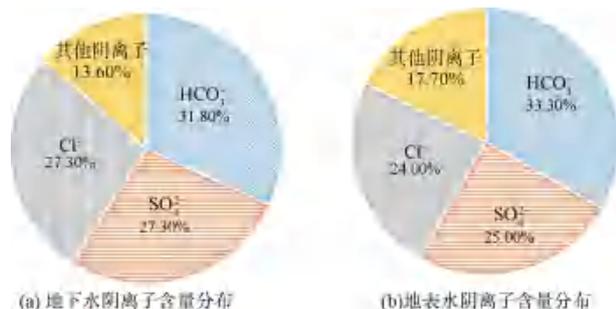
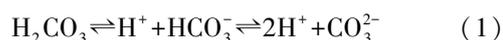


图 2 我国部分水源水中阴离子当量浓度分布

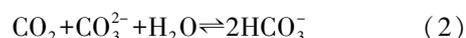
Fig. 2 Distribution of Anion Equivalent Weight Concentration in Some Water Sources at Home

## 1.2 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在水中的转化及基本作用

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对维持水体 pH 稳定具有重要的意义。在天然水体正常 pH 范围内,其酸-碱缓冲容量的 95% 来自于 CO<sub>2</sub>-碳酸盐体系,且 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 及其共轭酸碱含量越高,水体自身的缓冲能力越强。作为两性物质,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 可根据水中 H<sup>+</sup>、OH<sup>-</sup> 的含量变化自动调整离解反应的方向<sup>[9]</sup> [图 1、式(1)]。



此外,与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 相关的化学反应对维持水中 CO<sub>2</sub> 平衡也具有重要的意义,其作用过程为如式(2)<sup>[10]</sup>。



因此,作为水源水中含量较高的典型阴离子,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对于维持水体 pH 及水中 CO<sub>2</sub> 含量具有重要的作用。

## 2 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对水质稳定性及品质的影响

### 2.1 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与饮用水水质稳定性的关系

水质稳定性是近年来饮用水领域关注的关键指标之一,对于管网自身和管网输送过程中的水质具有重要的意义,水质稳定性较差会直接导致饮用水输送过程中管道的腐蚀或管壁上的结垢(图 3)。通

常用 Langelier 饱和指数 (LSI) 和 Ryznar 稳定指数 (RSI) 来评价水质稳定性,在两个指数核定过程中,饱和 pH (pH<sub>s</sub>) 的计算至关重要,其数值与总碱度、pH、钙硬度和总溶解固体直接相关。因此,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是影响水体水质化学稳定性的重要指标,其含量直接决定饮用水对管网的腐蚀或结垢倾向。

一般认为,当 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 质量浓度低于 80 mg/L 时,水体具有腐蚀倾向,在输送过程中会侵蚀金属管道内壁、管道水泥砂浆内衬、非金属保护层和非金属材料等,造成管道使用寿命的缩短、管道的漏损<sup>[11]</sup>。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较低导致管道腐蚀的现象易出现在海水淡化出水、南方部分水源以及少量南水北调水源调换的过程中<sup>[12]</sup>。针对 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量极低的海水淡化出水,补充适量的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 有利于保持其水质稳定性、维持管网输送过程中水质的安全。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量升高可增强水体缓冲能力、降低腐蚀速率<sup>[13]</sup>,一般认为:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 质量浓度低于 50 mg/L 时,LSI 一般小于 0,水体具有较强的腐蚀性;增加 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 质量浓度为 100、150、200 mg/L 时,LSI 逐步增大,腐蚀性减弱<sup>[14]</sup>;当 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 质量浓度高于 300 mg/L 时,水体有明显的结垢倾向,此时供水管道表面形成 CaCO<sub>3</sub> 附着层,导致管道有效过流面积减少、水流动阻力增加、供水能耗增大<sup>[13]</sup>。这与“碳达峰、碳中和”目标相悖,严重时会使管道完全堵塞,造成爆管事故。

由于管道内腐蚀和结垢过程复杂,产物种类繁多,通常将管内壁由腐蚀和结垢过程生成的黄褐色、多孔、凹凸不平的锈蚀物(主要是氧化铁和氢氧化铁)、层状堆积物(如 CaCO<sub>3</sub>、水中的胶体颗粒等)和黏垢(生物膜)相互结合成的复合体均统称为管垢<sup>[15]</sup>。附着在管道上的管垢会引起浑浊度增加、余氯和溶解氧锐减以及重金属的富集,影响管网末端水质。其中,重金属富集具体体现为 Cu、Ni、As、Cr、Cd、Pb 等物质的大量累积,富集浓度甚至超过水源水体中相应浓度多个数量级<sup>[16]</sup>。此外,管垢层还会成为污染物累积和微生物生长繁殖的场所。当管道管垢层较厚时,水中的丝状铁细菌可依靠铁盐的氧化而附着于管内壁,形成一种密集的锈瘤,同时产生黄褐色的絮状物,这种铁细菌还可以将硫酸盐还原成硫酸铁,几乎覆盖整个管壁,导致管道腐蚀加剧<sup>[17-19]</sup>。

### 2.2 饮用水水质稳定性的调控

根据影响水质稳定性的主要因素可以看出,通



图3 管道内壁腐蚀与结垢

Fig. 3 Corrosion and Scaling of Inner Wall of Pipelines

过调整饮用水的关键水质参数可以改变其水质稳定性、保障管网输送安全。结合水中物质对饮用水安全和健康的影响,调整  $\text{HCO}_3^-$  含量可以实现水质稳定性优化和饮用水健康、安全、舒适的双重目标。

基于以往针对饮用水中  $\text{HCO}_3^-$  与其腐蚀、结垢倾向间的研究结果,可以初步认为水中  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度为  $80 \sim 300 \text{ mg/L}$  可以保障其水质稳定性<sup>[16]</sup>。适当增加  $\text{HCO}_3^-$  含量可有效缓解水体酸碱度的突变<sup>[18]</sup>和输水管道中铁的释放<sup>[22]</sup>,同时不会造成管道出现明显结垢现象<sup>[13]</sup>。增加  $\text{HCO}_3^-$  的含量可通过投加少量碱、提高 pH 的方式<sup>[12]</sup>,特定情况下也可通过与气体  $\text{CO}_2$  组合投加来实现  $\text{HCO}_3^-$  和碱度的同步增加<sup>[20,23]</sup>。

### 2.3 $\text{HCO}_3^-$ 与优质饮用水供给的关系

优质饮用水的供给是近年来人们关注的热点,关系到人民生活质量和幸福感。优质饮用水目前尚没有完全统一的界定,一般指在满足现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的“合格水”基础上进一步提升水质,以更好地提升其安全性、舒适性和对人体健康的影响,而  $\text{HCO}_3^-$  与饮用水对人体的健康及舒适性也具有一定的关联。

#### 2.3.1 $\text{HCO}_3^-$ 对水质健康性的影响

饮用水的卫生安全与健康效应是人们所关注的主要方面。 $\text{HCO}_3^-$  作为胃液和肠液的正常分泌组分可被人体高效吸收,其含量直接影响人体健康<sup>[24-25]</sup>。国内外多项研究已经证实水中的  $\text{HCO}_3^-$  除具有维持人体酸碱平衡外,还有以下益处(图4):①提升血液 pH,缓解代谢性酸负荷,这也是水中  $\text{HCO}_3^-$  益于人体健康的基础;②在正常血压区间内降低收缩压以及下调血压升高因子醛固酮和肾素的水平,通过减少低密度和极低密度脂蛋白胆固醇水平,提升高密度脂蛋白胆固醇水平,改善血脂谱分布,有助于预防心脑血管疾病<sup>[25]</sup>;③改善机体糖代谢,提高糖耐量加强胰岛素,降低餐后血糖,有助于

预防糖尿病,患者长期饮用高  $\text{HCO}_3^-$  含量的饮用水(苏打水)会导致血压、血脂不同程度下降,且可消除高脂血症<sup>[25]</sup>;④降低甲状旁腺激素(PTH)和 C 肽,降低成年女性破骨细胞活性,富含碳酸氢盐和钙的碱矿泉水能减少骨质流失<sup>[26]</sup>;⑤减轻十二指肠运动的潜在功能障碍、增强胃排空率、明显增强胃酸和胃蛋白酶原分泌,改善消化系统功能,中和过多的胃酸、增加胰腺分泌、促进肠道蠕动、改善便秘等<sup>[27-28]</sup>;⑥碱化尿液,维持尿 pH 值在  $6.2 \sim 6.9$ ,提高尿酸的溶解度,避免尿酸盐沉积,预防肾脏及尿路结石的发生<sup>[29]</sup>;⑦减少乳酸、抗疲劳、减轻血液黏稠,可中和大量运动后人体肌肉产生的大量乳酸,起到缓解肌肉酸痛的作用<sup>[30]</sup>;⑧饮用水中存在适量的  $\text{HCO}_3^-$ ,有利于人体对 Ca、Mg 的吸收及利用<sup>[31]</sup>。

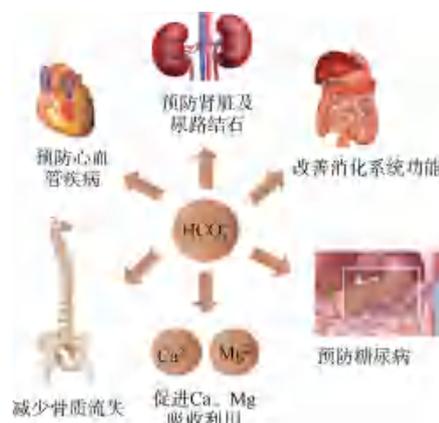


图4  $\text{HCO}_3^-$  对维持人体机能的作用

Fig. 4 Effect of  $\text{HCO}_3^-$  on Maintaining Human Function

需要特别注意的是,长期饮用  $\text{HCO}_3^-$  含量较高的水会出现胃酸缺乏、嗝气、食欲不振、腹胀、消化吸收障碍等不良反应<sup>[31]</sup>。

#### 2.3.2 $\text{HCO}_3^-$ 对饮用水口感的影响

饮用水的口感是评价其品质的重要指标,而  $\text{HCO}_3^-$  含量对饮用水的口感具有一定的影响。一般来说,水中  $\text{HCO}_3^-$  会使水口味偏甜<sup>[32]</sup>,适量的  $\text{HCO}_3^-$  含量有利于提升水的口感,使水质润滑可口;过量的  $\text{HCO}_3^-$  则使水饮用时有黏稠感,饮用后会出现不解渴的感觉<sup>[33]</sup>。 $\text{HCO}_3^-$  对水口感的影响不仅与其自身含量有关,还和  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  比例有关:①当  $\text{HCO}_3^-$  含量  $>$   $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量时,不仅水的口感较好,还有一定的甜味;②当  $\text{HCO}_3^-$  含量  $<$   $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量时,存在非碳酸氢盐硬度,水味变差,甚至发苦。

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量低而 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量高的苦咸水所呈现的苦、咸充分证实了上述结果,所以 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量高的饮用水通过提高 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量可使水的口感显著提升<sup>[34]</sup>。

### 2.3.3 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对饮用水“水垢”生成及控制的影响

饮用水使用过程中的“水垢”问题是近年来水厂被投诉较多的水质问题之一,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是生成“水垢”的主要物质基础。水中碳酸盐“水垢”的生成过程如图 5 所示:当水中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较高时,水在煮沸过程中 CO<sub>2</sub> 由水中溢出,水中溶解性无机盐离子之间的稳定状态被打破,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 与 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的离子积超过了 CaCO<sub>3</sub> 溶度积后便形成了 CaCO<sub>3</sub> 沉淀,即“水垢”的主要成分。

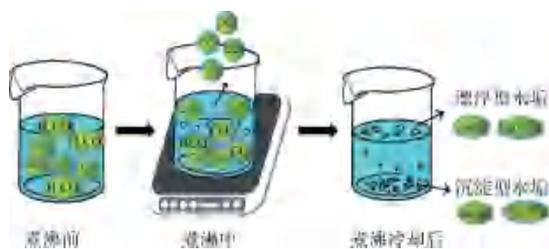


图 5 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对饮用水“水垢”生成的影响

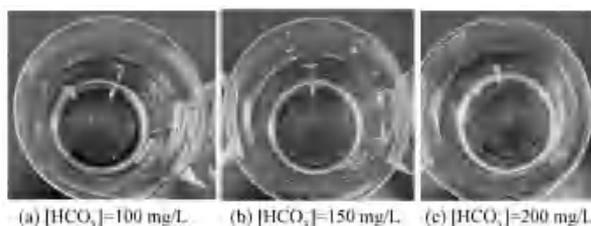
Fig. 5 Effect of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> on the Formation of "Scale" in Drinking Water

高硬度饮用水“水垢”的控制与水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的含量有关(图 6),根据水源水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量的差异,可以分为 2 类水质特征差异明显的水源:①HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较高且碳酸盐硬度占总硬度 50%以上时,针对此类水源水主要考虑总硬度和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量的降低,一般将总硬度(主体是碳酸盐硬度)降低 30%~40%即可解决“水垢”问题;②HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量低且非碳酸盐硬度占总硬度 50%以上时,针对此类水源水需要同步考虑总硬度、硫酸盐、Cl<sup>-</sup> 及其他复合污染物的去除<sup>[21]</sup>。

## 3 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量对饮用水处理工艺的意义

### 3.1 混凝效果及成分残留

混凝是常规处理工艺中的关键工艺单元,对保障整体处理效果具有重要的作用,然而其净化效能与水质条件有直接关系,其中碱度是重要影响因素之一。水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量对混凝剂的水解速度、水解产物和混凝沉淀效果影响很大。以铝盐混凝剂为例,当铝盐溶于水后,会发生水解作用,通常是以 [Al(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sup>3+</sup> 存在,接着发生水解与缩聚反应

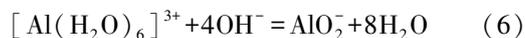
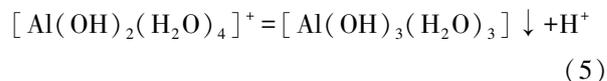
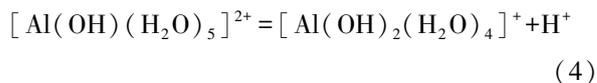


注:总硬度均为 200 mg/L。

图 6 不同含量 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 饮用水沸后“水垢”生成

Fig. 6 "Scale" Formation of Drinking Water with Different Contents of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> after Boiling

[式(3)~式(5)]。当水中含有适量 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 时,可以有效中和水解过程生成的 H<sup>+</sup>,保证铝水解生成物主要是 Al(OH)<sub>3</sub> 沉淀物。而原水中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量不足时(如因藻类滋生消耗了水中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>),铝的解离产物主要以 [Al(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sup>3+</sup>、[Al(OH)(H<sub>2</sub>O)<sub>5</sub>]<sup>2+</sup> 的形式存在,混凝效果变差<sup>[35-36]</sup>;当 pH 明显变化大时,水解成 AlO<sub>2</sub><sup>-</sup>[式(6)],混凝效果变差。



从上述混凝剂离解过程可以看出,当 pH 下降到一定程度时,铝盐水解作用变差,生成胶体成分减少,离子状态的残余铝增加,增加铝超标的风险,而聚集在人体中的铝过高将会导致软骨化症、老年痴呆症<sup>[37]</sup>、尿毒症等疾病,甚至造成死亡<sup>[37]</sup>。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量对铁盐混凝剂的影响及作用机制相似。

### 3.2 消毒过程

消毒工艺是保障饮用水生物安全的关键工艺单元,目前多采用液氯、次氯酸钠,以及紫外、臭氧等消毒剂。液氯、次氯酸钠类消毒剂的水解会引入外源 H<sup>+</sup>,进而对水体 pH 产生一定冲击。如果被消毒水体 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量过低,缓冲力弱,就会导致 pH 大幅波动,并最终影响消毒效果。

此外,pH 对其他类型消毒剂的消毒效果也有一定的影响<sup>[38]</sup>。例如:酸性条件下碘消毒剂以及醛类消毒剂消毒效果增强,碱性条件下阳离子消毒剂、生石灰等碱性消毒剂消毒效果增强。

因此,为保持水中  $\text{HCO}_3^-$  的含量充足以维持水体 pH 的相对稳定,对消毒剂充分发挥消毒性能至关重要<sup>[38-39]</sup>。

### 3.3 活性炭工艺

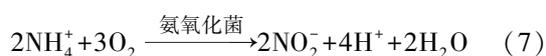
活性炭吸附法是利用活性炭的结构优势和化学性质,如大比表面积、多孔结构、疏水性等,对常规工艺处理后的溶解性有机物(DOM)和微污染物进行吸附去除的方法<sup>[40-41]</sup>。研究<sup>[42-43]</sup>表明,当工艺进水中  $\text{HCO}_3^-$  含量较高时, $\text{HCO}_3^-$  会与 DOM 和微污染物竞争吸附位点,从而降低活性炭对目标污染物的吸附能力。此外,臭氧生物活性炭( $\text{O}_3$ -BAC)工艺是将臭氧化学氧化、活性炭吸附、生物氧化降解技术合为一体的工艺,已逐渐被我国大部分水厂采用。当工艺进水中  $\text{HCO}_3^-$  含量较高时, $\text{HCO}_3^-$  不仅会降低活性炭的吸附能力,还会与作为强氧化剂的臭氧发生反应使臭氧的消耗变高,降低  $\text{O}_3$ -BAC 的整体处理效果。同时从工艺进水到出水中  $\text{HCO}_3^-$  的含量会降低,所以当进水  $\text{HCO}_3^-$  含量较低时会导致水质稳定性降低<sup>[44-45]</sup>。

### 3.4 反渗透(RO)工艺

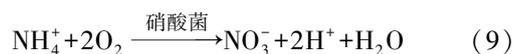
RO 工艺以压力差为推动力可对水中的溶解性盐类、有机污染物、胶体物质等进行有效地去除,是常见的深度处理工艺之一。RO 工艺在运行一段时间后,膜表面或者内部就会有部分离子结晶析出,并沉积附着于膜表面造成膜堵塞,会导致通量下降、离子截留率降低、不可逆的膜损坏、膜使用寿命缩短、维护费用增加等问题。而  $\text{CaCO}_3$  作为无机垢的主要成分与 RO 工艺进水中  $\text{HCO}_3^-$  含量有直接关系,且当 RO 系统回收率较高时,膜组件末端的浓水侧中成垢离子浓度往往是进水时离子浓度的 2~4 倍,此时无机结垢现象更加突出<sup>[46-47]</sup>。因此,为减少 RO 膜结垢,确保工艺的正常运行,应采用预处理将进水的  $\text{HCO}_3^-$  含量控制在合理范围。

### 3.5 生物砂滤池去除氨氮

砂滤池生物膜的硝化作用对水中的氨氮有去除作用,此过程主要由氨氧化菌和亚硝酸菌氧化菌共同作用完成,反应如式(7)~式(8)。



合并后如式(9)。



从式(7)~式(9)来看,硝化作用的过程不断产生酸度,使反应体系中的 pH 降低。由此可见,要保证硝化作用顺利、彻底完成,需要保证此过程中 pH 的相对稳定,即水中含有足量的  $\text{HCO}_3^-$ 。在水厂常规水处理工艺中,对于低 pH、低碱度的水源水,在混凝反应前投加石灰,将待滤水的  $\text{HCO}_3^-$  的含量提高,可以有效提高生物砂滤池对水中氨氮的去除率<sup>[48]</sup>。

### 3.6 磁软化过程

$\text{HCO}_3^-$  的含量会影响磁化处理过程,当水中  $\text{HCO}_3^-$  碱度增大时,磁化处理和未磁化的水中结垢量都增加,不同的是在碱度为 350 mg/L(以  $\text{CaCO}_3$  计)左右时磁化处理可以抑制结垢过程,但当水中  $\text{HCO}_3^-$  碱度远小于硬度时,抑垢效果不明显,即  $\text{HCO}_3^-$  含量与硬度的比例会影响磁化抑垢处理过程。因此,可考虑对在管道中停滞时间较短的水体使用辅助加碱法提高磁化水抑垢效果<sup>[49-50]</sup>。

## 4 饮用水中 $\text{HCO}_3^-$ 的意义和控制目标探讨

饮用水中  $\text{HCO}_3^-$  对于饮用水的口感、稳定性、健康性以及水处理工艺均具有一定的影响(图 7),针对具体的意义和控制目标探讨如下。

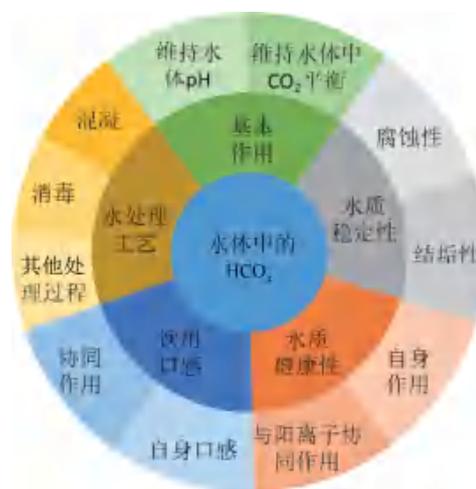


图 7 影响  $\text{HCO}_3^-$  控制的关键因素关系

Fig. 7 Relationship of Key Influencing Factors for  $\text{HCO}_3^-$  Control

①我国不同地区  $\text{HCO}_3^-$  的含量存在较大的差异,与水体的地理环境、地质条件、水源类型、水处理工艺等因素均有关。因此,我国现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)并未规定统一的限值,但结合相关研究发现,不同地区应根据实际情况将

饮用水中的  $\text{HCO}_3^-$  含量控制在合理的范围。既要防止  $\text{HCO}_3^-$  含量较低而导致水的缓冲性能差、管道易腐蚀及混凝消毒等处理效果差等问题,也要规避  $\text{HCO}_3^-$  含量较高而导致的易管道内结垢、煮沸生成“水垢”影响用户使用感受、长期饮用不利于身体健康等问题,同时保证饮用水口感和确保饮用水中含有一定量的  $\text{HCO}_3^-$  以促进人体对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的吸收利用。

②基于生活饮用水缓冲性能、水质健康性和稳定性以及水处理等方面的需求,针对饮用水中  $\text{HCO}_3^-$  的控制目标应满足,控制水中的  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度在 80~250 mg/L 最佳。为使水中  $\text{HCO}_3^-$  的含量最佳,针对  $\text{HCO}_3^-$  含量过低的水可考虑采用联合投加  $\text{CO}_2$ 、石灰的方式提高其质量浓度至 80 mg/L 以上;对于  $\text{HCO}_3^-$  含量过高的水,可通过投加氢氧化钠、氢氧化钙将水体中的  $\text{HCO}_3^-$  降低至适宜范围。

③目前已有部分针对水中  $\text{HCO}_3^-$  含量适宜范围讨论的研究,但  $\text{HCO}_3^-$  在水循环等方面作用及对水处理工艺、饮用水管网运输的影响研究还需进行进一步完善,且在水质健康方面缺乏相关长期健康效应评估,各地区也应根据自身水质情况、水源类型、水处理工艺、用户反馈等设置参考值,以保障饮用水水质,提高用户用水满意度。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 梁顺田. 三峡库区典型支流水体碳酸盐体系的变化及其影响因素研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.  
LIANG S T. The change of carbonate system and its influencing factors in typical tributary of the Three Gorges Reservoir Area [ D ]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017.

[ 2 ] 张含. 大气二氧化碳、全球变暖、海洋酸化与海洋碳循环相互作用的模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
ZHANG H. A modeling study of interactive feedbacks between carbon dioxide, global warming, ocean acidification, and the ocean carbon cycle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[ 3 ] BAO Q, LIU Z H, ZHAO M, et al. Role of carbon and nutrient exports from different land uses in the aquatic carbon sequestration and eutrophication process[J]. Science of the Total Environment, 2022, 813: 151917. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151917.

[ 4 ] 郑洁. 水生植物生物地球化学行为对岩溶碳汇的影响研究——以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例[D]. 重庆: 西南大学, 2014.

ZHENG J. The influence of biogeochemical behavior of aquatic plants on Karst carbon sink —A case study of Xue Yu cave subterranean stream basin of Fengdu, Chongqing [ D ]. Chongqing: Southwest University, 2014.

[ 5 ] JIANG Y J, LEI J Q, HU L C, et al. Biogeochemical and physical controls on the evolution of dissolved inorganic carbon ( DIC ) and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in karst spring-waters exposed to atmospheric  $\text{CO}_{2(\text{g})}$ : Insights from laboratory experiments [ J ]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124294. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124294.

[ 6 ] YU Z T, WANG X J, ZHAO C Y, et al. Carbon burial in Bosten Lake over the past century: Impacts of climate change and human activity [ J ]. Chemical Geology, 2015, 419: 132–141. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2015.10.037.

[ 7 ] 李鲁晶. 盐碱水绿色养殖技术[J]. 农业知识, 2020(15): 33–34.  
LI L J. Green culture technology of saline-alkali water [ J ]. Agriculture Knowledge, 2020(15): 33–34.

[ 8 ] DONG G, ZHAO F Y, CHEN J Q, et al. Land uses changed the dynamics and controls of carbon-water exchanges in alkali-saline Songnen Plain of Northeast China [ J ]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108353. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108353.

[ 9 ] 杨小莉. 超高硬度和超高碱度水处理方案研究[C]. 桂林: 水处理药剂研究及应用学术研讨会, 1995.  
YANG X L. Study on water treatment scheme with ultra-high hardness and ultra-high alkalinity [ C ]. Guilin: Symposium on Research and Application of Water Treatment Chemicals, 1995.

[ 10 ] 李玉平. 天然水的 pH 值与各种形态碳酸的关系[J]. 教学与研究, 1988(1): 12–17.  
LI Y P. Relationship between the pH value of natural water and various forms of carbonic acid [ J ]. Teaching and Research, 1988 ( 1 ): 12–17.

[ 11 ] 胡明强. 基于难溶碳酸盐沉淀形成的海水封存二氧化碳研究 [ D ]. 济南: 山东大学, 2011.  
HU M Q. Study on  $\text{CO}_2$  sequestration through carbonate precipitate formation in sea water [ D ]. Jinan: Shandong University, 2011.

[ 12 ] 米子龙, 邹慧婷, 张晓健, 等. 低 pH 低碱度水源水引起供水管网黄水的控制措施 [ J ]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 23–27.  
MI Z L, WU H T, ZHANG X J, et al. Control measures for red water problem caused by low pH and low alkalinity source water in drinking water distribution systems [ J ]. China Water & Wastewater, 2014, 30(18): 23–27.

[ 13 ] 彭思琪. 某市引入淡化海水条件下水质稳定性评价及腐蚀控制研究 [ D ]. 西安: 长安大学, 2020.  
PENG S Q. Evaluation of water quality stability and corrosion control under desalination of seawater in a city [ D ]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

- [14] 张守凤, 宋海亮. pH、碱度对供水管网水质化学稳定性的影响[C]. 南京: 第十三届全国水处理化学大会暨海峡两岸水处理化学研讨会, 2016.  
ZHANG S F, SONG H L. Influence of pH and alkalinity on chemical stability of water quality in water supply network [C]. Nanjing: The 13th National Water Treatment Chemistry Conference and Cross-Strait Water Treatment Chemistry Seminar, 2016.
- [15] 杜俨, 王汉玉, 王敬哲. 城市供水管网中的管垢及防治措施[J]. 环境科学动态, 2004(4): 22-23.  
DU Y, WANG H Y, WANG J Z. Pipe scale in urban water supply network and its prevention measures[J]. Environmental Science Trends, 2004(4): 22-23.
- [16] 李漫洁. 供水管网中铁释放规律及水质稳定性研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.  
LI M J. Iron release and water quality stability in drinking water distribution systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [17] 张超. 模拟回用水铸铁输水管道的腐蚀及水质的沿程特征研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
ZHANG C. The characteristics of corrosion and water quality along the reclaimed water cast iron pipeline in the simulation system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [18] 程杰. 城市输水管道中管垢的危害及防治办法[J]. 科技情报开发与经济, 2007(36): 265-266.  
CHENG J. Harm and prevention measures of pipe scale in urban water transmission pipeline [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007(36): 265-266.
- [19] ORLIKOWSKI J, ZIELINSKI A, DAROWICKI K, et al. Research on causes of corrosion in the municipal water supply system[J]. Case Studies in Construction Materials, 2016, 4: 108-115. DOI: 10.1016/j.cscm.2016.03.001.
- [20] 郑丹丹. 石灰-二氧化碳联用改善S市供水管网水质化学稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
ZHENG D D. Research on improvement of water chemical-stability of drinking water distribution system by lime and carbon dioxide process in S City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [21] 刘成, 徐文蕙, 邴颜, 等. 饮用水总硬度去除需求分析及控制目标探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 1-8, 80.  
LIU C, XU W H, BING Y, et al. Discussion on the removal demand and control goal of total hardness in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 1-8, 80.
- [22] 邵明聪, 丁树军, 陈忠国. 浅谈碳源和氮源在水质调节中的作用[J]. 水产养殖, 2021, 42(10): 51-52.  
SHAO M C, DING S J, CHEN Z G. Discussion on the role of carbon source and nitrogen source in water quality regulation[J]. Journal of Aquaculture, 2021, 42(10): 51-52.
- [23] 米子龙, 牛璋彬, 张晓健, 等. 供水管网中铁稳定性问题综合控制技术研究[J]. 给水排水, 2013, 49(9): 149-154.  
MI Z L, NIU Z B, ZHANG X J, et al. Study on comprehensive control technology to stabilize the ferrum in water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 49(9): 149-154.
- [24] NASEEM F, ZIA H Z, ISHTIAQ M, et al. Role of chemical composition of drinking water in human health of the community [J]. Journal of King Saud University - Science, 2022, 34(7): 102232. DOI: 10.1016/j.jksus.2022.102232.
- [25] 舒为群, 罗教华. 苏打水-天然的最健康[J]. 大众健康, 2020(4): 108-109.  
SHU W Q, LUO J H. Soda water is naturally the healthiest[J]. Well-Being, 2020(4): 108-109.
- [26] WYNN E, KRIEG M A, AESCHLIMANN J M, et al. Alkaline mineral water lowers bone resorption even in calcium sufficiency: Alkaline mineral water and bone metabolism[J]. Bone, 2009, 44(1): 120-124.
- [27] BERTONI M, OLIVERI F, MANGHETTI M, et al. Effects of a bicarbonate-alkaline mineral water on gastric functions and functional dyspepsia: A preclinical and clinical study [J]. Pharmacological Research, 2002, 46(6): 525-531.
- [28] 吴海艳, 李青山, 姚重璞, 等. 健康的饮用水——弱碱性离子水[C]. 青岛: 全国第十七届红外加热暨红外医学发展研讨会, 2019: 305-309.  
WU H Y, LI Q S, YAO C P, et al. Progress in drinking water safety [C]. Qingdao: Proceedings and abstracts of the 17th National Symposium on Infrared Heating and Development of Infrared Medicine, 2019: 305-309.
- [29] 黄柳绿, 梅杰, 潘立, 等. 苏打水降尿酸作用的研究[J]. 现代食品, 2020(22): 164-169, 173.  
HUANG L L, MEI J, PAN L, et al. Effect of soda water on uric acid[J]. Modern Food, 2020(22): 164-169, 173.
- [30] 倪浩军. 运动前不同时间补充苏打水对人体无氧运动能力的影响[J]. 农家参谋, 2018(12): 276-276.  
NI H J. Effect of supplementing soda water at different times before exercise on human anaerobic exercise ability [J]. The Farmers Consultant, 2018(12): 276-276.
- [31] 周丽. 苏打水打健康牌 专家称应理性饮用[N]. 河北日报, 2010-11-30(15).  
ZHOU L. Experts say soda water should be drunk rationally[N]. Hebei Daily, 2010-11-30(15).
- [32] 侯明韬, 刘晓婧, 许一鸣, 等. 饮用水中矿物成分的分布特征及其对口感的影响[J]. 环境影响评价, 2021, 43(6): 73-77, 84.  
HOU M T, LIU X J, XU Y M, et al. Distribution character of minerals in drinking water and its influence on taste [J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(6): 73-77, 84.
- [33] 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, 58(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, 58(2): 143-151.
- [34] 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.
- [35] 许仕荣, 张芳, 齐玉玲, 等. 絮凝剂与消毒剂对水质化学稳定性的影响[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 27(1): 116-120.
- XU S R, ZHANG F, QI Y L, et al. The research on influence of water quality chemical stability by flocculant and disinfectant [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 27(1): 116-120.
- [36] PERCY M E, KRUCK T P A, POGUE A I, et al. Towards the prevention of potential aluminum toxic effects and an effective treatment for Alzheimer's disease [J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2011, 105(11): 1505-1512.
- [37] 江莲. 地表水处理工艺与残留铝含量的研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- JIANG L. Treatment process of surface water studies on residual aluminum content[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [38] 宋金武, 邓金花, 黎洪周, 等. 酸碱度对次氯酸钠消毒液杀菌效果影响的研究[J]. *中国消毒学杂志*, 2016, 33(2): 107-109.
- SONG J W, DENG J H, LI H Z, et al. Study on the influence of acidity-alkalinity on germicidal efficacy of sodium hypochlorite disinfectant[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2016, 33(2): 107-109.
- [39] LI R A, MCDONALD J A, SATHASIVAN A, et al. Disinfectant residual stability leading to disinfectant decay and by-product formation in drinking water distribution systems: A systematic review[J]. *Water Research*, 2019, 153: 335-348. DOI: 10.1016/j.watres.2019.01.020.
- [40] 陈明. 碱度对水厂生物砂滤池去除氨氮的影响[J]. *城镇供水*, 2014(5): 28-29.
- CHEN M. Effect of alkalinity on removal of ammonia nitrogen by biological sand filter in waterworks [J]. *City and Town Water Supply*, 2014(5): 28-29.
- [41] BHATNAGAR A, ANASTOPOULOS L. Adsorptive removal of bisphenol A (BPA) from aqueous solution: A review [J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 885-902. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.121.
- [42] 王宇航, 俞伟, 赵思钰, 等. 改性生物炭对水环境中抗生素类药物吸附研究进展[J]. *环境工程*, 2021, 39(12): 91-99, 134.
- WANG Y H, YU W, ZHAO S Y, et al. Adsorption of antibiotic drugs in water environment by modified biochar: A review [J]. *Environment Engineering*, 2021, 39(12): 91-99, 134.
- [43] 吴晨曦. 改性生物炭对水中有机物的吸附效能与机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- WU C X. Study on the efficiency and mechanism of modified biochar in adsorbing organic matter in water [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [44] 柳慧. 碳基复合材料对两类常用抗生素的去除及机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- LIU H. The study of removal and mechanism onto two kinds of common antibiotics by carbon-based composites [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [45] 何卓义. 南方季节性咸潮影响下原水的给水处理工艺优化试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- HE Z Y. Study on optimization of raw water treatment process under the influence of seasonal salt tide in south China [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [46] 马丽. 臭氧/生物活性炭工艺影响因素及应用[J]. *中国水运(下半月)*, 2012, 12(9): 136-137, 139.
- MA L. Influential factors and application of ozone/biological activated carbon process [J]. *China Water Transport*, 2012, 12(9): 136-137, 139.
- [47] 李金守. 苦咸水淡化中反渗透膜内部污染物迁移/沉积数值模拟及实验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- LI J S. Numerical simulation and experimental study of pollutant migration/deposition inside reverse osmosis membrane in brackish water desalination [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [48] 刘建路, 岳茂文, 陈晓宇, 等. 反渗透海水淡化中无机结垢的现象及实时监测[J]. *工业水处理*, 2021, 41(7): 25-33.
- LIU J L, YUE M W, CHEN X Y, et al. The phenomenon and real-time monitoring of inorganic scaling in reverse osmosis seawater desalination process [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(7): 25-33.
- [49] ESMAEILNEZHAD E, CHOI H J, SCHAFFIE M, et al. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 908-921. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.166.
- [50] 甘安生, 史彭. 碱度对磁化水防垢效果的影响[J]. *工业水处理*, 1990, 10(6): 12-13.
- GAN A S, SHI P. Effect of alkalinity on anti-scaling effect of magnetized water [J]. *Industrial Water Treatment*, 1990, 10(6): 12-13.