

特色专题

饮用水安全保障技术挑战与对策建议

唐文忠^{1,2}, 黄鑫^{1,2}, 张洪^{1,2}, 胡承志^{1,2*}

摘要 从水源、水厂、管网及风险控制方面阐述了饮用水安全保障的发展现状,总结了饮用水安全领域 20 余年来在水质风险识别与评价、水源修复、水质净化、管网输配以及农村供水方面的重要成果,在监测设备国产化及能力提升、城镇龙头水稳定达标和农村供水提质等方面取得重大突破,创建了饮用水安全保障技术体系。分析了在新时代美丽中国建设目标下,饮用水安全保障领域面临的水源水质波动、新污染物风险及厂网智慧化程度有待提升等技术挑战与难题,如新污染物去除效率低、毒性副产物缺乏风险控制、化学药剂使用量高、流程繁琐等,并提出了未来要发现的水质净化新原理及新方法、研发水质净化新工艺及新技术、构建高品质饮用水技术体系及未来水厂的发展方向。

关键词 美丽中国; 饮用水安全; 水源生态调控; 绿色净水技术; 智慧化

民以食为天,食以水为先。饮用水安全事关民生福祉,是保障人民健康、促进社会和谐、提升人民群众获得感、幸福感、安全感的重要基础^[1]。2018 年,习近平总书记在中央财经委员会第一次会议上强调,“饮水安全是人民生活的一条底线。要加强水源水、出厂水、管网水、末梢水的全过程管理,划定水源保护区,依法全面清理保护区内违法项目和排污口,加强农村水源保护和水质检测,严防地下水污染,确保所有城乡居民喝上清洁安全的水”^[2]。饮用水安全保障不仅是人民美好生活为目标的美丽中国建设的重要基础,也是实现中华民族永续发展目标的基础保障。

中国具有世界上最复杂多样的水源、最庞大的供水系统、最广大的供水区域和服务人群,给饮用水安全保障技术带来了巨大挑战^[3]。城市饮用水安全是一

项复杂的系统工程,涉及水源地、自来水厂、市政管网及二次供水等多个环节,任何一个环节的缺失都会影响饮用水供给^[4]。农村饮用水由于地形条件限制、水资源禀赋差异巨大和基础设施缺乏等,导致部分地区水质达标困难,饮水安全难以获得保障^[5]。经过 20 余年的产学研用联合攻关,城市饮用水保障工作成效显著,已实现让居民喝上安全水、放心水的阶段目标^[6]。针对农村劣质水源水研发的低维护、短流程、少药剂的低成本处理技术,提升了农村供水品质,并通过研发多目标水质水量模型,优化水源、水厂、村庄空间布局,实现了城乡一体化供水目标。

现阶段,通过不同途径进入饮用水水源的新污染物虽然浓度极低,但具有较高的健康风险,严重威胁饮用水安全。未来饮用水处理将致力于新污染物等高风险污染物高效处理技术、短流程低能耗处理工艺的研发,形成智慧化全流程控制技术体系,进一步提升饮用水品质,满足人民日益增长的美好生活需要,助力美丽中国建设。

1. 中国科学院生态环境研究中心,区域环境安全全国重点实验室,环境水质学重点实验室,北京 100085

2. 中国科学院大学,北京 100049

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2025-01-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会基础科学中心项目(52388101); 国家重点研发计划项目(2023YFC3205600)

作者简介: 唐文忠,研究员,研究方向为流域系统治理与水生态修复,电子信箱: wztang@rcees.ac.cn; 黄鑫(共同第一作者),副研究员,研究方向为饮用水新污染物去除原理与技术,电子信箱: xinhuang@rcees.ac.cn; 胡承志(通信作者),研究员,研究方向为水污染控制原理与应用,电子信箱: czhu@rcees.ac.cn

引用格式: 唐文忠,黄鑫,张洪,等. 饮用水安全保障技术挑战与对策建议[J]. 科技导报, 2025, 43(11): 34-44; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.11.01609

1 中国饮用水安全保障技术发展现状

1.1 水源修复及水质原位调控技术

水源污染是中国饮用水安全保障的首要问题和最大难点。面对日益严重的水源污染问题如微污染、藻类滋生和咸潮入侵等^[7-9],水源修复及水质原位调控技术相辅相成,通过水源修复去除污染物的同时,利用原位调控技术保持水源地水质的稳定性与安全性^[10-11]。传统水源修复与水质调控技术主要包括生物修复、化学处理和物理过滤3种方法,其中生物修复被认为对环境影响最小^[12]。尽管这些技术在一定程度上有效,但在处理效率、成本和生态影响等方面存在不足。人工湿地作为多介质复合系统,其净水效率易受到系统组成要素、工艺结构、环境因素、操纵参数等多重因素的综合影响,水质净化效果波动较大^[13];化学处理方法如絮凝和氧化还原反应,能够快速去除水中污染物,但往往会产生二次污染和化学残留,影响水质安全^[12];底泥疏浚等物理方法虽然能有效清除营

养物、重金属、有机污染物等,但疏浚后悬浮颗粒物释放可能带来二次污染,从而引发新的生态风险^[14]。为应对这些挑战,近年来出现了一些新兴的水源修复与原位调控技术,并展现出良好的应用前景(表1)。研究人员发现植物床-沟壕的边界区存在基质、植物根孔和微生物共同作用形成的净水“活区”^[15]。通过人造根孔、生物铁锰强化和多塘-湿地等复合式构造,“活区”原理成功实现规模化应用,显著拓宽了污染物净化种类,并提高了低温条件下的处理能力,形成包括石臼漾湿地在内的浙北饮用水源湿地群^[16-18]。另外,调光抑藻技术结合水源水文学特征及产嗅藻类型,通过水位调节或浊度调节等措施,降低水下光强以形成抑制嗅藻生长的环境,突破了嗅味控制局限于水厂的传统思路^[19]。Su等^[20]利用上述技术在上海青草沙水库等饮用水源地开创原位控嗅的工程范例,实现了对2-甲基异莰醇(MIB)藻源致嗅物质超过80%的有效去除。针对咸潮入侵和突发污染问题,研究人员提出了智能调度决策模型,通过结合启发式与

表 1 常用水源修复及水质原位调控技术

分类	技术名称	技术原理	修复对象	应用场景
物理技术	扬水曝气技术 ^[23]	提升水体溶解氧促进微生物作用	营养盐	地表水
	底泥疏浚与覆盖 ^[24]	机械方法异位移除有害底泥	营养盐、重金属	地表水
	可渗透反应墙技术 ^[25]	利用反应材料的吸附、降解等作用阻截和修复地下水中的污染物	营养盐、有机物	地表水、地下水
化学技术	原位化学氧化技术 ^[26]	利用强氧化剂的氧化性化学去除污染物	有机污染物	地下水
	原位化学还原技术 ^[27]	利用还原、吸附、共沉淀作用去除污染物	硝酸盐	地下水
生物技术	调光抑藻控嗅技术 ^[28]	光合细菌提升细菌抑藻能力	藻类	地表水
	原位微生物技术 ^[29]	利用土著微生物或人工投加的高效降解微生物降解污染物	营养盐、有机物、生物多样性	地表水、地下水
	耦合生态净化系统技术 ^[30]	选择适合的生物体和调控手段对水质有效改善和修复	营养盐、有机污染物、生物多样性	地表水、地下水
复合技术	沉水植物调控技术 ^[31]	利用水位、鱼类、机械收割和生物化学等综合调控技术维持生态系统稳态	营养盐、重金属、生物多样性	地表水
	微纳米曝气与微生物活化技术 ^[32]	曝气提升溶解氧浓度,结合微生物活化去除污染	营养盐、有机物	地表水、地下水
	地下水循环井复合技术 ^[33]	结合连续电子供体生产过程,强化原位生物还原脱氯	致密非水相液体	地下水
	微生物辅助纳米技术 ^[34]	纳米材料作为载体促进微生物活性,增强吸附和降解能力	重金属、有机污染物	地表水、地下水
	铁锰复合氧化物除砷工艺 ^[35]	原位生成铁锰复合氧化物作为吸附剂去除地下水中的砷	砷	地下水
	阴极增强生态浮床耦合微生物电化学系统 ^[36]	利用纳米Fe ₃ O ₄ 修饰阴极提升微生物降解能力	营养盐	地表水

梯度算法,创建了跨区域的水质监测预警系统^[21-22],其能实时调整水源调度,提高水质管理的灵活性和适应性,为城市供水安全提供了强有力的支持^[23-36]。

1.2 水厂水质净化与管网输配技术

饮用水厂是保障供水安全的中枢系统,管网输配是保障供水安全的末梢神经。21 世纪初期,中国饮用水厂普遍采用以去除浊度和细菌为主的混凝-沉淀-过滤常规处理工艺,缺乏对管网系统中复杂化学和生物反应的深入认知,无法应对工业发展及环境恶化等导致的原水有机复合污染、臭味及净水过程产生的毒害副产物和耐氯生物等水质难题^[37]。

现阶段已经形成了基于强化常规处理-深度净化处理-安全稳定输配的全流程饮用水安全保障技术体系(图 1),解决了长期困扰供水行业的复合污染、臭味、毒害副产物、耐氯生物、黄水、龙头水欠稳定达标

等系列水质难题^[4]。在常规处理方面,研制了纳米铁铝及复合净水剂和富微孔、高石墨化除嗅活性炭等新材料,并通过氧碳比调控、物质形态匹配及 pH 值精准控制等方式强化常规处理工艺,实现了消毒副产物及余氯的有效控制^[38-39]。在深度处理环节,针对臭氧-活性炭深度处理工艺中致癌物溴酸盐的生成和微生物泄漏难题,研发了溴酸盐化学还原、微型动物定点消杀及多级拦截技术^[40]。此外,在膜滤技术方面,创建以膜滤与强化常规及深度处理等技术有机组合的净水新工艺^[41]。在输配过程方面,明确了水源切换时管垢的失稳机制,解决了由于水源切换引发的管网“黄水”问题^[42]。此外,还针对漏损控制与修复,创建管网健康诊断与漏损评估方法,开发出高精度智能水表及漏点精准识别、定位设备;创新非开挖管网修复方法,实现漏损的快速处置^[43]。

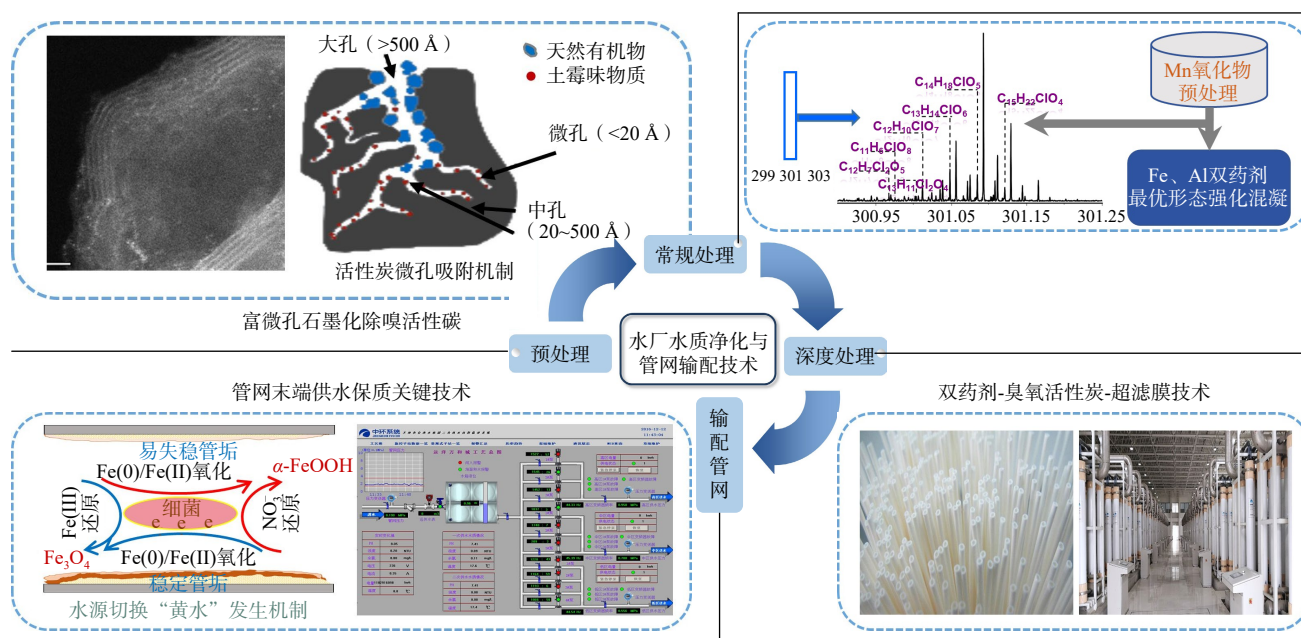


图 1 水厂水质净化与管网输配技术

1.3 小型集中式供水水质净化关键技术

“饮水安全有保障主要是让农村人口喝上放心水,统筹研究解决饮水安全问题。”习近平总书记始终将农村饮水安全保障挂念在心、亲自推动解决。农村饮水安全保障是巩固脱贫攻坚成果、推动乡村振兴的重要标志^[44]。相较于成熟的城市供水系统,农村供水中饮用水安全面临的巨大难题是复杂的水源情况^[45]。农村供水因受自然地理、经济发展等多种因

素的影响,存在水源水质差、供水设施差、运维困难等问题^[5]。

砷和氟是农村劣质水源中危害最大的 2 类风险物质,由于水中同时存在三价和五价 2 种形态的砷,常规除砷均采用先氧化再吸附的 2 步法工艺,操作复杂且成本高^[46];除氟普遍采用吸附法,传统吸附剂易失活,无法长效运行^[47]。现阶段,针对砷、氟吸附处理难题,中国科学院生态环境研究中心曲久辉团队研制了

一步法氧化吸附除砷技术,并创建了吸附、凝聚、膜滤等系列除氟工艺,为农村饮用水除砷除氟提供实用技术^[48-49]。针对农村供水设备适应性差的问题,相关研究团队研制出多相混合、电絮凝涡流反应等关键

部件,发明低压损、抗污染超滤膜材料和组件,创制模块化分类组装的标准化、装配式水厂和水源原位直接过滤的膜法水厂,形成了农村供水的短流程和标准化建设模式(图2)^[50]。

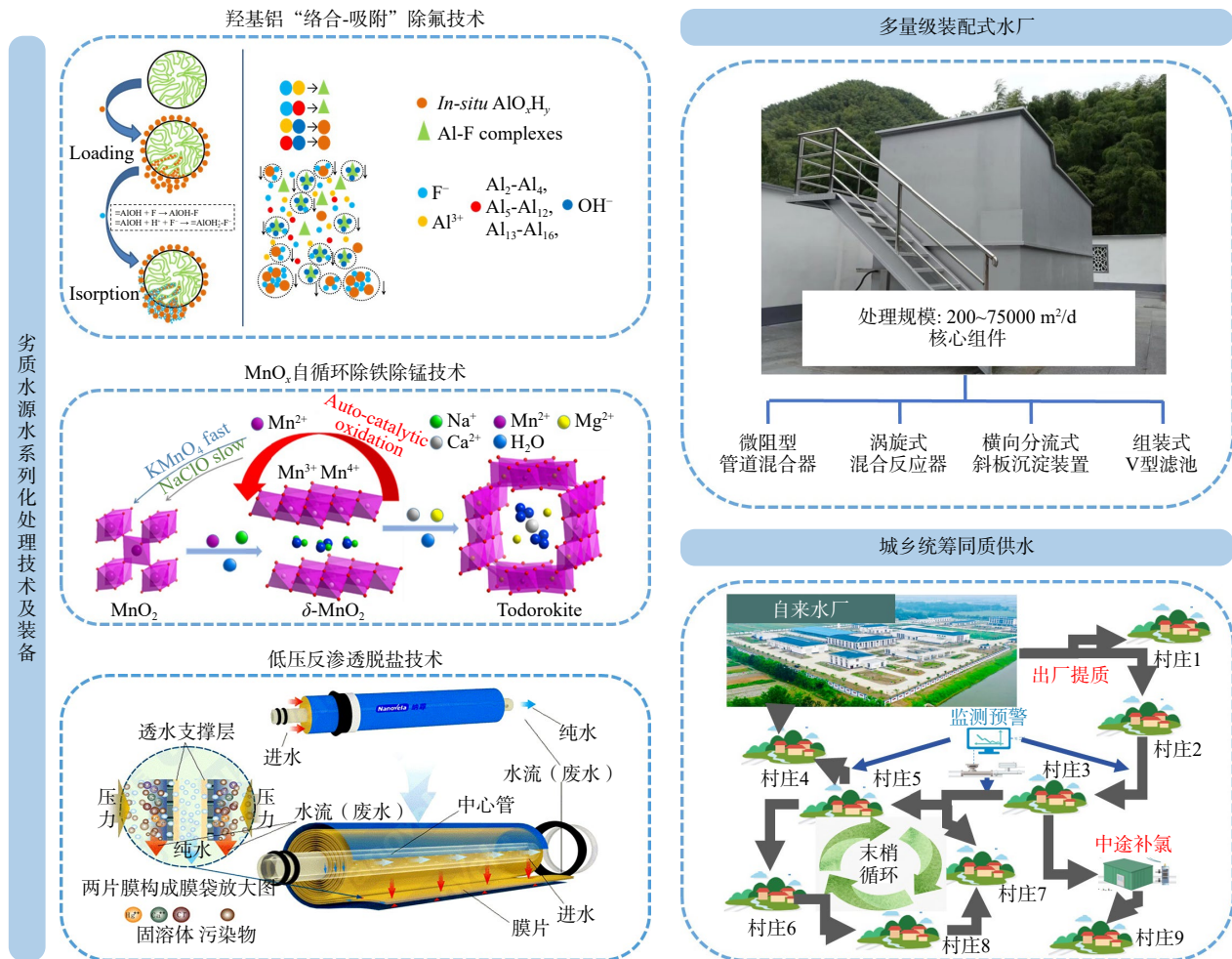


图2 劣质水源水质净化技术

城乡统筹供水实现同源、同网、同质、同监管、同服务,是保障农村饮水安全、促进社会公平的重要举措^[51]。然而,输水距离远、时间长、管网复杂等因素,导致水的浊度、微生物、副产物升高,成为制约城乡一体化供水的难题^[52]。同时,相关研究团队开发了多目标水质水量模型,优化了水源、水厂、村庄的空间布局,提出了“出厂水质提升-中途补氯-管网优化”的技术方案,推动了城乡统筹供水的实现(图2)^[53]。

新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中更新了对于小型集中式供水的定义,并仅指出因水源和净水条件受限时,可放宽对于菌落总数、氟化物、硝酸盐及浑浊度4项指标的要求。基于新标准对小

型集中供水和分散供水更高的水质要求,以及城乡区域发展和生活水平差距的显著缩小,农村饮用水水质亟需提升,这也给农村供水技术带来了新挑战。

1.4 水质风险识别与评价关键技术

有效识别水质风险源和风险因子是高质量评估的基础^[54],而传统的水质风险识别主要依赖定期现场采样,并通过实验室分析其物理(浊度、温度等)、化学(pH值、溶解氧、重金属含量等)和微生物(大肠杆菌、细菌总数等)指标^[55]。尽管传统识别技术在过去发挥了重要作用,但仍面临诸多挑战,例如,样品运输导致水质的滞后监测、空间限制及人力资源与成本消耗等^[56]。这使得传统识别方法难以及时反映水质变

化,影响了饮用水安全的保障。

数据驱动的智慧管理和污染物高分辨率识别等新兴技术的出现,促成了水质风险识别与评价领域的传统与新兴技术相结合的多元化格局。在水质监测预警方面,中国已突破设备严重依赖进口的困境,攻克快速换锥与进样、抗温湿度与振动变化等关键技术,并开发出大型仪器在线/车载检测技术^[57];通过集成电化学、原子荧光等技术,创建了采样、分析、质量控制和数据传输为一体的水质在线监测系统^[58-59];攻克高通量精准检测、自适应滴定等关键技术,创建多参数自动化实验室,实现全流程无人化分析(图3)^[60-61]。

在水质督察应急方面,建立了国家/省/市三级联动的水质督察体系和信息化平台,开发了移动应急监测系统、车载水厂及痕量污染物高通量检测等应急救援方法,解决了供水全过程监管缺失和信息孤岛问题(图3)^[62]。在供水管理方面,通过结合智能物联感知、机器学习算法和第五代移动通信(5G)等人工智能技术,构建了以智能加药和能耗管理为核心的智慧厂站、以漏损监控为核心的数字供水管网以及以危害分析和关键控制点(hazard analysis and critical control points, HACCP)管理为核心的全流程智能监控预警网,形成了从源头到龙头的数字化运营系统(图3)^[63-65]。

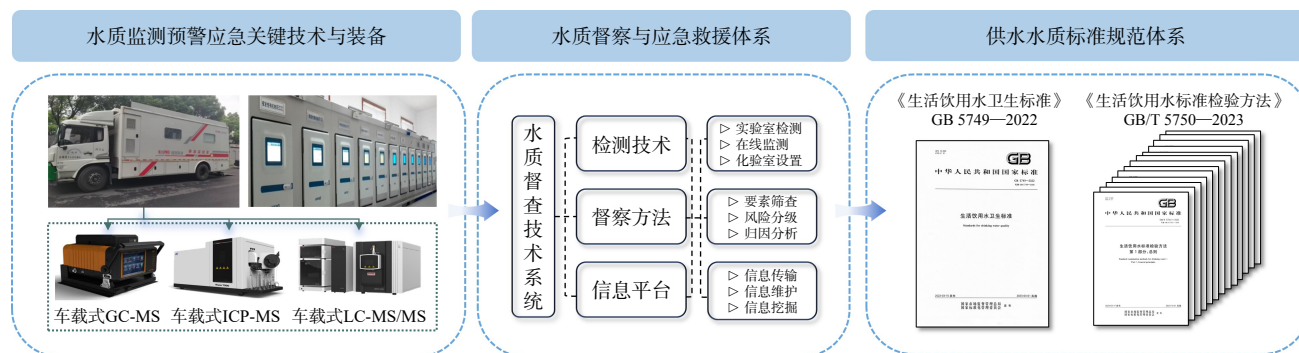


图3 水质风险识别与评价关键技术

2 未来水厂建设面临的技术挑战

2.1 水源水质的生态调控技术

过去几十年里,中国内陆地表水的水质安全问题逐渐演变为对人类健康和生态系统服务的主要环境威胁之一^[66]。水源水质安全监测数据表明,农村地区不达标比例显著高于县级城镇和地级及以上城市,地表水中主要超标指标为总磷、高锰酸盐指数、硫酸盐和锰;地下水中主要超标指标为氟化物、钠、铁、锰、氨氮和硝酸盐氮等^[67]。为保障水源水质安全,生态调控技术因其通过自然修复机制降低污染物浓度和增强生态系统自我恢复能力而逐渐受到关注,涵盖种植调控、湿地修复和生物多样性保护等多个方面^[68-72]。尽管生态调控技术展现出良好潜力,但常被视为“黑箱”,其是否可成功应用并可持续运行以控制污染仍存争议^[13]。生态调控技术在时空格局上均有其特异性,不同气候条件、水力特性、生物特性以及基质的物理化学特性决定技术的处理效率^[73]。在实际应用中,随着调控过程的进行,浮游动植物的种类更替、营

养盐循环变化和水动力的随机变化等影响因素均会削弱调控的预期效果,持久稳定的调控案例较少^[74]。此外,单一的湿地修复或水生植物修复技术在应对复杂水质问题时效果有限,亟需与其他技术结合发挥技术之间的协同效应,形成更为有效的复合治理方案^[75]。

中国的生态调控技术不仅基本与国际接轨,而且在某些技术领域已经实现了对国外常用方法的突破性进展。例如,调光抑藻控嗅技术相较于传统的化学试剂、鱼类投放或曝气等方法,在实现精准抑藻控嗅的同时,更加经济、简便且无害,接近自然状态。此外,人造根孔“活区”构建技术将自然造孔的周期从约3~5年缩短至约3~15个月,大大加快了高密度“活区”的构建速度,从而显著提升了处理效率。值得注意的是,这些新兴的水源修复及水质原位调控技术目前仍面临一些挑战。首先,尽管“活区”技术展现出良好的应用潜力,但其在不同环境和水质条件下的适应性尚需进一步验证。其次,调光抑藻技术虽然有效,但其对水下光照的精准控制较为复杂,且高度依赖水文和气候等环境因素,可能影响实施效果的可控性。

此外,智能调度决策模型的实际应用中,缺乏全面的监测和评估体系,可能忽视潜在的生态风险。最后,公众对新技术的认知和参与度不足,可能制约技术的推广与应用。因此,有必要进一步加强技术研发、完善监测体系和提升公众教育,以实现更高效、更可持续的水源管理。因此,生态调控技术必须从工程、生态和社会的整体视角评估,因地制宜实现可持续的水质改善和生态环境保护。

2.2 新污染物的绿色净水技术

近年来,随着国内饮用水厂的升级改造,中国城市饮用水品质得到了巨大提升,但水厂建设和改造大量采用国内外的先进技术和设备,国产设备覆盖率仍然较低,尤其是自动监测设备,核心传感器仍存在明显的技术差距。同时,饮用水处理技术工艺水平和理念与发达国家也有一定的差距,需要研发更加贴近自然、少药剂、短流程的处理技术。虽然现有饮用水处理技术已经可以满足现行的饮用水卫生标准,但是由于人民群众日益增长的水质要求以及各类化学品规模生产和广泛使用带来的新污染物风险,给饮用水安全保障带来了新的挑战^[76]。与传统污染物相比,新污染物浓度极低,并具有生物毒性、生物累积性、环境持久性等特征,长期暴露可能对人体健康带来更大的危害^[77]。因此,饮用水新污染物风险控制受到了高度重视。现阶段对饮用水中新污染物的污染特征、去除技术等已有部分研究^[78],但存在以下几方面的技术挑战。(1) 新污染物去除效率低。新污染物由于极低的环境浓度导致其相对常规污染物更难以锚定,如何提升可去除新污染物的定向转化效率仍需深入探索;另外,针对一些如难氧化降解的全氟化合物(PFAS)目前仍缺乏切实可行的处理技术。(2) 毒性副产物缺乏风险控制。由于常规处理工艺对新污染物去除效率有限,基于化学氧化-生物降解的深度处理工艺是目前控制新污染物的主要技术手段。因此,需要重点关注化学氧化及生物降解过程中新污染物的转化规律,避免高毒性副产物的生成。(3) 处理工艺过程中化学药剂使用量高、流程繁琐。传统水处理工艺过程中往往采用加大投药剂量或增加工艺流程的方式提升污染物去除效率,但这不仅增加了处理成本,还会导致二次污染。目前荷兰等发达国家已有采用岸滤-反渗透短流程无药剂绿色处理工艺的先例。因此,如何通

过优化整合现有工艺单元,提高单元处理效率,研发绿色处理技术,实现新污染物的低成本绿色去除是饮用水处理面临的挑战。

新污染物风险控制是全球范围内备受关注的饮用水安全问题,美国更是在2024年出台的新标准中对饮用水中包括全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酰基化合物(PFOS)等5种PFAS设置了极为严苛的标准。目前,美国国家环境保护局(EPA)建议通过使用颗粒活性炭吸附、反渗透和离子交换系统等技术和方法解决PFAS问题,但中国饮用水处理工艺还未采用上述方法,现有颗粒活性炭滤池多以生物降解功能为主,且部分水厂活性炭使用年限较长,吸附性能已显著下降。在处理工艺方面,基于河岸过滤-膜滤的短流程无药剂绿色饮用水处理技术已经在荷兰等发达国家采用,能够有效地去除水中的天然有机物及部分新污染物等。

2.3 水质水量同步保持的智能运维技术

虽然明确了水源切换对于管网“黄水”问题的影响,但是对于管网中新污染物赋存及转化情况有待探明,且缺乏智慧化管控技术,信息化监管水平有待提升,需要推动供水水质水量信息智能化感知装备的研发,提升厂网协同运维能力。此外,尽管在水质风险识别与评价过程中已建立水质督察和风险评估技术系统,并完善了《生活饮用水卫生标准》等供水水质标准规范体系,但其规模化应用、应急响应能力及数据有效性仍需进一步考察。根据《“十四五”全国城市基础设施建设规划》,要“加快新型城市基础设施建设,推进城市智慧化转型发展”。虽然中国水务行业对智慧化运维的探索开展较晚,但目前大中型城市已经纷纷开展了水务信息化的建设。当前数字革命已经深入各行各业,如何综合利用大数据、人工智能等智能化手段建设识别-分析-反馈的智能运维技术体系已经成为各国水务行业发展的共识^[79]。智慧运维体系的基础在于实时收集和传输水系统数据的相关信息,而现阶段的在线水质传感器仅可提供浊度、余氯、pH值、温度、压力等信息,而对于可以反映水质风险的其他指标,如溶解性有机碳、新污染物等,因缺乏可靠的传感器件而无法实现实时精准预测,极大限制了水质基础数据的可获得性^[80]。此外,设备更新所需的高昂成本和运营维护的经济负担可能会影响新技术的

普及,而公众对这些新技术的接受度也将直接关系到其实施效果。数据是模型精准的基础,因此需要研发可实时收集和传输供水系统中全流程的水质水量信息,实现对供水系统的全方位精准监测的器件及设备。虽然人工智能算法已经在供水领域得到了一定程度的应用,但是普遍存在精度偏低及泛化性差的缺点。因此,研发或优化适配处理供水系统数据信息的模型算法,改进以往基于仿真模型的供水管网漏损模型,实现对供水系统数据信息的转化分析和深入挖掘^[81],发现数据的潜在规律和特征,为优化供水策略及预警风险故障提供更为可靠的科学依据。

2019年国际水协会发表的数字水务白皮书报告中指出,国际上数字化程度较高的水务公司已逐步应用虚拟现实、大数据及人工智能技术开展水务智慧化方案制定。中国水务行业的智慧和运维近年来发展迅速,饮用水、污水和雨水系统与服务委员会(ISO/TC224)于2021年成立的智慧水务管理工作组(ISO/TC224/WG15)以中国专家团队领衔组建,并于2024年1月发布首项智慧水务国际标准《智慧水务管理-第1部分:导则》(ISO 24591-1)^[82],用于指导全球水务行业智慧化发展。

3 构建高品质饮用水技术体系的对策建议

3.1 突破水质净化新原理和新方法

现有水质净化原理和方法是建立在部分有限污染物和有限水质指标有效控制的基础之上,无法全面和深入地反映水质安全与健康风险的问题^[83]。水质安全保障的理论方法体系需要进一步完善,实现标准与效应协同控制是水质安全保障理论体系的发展方向。因此,需要开发饮用水密切相关的高风险污染物筛查分析方法,建立污染物基础数据库;突破传统单一污染物的毒性评价方法,构建综合毒性效应评价体系,逐步形成完善的水质风险的识别与评价方法理论体系。此外,还需要深入解析水质污染转化的微界面过程,明确污染物在水处理过程中分子转化机制及风险变化规律,改变传统以堆砌式流程为主的过度处理模式,构建污染物风险等级与技术工艺匹配的全流程逐级屏障控制方案,形成标准与效应协同控制的水质风险全流程阻控理论体系。

3.2 研发水质净化新材料和新工艺

新污染物在环境中不断检出,通过多种途径进入饮用水中并迁移扩散,给饮用水安全保障带来新的挑战^[84],针对新污染物的新材料和新工艺是饮用水处理的发展方向。未来深入解析不同新污染物的结构性质,优化材料界面及结构特性,增强其对特定污染物的水质净化效率,提升其在复杂水质条件下的适应能力,研发具有高选择性净水材料是提升水质净化效率的关键,如有报道发现硅改性活性炭可提升全氟化合物吸附量^[85]。在工艺方面,应改变水源污染物复杂而导致的长流程、高药耗和能耗的处理工艺,研发基于自然过程以及新型处理材料的绿色、低能耗、短流程净水工艺(如岸滤、膜滤等)是未来饮用水处理的发展趋势,例如有报道岸滤工艺对部分新污染物的去除效率可达80%以上^[86]。值得注意的是,需要关注处理过程中新污染物的代谢转化机制,解析其在不同过程中的中间产物及其转化行为,明确不同工艺中新污染物的毒性变化机制及关键风险因子,避免高毒性副产物的产生。针对不同新污染物结构性质,耦合其适配的生物、物理和化学处理技术,建立全流程的多级屏障技术体系,有效控制饮用水中新污染物的风险,为构建高品质饮用水技术体系奠定坚实基础。

3.3 构建厂网一体化供水新体系

为提升饮用水的供水服务与水质管理,构建厂网一体化供水新体系具有重要意义。该体系应结合城市发展规划与供水需求,制定中长期发展规划,明确发展目标与建设重点,以确保供水设施建设与运营管理标准的统一性。同时,根据城市供水需求及水资源分布,合理布局水厂、技术改造和管网更新,以提高供水效率并强化基础设施建设。引入物联网和大数据技术,实现供水网络的实时监测,应用人工智能等先进算法开发水处理工艺模拟器,优化处理工艺运行参数,推进智慧水务的建设。此外,在极端气候及旱涝急转等突发事件频发的情况下,应完善饮用水应急处理预案,在加快单一水源地区应急水源与备用水源建设的基础上,强化应急净水装备的技术研发,提升饮用水应急供水能力。同时,开发管网水力、水质与噪声的集成监测和智能诊断技术,明确水质劣化机制,揭示气候变化背景下水质与水量时空变化规律。利用先进技术实现净水工艺的自动调节与参数优化,推

动厂网一体化的智能低碳运行,最终有效保障饮用水的安全性与可持续性,为公众健康提供坚实基础。

3.4 推进未来水厂技术应用和示范

在美丽中国建设的背景下,中国经济社会发展正逐步向绿色化、低碳化的高质量发展阶段迈进^[1]。然而,传统集中式水处理技术已难以满足减污降碳和可持续发展的需求,因此构建高品质饮用水技术体系显得尤为重要。当下,未来水厂应以健康安全为核心,同时追求韧性化、绿色化和智慧化的发展。水质安全保障方面,需重点关注3大方向:首先,必须有效阻控病原微生物的饮水暴露风险,以确保饮水安全;其次,毒害物质的极限去除是关键措施,包括砷、碘及新污染物(如全氟化合物),这些污染物对人体健康构成严重威胁,必须依赖于先进的监测和处理技术解决;最后,消除饮用水异味,以提升水质的感官质量和公众的饮水体验。在绿色化方面,未来水厂可采用短流程和模块化的设计,以提高处理效率和灵活性。在智慧化方面,厂网一体化技术的应用将有助于实时监测和优化水质管理,实现高效的水资源利用。北京郭公庄水厂、上海临江水厂等示范项目应通过选择不同区域和类型的水厂进行技术示范,不仅积累了宝贵的数据与经验,还为全国范围内的推广提供了科学依据。同时,与地方政府和社区的合作将增强公众对饮用水安全的信任,推动社会各界共同参与饮用水安全管理。

参考文献(References)

- [1] 中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见[EB/OL]. (2024-01-11) [2024-10-08]. https://www.gov.cn/zhengce/202401/content_6925406.htm.
- [2] 习近平主持召开中央财经委员会第一次会议[EB/OL]. (2018-04-02) [2024-10-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2018-04/02/content_5279304.htm.
- [3] 邵世云, 于容朴. 供水水源存在问题及保障措施研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(4): 5-9.
- [4] 张金松, 韩小波, 靳军涛. 饮用水安全保障体系现代化的思考与实践[J]. 给水排水, 2019, 55(2): 1-3.
- [5] Zhu Y, Jiao X, Meng W, et al. Drinking water in rural China: Water sources, treatment, and boiling Energy[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(16): 6465-6473.
- [6] 全国人大常委会水污染防治法执法检查组第一次全体会议文件[R]. 北京: 全国人民代表大会, 2019.
- [7] Gokhale D, Hamelberg A F, Doyle P S. Multifunctional zwitterionic hydrogels for the rapid elimination of organic and inorganic micropollutants from water[J]. Nature Water, 2024, 2(1): 62-71.
- [8] Singh G, Patidar S K. Water quality improvement using novel attached growth systems[J]. Separation Science and Technology, 2023, 58(5): 1004-1026.
- [9] Chen Y L, Xu Z H, Dong Q, et al. Modeling the water use associated with energy consumption changes on saltwater intrusion in the Pearl River estuary, China[J]. Applied Energy, 2024, 372: 123755.
- [10] Megharaj M, Venkateswarlu K, Naidu R. Bioremediation [M]//Encyclopedia of Toxicology. Amsterdam: Elsevier, 2014: 485-489.
- [11] Jørgensen K S. In situ bioremediation[M]//Comprehensive Biotechnology. Amsterdam: Elsevier, 2011: 59-67.
- [12] Ateia M. In-situ biological water treatment technologies for environmental remediation: A review[J]. Journal of Bioremediation & Biodegradation, 2016, 7(3): 1-8.
- [13] Wu H M, Wang R G, Yan P H, et al. Constructed wetlands for pollution control[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(4): 218-234.
- [14] 范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1254-1277.
- [15] 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 等. 人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3804-3811.
- [16] 王宝玲, 王丽卿, 张玮, 等. 构筑根孔湿地夏季浮游植物群落结构特征[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 2109-2121.
- [17] Wang D, Bai Y, Qu J. The Phragmites root-inhabiting microbiome: A critical review on its composition and environmental application[J]. Engineering, 2022, 9: 42-50.
- [18] 沈亚强, 魏宏斌, 程旺大, 等. 嘉兴市石臼漾水源生态湿地运行过程中植物多样性研究[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2883-2890.
- [19] Su M, Suruzzaman M D, Zhu Y, et al. Ecological niche and in-situ control of MIB producers in source water[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 110: 119-128.
- [20] Su M, Zhu Y P, Jia Z Y, et al. Identification of MIB producers and odor risk assessment using routine data: A case study of an estuary drinking water reservoir[J]. Water Research, 2021, 192: 116848.
- [21] 顾晨. 超大城市供水系统韧性评估与应用实践: 以上海受咸潮入侵影响为例[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 1-9.
- [22] 朱宜平. 上海市水源地管理与原水系统保障实践[J]. 给水排水, 2021, 57(7): 12-19.
- [23] 张春晓, 黄廷林, 张轩, 等. 扬水曝气诱导自然混合持续改善水质效果评价[J]. 环境科学学报, 2024(10): 1-12.
- [24] 陆海明, 唐云清, 唐文忠, 等. 工程案例研究在河湖库环保清淤决策中的重要性(代序言)[J]. 环境工程学报, 2023,

- 17(12): 3843–3848.
- [25] 湛建宇, 许振成, 骆其金, 等. 应用可渗透反应墙技术修复受污染河水水质的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 5–7.
- [26] Wei K H, Ma J, Xi B D, et al. Recent progress on *in situ* chemical oxidation for the remediation of petroleum contaminated soil and groundwater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 432: 128738.
- [27] Della Rocca C, Belgiorno V, Meriç S. Overview of *in situ* applicable nitrate removal processes[J]. Desalination, 2007, 204(1/2/3): 46–62.
- [28] 林幅英, 罗智伟, 谢章彰, 等. 光合细菌*Rhodospseudomonas faecalis* JS提升细菌抑藻能力的机制研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(12): 2792–2801.
- [29] 皮晓宇, 刘凯, 王擎宇, 等. 原位微生物技术在亮马河水质提升中的应用[J]. 环境工程, 2020, 38(8): 101–104.
- [30] 魏源送, 黄炳彬, 曲丹, 等. 非常规水源补给的城市河道型水库水质改善与水生态修复专栏序言[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 1–5.
- [31] 张晓姣, 朱金格, 刘鑫. 浅水湖泊沉水植物调控技术研究进展[J]. 净水技术, 2018, 37(12): 46–51.
- [32] 陈丽娜, 黄志心, 白健豪, 等. 微纳米曝气-微生物活化技术在黑臭水体治理中的应用[J]. 给水排水, 2019, 55(12): 18–23.
- [33] Paolo C, Carlo E, Ernst B, et al. 3D dynamic model empowering the knowledge of the decontamination mechanisms and controlling the complex remediation strategy of a contaminated industrial site[J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148649.
- [34] 王梁燕, 戴商, 金妙仁, 等. 重金属污染水环境的微生物修复技术[J]. 生物工程学报, 2024, 40(10): 3427–3440.
- [35] 黄政宇, 吴霄龙, 李昂臻, 等. 原位生成铁锰复合氧化物在微絮凝/过滤工艺中除砷[J]. 中国给水排水, 2024, 40(1): 8–14.
- [36] Li Z, Qiu Y, Yu Y L, et al. Long-term operation of cathode-enhanced ecological floating bed coupled with microbial electrochemical system for urban surface water remediation: From lab-scale research to engineering application[J]. Water Research, 2023, 237: 119967.
- [37] 蔡璇. 饮用水深度处理技术研究进展及应用现状[J]. 净水技术, 2015, 34(1): 44–47.
- [38] 刘丽冰, 王希, 杨承刚, 等. 铝系混凝剂优势形态分析及其混凝特性[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4249–4262.
- [39] Zhao H, Liu H, Hu C, et al. Effect of aluminum speciation and structure characterization on preferential removal of disinfection byproduct precursors by aluminum hydroxide coagulation[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(13): 5067–5072.
- [40] 杨敏, 曲久辉. 水源污染与饮用水安全[J]. 环境保护, 2007, 35(10A): 62–64.
- [41] Ma B, Yu W, Liu H, et al. Effect of low dosage of coagulant on the ultrafiltration membrane performance in feedwater treatment[J]. Water Research, 2014, 51: 277–283.
- [42] 石宝友, 李涛, 顾军农, 等. 北方某市水源更换过程中管网黄水产生机制的探讨[J]. 供水技术, 2010, 4(4): 12–15.
- [43] 刘锐平, 曲久辉, 刘锁祥, 等. 城市供水管网的安全优化运行与污染控制[J]. 中国给水排水, 2011, 27(15): 39–43.
- [44] 习近平. 习近平著作选读: 第2卷[M]. 北京: 人民出版社, 2023.
- [45] Liu B, Huang J J, McBean E, et al. Risk assessment of hybrid rain harvesting system and other small drinking water supply systems by game theory and fuzzy logic modeling[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 134436.
- [46] Zhang X L, Wu M F, Dong H, et al. Simultaneous oxidation and sequestration of As(III) from water by using redox polymer-based Fe(III) oxide nanocomposite[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(11): 6326–6334.
- [47] Yu H, Chen H, Fang B, et al. Sorptive removal of per- and polyfluoroalkyl substances from aqueous solution: Enhanced sorption, challenges and perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2023, 861: 160647.
- [48] Hu C Z, Liu H J, Chen G X, et al. As(III) oxidation by active chlorine and subsequent removal of As(V) by Al13 polymer coagulation using a novel dual function reagent[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6776–6782.
- [49] Liu R P, Zhu L J, He Z, et al. Simultaneous removal of arsenic and fluoride by freshly-prepared aluminum hydroxide[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 466: 147–153.
- [50] 中华人民共和国水利部. 小型农村供水工程规范化提升技术规范: SL/T 825—2024[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.
- [51] 水利部: 加快推进农村供水高质量发展让城乡共饮“放心水” [EB/OL]. (2024–05–08) [2024–10–08]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202405/content_6949870.htm.
- [52] 赵志伟, 梁志杰, 李莉. 城乡统筹背景下农村供水面临的挑战与解决对策[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 1–6.
- [53] 王诗宇, 林涛. 长距离供水管网中不同水质影响下的中途补氯优化[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 209–214.
- [54] 孙滔滔, 赵鑫, 尹魁浩, 等. 水环境风险源识别和评估研究进展综述[J]. 中国水利, 2018(15): 41–44.
- [55] Khatri P, Gupta K K, Gupta R K. Raspberry Pi-based smart sensing platform for drinking-water quality monitoring system: A Python framework approach[J]. Drinking Water Engineering and Science, 2019, 12(1): 31–37.
- [56] Amrita C, Babiola D. Analysing the water quality param-

- ters from traditional to modern methods in aquaculture[J]. International Journal of Science, Environment and Technology, 2018, 7(6): 1954–1961.
- [57] 肖作为, 万文娇, 刘佳, 等. 基于车载大型设备的水质移动监测车快速检测技术在突发性水质事件中的应用及展望[J]. 净水技术, 2024, 43(8): 175–180.
- [58] 陈洁, 张立福, 张琳珊, 等. 紫外-可见光水质参数在线监测技术研究进展[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 1–9.
- [59] 朱礼鑫, 张士涛, 何苗, 等. 基于Modbus TCP的临时水质在线监测系统于供水管网上的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(8): 167–174.
- [60] 余嵩, 农晋琦. 水质检测实验室的智能化适用技术与应用[J]. 城镇供水, 2023(3): 24–27, 61.
- [61] 于瀛. 实验室检测系统在环境保护中的应用[J]. 科技视界, 2024(9): 63–65.
- [62] 河北在全国率先建成覆盖省市县三级跨界断面水质监测体系[EB/OL]. (2019–10–25) [2024–10–08]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-10/25/content_5444649.htm.
- [63] 李子怡, 钟炜. 智慧水厂能耗监测评价与异常诊断管理平台研究[J]. 给水排水, 2024, 60(2): 153–157, 166.
- [64] 顾晨. HACCP体系在上海水源地管理中的创新与应用[J]. 净水技术, 2023, 42(7): 1–7.
- [65] Hu Z K, Chen W L, Tan D B, et al. Multi-objective and risk-based optimal sensor placement for leak detection in a water distribution system[J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, 28: 102565.
- [66] Ma T, Zhao N, Ni Y, et al. China's improving inland surface water quality since 2003[J]. Science Advances, 2020, 6(1): eaau3798.
- [67] 2023年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2024, 52(11): 53–65.
- [68] Lu B, Xu Z S, Li J G, et al. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: An alternative way to remediate polluted rural rivers[J]. Ecological Engineering, 2018, 110: 18–26.
- [69] 乔啸华, 孙永利, 李鹤男, 等. 不同水生植物组合修复城市水体研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(增刊2): 80–87.
- [70] Li B H, Yin Y J, Kang L F, et al. A review: Application of allelochemicals in water ecological restoration: Algal inhibition[J]. Chemosphere, 2021, 267: 128869.
- [71] Zhang X H, Lin Y, Lin H, et al. Constructed wetlands and hyperaccumulators for the removal of heavy metal and metalloids: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 479: 135643.
- [72] 魏源送, 常国梁, 吴敬东, 等. 基于“源–流–汇”的非常规水源补给河流水质改善与水生态修复专刊序言[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 1–6.
- [73] Wu S B, Kuschik P, Brix H, et al. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review[J]. Water Research, 2014, 57: 40–55.
- [74] Chen J, Liu J R, Han S P, et al. Nontraditional biomanipulation: A powerful ecotechnology to combat cyanobacterial blooms in eutrophic freshwaters[J]. The Innovation Life, 2023, 1(3): 100038.
- [75] Chen Z Q, Zhao D, Li M L, et al. A field study on the effects of combined biomanipulation on the water quality of a eutrophic lake[J]. Environmental Pollution, 2020, 265: 115091.
- [76] 曲久辉, Hoffmann M R, 余刚. 应对新污染物挑战, 保护人类和生态健康[J]. Engineering, 2024, 10(6): 1–2.
- [77] Yang Y, Zhang X R, Jiang J Y, et al. Which micropollutants in water environments deserve more attention globally?[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(1): 13–29.
- [78] 敖秀玮, 孙文俊, 林明利, 等. 饮用水科技前沿热点与发展趋势[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 74–85, 108.
- [79] Mauro A D, Nardo A D, Bernini R, et al. On-line measuring sensors for smart water network monitoring[C]. Palermo: HIC 2018–13th International Conference on Hydroinformatics, 2018.
- [80] 刘天豪, 欧阳细莲, 程星洋, 等. 光电化学传感器在新污染物检测领域的应用[J]. 能源环境保护, 2023, 37(4): 12–19.
- [81] 蒋白懿, 牟天蔚, 李维轲, 等. 基于深度学习框架的时空联合供水管网漏损检测研究[J]. 给水排水, 2024, 60(6): 152–158.
- [82] 刘伟岩, 李鑫玮, 魏小凤, 等. 智慧水务标准现状与标准体系构建研究[J]. 给水排水, 2024, 60(10): 152–158.
- [83] 曲久辉. 饮用水处理工艺改革的方向与愿景[J]. 给水排水, 2016, 52(1): 1.
- [84] 李林云, 段宇婧, 侯捷. 饮用水中新污染物的来源、风险评估和防控治理的研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3447–3456.
- [85] Huang X, Huang J H, Wang K Y, et al. Comparison of perfluoroalkyl substance adsorption performance by inorganic and organic silicon modified activated carbon[J]. Water Research, 2024, 260: 121919.
- [86] Zhai Y J, Liu G, van der Meer W G J. One-step reverse osmosis based on riverbank filtration for future drinking water purification[J]. Engineering, 2022, 9: 27–34.

Technical challenges and countermeasures for drinking water safety under the construction goal of beautiful China

TANG Wenzhong^{1,2}, HUANG Xin^{1,2}, ZHANG Hong^{1,2}, HU Chengzhi^{1,2*}

1. Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Safe drinking water is of vital importance to people's well-being, and is also a critical constituent part of Beautiful China Initiative. This paper describes the development status of drinking water safety and security from the aspects of water source, water plant, pipeline network and risk control, summarises the important achievements in the field of drinking water safety in more than 20 years in the identification and evaluation of water quality risk, water source restoration, water purification, pipeline network transmission and distribution and rural water supply, and achieves significant breakthroughs in the localisation of monitoring equipment and the enhancement of monitoring capacity, the stabilisation of town faucet water to meet the standard, and the improvement of rural water supply quality, and creates a technical system for drinking water safety and security. It has created a technical system for drinking water safety and security, analysed the technical challenges and problems faced by the field of drinking water safety and security under the goal of building a beautiful China in the new era, such as fluctuations in water quality of the water source, the risk of new pollutants, and the degree of wisdom of the plant network to be upgraded, and put forward a breakthrough in the future of the water purification of new principles and methods, the research and development of water purification of new processes and new technologies, and construction of a high-quality drinking water technical system and the future of the development of the water plant.

Keywords beautiful China initiative; drinking water safety; ecological regulation of water sources; green water purification technology; intelligentization ●



(责任编辑 徐丽娇)