

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勳之, 姜榕, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的PM_{2.5}来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季PM_{2.5}中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)

淄博2021年元宵节PM_{2.5}水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
浙江省大气颗粒物PM_{2.5}中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)

2001~2019年气象条件对江苏省PM_{2.5}分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
基于神经网络和数值模型的重点区域PM_{2.5}预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)

2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)

山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善PMF源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)

日照市夏季VOCs物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)

典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)

西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)

不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
雨源型城市河流污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)

廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)

河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 陈召堂, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)

鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)

汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)

新冠疫情下武汉典型饮用水水源中DBPs污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)

氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)

冷冻PN/A颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮英, 文言, 钱飞跃 (920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)

云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)

地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
西南地质高背景区蔬菜Pb的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)

典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)

不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)

两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)

产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦Cd吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
土壤phoC和phoD微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余烁, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)

刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张祯敏, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)

稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
模拟及实际根系分泌物对镉污染土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)

德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)

长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
《环境科学》征订启事(618) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

再生水水质稳定性评价指标与体系

张馨怡^{1,2}, 魏东斌^{1,2*}, 杜宇国^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 污水再生利用是缓解水资源短缺的有效手段, 水质稳定性是再生水等水资源安全利用的前提, 稳定的水质能有效防止腐蚀和结垢的频繁发生, 不仅有利于改善水质的感官性状, 还能减少二次污染和能源消耗, 为推进污水资源化利用, 对再生水的水质稳定性进行评价和管理尤为重要. 在文献资料调研的基础上, 分别总结了化学稳定性和生物稳定性评价指标的特点及适用范围, 构建了完整的再生水水质稳定性评价指标和评价体系, 主要分为确定再生水水质稳定性的影响因素, 基于水质特征、管网和设备材料等遴选再生水水质稳定性评价指标, 评价水质稳定性并复核评价结果 4 步流程, 最后对水质稳定性评价存在的问题和面临的挑战进行了梳理, 旨在为科学合理地评价水质稳定性和保障再生水的长期安全利用提供理论依据.

关键词: 再生水; 化学稳定性; 生物稳定性; 评价指标; 评价体系

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0586-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105276

Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability

ZHANG Xin-yi^{1,2}, WEI Dong-bin^{1,2*}, DU Yu-guo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Wastewater reclamation and reuse are an effective measure to alleviate water shortages. Water quality stability is the premise for safe utilization of reclaimed water and other water resources. Stable water quality can prevent the frequent occurrence of corrosion and scaling, which not only improves the sensory properties of water quality but also reduces secondary pollution and energy consumption. In order to promote the utilization of wastewater resources, it is important to evaluate and manage reclaimed water quality stability. Based on substantial literature and research, the characteristics and scopes of evaluation parameters for both chemical stability and biological stability were summarized, and a set of evaluation parameters and a system for reclaimed water quality stability were comprehensively established in this study. The evaluation procedure was mainly divided into four steps including: ① determine the influencing factors of reclaimed water quality stability; ② select corresponding evaluation parameters based on reclaimed water quality characteristics, the materials of pipelines, and equipment; ③ evaluate the reclaimed water quality stability; and ④ examine whether the evaluation results were appropriate. Finally, the potential challenges for the stability evaluation of water quality were analyzed. This study is expected to provide a theoretical foundation for the scientific evaluation of water quality stability and safe utilization of reclaimed water.

Key words: reclaimed water; chemical stability; biological stability; evaluation parameters; evaluation system

水资源短缺和水污染是当前我国乃至全球面临的重大难题, 实现有限水资源的充分利用、再生水等非常规水资源的再生利用尤为重要. 水质稳定是水资源高效利用的前提, 但在供水管网的长距离输配过程中, 以及终端用户的水利用过程中, 水中各组分之间或者组分与管道、涉水设施之间可能发生多种化学(生化)反应引发管网腐蚀或结垢等问题, 进而造成水质二次污染. 统计资料显示, 我国以地表水为水源的水厂处理出水中仅有 21% 的水质基本稳定, 以地下水为水源的水厂出水中约 50% 的水质基本稳定^[1]. 再生水的水源主要是城市污水, 即使经过了一定的再生处理, 但再生水出水中仍然含有较多种类、较高含量的污染物, 水质成分比地表水、地下水更为复杂, 潜在的腐蚀和结垢问题更为突出. 2021 年 1 月我国印发了《关于推进污水资源化利用的指导意见》, 全面推进污水资源化利用工作. 为保障再生水的高效利用, 对再生水水质进行稳定性评价与管理非常必要. 目前关于水质稳定性评价的指标已有几十种之多, 但如何遴选指标尚存争议, 且水

质稳定性的评价方法尚不明确. 因此, 本文在文献资料调研的基础上, 建立评价指标的遴选原则和科学的再生水水质稳定性评价方法, 并梳理了水质稳定性评价中存在的问题和面临的挑战.

1 水质稳定性

水质稳定性分为化学稳定性和生物稳定性, 具体表现为腐蚀和结垢 2 个方面. 化学稳定性是指水在储存、输配或使用过程中各组分可能发生反应, 如碳酸钙在与水接触的管网和设备上沉积结垢, 金属管材表面腐蚀等^[2]. 其中, 腐蚀按照机制可分为电化学腐蚀和化学腐蚀两大类. 结垢主要分为 3 种情形: 一是热力学条件改变导致离子的溶解度降低析出结晶, 二是水中各组分间发生化学反应形成沉淀, 三是水力条件改变引起悬浮物沉降. 此外, 管网

收稿日期: 2021-05-27; 修订日期: 2021-07-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406300); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG02006)

作者简介: 张馨怡(1993~), 女, 博士, 主要研究方向为再生水水质安全评价, E-mail: 18300679588@163.com

* 通信作者, E-mail: weidb@cees.ac.cn

中化学物质的直接溶出也会增加水质的化学不稳定性,如高密度聚乙烯管网中易溶出 2,4-二叔丁基苯酚及其他芳香类组分,尤其是高纯水通常更易使化学物质从管网中溶出.生物稳定性是指在无消毒剂的条件下,水或与水接触的材料支持微生物生长的能力^[3].Lautenschlager 等^[4]对该定义进行了补充,保证水质的生物稳定性意味着在管网输配过程中水中微生物的群落组成和数量均保持不变.众所周知,微生物可通过产酸直接诱导腐蚀或者破坏金属表面的钝化膜加速腐蚀.此外,微生物也可通过形成氧浓差电池、阴极去极化和阳极区固定等方式引发腐

蚀.微生物结垢是由生物膜的过度生长所致,生物膜是在固液界面形成的由微生物分泌的胞外聚合物包裹的微生物聚集群落,因为胞外聚合酶的存在,微生物可利用复杂的有机基质进行生长繁殖,生物膜也可保护微生物免遭环境中消毒剂和毒素的影响.由此可见,化学稳定性和生物稳定性分别强调的是水中组分的化学反应和微生物活动对腐蚀或结垢的影响,两者既相互区别又紧密关联(图 1),共同决定水质的稳定性.比如,水中悬浮物沉积不仅可以引起化学结垢,也可以为微生物的附着和生长提供有利条件.

表1总结了水质稳定性的影响因素,主要包括

表1 水质稳定性影响因素

Table 1 Influencing factors of water quality stability

影响因素	具体表现
管网和设备特征	材质 影响腐蚀或结垢的发生,以及微生物群落组成.金属材料比非金属更易腐蚀,腐蚀造成颗粒物释放,表面形成凹陷,可吸附有机物,为微生物生长繁殖提供场所
	内壁粗糙程度 影响水流剪切力,从而影响物质沉积; 影响生物膜的形成,包括微生物的生长速率、密度和群落组成 ^[5] ,内壁粗糙系数较大的材料,有利于微生物的附着和生长
水质特征	pH 低 pH 值易引发腐蚀,高 pH 值易引发结垢;7.5~9.5 范围内随 pH 值升高,促进 Fe(II)的氧化,形成的 Fe(III)可强化腐蚀瘤的物理结构,抑制内部铁的释放; pH 值变化打破化学反应的动态平衡,参与反应的组分浓度相应改变; pH 值变化影响某些微生物的生长 ^[6]
	钙和镁离子 决定水的硬度,低硬度利于材料内壁钝化膜的生成,防止进一步腐蚀,高硬度易导致结垢
	硫酸根和氯离子 导致电导率升高,水中离子和电子的迁移速率加快,促进铁、铝和锰的腐蚀,但对铜、铬、镍和镍的腐蚀无影响 ^[7] .高浓度的氯离子促进点蚀发生(尤其是不锈钢材料); 硫酸根与钙离子共存引发结垢
	硝酸根 大大加速铁在酸性溶液中的腐蚀,在中性溶液中影响不大 ^[8]
	铁离子 与碳酸氢根共存时,形成 Fe(OH) ₃ 沉淀
	悬浮物 加剧水流对管道内壁的冲刷,剥落内壁钝化膜,促进管道腐蚀 ^[9,10] ; 悬浮物沉积引发管道结垢; 为微生物提供天然屏障和营养基质
水质特征	溶解氧 作用于管道内壁时促进腐蚀; 作用于腐蚀表面,促进钝化膜形成,抑制腐蚀 ^[10] ; 高溶解氧利于好氧细菌生长,如氨氧化细菌、硫化细菌和铁氧化细菌等; 低溶解氧利于兼性细菌生长,如硝酸盐还原菌和硫酸盐还原菌等; 无溶解氧时利于厌氧细菌生长,如硫酸盐还原菌和铁还原菌等; 生物膜中的溶解氧呈梯度降低,影响微生物的群落组成
	碳 是细菌生长的最主要限制因子,碳源类型影响细菌的群落结构及生长速度
	氮 结合细菌的元素组成(如碳:氮:磷摩尔比=100:20:1.7),氮也为细菌生长所必需的营养源; 氨氧化细菌可将氨转化为硝酸,导致 pH 降低,促进碳钢、铜、铝及其他金属管道腐蚀; 硝酸盐还原菌可将硝酸根转化为氮气,竞争抑制硫酸盐还原菌活性,减缓腐蚀发生
	磷 影响细菌的正常生长,其中磷酸盐可为细菌提供营养; 细菌所需的磷含量比碳含量低,二级出水中的磷含量取决于处理过程的去除率
	硫 硫酸化菌可将元素硫和硫化物转化为硫酸根和硫酸,促进腐蚀; 硫酸盐还原菌可将硫酸根转化为硫化氢,进而被硫酸化菌氧化为硫酸,引发腐蚀
	铁 铁氧化细菌可产生 Fe(OH) ₃ 沉淀,改变水的酸度,促进腐蚀; 铁还原菌可破坏管道内壁钝化膜,将铁氧化物还原为溶解的 Fe(II),促进腐蚀
	微生物 通过产酸或破坏金属表面钝化膜等方式加速腐蚀; 微生物及其代谢产物沉积于固体表面,生长繁殖形成微生物粘膜,加速结垢 ^[11,12]
水力运行参数	温度 影响离子的迁移及反应速率,温度升高通常会加剧腐蚀 ^[13,14] ; 影响微生物群落组成,特定温度可为某些微生物提供竞争优势
	压力 输水方式主要包括重力模式和压力模式.重力模式下,管网内溶解氧含量较高,优势微生物为好氧和兼性细菌;压力模式下,管网内处于厌氧状态,优势微生物为厌氧细菌
	流速 高流速利于溶解氧扩散,其作用于管道内壁和腐蚀产物表面时分别促进和抑制腐蚀.低流速下悬浮物易沉积,促进管网结垢; 影响生物膜的结构,高流速下易形成单层生物膜,低流速下易形成复杂结构的生物膜 ^[15]

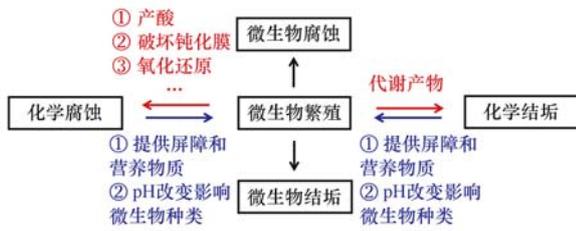


图1 化学稳定性和生物稳定性之间的关联

Fig. 1 Relation between chemical stability and biological stability

管网和设备特征、水质特征以及水力运行参数。其中,管网和设备特征主要包括材质和内壁粗糙程度等;水质特征主要包括理化和微生物两方面;水力运行参数主要包括温度、压力和流速等。可以看出,同一因素对水质稳定性的影响往往是多方面的,不同因素间也可能存在相互作用,共同促进腐蚀或结垢的发生。

2 水质稳定性评价指标

腐蚀和结垢的频繁发生不仅增加能源消耗,还将大大缩短管网和设备的使用寿命,为确保水资源的安全和高效利用,水质稳定性评价及管理至关重要。目前已有的评价指标多达数十种,现就常见的几种评价指标的特点及适用范围进行概述。

2.1 化学稳定性评价指标

化学稳定性评价指标主要分为两类,一类是单一指标,如pH、总碱度、总硬度、总溶解性固体和浊度等^[16-18]。单一指标是从化学稳定性的影响参数中筛选而得,这些指标是常见的水质监测指标,简便易得,易于理解。我国《再生水水质标准》中将浊度和悬浮物列为结垢的评价指标,将色度、pH、总硬度、五日生化需氧量、化学需氧量、总溶解性固体、氨氮、总磷、铁和锰列为腐蚀的评价指标^[19]。我国《工业循环冷却水处理设计规范》中提出钙硬度+总碱度这一综合指标能更加准确地评价腐蚀或结垢的倾向^[20]。丹麦、瑞典和挪威等国的供水水质标准中明确规定pH、总碱度、总硬度、氯离子、硫酸根、铁、锰和铝为化学稳定性的控制指标^[21]。但单一指标的不足是无法反映各因素间的相互作用。

另一类是复合指标,可分为基于碳酸钙溶解平衡的评价指标和基于多参数分析的评价指标。碳酸盐溶解平衡类指标考虑了碳酸氢钙、碳酸钙和二氧化碳三者之间的平衡关系,当水中游离二氧化碳的浓度低于平衡浓度时,生成碳酸钙沉淀;等于平衡浓度时,水质处于稳定状态;高于平衡浓度时,发生二氧化碳腐蚀。根据碳酸盐的溶解平衡,Langelier^[22]于1936年首次提出了Langelier饱和指数(Langelier saturation index, LSI),为水质化学稳定性评价奠定

基础。LSI指数反映了水的实际pH值与其在碳酸钙饱和平衡时的pH值之差,若该值大于零,表明水中溶解的碳酸钙超过饱和值,水样具有结垢倾向;若小于零,则水中溶解的碳酸钙低于饱和值,水样具有腐蚀倾向。但该指标无法定量评价水质的腐蚀或结垢程度,特别是当LSI值接近零时,化学稳定性评价结果存在不确定性。随后相继发展了Ryznar稳定指数(Ryznar stability index, RSI)、暂时过量指数(momentary excess index, ME)、推动力指数(driving force index, DFI)、Feitler临界指数(F_1)、应用指数(Y_1)、碳酸钙沉淀势(calcium carbonate precipitation potential, CCPP)、侵蚀指数(aggressive index, AI)和Puckorius结垢指数(Puckorius scaling index, PSI)等碳酸钙溶解平衡类指标(表2)。在上述众多评价指标中,我国《给水排水设计手册》推荐使用LSI和RSI评价水质化学稳定性,美国《铅和铜指导手册》采用CCPP和LSI为评价指标,美国环境保护署建议用LSI和RSI判断水质的腐蚀或结垢倾向。在实际应用中,尽管碳酸钙溶解平衡类指标的使用频率较高,但该类指标只能评价由碳酸钙引起的结垢,无法评价其他类型的矿物结垢。因此,对于再生水等水质特征复杂的水,其水源水质差且组分多变,通常具有较高的矿化度和电导率,若仅考虑碳酸盐溶解平衡,可能无法真实评价化学稳定性。

为满足不同特征水样化学稳定性评价的需求,多参数分析类评价指标应运而生(表2)。该类指标主要包括Larson腐蚀指数(Larson corrosion index, LR)、Riddick腐蚀指数(Riddick corrosion index, RCI)、Casil指数(Casil index, CI)、Yahalom指数(Yahalom index, YI)、腐蚀因子(F_w)、结垢因子(J_w)和改进Larson腐蚀指数(LR')等。LR'指数是在LR的基础上,纳入了水温、水力停留时间、硬度和溶解氧等影响因素^[14]。多参数分析类评价指标涵盖了除碳酸钙外的其他矿物溶解平衡体系,考虑了包括硬度、碱度、溶解氧、氯离子和硫酸根等在内的多种因素的影响,能更加全面地评价水质化学稳定性,但多种参数的引入也使这些指标的获取更为困难。

本文统计了数十篇运用复合指标评价化学稳定性的文献,待评价水样涵盖再生水、饮用水和淡化海水等。LSI指数、RSI指数、LR指数、CCPP指数、AI指数、PSI指数和 F_1 指数的使用频率分别为90%(27/30)、60%(18/30)、40%(12/30)、27%(8/30)、23%(7/30)、17%(5/30)和3%(1/30)^[16-18,23-49]。可以看出,在化学稳定性评价指标的遴选方面,所选择的指标数量一般为2~5个,

表 2 常见化学稳定性评价指标

Table 2 Common evaluation parameters of chemical stability

评价指标	计算公式	特点及适用范围
LSI 和 RSI	$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s$ $\text{RSI} = 2\text{pH}_s - \text{pH} = \text{pH}_s - \text{LSI}, \text{pH}_s = (9.30 + A + B) - (C + D)$ $A = \frac{[\lg(\text{TDS}) - 1]}{10}$ $B = -13.12 \times \lg(T + 273) + 34.55$ $C = \lg([\text{Ca}^{2+}] \text{ as } \text{CaCO}_3) - 0.40$ $D = \lg(\text{Alk as } \text{CaCO}_3)$ 式中, pH 为水的实际 pH 值; pH_s 为水在碳酸钙饱和平衡时的 pH 值, 即饱和 pH 值; A 为水质溶解固体常数; B 为温度常数; C 为钙硬度常数; D 为总碱度常数; TDS 为水中总溶解性固体的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); T 为水温 ($^{\circ}\text{C}$); $[\text{Ca}^{2+}]$ 为水中 Ca^{2+} 的质量浓度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Alk 为水的总碱度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	基于 pH 对碳酸钙溶解平衡的影响得出, 根据水中碳酸钙是否饱和和析出判断结垢或腐蚀倾向, LSI 适用于钢管、铸铁管和镀锌钢管等未做防腐内衬的金属管, 可定性评价水样未加药剂时的腐蚀或结垢倾向; RSI 是大量实验基础上的半经验指数, 适用于间冷开式循环冷却水系统, pH6.5~8 时较准确
ME 和 DFI	$[\text{Ca}^{2+} - \text{ME}] \times [\text{CO}_3^{2-} - \text{ME}] = K_{\text{SO}}$ $\text{DFI} = [\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}] / K_{\text{SO}}$ 式中, $[\text{Ca}^{2+}]$ 为水中 Ca^{2+} 浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); $[\text{CO}_3^{2-}]$ 为水中 CO_3^{2-} 浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); K_{SO} 为 CaCO_3 的溶度积常数	基于溶度积原理得出, ME 表示超过溶度积所允许的碳酸钙溶解浓度, DFI 表示碳酸钙的饱和程度, 两者可定量计算溶解平衡时水中碳酸钙的理论沉淀值或溶解值
碳酸钙溶解平衡类指标	$F_1 = \text{pH} - \text{pH}_c, \text{pH}_c = \text{pH}_s + 2$ $Y_1 = \text{pH} - \text{pH}_y, \text{pH}_y = \text{pH}_s + 1$ 式中, pH 为水的实际 pH 值; pH_c 为水中开始析出碳酸钙沉淀时的 pH 值, 即临界 pH 值; pH_y 无实际意义, 因控制 pH 为临界值难以实现, 实际中常以控制 pH 不大于 pH_s 1 个单位较安全, pH_s 为水的饱和 pH 值	基于 pH 对碳酸钙溶解平衡的影响得出, F_1 反映了水的 pH 值与实验法测得结垢时的 pH 值 (临界 pH) 之差, 由于临界 pH 较难控制, Y_1 在 F_1 的基础上进行修正, 两者均适用于各式冷却水系统, 对水质参数无过多限制
CCPP	①以碱度定义: $\text{CCPP} = 50\,000(\text{Alk}_i - \text{Alk}_{\text{eq}})$ 式中, Alk_i 和 Alk_{eq} 分别为水的实际碱度和当碳酸钙达饱和平衡时的碱度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) ②以钙离子的质量浓度定义: $\text{CCPP} = 100([\text{Ca}^{2+}]_i - [\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}})$ 式中, $[\text{Ca}^{2+}]_i$ 和 $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}}$ 分别为水的实际和在碳酸钙饱和平衡时 Ca^{2+} 的质量浓度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	基于碱度或钙离子的质量浓度对碳酸钙溶解平衡的影响得出, CCPP 可定量计算水中碳酸钙的沉淀值或溶解值, 当水中存在腐蚀性离子 (如 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等) 时, CCPP 无法准确评价化学稳定性
AI	$\text{AI} = \text{pH} + \lg(\text{Alk} \times \text{Hardness})$ 式中, Alk 和 Hardness 分别为水的总碱度和总硬度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	除考虑 pH 对碳酸钙溶解平衡的影响外, 结合了总碱度和总硬度的影响, AI 适用于水泥管及水泥砂浆内衬的金属管
PSI	$\text{PSI} = 2\text{pH}_s - \text{pH}_{\text{eq}}, \text{pH}_{\text{eq}} = 1.47 \lg(\text{Alk}) + 4.54$ 式中, pH_s 为水的饱和 pH 值; pH_{eq} 为冷却水的平衡 pH 值; Alk 为水的总碱度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	基于 pH 对碳酸钙溶解平衡的影响得出, PSI 在 RSI 的基础上以平衡 pH 替代实际 pH, 属纯经验指数, 适用于直流式冷却水系统和地表水补充为主的循环冷却水系统, pH6.5~7.5 时较准确
LR	$\text{LR} = ([\text{Cl}^-] + 2[\text{SO}_4^{2-}]) / [\text{HCO}_3^-]$ 式中, $[\text{Cl}^-]$ 为水中 Cl^- 浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); $[\text{SO}_4^{2-}]$ 为水中 SO_4^{2-} 浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); $[\text{HCO}_3^-]$ 为水中 HCO_3^- 浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	基于对铁的腐蚀速率建立得出, 以腐蚀性离子和缓冲性离子摩尔浓度的比值大小反映腐蚀倾向, LR 适用于铁管, 当水的 pH 值、碱度和硬度等参数在较大范围内明显改变时, 无法准确评价化学稳定性
RCI	$\text{RCI} = \frac{75}{\text{Alk}} \left[\text{CO}_2 + \frac{1}{2}(\text{Hardness} - \text{Alk}) + [\text{Cl}^-] + 2[\text{NO}_3^-] \right] \left(\frac{10}{\text{SiO}_2} \right) \left(\frac{\text{DO} + 2}{\text{DO}_s} \right)$ 式中, Alk 和 Hardness 分别为水的总碱度和总硬度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); DO 和 DO_s 分别为水中溶解氧和溶解氧饱和时的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	除与腐蚀相关的常规参数外, 考虑了 DO、 CO_2 、 NO_3^- 、 SiO_2 等因素, RCI 适用于低硬度水样
多参数分析类指标	$F_{\text{水}} = 5 \times 10^9 \times 10^{1.93 - \text{pH}_{\text{eq}}} \times (9.80 - \text{pH}) \times [\ln([\text{Cl}^-] + 0.50\rho_s) / ([\text{Ca}^{2+}] \times \text{Alk})]$ $J_{\text{水}} = 2 \times 10^{-10} \times 10^{\text{pH}_{\text{eq}} - 1.93} \times [\text{Ca}^{2+}] \times \text{Alk} \times (\text{pH} - 5.30)$ $\text{pH}_{\text{eq}} = 1.47 \lg[\text{Alk}] + 4.54$ 式中, $[\text{Ca}^{2+}]$ 为水中 Ca^{2+} 的质量浓度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $[\text{Cl}^-]$ 为水中 Cl^- 的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); ρ_s 为水中总溶解盐的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Alk 为水的总碱度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); pH 为水的实际 pH 值; pH_{eq} 为冷却水的平衡 pH 值	$F_{\text{水}}$ 表示在循环水运行条件下水对碳钢的腐蚀程度, 主要与硬度、碱度、 Cl^- 和总溶解盐的质量浓度相关, $J_{\text{水}}$ 表示特定温度下钙硬度和碱度的离子积与该温度下达平衡时溶度积的比值, 主要与硬度和碱度相关, 两者能准确评价水的腐蚀或结垢倾向, 使用较方便
LR'	$\lg(\text{LR}') = -1.92 + 0.39 \lg(\text{LR}) + 9.97 \lg\left(\frac{\text{Hardness}}{100}\right) - 0.28 \lg\left(\frac{\text{DO}}{8}\right) - 2.42 \lg\left(\frac{T}{25}\right) - 0.09 \lg\left(\frac{\text{HRT}}{6}\right)$ 式中, Hardness 为水的总硬度 (以 CaCO_3 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); DO 为水中溶解氧的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); T 为水温 ($^{\circ}\text{C}$); HRT 为水力停留时间 (h)	LR' 以 LR 为基础, 综合考虑了包括水温、水力停留时间、硬度和溶解氧等在内的多项影响因素

其碳酸钙溶解平衡类指标占主导地位. 无论碳酸钙溶解平衡类还是多参数分析类指标, 大多由模拟实验法或经验法得出, 在实际应用中可能具有一定的局限性, 因此建议各类指标联合使用以便更加准确地评价再生水的化学稳定性.

2.2 生物稳定性评价指标

再生水和其他水样如饮用水具有显著不同的水质特征, 饮用水中的主要组分为天然有机质, 而城市污水的二级出水中包含多种溶解性微生物产物(如蛋白质和碳水化合物等)、合成有机化合物和天然有机质等组分^[50]. 在再生水的储存、输配和使用过程中微生物可能重新生长和繁殖, 引发水质的不稳定等问题.

生物稳定性评价指标分为 3 类: 有机碳指标、磷指标和综合指标(表 3). 有机碳指标发展得最早, 目前应用最为广泛, 主要包括生物可同化有机碳(assimilable organic carbon, AOC)和生物可降解溶

解性有机碳(biodegradable dissolved organic carbon, BDOC). AOC 是 BDOC 的一部分, AOC 反映了易被微生物摄取的溶解性有机碳, 而 BDOC 反映的是能被微生物降解的溶解性有机碳, 包括生物膜中微生物可利用的难降解组分^[51]. 与 BDOC 相比, AOC 的质量浓度与微生物生长量的相关性更高^[52]. 结合再生水的水质特征, 除了荧光假单胞菌 P17 和螺旋菌 NOX 外(饮用水 AOC 测定中的常用菌株), 建议选择寡养单胞菌属 ZJ2、假单胞菌 G3 和肠杆菌 G6 共 5 种菌株共同测定 AOC, 更准确地评估再生水中微生物的生长潜力^[53]. 磷指标主要包括生物可利用磷(microbially available phosphorus, MAP)和总磷(total phosphorus, TP), 其中 MAP 仅为能被微生物利用的磷源, TP 则是水中各种形态磷源的总和, 两指标之间不具有确定的比例关系, MAP 的应用范围更广. AOC、BDOC 和 MAP 均通过测定水中可被微生物利用的营养物质的质量浓度间接评价水质生物

表 3 常见生物稳定性评价指标

Table 3 Common evaluation parameters of biological stability

评价指标	单位	测定方法	定义	优点	缺点	适用范围	
有机碳指标	AOC $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (以乙酸碳计)	Van Der Kooij 法(文献[61]); Werner & Hamsch 法(文献[62]); LeChevallier 法(文献[63]); Eawag 法(文献[64]); APHA 法(文献[65])	溶解性有机碳中可被微生物同化利用的部分	能科学评价水质生物稳定性; 不同水样之间具有可比性	操作复杂	应用范围广, 适用于多种水样的生物稳定性评价	
		BDOC	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	文献[66]	溶解性有机碳中可被微生物利用和代谢的部分	几乎包括所有可生物降解的有机物	灵敏度低, 检测限至少比 AOC 和 BGP 高 1 个数量级 ^[67] ; 与微生物生长没有显著的相关性 ^[55]
磷指标	MAP	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)	文献[68]	可被微生物利用的总磷	操作简便	微生物生长最适宜的 C:N:P = 100:10:1, 碳源是微生物生长的主要限制因子 ^[55]	适用于营养元素比例无法满足微生物的生长, 磷作为限制因子时 ^[69]
	TP	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)	文献[70]	水中的总磷	无需接种	灵敏度低, 应用范围小	适用于磷作为限制因子时
综合指标	BGP	$\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$	文献[71]	水中多种营养物质存在、微生物种群间存在相互作用时的最大微生物生长量	操作简便; 以土著微生物为接种菌, 不需特殊菌种	缺少标准阈值和标准化方法 ^[59] ; 不同批次水样之间不具有可比性 ^[71]	能评价水中真实的微生物生长状态
	BFR	$\text{pg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{d})^{-1}$ (ATP)	文献[57]	微生物形成生物膜的速率	更全面的反映微生物的生长状态, AOC 水平较低时也可形成大量生物膜 ^[55]	操作复杂, 测定时间较长	可评估水样促进生物量积累的能力
	ATP	$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	文献[72]	三磷酸腺苷, 是存在于活细胞内的生物分子, 细胞代谢的化学能量载体	只出现在活细胞内, 能较准确的反映微生物数量	操作复杂; 测定结果可能出现假阳性或假阴性; 高盐度干扰测定, 不能直接用于海水样品 ^[73]	作为补充指标, 适用于评价水源储存及管道输送过程中微生物量的动态变化

稳定性,只考虑了碳、磷营养源,忽略了其他营养元素对微生物生长的影响,无法评估由自养菌(如氢氧化细菌和反硝化细菌、硫化菌和硫酸盐还原菌、铁氧化菌和铁还原菌等)的生长繁殖等活动造成的水质不稳定^[54,55]。

为了客观表征微生物的生长状态,又提出了以细菌生长潜力(bacterial growth potential, BGP)、生物膜形成速率(biofilm formation rate, BFR)和三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)为代表的综合指标,其中 BGP 反映的是多种营养物质存在条件下,种群间存在相互作用时微生物的生长潜力,叶林等^[56]的研究表明 BGP 与 BDOC 具有良好的线性相关关系,可作为无法测定 BDOC 时生物稳定性评价的参考指标。BFR 强调了水样促进生物量积累的能力,与 AOC 的相关性良好^[57],同样可用于生物稳定性评价。ATP 能较准确地反映水中的微生物数量,王惠荣等^[58]的研究发现 ATP 的质量浓度与流式细胞法测定的活细胞数量呈线性相关,根据测定得到 ATP 的质量浓度能够间接获得水样中的生物量。综合指标直接测定微生物的数量或微生物细胞内 ATP 的质量浓度,同时考虑多种营养元素(包括氮、硫、铁和锰等)对微生物生长的影响,但该类指标缺少标准化的测定方法,不同方法测得的指标数值可能不完全一致^[59]。上述 3 类指标中,目前国际上普遍以 AOC 作为首要的生物稳定性评价指标,其他指标作为补充指标。有研究建议联合使用 AOC 和 BFR 两指标评价生物稳定性^[60], Lautenschlager 等^[4]的研究表明 AOC 与 ATP 相结合评价生物稳定性更具指导意义。

3 水质稳定性评价指标的遴选

水质稳定性评价指标种类繁多,针对同一水样,各指标的评价结果可能不同,原因在于每种指标均具有各自的特点及适用范围,因此根据实际情况筛选出能客观评价水质稳定性倾向的指标尤为重要。

基于文献调研结果和相关实践经验,本文提出了再生水水质稳定性评价指标的遴选原则,如下所述。

3.1 结合水质特征遴选评价指标

我国不同区域、不同水样的水质特征往往存在较大差异,比如地下水硬度偏高,海水卤素含量高,黄河水浊度偏高等。对再生水而言,水质特征更为复杂,以北京市某再生水厂为例,管网出水中的粪大肠菌群和沙门氏菌较进水增加了约 3 个数量级,微生物的代谢活动导致水的浊度、色度、总有机碳和氨氮等指标升高^[74]。在对再生水进行稳定性评价时,建议结合水质特征遴选相应的评价指标。水质特征未知时,尽量遴选无特定要求的指标。相对而言,化学稳定性评价指标中,单一指标和某些复合指标如 ME、DFI、 F_1 、 Y_1 、AI、 F_w 和 J_w 适用于多种水样。而其他复合指标仅适用于具有特定水质特征的水样。比如,LR 指标适用于 pH 值、碱度和硬度等参数无显著变化的水样,RI 指标适用于低硬度的水样,CCPP 指标适用于不含腐蚀性离子水样的水样,LSI 指标适用于未添加防腐剂的水样。生物稳定性评价指标中,AOC 的适用范围最广,磷指标适用于磷作为微生物生长限制因子的水样,当除碳、磷外的其他营养元素(如氮、硫、铁和锰等)显著影响水中微生物的生长时,建议补充综合评价指标。

3.2 针对管网和设备材料遴选评价指标

再生水通过管网输配供给用户,后续利用中涉及很多种类的设施设备,如热水器、喷雾器、锅炉和冲厕设备等。水质稳定性与管网、设备的材料密切相关,即使相同的水质对不同材料设施而言腐蚀或结垢倾向可能不同。在进行再生水水质稳定性评价时,建议首先明确管网和设备材料,遴选有针对性的评价指标。表 4 列出了常见管网材料可遴选的化学稳定性复合指标,除 LSI、RSI、AI、LR 和 LR' 外,其他化学稳定性评价指标及所有生物稳定性评价指标均适用于未做防腐内衬的各类材料。

表 4 常见管网材料化学稳定性复合指标的遴选¹⁾

Table 4 Composite parameter selection of chemical stability for common pipeline materials

复合指标	管网材料				
	钢管及镀锌钢管	水泥管及水泥砂浆内衬金属管	塑料管	铸铁管及球墨铸铁管	有色金属管
LSI	✓			✓	✓
RSI	✓			✓	✓
CCPP	✓	✓	✓	✓	✓
AI		✓			
LR				✓	
LR'				✓	
RCI	✓	✓	✓	✓	✓

1) ✓表示可遴选

3.3 联合使用各类指标

目前已有的水质稳定性评价指标均具有一定的局限性,单独使用某一指标可能无法准确评价水质的腐蚀或结垢倾向,因此,遴选不同类别的评价指标可更全面客观地评价再生水的水质稳定性.比如在化学稳定性评价指标中,单一指标和复合指标联合使用,且复合指标中应同时包含碳酸钙溶解平衡类和多参数分析类指标.生物稳定性评价指标中,以综合指标为补充指标,与有机碳或磷指标联合使用.

为了更直观地阐明如何针对特定水质特征的再生水遴选稳定性评价指标,现举例说明遴选流程.表5列出了用钢管输配的再生水水质特征,在遴选化学稳定性评价指标时,基于3.2节,钢管对应的复合评价指标包括LSI、RSI、CCPP和RI,其中LSI、RSI和CCPP均为碳酸钙溶解平衡类指标,RI为多参数分析类指标.基于联合使用各类指标,应分别在上述

两类指标中进行选择.结合3.1节,由于该水样的硬度较高且含有腐蚀性离子,故排除RI和CCPP指标.LSI和RSI中,RSI指标在pH为6.5~8范围内更准确,选其为化学稳定性评价指标.RSI指标中考虑了pH的影响,故单一指标选择硬度、碱度、溶解氧、总溶解性固体和浊度,其中浊度可反映腐蚀性 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的影响.综上,化学稳定性评价指标最终确定为硬度、碱度、溶解氧、总溶解性固体、浊度和RSI.在遴选生物稳定性评价指标时,计算该水样的C:P比值,并与微生物生长的最适比值(C:P=100:1)进行对比,判断磷是否作为微生物生长的限制因子,若是限制因子,则选择MAP指标,反之选择AOC指标.此外,该水样中氮的质量浓度较高,可能会促进氨氧化细菌和硝酸盐还原菌的生长,进而影响水样的生物稳定性,故BGP作为补充指标.综上,生物稳定性评价指标最终确定为AOC(或MAP)和BGP.

表5 某钢管输配的再生水水质特征

Table 5 Characteristics of reclaimed water distributed by a steel pipe

项目	pH	水温 /°C	$\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{Ca}^{2+})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{总氮})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ /mg·L ⁻¹
参数	6.98	25	0.27	240	9.58	0.18
项目	$\rho(\text{NO}_3^+\text{-N})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{Cl}^-)$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{总溶解性固体})$ /mg·L ⁻¹	总硬度 /mg·L ⁻¹	总碱度 /mg·L ⁻¹
参数	8.36	62.90	56.80	142.90	181	97.80

4 水质稳定性评价方法的构建

再生水水质稳定性评价方法主要分为4步,评价流程如图2所示.

首先,确定再生水水质稳定性影响因素.影响水质稳定性的因素主要包括管网和设备特征、水质特

征以及水力运行特征等3个方面.其中管网和设备特征包括其化学组成和内壁粗糙程度等;水质特征包括硬度、碱度、溶解氧和pH值等;水力运行特征包括温度、流速和压力等.

第二,遴选再生水水质稳定性评价指标.按照“结合水质特征,针对管网和设备材料,联合使用各类指标”的原则,在众多评价指标中遴选出客观科学和简便易得的指标,能合理和准确地评价再生水的化学稳定性和生物稳定性.当可供遴选的指标数量过多时,应尽量避免遴选复杂难得的指标,此外针对不同地区的实际情况,需要适当增补或删减个别指标.

第三,评价再生水水质稳定性.运用标准的或国际上普遍认可的方法测定评价指标的数值,将测算结果与临界值进行对比,据此判定水质发生腐蚀或结垢的倾向.评价结果分为严重腐蚀、轻微腐蚀、基本稳定、轻微结垢和严重结垢这5个等级.临界值的设定往往需考虑社会经济水平、再生水用途和水资源利用综合效益等多方面因素,且需随技术的发展与进步不断更新.各类化学和生物稳定性评价指标的临界值如表6所示.临界值可能对某一具体数值或是特定范围,当评价指标的测

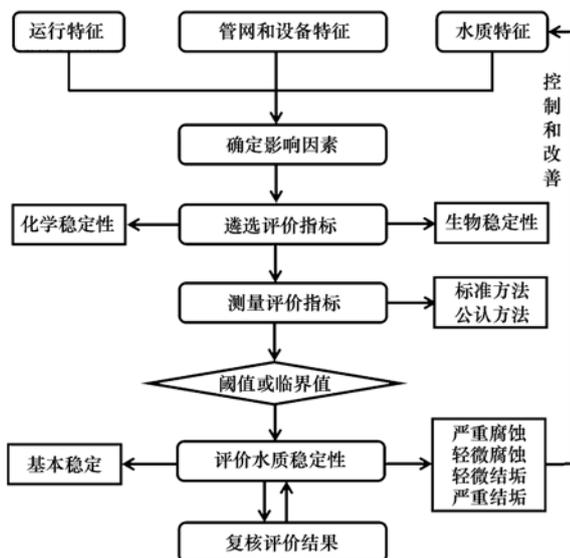


图2 再生水水质稳定性评价流程

Fig. 2 Evaluation procedures for reclaimed water quality stability

算值刚好等于临界值或落入其范围内,水质处于相对稳定状态。

最后,复核再生水水质稳定性评价结果.针对水质稳定性的评价结果开展深入分析,复核以下3个方面的内容:其一,所遴选的评价指标是否合理,不同类型指标的判定结果是否一致;其二,评价方法是否客观,评价过程是否存在偶然性,评价结果是否准确和全面;其三,基于评价结果提出的建议及改善方案能否实现水质的基本稳定.根据复核结果得出水质稳定性的最终评价结论.值得注意的是,在比

较各指标的评价结果时,可能出现2种比较典型的现象,一是各指标测算得到的水质腐蚀或结垢倾向不同,二是腐蚀或结垢的倾向相同但等级不同.出现第1种现象可能是评价指标的遴选不当,或指标的测量、计算等过程出现错误所致,此时需从第1步重新开始评价流程,寻找问题所在;出现第2种现象可能是临界值的差异所致,此时需根据各地区的实际情况,综合水厂的运行状况和用户需求后进行修订.在经济条件允许的情况下,可对水质稳定性从严要求。

表6 水质稳定性评价指标的判定临界值

Table 6 Critical values of evaluation parameters for water stability

评价指标	临界值	文献
LSI 和 ME	0	[75,76]
RSI	6~6.60	[75]
DFI	1	[76]
F_1	-2~0	[75]
Y_1	-1~0	[75]
CCPP	0~4	[76]
AI	≥ 12	[76]
PSI	6	[75]
LR	<0.30	[77]
	<0.50	[78]
RCI	<25	[79]
AOC	2~311 (Eawag 法测定)	[80]
(不加消毒剂氯)	4~130 (Van Der Kooij, Eawag, Werner & Hamsch 法测定)	[81]
	<10 (Van Der Kooij 法测定)	[82]
AOC	92~482 (Van Der Kooij 法测定, $\rho(\text{Cl}) = 1.50 \sim 2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	[83]
(加消毒剂氯)	36~446 (APHA 法测定, $\rho(\text{Cl}) > 0.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	[84]
	50~100 (LeChevallier 法测定, $\rho(\text{Cl}) > 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	[85]
BDOC	≤ 0.15	[86]
	≤ 0.25	[87]
MAP(不加消毒剂氯)	≤ 0.70	[88]
ATP	≤ 7.76	[89]
BGP	$< 2.70 \times 10^5 [\rho(\text{Cl}) < 0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$	[59]
BFR	<10	[90]

5 结论

本文在详细分析已有水质稳定性评价指标和方法的基础上,提出了1套科学、完整的再生水水质稳定性评价体系.该体系主要包括4个步骤:①考虑水力运行特征、水质特征和管网设备材质特征等3个方面,确定再生水水质稳定性影响因素;②从化学和生物2个方面出发,讨论对腐蚀和结垢的影响,遴选出可全面客观评价再生水水质稳定性的指标;③利用标准的或者公认的方法测定评价指标的数值,将所得的数值与指标的限定阈值或临界值进行比对,判定再生水水质的稳定性;④结合实际案例复核再生水水质稳定性评价结果.遴选评价指标时,建议结合水质特征和水力运行特征,针对管网和设备材料,分别提出化学稳定性和生物稳定性评价

指标,同时尽可能将不同类别的指标联合运用,实现对再生水水质稳定性的全面和准确评价。

6 展望

就目前国内外学者对水质稳定性评价的研究进展而言,仍存在局限性.基于指标测算的水质稳定性评价方法虽能判定水质腐蚀或结垢的倾向,但难以实时反映水质稳定性的动态变化趋势,无法对腐蚀或结垢等问题进行及时、有效地控制;此外,我国尚缺少再生水水质稳定性评价标准体系,目前仅少数水质标准中涉及稳定性评价相关的内容.面对上述不足,未来水质稳定性评价的研究方向还应包括以下3个方面。

(1)建立水质稳定性评价的新指标.评价指标直接影响着水质稳定性的评价结果,但已有指标大

多仅适用于某些特定的条件,且部分指标在管网内部形成致密稳定的腐蚀层时不再适用,建立适用范围更广的水质稳定性评价指标非常必要。

(2)开发水质稳定性指标的在线监测装置.管网和设备的腐蚀或结垢是一个缓慢的不易察觉的过程,往往在水的浊度或色度升高甚至出现“有色”水时才得以发现.为了实时反映水的腐蚀或结垢倾向,有必要开发水质稳定性在线监测装置,对出厂水和管网水进行重点监测,便于及时采取控制和改善措施,有效防止腐蚀和结垢的频繁发生。

(3)建立再生水水质稳定性评价标准体系.我国多数水质标准中尚未充分考虑水质稳定性评价,缺少专门的再生水水质稳定性评价标准.为保障再生水的安全、高效利用,有必要形成科学、统一的水质稳定性评价标准体系,规范评价方法,强化对再生水水质稳定性的管控。

参考文献:

- [1] 徐洪福, 尤作亮, 邓汇, 等. 深圳市给水管网水质安全管理技术研究[J]. 给水排水, 2007, **33**(9): 111-115.
- [2] ISO 20670-2018, Water reuse — vocabulary[S].
- [3] Van Der Kooij D. Biological stability: a multidimensional quality aspect of treated water[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2000, **123**(1-4): 25-34.
- [4] Lautenschlager K, Hwang C, Liu W T, et al. A microbiology-based multi-parametric approach towards assessing biological stability in drinking water distribution networks[J]. Water Research, 2013, **47**(9): 3015-3025.
- [5] Wang H, Masters S, Edwards M A, et al. Effect of disinfectant, water age, and pipe materials on bacterial and eukaryotic community structure in drinking water biofilm[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(3): 1426-1435.
- [6] Rathnayake D, Krishna K C B, Kastl G, et al. The role of pH on sewer corrosion processes and control methods: a review[J]. Science of the Total Environment, 2021, **782**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146616.
- [7] 李璇, 王莲, 马卫星, 等. 不同河道型微污染水源预处理工程水质净化效能及水质稳定性评价[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(8): 2771-2784.
Li X, Wang L, Ma W X, et al. Evaluation of water purification efficiency and stability of water quality in micro-polluted water sources pretreatment projects with different types of river[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(8): 2771-2784.
- [8] Xu X Y, Liu S M, Smith K, et al. An overview on corrosion of iron and steel components in reclaimed water supply systems and the mechanisms involved[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **276**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124079.
- [9] Cui Y, Liu S M, Smith K, et al. Characterization of corrosion scale formed on stainless steel delivery pipe for reclaimed water treatment[J]. Water Research, 2016, **88**: 816-825.
- [10] 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.
- [11] Little B J, Blackwood D J, Hinks J, et al. Microbially influenced corrosion-any progress? [J]. Corrosion Science, 2020, **170**, doi: 10.1016/j.corsci.2020.108641.
- [12] Yang F, Shi B Y, Bai Y H, et al. Effect of sulfate on the transformation of corrosion scale composition and bacterial community in cast iron water distribution pipes [J]. Water Research, 2014, **59**: 46-57.
- [13] Konovalova V. The effect of temperature on the corrosion rate of iron-carbon alloys[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, **38**: 1326-1329.
- [14] 贾利华. 海水淡化水安全输配研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. 52-59.
- [15] Zhou Y C, Weng S C, Zhang Y P, et al. Experimental study of seepage flow properties with biofilm development in porous media with different filter morphologies [J]. Journal of Hydrology, 2020, **591**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125596.
- [16] 汪翔, 刘立凡, 漆文光, 等. 地表 I 类水长距离输水初期水质稳定性研究[J]. 中国给水排水, 2018, **34**(23): 36-39.
Wang X, Liu L F, Qi W G, et al. Initial water quality stability of class I surface water in long distance conveyance pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2018, **34**(23): 36-39.
- [17] Świetlik J, Raczyk-Stanisławiak U, Piszora P, et al. Reasons for the lack of chemical stability of treated water rich in magnesium [J]. Water Research, 2011, **45**(19): 6585-6592.
- [18] Luo B J, Zhao X H, Liang B S, et al. Study on water quality chemical stability of desalinated seawater in municipal water supply systems [A]. In: 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology [C]. Wuhan: Intelligent Information Technology Application Research Association, 2009. 360-364.
- [19] SL 368-2006, 再生水水质标准[S].
- [20] GB/T 50050-2017, 工业循环冷却水处理设计规范[S].
- [21] AWWA Research Foundation, DVGW-Technologiezentrum Wasser. Internal corrosion of water distribution systems [M]. Denver: The Foundation, 1996.
- [22] Langelier W F. The analytical control of anti-corrosion water treatment[J]. Journal (American Water Works Association), 1936, **28**(10): 1500-1521.
- [23] Tyagi S, Sarma K. Qualitative assessment, geochemical characterization and corrosion-scaling potential of groundwater resources in Ghaziabad district of Uttar Pradesh, India [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, **10**, doi: 10.1016/j.gsd.2020.100370.
- [24] Ahmed S, Sultan M W, Alam M, et al. Evaluation of corrosive behaviour and scaling potential of shallow water aquifer using corrosion indices and geospatial approaches in regions of the Yamuna River basin [J]. Journal of King Saud University-Science, 2021, **33**(1), doi: 10.1016/j.jksus.2020.101237.
- [25] 蔡美全, 温柔, 刘文君. 管材对淡化海水在管网中水质稳定性的影响[J]. 水处理技术, 2018, **44**(11): 26-32.
Cai M Q, Wen R, Liu W J. Effect of pipe materials on the water quality stability of desalinated seawater in drinking water distribution system[J]. Technology of Water Treatment, 2018, **44**(11): 26-32.
- [26] Dehghani M, Keshtgar L, Davoodi S, et al. Data on the trend of corrosivity and scale formation potential of Shiraz groundwater drinking water resources during 2001-2007 [J]. Data in Brief, 2019, **23**, doi: 10.1016/j.dib.2019.103736.
- [27] Gholizadeh A, Mokhtari M, Naimi N, et al. Assessment of corrosion and scaling potential in groundwater resources; a case study of Yazd-Ardakan Plain, Iran [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2017, **5**: 59-65.

- [28] Al-Rawajfeh A E, Al-Shamaileh E M. Assessment of tap water resources quality and its potential of scale formation and corrosivity in Tafila Province, South Jordan[J]. *Desalination*, 2007, **206**(1-3): 322-332.
- [29] Li M J, Wang Y H, Liu Z W, *et al.* Metal-release potential from iron corrosion scales under stagnant and active flow, and varying water quality conditions[J]. *Water Research*, 2020, **175**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115675.
- [30] Alimoradi J, Naghipour D, Kamani H, *et al.* Data on corrosive water in the sources and distribution network of drinking water in north of Iran[J]. *Data in Brief*, 2018, **17**: 105-118.
- [31] Taghavi M, Mohammadi M H, Radfard M, *et al.* Assessment of scaling and corrosion potential of drinking water resources of Iranshahr[J]. *MethodsX*, 2019, **6**: 278-283.
- [32] Acharya S, Sharma S K, Khandegar V. Assessment and hydro-geochemical characterization for evaluation of corrosion and scaling potential of groundwater in South West Delhi, India[J]. *Data in Brief*, 2018, **18**: 928-938.
- [33] Song J C, Liu M Y, Sun X X. Model analysis and experimental study on scaling and corrosion tendencies of aerated geothermal water [J]. *Geothermics*, 2020, **85**, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101766.
- [34] 冯宇希, 范高哲, 张海亚. 南方某市供水管网水质问题区域水质特征解析[J]. *给水排水*, 2018, **44**(3): 111-116.
Feng Y X, Fan G Z, Zhang H Y. Analysis of water quality characteristics in areas with frequent water quality problems in a city of south China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, **44**(3): 111-116.
- [35] 张素佳, 王海波, 赵丹, 等. 不同管网腐蚀与水质稳定性中试研究[J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(13): 66-70.
Zhang S J, Wang H B, Zhao D, *et al.* Corrosion and water chemical and biological stability in different pipe lines: Influence of water quality and pipe material [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(13): 66-70.
- [36] 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. 43-53.
- [37] 彭思琪. 某市供水管网水质化学稳定性研究及控制方法[J]. *陕西水利*, 2021, (3): 86-88.
Peng S Q. Study on the chemical stability of water quality in a city's water supply network and its control methods [J]. *Shaanxi Water Resources*, 2021, (3): 86-88.
- [38] Dehghani M H, Ghanbari R, Heidarinejad Z. Dataset on comparing the corrosion indices of alum and ferric chloride coagulants with phosphate dose elevation [J]. *Data in Brief*, 2018, **20**: 281-288.
- [39] 许萍, 魏智刚, 张雅君, 等. 不同处理工艺对再生水化学稳定性的影响研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, **42**(10): 3-7.
Xu P, Wei Z G, Zhang Y J, *et al.* Study on the influences of different processing technologies on reclaimed water chemical stability [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, **42**(10): 3-7.
- [40] Ma J P, Xu Y J, Lv M, *et al.* The analysis and improvement measure of chemical stability of water quality in Jinan city water distribution system [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **356-360**: 2186-2189.
- [41] García-ávila F, Ramos-Fernández L, Pauta D, *et al.* Evaluation of water quality and stability in the drinking water distribution network in the Azogues city, Ecuador[J]. *Data in Brief*, 2018, **18**: 111-123.
- [42] 李晓敏, 汪隼, 陈超, 等. 淡化海水进入水泥砂浆内衬管后的水质化学稳定性[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(17): 43-47.
- Li X M, Wang J, Chen C, *et al.* Chemical stability of desalinated seawater after entering into cement mortar lined pipes [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(17): 43-47.
- [43] 龚淑艳, 王伟, 唐娜, 等. 海水淡化水进入供水管网化学稳定性控制应用[J]. *供水技术*, 2016, **10**(4): 40-43.
Gong S Y, Wang W, Tang N, *et al.* Control scheme and application on the chemical stability of the desalinated water for entering into municipal water supply network [J]. *Water Technology*, 2016, **10**(4): 40-43.
- [44] Lytle D A, Tang M, Francis A T, *et al.* The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron[J]. *Water Research*, 2020, **183**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116037.
- [45] Romaine A, Crozet M, Mary N, *et al.* Importance of the surface and environmental conditions on the corrosion behavior of brass, steel and brass coated steel wires and brass coated steel cords [J]. *Corrosion Science*, 2020, **177**, doi: 10.1016/j.corsci.2020.108966.
- [46] Stets E G, Lee C J, Lytle D A, *et al.* Increasing chloride in rivers of the conterminous U. S. and linkages to potential corrosivity and lead action level exceedances in drinking water [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 1498-1509.
- [47] Lahav O, Salomons E, Ostfeld A. Chemical stability of inline blends of desalinated, surface and ground waters: the need for higher alkalinity values in desalinated water[J]. *Desalination*, 2009, **239**(1-3): 334-345.
- [48] Rakanta E, Daflou E, Batis G. Evaluation of corrosion problems in a closed air-conditioning system: a case study [J]. *Desalination*, 2007, **213**(1-3): 9-17.
- [49] Ravikumar P, Somashekar R K. Assessment and modelling of groundwater quality data and evaluation of their corrosiveness and scaling potential using environmetric methods in Bangalore South Taluk, Karnataka state, India[J]. *Water Resources*, 2012, **39**(4): 446-473.
- [50] Shon H K, Vigneswaran S, Snyder S A. Effluent organic matter (EfOM) in wastewater: constituents, effects, and treatment[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2006, **36**(4): 327-374.
- [51] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(9): 623-633.
- [52] Pick F C, Fish K E, Boxall J B. Assimilable organic carbon cycling within drinking water distribution systems [J]. *Water Research*, 2021, **198**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117147.
- [53] Zhao X, Hu H Y, Liu S M, *et al.* Improvement of the assimilable organic carbon (AOC) analytical method for reclaimed water [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, **7**(4): 483-491.
- [54] Sachan R, Singh A K. Comparison of microbial influenced corrosion in presence of iron oxidizing bacteria (strains DASEWM1 and DASEWM2) [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119438.
- [55] Chen Z, Yu T, Ngo H H, *et al.* Assimilable organic carbon (AOC) variation in reclaimed water: insight on biological stability evaluation and control for sustainable water reuse[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **254**: 290-299.
- [56] 叶林, 于鑫, 施旭, 等. 用细菌生长潜力(BGP)评价饮用水生物稳定性[J]. *给水排水*, 2007, **33**(11): 146-149.
Ye L, Yu X, Shi X, *et al.* Application of bacterial growth

- potential (BGP) method to evaluate the biological stability of drinking water[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, **33** (11): 146-149.
- [57] Van Der Kooij D. Potential for biofilm development in drinking water distribution systems[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 1998, **85**(S1): 39S-44S.
- [58] 王惠荣, 池勇志, 辛丽花, 等. ATP 生物发光法在饮用水和再生水活菌生物量快速检测中的应用[J]. *给水排水*, 2016, **52**(4): 27-33.
- [59] Zhang J P, Li W Y, Wang F, *et al.* Exploring the biological stability situation of a full scale water distribution system in south China by three biological stability evaluation methods [J]. *Chemosphere*, 2016, **161**: 43-52.
- [60] Van Der Kooij D, Veenendaal H R, Baars-Lorist C, *et al.* Biofilm formation on surfaces of glass and Teflon exposed to treated water[J]. *Water Research*, 1995, **29**(7): 1655-1662.
- [61] Van Der Kooij D, Visser A, Hijnen W A M. Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water[J]. *Journal (American Water Works Association)*, 1982, **74**(10): 540-545.
- [62] Werner P, Hamsch B. Investigations on the growth of bacteria in drinking water[J]. *Water Supply*, 1986, **4**(3): 227-232.
- [63] LeChevallier M W, Shaw N E, Kaplan L A, *et al.* Development of a rapid assimilable organic carbon method for water [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(5): 1526-1531.
- [64] Hammes F A, Egli T. New method for assimilable organic carbon determination using flow-cytometric enumeration and a natural microbial consortium as inoculum[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(9): 3289-3294.
- [65] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, *et al.* Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.) [M]. Washington: American Public Health Association, 2005.
- [66] Servais P, Billen G, Hascoët M C. Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters[J]. *Water Research*, 1987, **21**(4): 445-450.
- [67] Escobar I C, Randall A A, Taylor J S. Bacterial growth in distribution systems; effect of assimilable organic carbon and biodegradable dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(17): 3442-3447.
- [68] Lehtola M J, Miettinen I T, Vartiainen T, *et al.* A new sensitive bioassay for determination of microbially available phosphorus in water[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(5): 2032-2034.
- [69] Jiang D L, Ni G W, Zhang Y M. Effects of AOC and phosphorus on bacterial growth under oligotrophic condition (1) [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, **138-139**: 981-987.
- [70] Miettinen I T, Vartiainen T, Martikainen P J. Phosphorus and bacterial growth in drinking water [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(8): 3242-3245.
- [71] Sathasivan A, Ohgaki S. Application of new bacterial regrowth potential method for water distribution system—a clear evidence of phosphorus limitation[J]. *Water Research*, 1999, **33**(1): 137-144.
- [72] Vang Ó K, Corfitzen C B, Smith C, *et al.* Evaluation of ATP measurements to detect microbial ingress by wastewater and surface water in drinking water[J]. *Water Research*, 2014, **64**: 309-320.
- [73] Sim L N, Chong T H, Taheri A H, *et al.* A review of fouling indices and monitoring techniques for reverse osmosis [J]. *Desalination*, 2018, **434**: 169-188.
- [74] 王建森, 孙傅, 曾思育, 等. 再生水管网水质特征及其影响因素研究[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(15): 80-84.
- Wang J M, Sun F, Zeng S Y, *et al.* Characterization of reclaimed water quality in distribution systems and its influencing factors[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(15): 80-84.
- [75] 王鼎臣. 关于碳酸盐型水质稳定性指数判定法的讨论[J]. *水处理技术*, 1994, **20**(4): 219-229.
- [76] 高强, 张凌峰, 李晨光, 等. 循环冷却水水质稳定性判断方法的研究综述[J]. *工业水处理*, 2011, **31**(10): 20-24.
- Gao Q, Zhang L F, Li C G, *et al.* Review of the research on the adjustment method for the water quality stability of circulating cooling water[J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, **31**(10): 20-24.
- [77] Larson T E. Bacteria, corrosion and red water [J]. *Journal (American Water Works Association)*, 1939, **31**(7): 1186-1196.
- [78] Merrill D T, Sanks R L. Corrosion control by deposition of CaCO₃ films: part 1, a practical approach for plant operators [J]. *Journal (American Water Works Association)*, 1977, **69**(11): 592-599.
- [79] Riddick T M. The mechanism of corrosion of water pipes [J]. *Water Works & Sewerage*, 1944, **91**: 133-138.
- [80] Hammes F, Berger C, Koster O, *et al.* Assessing biological stability of drinking water without disinfectant residuals in a full-scale water supply system [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 2010, **59**(1): 31-40.
- [81] Ross P S, Hammes F, Dignum M, *et al.* A comparative study of three different Assimilable Organic Carbon (AOC) methods: results of a round-robin test[J]. *Water Supply*, 2013, **13**(4): 1024-1033.
- [82] Van Der Kooij D. Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth [J]. *Journal (American Water Works Association)*, 1992, **84**(2): 57-65.
- [83] Liu W, Wu H, Wang Z, *et al.* Investigation of Assimilable Organic Carbon (AOC) and bacterial regrowth in drinking water distribution system[J]. *Water Research*, 2002, **36**(4): 891-898.
- [84] Thayanukul P, Kurisu F, Kasuga I, *et al.* Evaluation of microbial regrowth potential by assimilable organic carbon in various reclaimed water and distribution systems [J]. *Water Research*, 2013, **47**(1): 225-232.
- [85] LeChevallier M W, Welch N J, Smith D B. Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(7): 2201-2211.
- [86] Laurent P, Servais P, Prévost M, *et al.* Testing the SANCHO model on distribution systems [J]. *Journal (American Water Works Association)*, 1997, **89**(7): 92-103.
- [87] Niquette P, Servais P, Savoie R. Bacterial dynamics in the drinking water distribution system of Brussels [J]. *Water Research*, 2001, **35**(3): 675-682.
- [88] 于鑫, 张晓健, 王占生. 磷元素在饮用水生物处理中的限制因子作用[J]. *环境科学*, 2003, **24**(1): 57-62.
- Yu X, Zhang X J, Wang Z S. Phosphorus as a limiting nutrient in drinking water biological treatment [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(1): 57-62.
- [89] 潘仁杰. 水源切换下管网水质微生物稳定性及控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020. 20-32.
- [90] Van Der Kooij D, Vrouwenvelder H S, Veenendaal H R. Kinetic aspects of biofilm formation on surfaces exposed to drinking water [J]. *Water Science and Technology*, 1995, **32**(8): 61-65.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)