



移动扫码阅读

曾超, 张天阳, 何欢, 等. 市政饮用水品质提升关键问题与发展路径分析 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(1): 1-10.

ZENG Chao, ZHANG Tianyang, HE Huan, et al. Key Challenges and Strategic Pathways for Improving Municipal Drinking Water Quality [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(1): 1-10.

市政饮用水品质提升关键问题与发展路径分析

曾超, 张天阳, 何欢, 徐斌*

(同济大学环境科学与工程学院水利部长三角城镇供水节水及水环境治理重点实验室, 上海 200092)

摘要: 饮用水安全保障是重要的民生工程, 事关人民群众身体健康和社会稳定。随着我国社会经济的快速发展和生活水平的不断提高, 居民对饮用水品质的要求也在不断上升。因此, 进一步推动饮用水品质提升, 建立高质量供水体系, 已成为我国供水行业实现高质量发展的重要内容。从我国居民饮用水事业发展现状出发, 系统分析了市政高品质饮用水建设发展趋势, 以及水质保障技术、质量控制体系、综合管控平台和服务体系的现实需求。重点阐述了在提升饮用水品质过程中, 需特别关注的水质潜在生物风险、新型化学风险、复杂感官性状问题以及全球气候变化等关键挑战。基于此, 提出了以标准体系建设、基础设施升级改造和智慧赋能管理为核心的综合解决路径。通过构建覆盖“水源-水厂-管网-二次供水-龙头”的全流程水质保障体系, 能够有效应对当前供水系统所面临的潜在水质风险, 从而实现高品质饮用水的安全供给。

关键词: 高品质饮用水; 新兴水质问题; 二次供水; 全流程管控; 智慧运维

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)01-0001-10

Key Challenges and Strategic Pathways for Improving Municipal Drinking Water Quality

ZENG Chao, ZHANG Tianyang, HE Huan, XU Bin*

(Key Laboratory of Urban Water Supply, Water Saving and Water Environment Governance in the Yangtze River Delta of Ministry of Water Resources, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ensuring drinking water safety is critical to public welfare, directly impacting public health and social stability. In China, rapid economic development and continuous improvement of living standards have led to an increasing demand for high-quality drinking water. This article systematically examines the current state of China's drinking water industry, identifies major challenges, and explores potential solutions to improve water quality and establish high-quality water supply systems aligned with the country's development goals. China's drinking water supply systems have made significant progress over the past decade: Urban water supply coverage has reached 99.43%, and the overall water quality compliance rate has increased from 52.8% in 2009 to over 96.0% in urban areas. Despite these advancements, several key challenges remain that hinder the establishment of a sustainable, high-quality water supply system. One primary challenge is biological risks, including chlorine-resistant microorganisms and antibiotic-resistant genes. These pathogens thrive in distribution systems,

收稿日期: 2024-11-20

修回日期: 2024-12-20

接受日期: 2024-12-23

DOI: 10.20078/j.eep.20250101

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52470013, 52270010)

第一作者: 曾超(1988—), 江苏无锡人, 研究员, 主要研究方向为饮用水新兴水质问题分析与控制技术研发等。E-mail: Chao_Zeng@tongji.edu.cn

通讯作者: 徐斌(1976—), 江西丰城人, 教授, 主要研究方向为饮用水处理理论与技术等。E-mail: tjwenwu@tongji.edu.cn

particularly within biofilms, which protect them from standard disinfection methods. Emerging chemical risks, such as per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), present further complications. PFAS are widely distributed, persist in the environment, and pose serious health risks, yet conventional water treatment technologies show limited effectiveness, with some municipal plants achieving less than 20% removal efficiency. Additionally, there are complex aesthetic issues, such as turbidity, taste and odor problems, often resulting from aging infrastructure and biofilm formation. These issues are compounded by climate change, exacerbating risks to water quality through extreme weather events such as floods, droughts, and rising temperatures. These factors make it even more difficult to maintain stable and safe drinking water quality. To address these challenges, a comprehensive approach is necessary, focusing on improving water quality standards, upgrading technologies, and integrating smart management practices. A key recommendation is the construction of a whole-process water quality assurance system that encompasses the entire water supply chain: From the source, through the treatment plant, distribution networks, and secondary supply, to the tap. Technological advancements, such as ultraviolet oxidation, activated carbon adsorption, and membrane filtration, should be prioritized to effectively remove emerging contaminants like PFAS and minimize the formation of disinfection by-products (DBPs). Infrastructure improvements, including the use of corrosion-resistant materials, advanced pipeline cleaning techniques, and intelligent monitoring systems, are essential to reduce risks associated with aging infrastructure and biofilm formation. Additionally, the integration of real-time monitoring, data analytics, and machine learning technologies can facilitate proactive water quality management, ensuring that water systems can adapt to dynamic challenges and maintain safe drinking water standards. These efforts will promote the goal of providing safe, high-quality drinking water to all households, improving public health, and contributing to China's sustainable development.

Keywords: High-quality drinking water; Emerging water quality issues; Secondary water supply; Whole-process management; Intelligent operation and maintenance

0 引 言

饮用水安全直接关系到人民群众的生命健康,是最基本、最普惠的民生需求之一。随着我国社会经济快速发展和生活水平不断提升,人民群众对供水安全和供水质量的要求也不断提高,健康安全、品质优良的饮用水供给已成为人民群众的强烈期盼。国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要强调,将进一步提升城市公共服务品质列为重点目标;《健康中国行动》提出要加大饮用水工程设施投入,加强饮用水监测与评价,并持续提升水质达标率;《关于加强城市供水安全保障工作的通知》明确指出要推进供水设施改造,提高供水检测与应急能力,并优化城市供水服务。一系列政策措施的密集出台,充分体现了国家从顶层设计到具体实施层面对饮用水安全的高度关注,并将其视为保障社会稳定、提升生活质量的关键举措。在此背景下,进一步推动我国饮用水水质的改善与提升,建立完善的供水全流程保障体

系,已成为供水行业实现高质量发展最为重要的内容之一。

发达国家城市在饮用水保障方面起步较早,已具有较为完善的供水体系和管理规范。日本、澳大利亚、芬兰等国家的自来水能够直接饮用,美国、德国、英国、法国等国家的居民也有长期直接饮用自来水的经历。我国在 2010 年左右开始高品质饮用水探索工作,整体起步晚于发达国家,但关注度高,近年来发展非常迅速。上海、深圳相继规划实现全域可直饮的目标,明确提出市政饮用水水质要达到或优于世界发达国家城市水平,全国众多城市也正在规划和实施大规模市政供水品质改善工程^[1-2]。然而,当前我国对高品质饮用水建设尚存在概念目标不清晰、实施路径不明确、监管运维不规范、管理机制不完善等突出问题,亟待突破高品质饮用水质量评价、厂网全过程水质保障、高质量检测监控、高效率运维服务等关键技术方法,构建相配套的全链条质量控制和管理标准体系等。

基于我国居民饮用水发展现状,本文全面梳理了当前供水系统在水质保障方面的核心问题与技术需求,深入分析了饮用水品质提升中需重点关注的生物风险、化学风险以及感官问题。在此基础上,结合国内外先进经验,提出通过标准体系建设、设施升级改造、智慧赋能管理的解决路径,为有效解决全系统水质风险,实现高品质饮用水供给提供实践指导。

1 我国高品质供水现状与技术需求

经过持续的努力,我国在过去 20 余年间供水能力显著增强,饮用水水质大幅改善,取得了举世瞩目的成就。根据住房和城乡建设部最新发布的《2023 年城市建设统计年鉴》,2023 年我国城市供水普及率已达 99.43%,供水总量达到 687.56 亿 m^3 ,共惠及 5.65 亿人口(图 1)。全国城市饮用水水质达标率也由 2009 年的 52.8% 大幅提升至 2022 年的 96.0% 以上。同时全国农村地区普遍新建了集中供水工程,集中供水率达到 82% 以上,农村供水水质达标率从 2009 年的 37.8% 上升到 2022 年的 83.0% 以上。

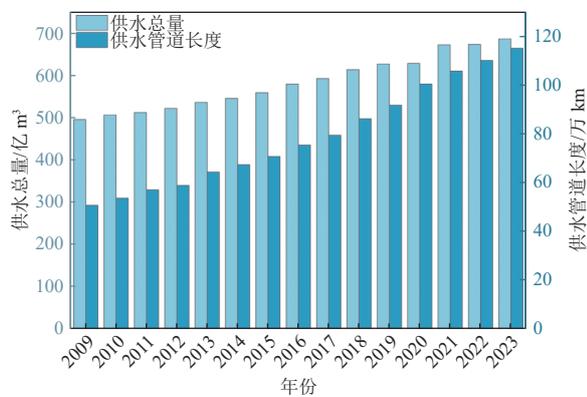


图 1 我国历年城市供水统计数据

Fig. 1 Annual urban water supply data in China

随着社会经济的快速发展和生活水平的不断提高,人民群众对美好生活的向往愈发强烈,对用水的需求也逐步从“合格水”向“优质水”转变。为响应该需求,我国于 2010 年左右开始高品质饮用水探索工作,上海、深圳等城市通过规划、标准带动高品质饮用水发展,建设了上海临港、黄浦与深圳盐田等高品质饮用水示范区,实施了大规模的深度处理、供水管网、二次供水工程改造等。近年来,苏州、张家港、昆山、福州、成都等众多城市也陆续发布了饮用水品质改善提升的建设规划^[2]。2023 年 4 月《生活饮用水卫生标准》

(GB 5749—2022)正式实施,新标准更加关注有机物、消毒副产物、感官性等水质指标,全国关于饮用水水质的进一步改善提升工作也进入新的发展时期。然而关于高品质饮用水的建设,我国还处在发展阶段,相关内涵尚待厘清,技术体系还需不断强化,实施路径亟待明确,管理运维方法有待进一步完善,尤其在以下几个方面亟须建立相应的技术体系。

1.1 饮用水品质评价方法和指标体系

在世界范围内,饮用水品质缺少一个通用的标准和评价方法。主要发达国家的饮用水评价和指标体系建立较早且已基本形成规范方法,例如《美国饮用水法案》(SDWA)具有多指标综合评价体系,其中包括水质安全、供应稳定性、基础设施可靠性和社会接受度等,并强调对污染物的长期追踪管理;《欧盟饮用水指令》(EU 2020/2184)注重从水源地取水到龙头供水的全流程管理;日本《水道法》对异味、色度等感官指标具有严格的规定。我国供水指标体系涵盖了基础标准、检测与评价以及运行维护等多个方面,正逐步向国际先进水平靠拢。其中,基础标准和部分地方标准已与发达国家接轨,但在精细化管理、动态评估和新污染物控制等方面还有提升空间。

通常来说,高品质饮用水应在满足现有卫生标准基础上,具有感官性状更好、水质化学安全性更高、能够持续稳定达到生饮要求等优势^[3]。事实上,水质因子对饮用水的感官性状(色度、嗅味等)、化学安全、生物风险等影响复杂,尤其在复杂背景和共存体系下,综合评价更为困难。例如,碱度、矿物质等显著影响饮用水品质的指标,尚未确立限值。目前行业内高品质饮用水理念和内涵争议较大,相关理论和研究较少,难以取得普遍共识,这也严重阻碍高品质饮用水的发展。因此,需要厘清多元水质因素对饮用水品质的影响规律与机制,建立适应我国特点的高品质饮用水品质内涵目标与评价体系,为水质风险识别与质控标准确立提供支撑。

1.2 供水全流程的技术保障与质量控制体系

城市市政供水系统复杂,水质保障是涉及水厂、管网和二次供水等环节的全流程系统性工程。为确保用户用水的高品质要求,迫切需要构建从生产到输配全流程的饮用水质量体系和技术体系。为达到水质标准要求,自来水厂通常采用常规和深度处理工艺,涵盖繁杂的净水控制环节,

同时涉及众多的净水材料、设备组件和装备设施等;供水输配中管网水质劣化问题较为显著,供水管材、水龄、环境要素变化等都是潜在影响要素;二次供水系统是供应到居民的“最后一公里”,水质维持保护尤为重要。如图2所示,目前高品质

饮用水建设中普遍缺乏这些过程统一的技术要求和标准,运行控制随意性较大,难以有效保证高品质供水。为此需要开展标准化技术攻关,建立饮用水供水全流程的技术质量体系。

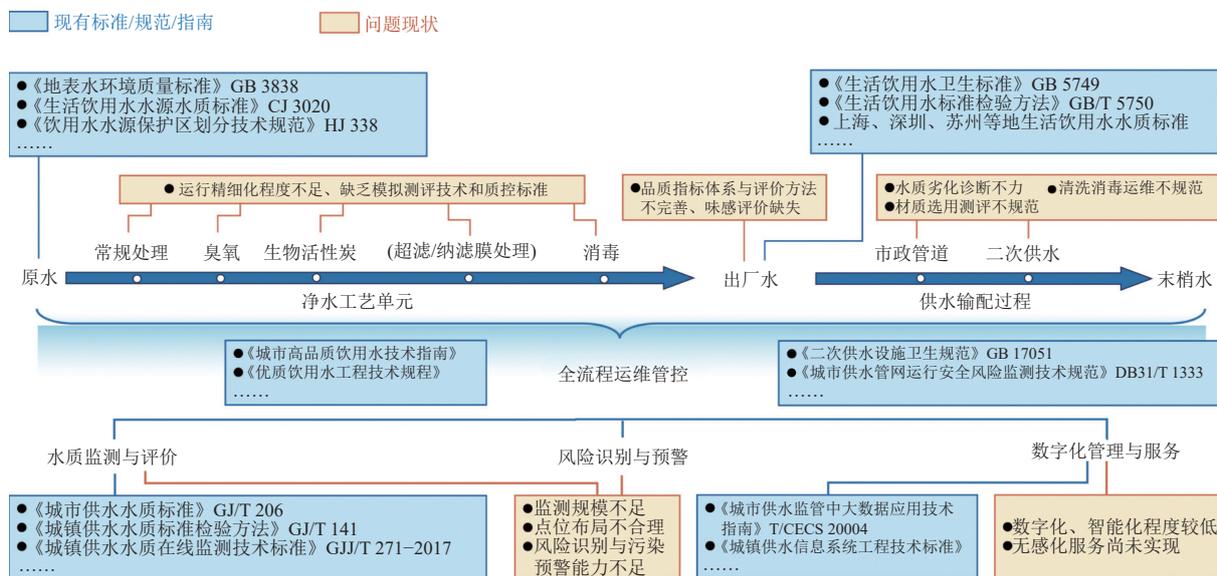


图2 我国供水系统各环节质量控制标准体系与问题现状

Fig. 2 Existing standards and current issues across China's water supply system

1.3 全流程智能管控平台和服务体系

随着我国供水行业跨入新发展阶段,以用户龙头水可直饮为特征的高品质供水系统升级正在不断推进,这对供水行业的高效率监控、标准化管理、规范化服务的要求也越来越高。经调查,发达国家城市供水系统监控与服务技术较为完善,其监测点位密度、监测频率和水样数量等见表1,而我国在该方面还处于发展完善阶段,较难支撑风险监督和预警分析的要求,亟待开展监测运维、管

表1 发达国家城市市政供水系统监管规模

Table 1 Comparison of regulatory scales for municipal water supply systems in different regions

监控指标	美国纽约	法国巴黎	西班牙布尔戈斯
水质在线监测点数	约1 000个	408个	1 536个
供水服务范围	约789.0 km ²	约105.4 km ²	覆盖 55.44 km ² 供水管网
监测密度	0.80个/km ²	3.87个/km ²	—
监测频率	31 300个水样 363 200次分析/年	每天检测 达标率100%	—
监测指标类型	水质	水质	水量、水压、水质

理服务方面的技术策略与规范研究,融合大数据、物联网、云计算、人工智能等前沿科技手段,建立完善的全链条智能水务管理体系,解决各环节风险,实现数据资源化、管理精细化、服务自动化、决策智能化。

2 重点关注的水质潜在风险

我国饮用水标准的更新与发展充分反映了对水质安全认知的不断深化,并体现了对水质安全保障更高的要求。新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)在保留基础性指标的同时,结合了最新的毒理学研究成果及我国实际水质特性,对关键性指标限值进行了优化。标准更加注重消毒副产物、新污染物和感官指标的控制,并强调从水厂到龙头全流程风险管理的理念。这一变化与世界卫生组织(WHO)、欧盟和美国等国际先进标准的发展趋势一致,即通过科学的指标体系和动态调整机制,应对复杂水质挑战。高品质饮用水不仅要求满足基本的安全标准,更追求生物、化学安全和感官性状上的全面优化。我国在高品质供水推进过程中仍面临多重挑战。系统分析当前饮用水安全保障中存在的风险,是明确改进方

向、实现饮用水品质提升的前提。

2.1 潜在水质生物风险

近年来,饮用水系统中的生物风险逐渐得到重视。耐氯微生物、致病原生物、耐药细菌及其携带的耐药基因(ARGs)的存在,对公众造成了较大健康风险并显著增加了饮用水系统的管理难度,对这些生物风险的监测与防控是高品质饮用水建设中的核心挑战之一。

部分真菌孢子和细菌能够在含氯消毒条件下存活并快速繁殖。例如,军团菌和真菌孢子等在氯胺或余氯环境中可通过生物膜形成保护屏障,从而降低消毒剂的杀灭效果。研究发现,在0.25 mg/L自由氯条件下,接触90 min后,军团菌的灭活率仍不足90%(1-log)^[4]。这些微生物不仅能够在供水管网中长期存在,还可能在输水管道的不利条件下激活生长,造成末梢水水质劣化^[4-5]。此外,水中存在的一些消毒副产物(DBPs)可能进一步影响微生物的代谢和生存环境,为其耐受性提供间接支持^[6]。

供水系统中的原生动(阿米巴等)常充当病原体的“温床”,能够吞噬并保护病原菌(如军团菌、诺如病毒等),从而提高病原菌的存活率,并促进其在生物膜或滤膜装置中的繁殖。例如,常规消毒对水中的自由细菌能够实现99.999%(5-log)的灭活率,然而对于阿米巴内病原菌的灭活率仅为99%(2-log)^[7]。尽管超滤或纳滤等深度处理工艺能去除绝大部分微生物,但致病微生物的残留风险依然不容忽视。此外,管网和二次供水系统中的生物膜因水龄较长而加剧了病原菌的传播风险。这类问题在高温湿润的亚热带城市中较为突出,例如深圳和广州的饮用水系统便存在此类隐性威胁。

耐药细菌(ARB)与耐药基因问题是高品质供水面临的另一大生物风险,这种风险是微生物进化、环境污染和水体循环等多重因素共同作用的结果。ARGs能够通过水平基因转移在微生物群体间传播,从而使原本不携带抗生素抗性(即耐药性)的菌株转变为耐药菌。此外,有研究表明,部分耐药菌对氯消毒剂的抗性比非耐药菌更强,且低剂量的化学消毒(如氯消毒,0.2~0.5 mg/L自由氯)会促进ARGs的水平转移^[8]。饮用水系统中,尤其是管道及二次供水设备中累积的生物膜为ARGs传播提供了理想环境,其复杂的微生态结构为耐药基因的积累提供了温床。有研究发现,供

水系统中ARGs的浓度可高达 2.1×10^8 copies/mL,且主要集中于生物膜中^[9];这些ARGs的抗性种类包括 β -内酰胺类抗性、四环素类抗性、喹诺酮抗性以及多重耐药等,其宿主细菌(即ARB)涉及大肠杆菌、假单胞菌、不动杆菌等种属,其数量范围从 $10^3 \sim 10^5$ CFU/mL不等^[9]。饮用水中ARGs对公共健康的影响尚不明确,目前尚无统一的风险定量评估体系与标准,需要进一步探究。

2.2 新型水质化学风险

饮用水中化学污染物引发的健康风险逐渐成为关注焦点,其中以新污染物和消毒副产物为代表的化学风险尤为显著。这些污染物种类繁多,具有环境持久性、生物累积性和潜在毒性等特征,即使在极低浓度下,摄入含有这些物质的饮用水也会对健康构成威胁。

新污染物是指新近发现或被关注的,对生态环境或人体健康存在风险,尚未纳入管理或者现有管理措施不足以有效防控其风险的污染物。国务院办公厅发布的《新污染物治理行动方案》明确了4大类新污染物,包括持久性有机污染物(POPs),内分泌干扰物(EDCs)、抗生素和微塑料。新污染物通常以极低浓度(ng/L~ μ g/L范围)存在于环境中。以全氟和多氟烷基物质(PFASs)为例,其在我国各地的饮用水中被广泛检出,平均浓度约为0.1~502.9 ng/L^[10-13]。常规饮用水净化工工艺对新污染物的去除效能非常有限(见表2),对于具有高亲水性和化学稳定性的新污染物(如PFAS),臭氧/生物活性炭等深度处理工艺也难以有效去除,因此增加了饮用水安全保障的难度。

氯(胺)消毒作为常规水处理方法,消毒剂会与水中天然有机物反应生成一系列“三致”特性的消毒副产物,如三卤甲烷和卤乙酸。目前已鉴定出超过700种的DBPs,其中碘代三卤甲烷等含碘和含溴的消毒副产物的细胞毒性和基因毒性远高于传统的氯代消毒副产物,且存在明显的季节性波动^[18]。据估计,仍有超过70.0%的消毒副产物尚未被完全识别(图3),这些未知DBPs可能包含高毒性物质。由于现有监测和处理技术对未知DBPs的识别和去除能力不足,某些深度处理工艺甚至可能产生新的前体物或副产物,进一步增加了DBPs的控制难度。

2.3 复杂水质感官问题

水质感官性状,包括浑浊度、嗅味、味感等,是公众对饮用水品质最直观的判断依据。在全国

表 2 不同工艺对抗生素、全氟和多氟烷基物质的去除效果

Table 2 Removal efficiency of various treatment processes for antibiotics and PFAS

新污染物类型	浓度范围	水厂净水工艺	去除率
抗生素	6~1 172 ng/L ^[9-10]	常规工艺	6%~51% ^[11]
		臭氧生物活性炭深度处理	48%~100% ^[12]
		纳滤膜处理	>90% ^[11]
		UV/H ₂ O ₂ 高级氧化	>90% ^[11]
全氟和多氟烷基物质	0.1~502.9 ng/L ^[13]	常规工艺	12%~14% ^[13-14]
		臭氧生物活性炭深度处理	10%~21% ^[15]
		活性炭或离子交换树脂	>90% ^[16]
		纳滤	>90% ^[17]

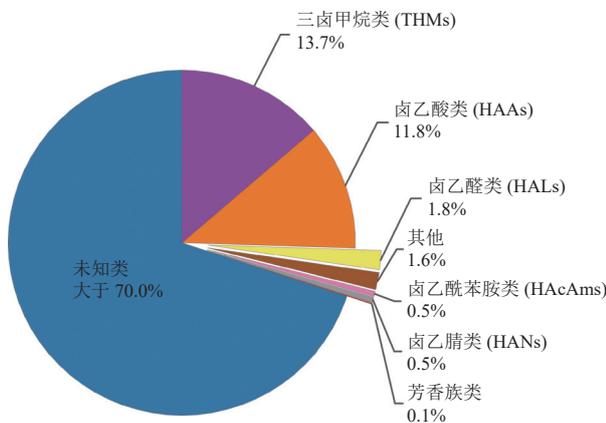


图 3 消毒副产物主要类型及占比

Fig. 3 Types and proportion of disinfection byproducts

范围内的饮用水投诉中,黄水、黑水、异味及沉积物等感官问题常年占据比例较高。虽然感官问题通常不会对人体健康造成直接威胁,但会严重影响用户的用水体验和对供水系统的信任感。

感官性状问题的形成往往与供水管网的老化和材质有关。管道腐蚀可能导致铁、锰等金属离子溶出并在水中进一步氧化,形成肉眼可见的颗粒,表现为“黄水”或“红水”现象。管道内壁的化学不稳定性也可能引发积垢脱落,特别是在水力条件变化时。在供水切换或水压波动情况下,管垢松动会导致水质浑浊度和色度明显升高,进一步加剧用户的不满。一些藻类或细菌代谢产物(如土臭素)具有极低的嗅阈值(<15 ng/L),因而极易被用户感知。研究表明,真菌孢子能够在水管网和水箱余氯条件下繁殖,并产生令人不悦的臭味物质,从而造成龙头水的异臭味问题^[19]。尽管 2-甲基异莰醇和土臭素已被纳入我国最新的水质

标准,但其他类似物质(如 2-异丁基-3-甲氧基吡嗪等)的潜在风险有待进一步研究。

味感也是饮用水感官的关键评价指标,受多种无机离子等的影响。例如,高浓度的 Ca²⁺、Mg²⁺可赋予水体明显的苦涩味,而 Cl⁻浓度升高会导致咸味的出现。硫酸盐含量较高时,可能引发明显的涩味。此外,水温、pH 及总溶解性固体(TDS)等因素也对味感有显著影响。由于味感问题涉及多种离子和化学成分的复合作用,其成因和影响机制仍缺乏深入研究,区域性和个体化的味觉偏好进一步增加了理解和控制的难度。

2.4 气候变化引起的水质风险

全球气候变化正深刻影响供水系统的稳定性和安全性。气温升高、降水模式变化、海平面上升以及极端气候等对水源地保护、供水设施稳定性及水质安全保障带来了多重挑战。极端降雨可能导致面源污染被冲刷进入水体,从而影响水源地水质^[20-21];干旱则会减少地面水径流和地下水补给,导致水体盐度、污染物浓度上升^[20-22]。此外,高温环境可能加快管网等的腐蚀,缩短供水设施使用寿命,而低温则可能导致管网破裂引起停水等问题。气温上升和降水模式的改变都会引起饮用水生物风险的上升。研究表明,高温、强降雨与管网内细菌生长存在显著的相关性,会增加病原微生物暴露风险,并可能间接导致饮用水感官性状的恶化(浊度上升、臭味问题等)^[23]。

为应对气候变化及突发事件对水质带来的风险,市政供水系统亟须提升韧性建设。例如,通过分区域水资源调度,降低对单一水源的依赖性;应用智能化动态监控技术,如实时水质监测和水质

风险预测系统,实现对极端事件的快速响应,从而有力保障供水系统的安全稳定运行。

3 饮用水品质提升实现路径分析

3.1 高水平水质标准先行

新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)包含了 97 项水质指标,已达到全球主要发达国家的标准水平。我国部分城市实行的地方标准相较国标更为严格,其中上海市和深圳市的水质指标分别达到 111 项和 116 项(表 3),且对微生物、毒理、感官性状指标都提出了更低的限值。这些国家和地方标准为实现高品质饮用水打下了坚实的基础。

表 3 我国国家及部分地方生活饮用水标准

Table 3 National and selected municipal drinking water quality standards in China

指标类型/项	上海市地方标准 (DB 31/T 1091—2018)	深圳市地方标准 (DB 4403/T 60—2020)	国家标准 (GB 5749— 2022)
常规指标	49	52	43
扩展指标	62	64	54
指标总数	111	116	97
参考指标	27	44	55

为更好体现高品质饮用水的安全性、可靠性以及重视用户体验的内涵,在高品质饮用水标准体系建设过程中还应该注意以下 4 个方面:

(1)因地制宜,结合当地水源水质的特性制定标准。例如,我国部分地区为水源性高碘地区(碘含量 $>100 \mu\text{g/L}$)^[24-25],而碘代消毒副产物的生成会对用户健康造成风险,因此需要特别关注此类污染物的控制。通过制定基于区域水质特性的差异化标准,有效提升饮用水安全保障的针对性和科学性,同时优化资源配置,提升高品质饮用水供给的可持续性。

(2)重视新污染物的控制,弥补现有标准的不足。新污染物因其来源广泛、存在持久、浓度低但风险高的特点,已引起了国内外的广泛关注。美国国家环保局(EPA)在 2024 年 4 月将 6 种 PFAS 列入了饮用水强制标准,其中全氟辛酸(PFOA)和全氟辛基磺酸(PFOS)的限值均设定为 4 ng/L ,体现了对这一新兴水质问题的高度重视。然而我国仅将 PFOA 和 PFOS 列入了水质参考指标,限值分别为 80 ng/L 和 40 ng/L 。对于经济发达、治

理能力较强的地区,应率先开展新污染物治理研究并逐步引入相关指标,以弥补现有标准的不足,为未来全国性的推广提供数据和经验支持。

(3)以人为本,将人民群众对饮用水的关注点科学合理地融入标准中。饮用水是最普惠的民生之一,需要充分了解广大群众的实际需求。例如,感官性状是公众对饮用水品质最直观的判断依据,由此可以研究关键水质因子与饮用水感官性状之间的关联,并在标准中优化相关限值,从而让用户切实体会到饮用水品质的提升^[26]。这不仅能让饮用水更符合直饮需求,还能增强公众对龙头水直饮的接受度,推动高品质饮用水的普及。

(4)面对日益复杂的水质环境,探索综合水质评价指标。单一污染物限值难以准确评估多种污染物之间可能存在的协同或拮抗作用,这些复合效应对水质安全性构成新的挑战。因此,开发如“水质健康指数”或“总生物毒性指数”等综合性评价指标,通过整合生物毒性测试、化学分析和风险评估模型,结合多参数数据进行综合计算,有望更全面地评估饮用水的安全性。

3.2 供水基础设施改造提升

全面实现高品质饮用水的供给离不开城市供水设施的优化与改造。改造过程中供水设施需要考虑兼顾水质安全、工艺效率和环境友好,并结合创新技术应用及智慧化运维,构建更为高效、可靠的供水体系。

随着污染物种类的多样化,传统单一污染物处理方法逐渐难以满足需求,因此复合污染协同处理技术成为重点发展方向。针对农药、药物残留、内分泌干扰物等多种难降解污染物,可以采用多重氧化工艺,通过引入紫外高级氧化等污染物强化降解工艺,并结合吸附或膜过滤技术,可以实现多种污染物的高效降解与产物去除。消毒副产物作为水处理中常见的化学风险,与氯等消毒剂的使用密切相关。通过减少氯消毒剂的使用比例,并更多采用臭氧和紫外线等消毒手段,可以有效降低消毒副产物的形成^[27]。此外,通过优化反应条件(如 pH 和接触时间),并在深度处理阶段加入吸附单元,有望进一步降低消毒副产物的生成量,实现消毒安全性与水质保障的协同优化。为应对复杂的水质条件和动态的需求变化,水厂需要具备更强的适应性。模块化构建通过单元模块的标准化设计,实现了不同水处理设备的快速组装与灵活扩展,使水厂能够根据不同地区水质特

性选择最适宜的处理单元。这种设计方式不仅提高了水厂建设效率,还能根据不同需求灵活配置工艺流程。例如,当湖库型水源地发生藻类暴发时,水厂可优先启动藻类去除模块,确保水处理效果不受影响。柔性化调控则依托于在线监测技术和智能化控制系统,根据水质的季节性变化和突发污染事件,动态调整混凝、过滤及消毒工艺参数。该手段能够有效提升水厂应对突发事件的能力,确保水质的长期稳定达标。

供水输配环节是水质劣化的主要风险来源,其改造重点集中在设施升级和运行优化上。针对管网的老旧腐蚀、漏损及生物膜滋生问题,可采用耐腐蚀新材料、内壁涂层及清管技术进行系统更新,同时优化管网布局和水力条件,缩短水龄以减缓水质波动。在二次供水环节,通过优化水箱设计(如减少死角、增设自动清洁装置)并结合在线监测技术,可显著减少污染物累积并提高运维效率。此外,建立综合性的健康状态评价体系,明确关键污染控制指标及动态监控策略,实现输配设施的精准管理与高效运行,从而夯实终端水质安全保障的基础。

供水设施改造不仅限于单一环节的优化,而是需要形成多环节协同升级的综合模式。通过融合智能化和绿色化理念,进一步推动节能降耗和资源优化利用。政策支持和标准引导在改造实施过程中起到至关重要的作用,结合市场化推动机制,为技术创新和设施升级提供更为坚实的保障。

3.3 智慧赋能全流程水质保障

实现高品质饮用水的稳定供给,需要构建覆盖“水源地-水厂-管网-二次供水-龙头”的全流程水质安全保障体系。传统体系往往依赖人工取样,检测周期长、覆盖范围有限;在水处理工艺调控及水质劣化识别方面也存在被动和低效等问题。通过运用大数据、人工智能等先进技术,对供水系统进行智慧赋能,则能够全面提升供水系统中各个环节的运行效能,实现从低效被动响应到主动智能管理的转变^[28]。

在水源地保护方面,通过卫星遥感技术与机器学习的结合,实现对潜在污染源的精准监测和动态跟踪^[29-30]。例如,基于多源卫星数据并运用区域交叉相关算法,可以动态追踪水体藻华的空间分布和漂移轨迹;而结合长短期记忆网络(LSTM)及Transformer模型开发的预测系统,能够基于气象条件(如风速、水温)和历史数据实时

评估藻华暴发风险^[31]。相较于传统人工监测和统计方法,这种基于深度学习的追踪、预测技术在时效性和预测精度上均有显著提升。水厂作为供水系统的核心,其智慧化改造对于提升水质同样具有重要意义。当前水厂面临着新污染物等引起的化学风险,而传统水厂体系对水质监测及工艺调控缺乏动态响应,难以有效应对上述问题。以碘代消毒副产物控制为例,智慧赋能通过在水厂部署在线监测传感器,能够实时监控溶解性有机物、碘离子(I^- 、 IO_3^-)等关键参数,结合极端梯度提升算法(XGB)等机器学习模型,能够精准预测消毒过程中碘代消毒副产物的生成量;在此基础上,智慧化水厂能够通过优化算法动态调控氯胺等消毒剂用量,在降低消毒副产物的同时,减少化学试剂的使用量,实现水厂降本增效^[32]。

输配管网和二次供水系统是保持水质的关键节点,也是水质劣化的高风险区域。当前模式存在重水质检测、轻设施管理运维的问题,在水质劣化成因、污染溯源分析及水龄动态控制方面存在诸多不足。基于物联网的智能监测网络实时采集管网压力、流量及水质数据,利用机器学习算法分析潜在风险点,预测管网腐蚀、漏损或污染物积累区域。该系统可支持精准维修和主动干预,防止水质劣化问题产生或避免问题的扩散。此外,通过图像识别技术和在线监测装置,有望快速识别水箱内壁腐蚀、生物膜积累程度及微生物滋生情况,帮助制定动态清洗和维护策略,从而提高水箱运维效率,降低二次污染风险。从被动水质监测到主动设施管理的转变,为供水输配系统中水质保持开辟了全新的实现路径。

智慧赋能的核心在于实现全流程数据的集成分析和协同优化。通过建立统一的智能化管理平台,可以将水源地、水厂、管网和二次供水系统的运行数据全面整合,开展多维度水质风险评估和实时调控,为高品质饮用水的稳定供给提供全方位保障。

4 结 论

高品质饮用水的建设不仅是保障人民健康与提升生活质量的基本需求,更是推动社会可持续发展和城乡供水系统高质量升级的关键举措。尽管当前我国高品质饮用水覆盖率尚不高,但在政策支持和技术创新的驱动下,其发展潜力巨大。高品质饮用水供给涉及“水源-水厂-管网-二次供

水-龙头”等多个环节,面临生物风险、化学风险及感官问题等多重挑战。通过污染源和水质劣化成因解析,结合相关水质标准制定,供水设施改造与智慧赋能,有望逐步完善从水源到龙头的全流程水质保障体系,推动居民龙头水直饮目标的实现,进而提升人民群众的获得感和幸福感,为社会的高质量发展注入更多动力。

参考文献 (References):

- [1] 包伟忠. 高品质饮用水建设及运维中关键问题探讨 [J]. 净水技术, 2024, 43(S1): 71-75.
BAO Weizhong. Discussion on key problems of high quality drinking water building and management[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(S1): 71-75.
- [2] 程志强, 彭秀华, 陈志伟, 等. 新国标背景下高品质饮用水建设路径探索 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(18): 8-14.
CHENG Zhiqiang, PENG Xiuhua, CHEN Zhiwei, et al. Exploration of construction path for high-quality drinking water under the background of the new national standard[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(18): 8-14.
- [3] 吴铭轩, 张凯, 周艳春, 等. 湖北省“高品质”饮用水现状分析及发展对策 [J]. 给水排水, 2024, 50(10): 21-29.
WU Mingxing, ZHANG Kai, ZHOU Yanchun, et al. Investigation and development countermeasure of "high-quality" drinking water in Hubei[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(10): 21-29.
- [4] LUO Liwei, WU Yinhu, YU Tong, et al. Evaluating method and potential risks of chlorine-resistant bacteria (CRB): A review[J]. Water Research, 2021, 188: 116474.
- [5] ZHAO Hengxuan, HE Huan, ZHANG Tianyang, et al. Stimulated germination of chlorine-resistant fungal spores during drinking water chlor(am)ination[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2023, 10(12): 1173-1180.
- [6] SHEN Yun, HUANG Conghui, LIN Jie, et al. Effect of disinfectant exposure on *Legionella pneumophila* associated with simulated drinking water biofilms: Release, inactivation, and infectivity[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(4): 2087-2095.
- [7] MAI Yingwen, ZHENG Jianyi, ZENG Jiexiong, et al. Protozoa as hotspots for potential pathogens in the drinking water of a subtropical megacity: Diversity, treatment, and health risk[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(15): 6108-6118.
- [8] LIU Li, ZHANG Qianghong, LI Ruitong. *In situ* and individual-based analysis of the influence of polystyrene microplastics on *Escherichia coli* conjugative gene transfer at the single-cell level[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(42): 15936-15944.
- [9] HU Yaru, JIN Lei, ZHAO Yi, et al. Annual trends and health risks of antibiotics and antibiotic resistance genes in a drinking water source in East China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 148152.
- [10] BEN Yujie, HU Min, ZHANG Xingyue, et al. Efficient detection and assessment of human exposure to trace antibiotic residues in drinking water[J]. Water Research, 2020, 175: 115699.
- [11] DE ILURDOZ M S, SADHWANI J J, REBOSO J V. Antibiotic removal processes from water & wastewater for the protection of the aquatic environment—A review[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 45: 102474.
- [12] 张静, 张晓岚, 蔡佳男, 等. 抗生素在给水厂中的去除及其对水质的影响研究综述 [J]. 净水技术, 2022, 41(1): 23-30.
ZHANG Jing, ZHANG Xiaolan, CAI Jianan, et al. Review of research on antibiotics removal and effects on water quality in waterworks[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(1): 23-30.
- [13] LIU Liqian, QU Yingxi, HUANG Jun, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in Chinese drinking water: Risk assessment and geographical distribution[J]. Environmental Sciences Europe, 2021, 33(1): 6.
- [14] 温馨, 吕佳, 王园媛, 等. 常规处理工艺对饮用水中全氟化合物的去除效果研究 [J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(7): 526-532.
WEN Xin, LYU Jia, WANG Yuanyuan, et al. Removal efficiency of perfluorinated compounds in drinking water by conventional treatment process[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(7): 526-532.
- [15] 钟婷婷, 林涛, 刘威. 饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向 [J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2613-2621.
ZHONG Tingting, LIN Tao, LIU Wei. Distribution, transformation, and fate of per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water treatment[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2613-2621.
- [16] ZENG Chao, ATKINSON A, SHARMA N, et al. Removing per- and polyfluoroalkyl substances from groundwaters using activated carbon and ion exchange resin packed columns[J]. AWWA Water Science, 2020, 2(1): 1-11.
- [17] APPLEMAN T D, DICKENSON E R V, BELLONA C, et al. Nanofiltration and granular activated carbon treatment of perfluoroalkyl acids[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 740-746.
- [18] 徐斌. 饮用水消毒衍生的新兴水质问题及控制策略 [J]. 净水技术, 2022, 41(6): 1-6+133.
XU Bin. Emerging water quality problems derived from disinfection of drinking water and control strategies[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 1-6+133.
- [19] ZHAO Hengxuan, HE Huan, ZENG Chao, et al. Overlooked role of fungi in drinking water taste and odor issues[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(40): 17817-17827.
- [20] BECHER O, SMILOVIC M, VERSCHUUR J, et al. The

- challenge of closing the climate adaptation gap for water supply utilities[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 356.
- [21] LYLE Z J, VANBRIESEN J M, SAMARAS C. Drinking water utility-level understanding of climate change effects to system reliability[J]. *ACS ES&T Water*, 2023, 3(8): 2395-2406.
- [22] SHARMA N, WESTERHOFF P, ZENG Chao. Lithium occurrence in drinking water sources of the United States[J]. *Chemosphere*, 2022, 305: 135458.
- [23] MOHAMMED H, TORNYEVIADZI H M, SEIDU R. Modelling the impact of weather parameters on the microbial quality of water in distribution systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 111997.
- [24] 钱永, 张兆吉, 费宇红, 等. 华北平原饮用地下水碘分布及碘盐分区供应探讨 [J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(1): 9-14.
- QIAN Yong, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, et al. Spatial distribution of iodine in underground drinking water and discussion on region-specific supply of iodized salt in the North China plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(1): 9-14.
- [25] MA Ruoqi, YAN Mingquan, HAN Peng, et al. Deficiency and excess of groundwater iodine and their health associations[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7354.
- [26] 徐斌, 唐利贞. 饮用水味感研究的现状及展望 [J]. *净水技术*, 2020, 39(8): 1-7.
- XU Bin, TANG Lizhen. Research progress and prospect of taste and mouth feel of drinking water[J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(8): 1-7.
- [27] REID E, IGOU T, ZHAO Yangying, et al. The minus approach can redefine the standard of practice of drinking water treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(18): 7150-7161.
- [28] GUPTA S, AGA Diana, PRUDEN A, et al. Data analytics for environmental science and engineering research[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(16): 10895-10907.
- [29] HUANG Yuankai, WANG Xingyu, XIANG Wenjun, et al. Forward-looking roadmaps for long-term continuous water quality monitoring: Bottlenecks, innovations, and prospects in a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(9): 5334-5354.
- [30] MAHMOOD A U, ISLAM M, GULYUK A V, et al. Multiple data imputation methods advance risk analysis and treatability of co-occurring inorganic chemicals in groundwater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(46): 20513-20524.
- [31] WANG Denghui, LI Lei, NING Rongsheng, et al. Satellite tracking reveals the speed up of the lacustrine algal bloom drift in response to climate change[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(26): 11727-11736.
- [32] LUO Zhengning, HE Huan, ZHANG Tianyang, et al. Enhanced iodinated disinfection byproducts formation in iodide/iodate-containing water undergoing UV-chloramine sequential disinfection: Machine learning-aided identification of reaction mechanisms[J]. *Water Research*, 2024, 272: 122975.