

大家之言

龚利民, 符翔, 邹苏红. 发达国家饮用水质量管理经验与对比分析[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 1-9, 22.

GONG L M, FU X, ZOU S H. Experiences and comparative analysis of drinking water quality management in developed countries[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 1-9, 22.

发达国家饮用水质量管理经验与对比分析

龚利民, 符翔*, 邹苏红

(深圳市环境水务集团有限公司, 广东深圳 518033)

摘要 【目的】 尽管我国供水系统取得了显著进展,但在供水管理、法规完善及技术创新等方面,与发达国家仍有差距,需要借鉴发达国家的成功经验。【方法】 文章系统梳理了发达国家在饮用水供应系统管理中的先进实践,重点分析了法规完善、水质管控和智能化技术在提升水质安全中的作用,为我国提供了可借鉴的路径。【结果】 发达国家通过严格立法、制定高标准的水质限值、管网保护及智能化监控等多种手段优化饮用水管理。其中,欧美国家自 20 世纪起陆续出台相关法规,并针对新污染物加强立法;通过高质量管材、智能监控和快速修复机制,有效降低管网污染与漏损率;新加坡通过 NEWater 项目和综合水管理体系确保水源多样性与水质稳定。此外,这些国家还采用人工智能技术强化水质监测和风险管理,显著提升了水质安全水平。【结论】 我国应借鉴发达国家在管网建设、维护及新污染物控制等方面的经验,进一步加强水质监控、完善法规体系、推动技术创新,逐步缩小与发达国家的差距,为保障未来饮用水安全提供强有力的支撑。

关键词 水质管理 新污染物 管网污染 技术创新 智能监控

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)02-0001-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.001

Experiences and Comparative Analysis of Drinking Water Quality Management in Developed Countries

GONG Limin, FU Xiang*, ZOU Suhong

(Shenzhen Water and Environment Group Co., Ltd., Shenzhen 518033, China)

Abstract [Objective] Although China's water supply system has made significant progress, it still lags behind developed countries in terms of supply management, regulatory frameworks, and technological innovation. There is a need to learn from the successful experiences of developed countries. [Methods] This study systematically reviews advanced practices in drinking water supply management in developed countries, focusing on the role of regulatory improvements, water quality management control, and smart technologies in enhancing water safety, providing valuable insights for China. [Results] Developed countries optimize drinking water management through strict legislation, high standards for water quality limits, pipeline protection, and intelligent monitoring. Since the 20th century, European and American countries have gradually introduced relevant regulations and strengthened legislation to address emerging contaminants. They have effectively reduced pipeline pollution and leakage rates through the use of high-quality materials, intelligent monitoring, and rapid repair mechanisms. Singapore has ensured water source diversity and water quality stability through its NEWater project and integrates water management systems. Additionally, these countries have employed artificial intelligence technologies to enhance water quality monitoring and risk management, significantly improving water safety. [Conclusion] China should draw on the experiences of developed countries in pipeline construction, maintenance, and emerging contaminant control,

[收稿日期] 2024-10-20

[作者简介] 龚利民(1969—),男,硕士,高级工程师,研究方向为城市水资源管理、水污染治理、水务设施运营管理,E-mail: gonglimin@waterchina.com。

[通信作者] 符翔(1986—),男,博士,主要从事水处理技术、智慧化模型研究工作,E-mail: fuxiang86@126.com。

further strengthen water quality monitoring, improve regulatory frameworks, and promote technological innovation. It may help narrow the gap with developed countries and provide strong support for ensuring future drinking water safety.

Keywords water quality management emerging pollutant water supply network pollution technological innovation intelligent monitoring



龚利民,高级工程师,现任深圳市环境水务集团有限公司及深圳市水务(集团)有限公司党委副书记、总裁。在城市水污染治理、供排水管理进小区、水务数字化转型等方面拥有丰富经验。近年来,积极参与深圳“十三五”水污染治理,力推正本清源、雨污分流等工作,创新提出排水管理进小区“四全”理念(即全覆盖、全链条、全环节、全过程),打造小区污水零直排,使深圳水环境质量实现历史性、根本性、整体性好转,被国务院办公厅评为重点流域水环境质量改善明显的5个城市之一,成功入选国家城市黑臭水体治理示范城市。目前,在全国率先推行供排水管理进小区一体化网格化管理,打造千家万户“水管家”新模式,同时大力实施深水云脑战略,奋力向科技创新型企业转型发展。

在中世纪的欧洲,清洁的水源极为稀缺,导致人们常常以酒代水来应对饮水需求^[1]。随着时间的推移,一些创新的水处理装置开始出现,例如意大利人发明的砂滤装置,逐渐缓解了水质问题^[2]。与之相比,我国在同一时期的供水系统则主要依赖于井水和河水,隋唐时期还通过大规模水利工程满足城市和农业用水需求,展现了早期水资源管理的智慧。进入近代,欧洲的现代供水系统迅速发展,尤其是19世纪中期的供水网络建设,奠定了现代城市供水的基础^[3]。与此同时,我国在19世纪末才开始引入现代供水系统,新中国成立后加大基础设施建设投入,改革开放后则进入快速发展阶段。随着我国经济的增长和人民生活水平的提高,社会对饮用水质量的要求日益提升。特别是在经济发达的大城市,实现高品质自来水已经成为城市供水系统的重要目标。然而,尽管我国供水系统取得了长足进步,但在供水管理、技术创新和水质监测等方面,与发达国家相比仍有一定差距,各个方面还需要借鉴国外先进国家的经验。因此,本文通过对发达国家供水系统建设和管理的对比分析,为我国建设高品质自来水提供借鉴和参考。

1 饮用水水质管理

1.1 供水系统提升

从19世纪开始,美国、法国和德国等发达国家纷纷建立了自来水厂和供水系统,至19世纪中叶,砂滤系统在这些国家的水厂都有了广泛的应用(表1)。至20世纪,氯消毒技术的应用开启了现代水处理的新篇章,推动了技术和管理水平的不断发展^[4]。同时,用以保障饮用水安全的法规和标准相继出台。各国通过制定严格的水质标准和加大供水

网络建设与维护投入,提升了供水系统的安全性和可靠性。到了20世纪末,随着技术的持续发展、供水系统不断提升和法律法规的进一步完善,众多发达国家和地区逐步实现了“自来水水质达到直接饮用标准”(又称高品质自来水),这一成就已经成为发达国家和地区的标配之一。我国的自来水发展历史同样丰富多彩,从古代利用井水和河水、隋唐时期的大规模水利工程,到19世纪末现代供水系统的引入,以及新中国成立后的基础设施投资、改革开放后的快速发展与水资源管理,再到21世纪的科技创新、南水北调工程以及可持续发展和环保理念,体现了我国供水系统的持续进步和现代化。

1.2 立法保护

发达国家通过制定严格的法律和法规来保护水源并确保自来水质量。美国在这方面的立法尤为显著,其关键法律包括1948年颁布的《联邦水污染防治法》、1972年的《清洁水法》、1974年的《安全饮用水法》和1976年的《有毒物质控制法规》^[5]。这些法律明确了国家在控制水污染和规范饮用水质量方面的目标和措施,并赋予美国国家环境保护局(Environmental Protection Agency, EPA)相应的监管权。欧洲主要国家如法国和德国也通过设立保护区和制定《水法》等措施来保护水源。法国自1964年开始立法保护水源,1992年实施的《水法》规定在自来水水源地附近设立保护区,禁止建设对水质有直接或间接影响的设施^[6]。德国于1957年颁布了《联邦水法》,不仅限定了水源污染物浓度,还要求保护水生动植物。此外,德国通过《污水缴费法》对排污单位收取费用并追究非法排污者的责任^[7]。

表 1 主要发达国家供水系统的发展历史

Tab. 1 Development History of Water Supply Systems in Major Developed Countries

时期	美国	法国	德国	澳大利亚	新加坡
19 世纪初	① 波士顿、纽约市等大城市修建了早期的供水系统,利用重力将水从远离城市的水源地引入城市 ② 一些城市供水系统由私人公司运营,建设了基础设施并收取用户费用	1802 年,巴黎建成了第一个自来水厂;1822 年,巴黎通过修建渠道将桑吉斯河的水引入城市,这是当时最大的工程之一,极大改善了城市的供水条件	柏林在 1838 年建成了首个自来水厂,通过管道将水引入城市	主要依赖于附近的河流和地下水来满足日常用水需求	开始建设基本的供水基础设施;早期的供水系统依赖于河流和地下水,供水设施相对简单
19 世纪中后期	① 19 世纪中叶,随着霍乱和伤寒等水传播疾病的暴发,公共卫生意识逐渐增强,促使政府介入供水系统的建设和管理 ② 19 世纪末,砂滤技术逐渐应用于水处理,显著提高了供水的安全性	19 世纪中叶,砂滤技术开始应用于巴黎的水处理,显著提高了水质;1870 年代,巴黎开始使用氯化消毒技术	工业革命推动了城市化进程,德国各大城市加快了供水系统的建设,采用砂滤技术提高水质	悉尼在 1850 年代建设了第一座公共水库—Botany Swamps Water Supply;1867 年建成的 Yan Yean 水库,是墨尔本的主要供水源	随着新加坡的发展,供水需求不断增加;19 世纪中叶,英国殖民政府开始建设更大规模的供水系统,包括水库和供水管道
20 世纪前中期	① 1908 年,氯化消毒技术迅速在全美推广,其后,膜过滤、臭氧消毒等新技术逐渐被引入,提高了水处理的效率和效果 ② 1914 年,美国公共卫生服务局制定了首个饮用水质量标准	① 政府开始制定饮用水质量标准 and 法规 ② 成立国家水务公司,提高供水系统的效率和覆盖范围 ③ 二战后,投资大量资金建设和升级供水系统	① 水质标准和法规 政府制定了饮用水质量标准和法规 ② 氯化消毒技术 引入氯化消毒技术 ③ 成立了多个区域供水公司,提高了供水的效率和覆盖范围	① 20 世纪初开始引入氯化消毒技术 ② 政府开始制定饮用水质量标准 and 法规,以确保供水系统的安全和卫生	① 1920 年代,麦里芝水库建成 ② 外部供水依赖 新加坡与邻国马来西亚签订了供水协议,从柔佛河引水进入新加坡
20 世纪末至今	① 1974 年,美国国会通过《安全饮用水法》,对公共饮用水系统进行全面监管,并定期向公众报告水质情况 ② 美国供水系统不断引入现代技术,如自动化控制、数据监测与分析等	① 提高水处理技术,减少水资源浪费和保护水源地 ② 作为欧盟成员国,遵守欧盟饮用水指令,对供水系统进行严格监管,确保水质达到欧盟标准	① 引入现代水处理技术,如膜过滤和臭氧消毒,进一步提高水质 ② 通过保护水源地,减少水资源浪费和提高水处理效率	① 2004 年推出《国家水计划》加强水资源管理和保护 ② 开始建设海水淡化厂,如 2006 年建成的珀斯海水淡化厂	① 成立新加坡公共事业局(PUB) 推进海水淡化技术 ② 2003 年推出了 NEWater 项目 ③ 实施严格的水资源保护和管理政策

其他发达国家的举措也较为类似,比如澳大利亚于 2004 年推出《澳大利亚饮用水指南》,并于 2007 年制定《水法》,从水源地管理、水文信息到水资源使用情况都进行了法律规定,并赋予竞争与消费者委员会(Australian Competition and Consumer Commission, ACCC)对水务费和市场的监管权^[8];新加坡参考世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的《饮用水指南》,在《环境公共健康法案》中制定了饮用水水质相关条例,对水源地进行了划界,并规定了水质要求和监控措施,明确了水质检测采样方法和水安全保障措施。新加坡的水质由 PUB 监管,定期发布《饮用水供应通告》,告知供水单位责任和违规惩罚^[9](表 2)。

研究和评估表明,发达国家的自来水质量管理实践是有效的。例如,EPA 的报告显示,美国 92% 的供水系统符合 EPA 的水质标准^[10];澳大利亚也

通过系统分析和风险评估,确保了饮用水的安全和质量^[11]。我国在立法方面相较于发达国家仍显滞后,尤其在水质管理的标准化和法规执行方面,与这些国家存在差距。尽管我国于 2002 年 8 月 29 日修订通过《中华人民共和国水法》对水源地进行了立法保护,并对水质管理提出了明确要求,但在一些细化的执行层面和法律的落实力度上仍存在一定差距。

此外,发达国家也持续关注新污染物,近年来,纷纷出台新法规或修订现有法规,以加强对新型污染物的控制(表 3)^[12-14]。

我国也在 2022 年 12 月 29 日公布了《重点管控新污染物清单(2023 年版)》(自 2023 年 3 月 1 日起施行),以应对新污染物对水环境的潜在威胁。该清单涵盖了多种新兴污染物,尤其是一些工业和农业活动中常见的有害物质,如全氟和多氟烷基物质(PFAS)、抗生素、微塑料以及药物残留物等。通过

表 2 主要发达国家/组织保护水质的法案内容和关键措施

Tab. 2 Key Legislation and Measures for Water Quality Protection in Major Developed Countries/Organizations

国家/组织	法案名称	时间	主要内容	关键措施
美国	《安全饮用水法》	1974 年 12 月 16 日	保障公共饮用水供应, 制定饮用水质量标准, 要求定期检测和报告水质	水质标准设定、风险评估、应急响应计划 (ERP)、监测和预警系统
	《清洁水法》	1972 年 10 月 18 日	恢复和维护全国水资源的完整性, 防止污染物排放	污染物排放许可制度 (NPDES)、水质标准、污染控制措施
欧盟	《欧盟饮用水指令》	1980 年 (2020 年 12 月 16 日修订)	确保欧盟公民的饮用水安全和清洁	饮用水质量标准、定期监测和报告、公众信息公开、基于风险的水安全管理
	《水框架指令》	2000 年 12 月 22 日	保护和改善水资源质量, 制定综合的水管理框架	河流域管理计划、水质目标、污染预防措施、可持续水资源利用
法国	《公共卫生法典》	1989 年 (2021 年 3 月 14 日修订)	监管公共卫生, 包括饮用水标准	严格的水质标准、定期监测和报告、源水保护和污染控制措施
德国	《饮用水条例》	1975 年 1 月 31 日 (2023 年 6 月 24 日修订)	确保德国饮用水质量	严格的水质标准、定期水质检测和报告、源水保护措施
澳大利亚	《澳大利亚饮用水指南》	2011 年 (2023 年 12 月 22 日修订)	提供饮用水质量管理框架	健康和审美标准、预防性风险管理、应急响应计划、定期监测
	《国家水务倡议》	2004 年	实现全国一致的水管理方法, 促进可持续用水和水资源保护	可持续水资源利用、流域管理、水生态系统保护
新加坡	《公共事业法》	1963 年 5 月 1 日 (1987 年 3 月 30 日修订)	监管公共事业, 包括供水安全和可靠性	水安全计划、定期监测和报告、源水保护、公众教育和宣传
	NEWater 项目	2003 年	通过再生水确保可持续和弹性的水供应	高质量再生水生产、整合入公共供水系统、严格的质量标准和监测措施

表 3 主要发达国家/组织应对新污染物的相关法案

Tab. 3 Relevant Legislation on Emerging Contaminants in Major Developed Countries/Organizations

国家/组织	法案名称	时间	主要内容
美国	《未受管制污染物监测法案 第五版》	2021 年 12 月 27 日	将 PFAS 等新型污染物纳入监测范围, 并设定更严格的健康参考标准, 以降低长期暴露的健康风险
	《安全饮用水法》(修订版)	/	要求 EPA 每 5 年发布一次未受监管污染物清单, 供公共供水系统进行监测, 新近增加了对微塑料、药物残留等潜在威胁物质的监控要求
欧盟	《欧盟饮用水指令》(修订版)	2020 年 12 月 16 日	首次引入对新兴污染物如内分泌干扰物和抗生素残留的监测要求, 并要求成员国逐步采用更高效的检测技术。同时, 指令还强调对管网铅污染的全面整治及公众对水质信息的透明度
法国	《饮用水健康安全法令》	2023 年 1 月 3 日	进一步加强对内分泌干扰物、药物残留和微塑料的监控
德国	《饮用水条例》(修订版)	2023 年 12 月 22 日	要求对抗生素、药物代谢物和 PFAS 等新污染物进行检测, 同时提高了水质限值标准, 以进一步保障居民健康
澳大利亚	《澳大利亚饮用水指南》	2023 年 12 月 22 日	引入了对有机污染物和抗生素耐药基因的风险评估, 并加大对气候变化引发的水质波动的研究和政策响应力度
新加坡	《环境公共卫生法 1987》(2020 年修订版)	2021 年 12 月 31 日	强化了饮用水的质量控制和污染应对措施。该法规明确要求定期检测和更新污染物清单, 包括新型有机污染物、重金属和微塑料, 确保饮用水符合高标准的水质安全要求

对这些新污染物的管控, 我国力图加强水质监管, 避免其在水体中的积累与扩散, 保障生态环境和公众健康。此外, 清单的发布标志着中国在水质监控体系中

迈出了重要步伐, 推动了污染源头的治理和排放标准的完善, 为进一步加强水环境治理、实现可持续发展提供了法律和政策支持。

2 饮用水质量标准

发达国家依托法案法规制定了相应的饮用水质量标准;美国通过《安全饮用水法》设定了多种污染物的限值,显著提升了水质;法国和德国依托《欧盟饮用水指令》,制定了高标准的水质限值,并通过严格的监

测和管理措施,确保水质安全;澳大利亚依据《澳大利亚饮用水指南》,采用预防性风险管理和定期监测措施,提升自来水质量;新加坡根据 WHO 的指导,制定了严格的水质标准,通过 NEWater 项目和综合水管理体系,确保高质量的饮用水供应(表 4)。

表 4 中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)与主要发达国家/组织的对比

Tab. 4 Comparison of China's Standards for Drinking Water Quality (GB 5749—2022) with Major Developed Countries/Organizations

国家/组织	标准	类型	数量	内容
中国	《生活饮用水卫生标准》 (GB 5749—2022)	微生物指标	3	总大肠菌群、大肠埃希氏菌和菌落总数
		毒理指标	18	包括重金属、氰化物、氟化物、无机盐、消毒副产物等
		感官性状和一般化学指标	16	色度、浑浊度、pH、金属元素和其他常规指标
		放射性指标	2	总 α 放射性和总 β 放射性
		消毒剂指标	4	游离氯、总氯、臭氧和二氧化氯
		扩展指标	54	反映地区生活饮用水水质特征及在一定时间内或特殊情况下水质状况的指标
美国	《国家饮用水主要法规》	微生物指标	7	隐孢子虫、贾第虫、异养菌平板计数、军团菌、总大肠菌群、浑浊度和肠道病毒
		消毒剂指标	3	氯胺、总氯和二氧化氯
		消毒副产物指标	4	溴化物、氯化物、卤乙酸和总三卤甲烷
		无机物指标	16	重金属、氰化物、氟化物、硝酸盐、亚硝酸盐和稀有金属等
		有机物指标(不含 PFAS)	53	工业化学物质、农业化学物质、苯系物、挥发性有机化合物(VOCs)和卤代化合物等
		PFAS 指标	7	PFAS 危害指数、六氟丙烯氧二聚酸(HFPO-DA)、全氟丁烷磺酸盐(PFBS)、全氟己烷磺酸(PFHxS)、全氟壬酸(PFNA)、全氟辛酸(PFOA)和全氟辛烷磺酸(PFOS)
		放射性指标	4	总 α 放射性、总 β 放射性、镭-226/镭-228、铀
欧盟	《欧盟饮用水指令》	微生物指标	2	肠球菌和大肠杆菌(<i>E. coli</i>)
		化学指标	34	包括无机物指标、有机物指标、PFAS 和一些消毒副产物指标
		指示性指标	18	氨氮、金属元素、色度、浑浊度和电导性等常规指标
		供水管网风险评估相关指标	2	军团菌和铅
德国	《饮用水条例》	微生物指标	3	大肠杆菌、肠球菌和铜绿假单胞菌
		化学指标	34	类同《欧盟饮用水指令》[Directive (EU) 2020/2184]
		指示性指标	20	
		饮用水设施相关的特殊指示参数	1	军团菌
		潜在微生物污染及相关健康风险的关键指标	1	体细胞大肠杆菌噬菌体
		放射性指标	18	包括钋、镭、铀等天然放射性核素和镭、铯、碳、钴、碘、铯等人工放射性核素
新加坡	《2019 年环境公共卫生(饮用水适用性)(第 2 号)法规》	微生物指标	1	大肠杆菌
		物理化学指标	3	色度、浑浊度和 pH
		放射性指标	3	总 α 放射性、总 β 放射性、氩-222
		化学指标	106	包括农药和除草剂、挥发性有机化合物(VOCs)、金属及其化合物、消毒副产物及相关化合物、工业化学品、感官和辅助指标化合物和微量污染物等

在制定保护水质的法规和标准时,我国主要参考了美国、欧洲、WHO、俄罗斯和日本的相关规范,遵循了与美国类似的原则,水源水质管理则遵循《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),并于2022年将《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)更新为《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),新标准对各类污染物的限值做出了严格规定,涵盖了微生物、重金属、

化学物质和有机污染物等多个方面。这一标准的修订不仅提高了水质管控要求,也响应了新污染物的控制,进一步完善了我国的饮用水质量管理体系。

在污染物限值方面,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对主要污染物的限值与这些发达国家相当,部分指标甚至接近或高于其标准。然而,在新污染物(如PFAS)的管控方面,当前标准尚未对其进行具体覆盖(表5)。

表5 中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)主要污染物限值与发达国家/组织的对比
Tab. 5 Comparison of the Limits for Major Contaminants in China's Standards for Drinking Water Quality (GB 5749—2022) with Developed Countries/Organizations

项目	中国	美国		欧盟	德国	新加坡
		目标值	限值			
总大肠杆菌/[CFU·(100 mL) ⁻¹]	0	0	0.05	0	0	0
砷/(mg·L ⁻¹)	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01
镉/(mg·L ⁻¹)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.003	0.003
铬(六价)/(mg·L ⁻¹)	0.05	0.1(总铬)	0.1(总铬)	0.025	0.025	0.05(总铬)
铅/(mg·L ⁻¹)	0.01	0	0.015	0.005	0.01	0.01
汞/(mg·L ⁻¹)	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.006(无机汞)
氰化物/(mg·L ⁻¹)	0.05	0.2	0.2	0.05	0.05	0.07
氟化物/(mg·L ⁻¹)	1	4	4	1.5	1.5	0.7
三卤甲烷	该类化合物中各种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和不超过1	/	各类的最大值都不超过0.08	三氯甲烷、三溴甲烷、二溴氯甲烷和二氯溴甲烷的浓度之和不超过0.1		该类化合物中各种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和不超过1
总氯/(mg·L ⁻¹)	3	4	4	0.25(氯酸盐)/0.25(亚氯酸盐)	0.07(氯酸盐)/0.20(亚氯酸盐)	5
二氧化氯/(mg·L ⁻¹)	0.8	0.8	0.8	0.7	0.2	0.7
PFAS/(mg·L ⁻¹)	/	Hazard Index PFAS*为1 HFPO-DA为0.000 01 PFHxS为0.000 01 PFNA为0.000 01 PFOA为0 PFOS为0	Hazard Index PFAS*为1 HFPO-DA为0.000 01 PFHxS为0.000 01 PFNA为0.000 01 PFOA为0.000 004 PFOS为0.000 004	PFAS总量为0.000 5 PFAS-20*为0.000 1	PFAS-20*为0.000 1 PFAS-4*为0.000 02	/

注: *表示美国标准中一种基于健康风险的水质目标值,是理论上的“无风险”浓度水平,对所有人群(包括敏感人群,如儿童和免疫力低下者)都没有已知或预期的健康风险;Hazard Index PFAS表示美国标准中20种PFAS化学物质的集合;PFAS-4是指包括PFOA、PFNA、PFHxS和PFOS等4种PFAS化学物质的集合。

除了国家标准之外,我国主要城市还设置了地方标准。例如,上海市出台的《生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2018)通过分析对照和研究,对国际标准中包含但我国国标未涉及的指标在地方标准中进行了部分引入,对我国国标已包含但限值要

求低于国际标准的指标在地方标准中进行了相应提升^[15]。深圳市推出的《生活饮用水水质标准》(DB4403/T 60—2020)对水质检验和水质安全管理都作出了具体规定^[16]。总而言之,除了我国整体饮用水质量标准的提升,国内发达地区也在制定自己

的标准,以更好地保护饮用水安全。这表明我国在不断学习先进经验的基础上,高度重视饮用水安全,致力于保障公众健康。

3 饮用水水质风险应对

3.1 管网污染

在应对管网污染方面,各发达国家采取了多种措施以确保供水安全和管网水质。美国过去一直面临管网中铅污染的问题,尤其是在 20 世纪 80 年代之前,许多城市的供水管网使用铅制管道,并且焊接材料中含有铅。尽管这些含铅材料已经被禁止使用,但一些老旧城区和低收入社区仍然存在水质铅超标的情况。许多地方通过更换老旧管道解决了水质污染问题,但在老城区和少数族裔聚集地区,管网更换工作仍面临经济和社会等多重挑战^[17-19],为了应对这些老旧管网改造问题,EPA 于 1991 年推出了《铅和铜规范》(Lead and Copper Rule),对水厂供水的铅和铜浓度进行限定;德国定期进行管网维护和更新,减少管道老化对水质的影响;澳大利亚通过定期管网检查和快速修复机制应对突发的管网污染问题;新加坡的 NEWater 项目和综合水管理体系通过高科技再生水处理和严格监测,确保了饮用水的高质量和可持续性。这些国家的经验为全球管网污染治理提供了宝贵的借鉴。我国的管网污染治理在近年来逐步取得了一些进展,但仍面临许多挑战。随着城市化进程的加快,许多老旧城区的供水管网面临腐蚀、漏损等问题,这些问题直接影响了水质的稳定性和安全性。为此,我国部分大城市已经开始加大对管网设施的投资,通过更换老旧管道和采用新型管材来减少管网污染的风险。此外,部分城市也开始试点智能管网管理系统,利用物联网(IoT)和传感器技术实时监控管网的运行状况,及时发现并修复漏水和污染问题。

此外,新加坡采用海水淡化和再生水技术减轻单一水源对管网的污染压力的方法也值得借鉴,而不同国家和地区在海水淡化和再生水利用方面存在显著差异(表 6),美国拥有超过 400 座海水淡化厂,尽管再生水占比仅为 6%,但其海水淡化能力领先全球。新加坡再生水占比高达 30%,尽管其仅有 3 座海水淡化厂。这一高比例再生水利用表明,新加坡在水资源管理和技术创新方面取得了显著成效。澳大利亚和我国在再生水利用方面表现出较高的重

视度,两国再生水占比均为 10%。澳大利亚拥有 6 座海水淡化厂,而我国的海水淡化厂现有海水淡化工程 156 个(截至 2023 年底),其中万 t 级及以上海水淡化工程共 55 个,千 t 级及以上、万 t 级以下海水淡化工程共 51 个。

表 6 海水淡化厂数量和再生水利用占比对比
Tab. 6 Comparison of Seawater Desalination Plant Numbers and Reclaimed Water Utilization

国家	海水淡化厂数量	再生水利用占比
美国	>400	6%
新加坡	3	30%
澳大利亚	6	10%
中国	156	10%

借鉴国际经验,我国还需要建立更加完善的管网管理制度,推进海水淡化和再生水的建设,进一步提高管网污染治理的效率和响应速度。

3.2 管网漏损

发达国家在供水管网建设和维护方面具有较长的历史和丰富的经验,整体漏损率较低,管网平均使用寿命较长(表 7)。法国和德国注重选择高质量、耐腐蚀的管材(如不锈钢、聚乙烯),并确保所有新建管网的质量能够达到长期使用标准。同时通过优化供水管网的水压,避免过高的水压导致管道破裂或泄漏。新加坡通过 PUB 实施智能管网系统,结合传感器、实时数据监测和自动化管理,实时检测水流量和水质,精准识别漏损点。利用大数据和云计算平台,分析全市供水管网的运行状况,并对潜在问题进行预警,快速反应并进行修复。在管网建设中,澳大利亚选择了适应极端气候条件的管道材料(如抗腐蚀材料),确保管网在高温、干旱等极端天气下仍能有效运行。通过实时水质监控系统 and 传感器技术,确保水质和管网状态的实时反馈,及时发现漏损和水质异常问题。美国部分地区(如纽约、加州)采用大数据分析和人工智能(AI)技术,预测管网中可能发生的漏损区域,并提前采取维护措施。结合声波探测技术和压力监测设备,实时检测管道漏水点。通过智能传感器、自动化控制和远程监控系统,全面管理和优化供水管网的运行。

我国在大城市的供水基础设施相对完善,但农村和偏远地区的供水设施仍需进一步提升,面临较高的漏损率和较短的管网使用寿命。通过学习发达国家的经验,我国可以在供水管网建设和维护方面

取得更大的进展,尤其是在降低漏损率、延长管网使用寿命和提高供水覆盖率方面。

表 7 中国与发达国家的管网情况对比

Tab. 7 Comparison of Pipeline Infrastructure between China and Developed Countries

国家	管网长度/km	漏损率	管网升级和维护投资/(美元·a ⁻¹)	供水覆盖率	管网平均使用寿命/a
美国	1 600 000	20%~25%	6 250 亿(2041 年)	87%	45
法国	850 000	约为 20%	60 亿	95%	60
德国	570 000	约为 7%	48 亿	99%	50
澳大利亚	300 000	约为 10%	22 亿	90%	50
新加坡	5 500	约为 5%	3.7 亿	100%	40
中国	1 400 000	9%~15%	150 亿(10 年内平均)	95%(城市)	30

3.3 水质安全和风险应急措施

发达国家的法案中不仅对水质安全保护作了详细规定,还包含了具体的风险应急措施。例如,美国通过《安全饮用水法》和《清洁水法》设定了最大污染物含量(maximum contaminant levels, MCLs)和处理技术(treatment techniques, TTs)的标准,同时要求建立快速反应团队和应急响应计划,以减少突发污染事件对公众健康的影响。此外,美国的《未受管制污染物监测法案 第五版》法案针对铅、PFAS 等特定污染物制定了专项工作方案,进一步确保了饮用水质量的长期稳定。欧盟则通过《饮用水指令》和《水框架指令》,明确要求成员国实施河流域管理、污染源控制和水资源保护措施,减少污染物排放,并提升公众对饮用水安全的信任度。欧盟还制定了定期水质检测和污染预警机制,确保水质标准严格执行,并通过区域合作提高跨国水源的管理效率。澳大利亚在《澳大利亚饮用水指南》中包含了水安全计划,提出了一系列综合措施,如水源保护、污染控制和水质监控,以减少水污染相关疾病的发生。同时,该水安全计划参考了国际标准,如危害分析和关键控制点(HACCP)和国际质量管理体系标准 ISO 9001,全面规范了水质管理的各个方面,涵盖水源保护、污染源管理、质量监控和应急响应等内容。新加坡则通过 PUB、NEWater 项目和综合水管理体系,采用先进的水处理技术和严格的监控手段,确保水质的高质量和持续性。新加坡的水质安全体系高度依赖实时监控、快速反应和多元化水源保障,以应对潜在的水质问题。

综上所述,发达国家通过综合性的水质管理框架,不仅加强了水质监控和污染源控制,还通过建立应急响应机制,提高了应对突发水质污染事件的能力。这些经验为我国提供了宝贵的借鉴。尽管我国

在水质风险管控方面已取得显著进展,但仍面临一些挑战,例如新污染物的监控与管控、区域水质差异、水质监测覆盖不足等问题。未来,我国需要进一步深化水质安全管理和风险应急措施,强化立法保护水质安全,提升水质治理的科学化与系统化水平。

3.4 水质安全源头控制

发达国家在水质安全保障方面,通过源头控制实施了一系列综合性措施,这些措施覆盖了法律法规、土地利用管理、技术创新以及公众参与等多个方面,体现了系统化和精细化的水源保护策略。首先,这些国家通过制定严格的法律法规,为水源保护提供了法律保障。如前所述,美国《清洁水法》从源头上规范了工业和农业污染物的排放;欧盟《水框架指令》,以流域为单位进行综合管理,协调跨国水资源的利用和保护,推动成员国之间的合作与经验共享。其次,发达国家在土地利用管理方面采取了科学合理的措施,尤其是在农业径流和工业污染控制方面。例如,欧盟通过共同农业政策(CAP),推广低影响农业实践,减少农药和化肥对水体的污染;德国和法国则通过设置水源地缓冲区,有效过滤和拦截人类活动带来的污染物,确保了水源的清洁。此外,澳大利亚通过精准的土地管理技术,依托物联网和传感器技术,对敏感水源区进行实时监控,及时发现和应对潜在污染风险。最后,发达国家还注重提升公众的环保意识和社区参与度。例如,新西兰通过教育计划和公众参与机制,将社区纳入水源保护体系,强化了全社会的共同责任感。类似地,法国和澳大利亚也通过立法鼓励公众参与水质监测和水源保护,增强了水资源管理的透明度和公众信任度。

此外,发达国家在污染源控制方面也有着严格的管理经验。例如,EPA 为工业废水设定了严格的排放标准,同时对农业径流实施精准控制措施;德国

通过严格的工业许可制度和污染物排放限制,确保了源头污染的最小化;澳大利亚通过“水安全计划”将污染源识别、风险评估和应急响应整合到统一的管理框架中,显著提高了污染控制效率。

我国可以借鉴这些经验,在水源保护方面进一步完善法律法规,推进高效的监测技术应用,特别是在智能化监控、污染物排放控制和社区参与等方面加大力度。

4 展望

随着全球水资源管理和水质保护的日益重视,水质风险管控将面临更加复杂的挑战。水质问题的多样化和管网污染治理的难度不断增加,完善相关法律法规、制定与时俱进的水质标准、提高管网水质监测能力和加强污染源控制将成为未来工作的重点。我国应特别借鉴发达国家在水质管理方面的先进经验,并通过学习这些国家在智能化监控、法规执行和管网管理方面的成功做法,来提升我国的水质管控水平。

(1) 加快制定与国际接轨的饮用水质量标准。特别是针对新污染物(如 PFAS、微塑料、药物残留)的管控标准。此外,应完善现有的水质法规体系,结合区域特征和污染源分布,制定更具有针对性的法律法规和技术标准。与此同时,我国还需建立动态更新的标准评估机制,确保法律法规能够及时响应环境变化和科技进步。

(2) 加强智能化水质监测技术的应用。利用物联网、大数据和人工智能等技术,实时监控水质变化,及时发现潜在风险,并采取相应的应对措施,从而提升水质管理的精准度和效率。特别是在实时数据收集和预测分析方面,可通过提升监测技术、增加数据共享和跨部门合作,增强水质管理的综合性和及时性。

(3) 强化水质分级分类精细化管理。在水源保护方面,尤其是在农业、工业和城市排污管控方面,可制定更加差异化的水质管理策略,特别是在农村和欠发达地区,加强水质基础设施建设和技术支持,确保全国范围内的水质安全。在管网管理方面,随着城市化的推进和管网老化问题的日益严重,建立管网维护与智能化监控体系、漏损预测系统,以及快速修复机制等智能化管网技术,优化水流压力和管理管网漏损,进一步提高供水系统的稳定性和水质

安全性。

(4) 加强水质应急能力建设。重点提升应急响应速度和效率,可针对重点区域和高风险区域组建区域化的应急响应团队,提供专业化的应急技术支持,并建立定期演练和评估机制,以确保在突发事件中能够迅速反应。此外,在污染应急处置技术方面,我国需要加快技术储备和研发力度,尤其是对于新污染物应开发针对性强、响应速度快的应急处理技术,提升污染物去除效率。最后,应注重公众参与和社会协作,强化水质安全应急管理的社会基础,逐步建立全社会参与的水质安全应急管理体系。

综上所述,未来我国在水质风险管控领域将依托技术创新、管理优化和法规完善,学习并借鉴发达国家的先进经验,构建更加智能、高效和可持续的水质管理体系。这不仅将有助于提升饮用水安全和环境保护水平,也为全球水资源管理提供中国经验和解决方案。通过强化水质监控、污染源控制、管网管理等方面的改进,我国将实现更高效的水质管理,确保公众健康和可持续环境的保障。

参考文献

- [1] MEDIEVALIST. Did people drink water in the Middle Ages? [EB/OL]. (2014-07) [2024-10-20]. <https://www.medievalists.net/2014/07/people-drink-water-middle-ages>.
- [2] TURNER R. Drinking water disinfection—A history and improved monitoring techniques[J]. *Journal of the New England Water Works Association*, 132(2): 83-89.
- [3] Water Exotic. History of tap water systems [EB/OL]. (2024-06-15) [2024-10-20]. https://waterexotic.com/history-of-tap-water-systems/#google_vignette.
- [4] Courtesy of the Chlorine Chemistry Council, American Chemistry Council. Drinking water chlorination: A review of disinfection practices and issues [J/OL]. [2024-10-20]. *Water Conditioning & Purification International Magazine*, 2006. <https://wponline.com/2006/02/27/drinking-water-chlorination-review-disinfection-practices-issues>.
- [5] PATEL A I, HECHT C E, CRADOCK A, et al. Drinking water in the United States: Implications of water safety, access, and consumption[J]. *Annual Review of Nutrition*, 2020, 40: 345-373. DOI: 10.1146/annurev-nutr-122319-035707.
- [6] Encyclopedia of the Environment. Water law in France [EB/OL]. (2019-02-11) [2024-10-20]. https://www.encyclopedie-environnement.org/en/society/water-law-in-france/#_ftn17.

(下转第 22 页)

- 96.
- LI Y B, FANG H, HAN Z S, et al. The influence of activated carbon indicators on the adsorption and removal efficiency of 2-MIB and geosmin [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41 (10): 91-96.
- [64] 高伟,王铮. O₃-BAC 工艺去除原水中典型异嗅物的效果[J]. *净水技术*, 2014, 33(s1): 44-47.
- GAO W, WANG Z. Treatment of raw water by ozone-biological activated carbon process [J]. *Water Purification Technology*, 2014, 33(s1): 44-47.
- [65] 宋欣,李燕君,黄慧,等. 臭氧-上向流 BAC 工艺对常规及新污染物的控制效果[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(3): 1-8.
- SONG X, LI Y J, HUANG H, et al. Control of conventional and emerging contaminants by ozone-upflow biological activated carbon process [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(3): 1-8.
- [66] REN X Y, WU Q D, SU J Y, et al. Efficient removal of organic matters and typical odor substances in rural drinking water using ozone-BAC-UF combined system to meet new water quality standards in China [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 327: 124899. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.124899.
- [67] HAMID A I K, SANCIOLO P, GRAY S, et al. Comparison of the effects of ozone, biological activated carbon (BAC) filtration and combined ozone-BAC pre-treatments on the microfiltration of secondary effluent [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 215: 308-316. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.01.005.
- [68] WU Q, CHEN C, SHU J, et al. Efficiency of a combined biological aerated filter and ultrafiltration process for removal of odor compounds in rural drinking water [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 342: 126991. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126991.

(上接第9页)

- [7] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Water management: Water protection policy in Germany [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.bmu.de/en/topics/water-resources-waste/water-management>.
- [8] Australia Government, Department of Agriculture, Water and the Environment. Water management policy and legislation: Commonwealth water legislation [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.agriculture.gov.au/water/policy/legislation>.
- [9] Singapore Food Agency. Drinking water quality [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.sfa.gov.sg/food-retail/drinking-water-quality/drinking-water-quality>.
- [10] United States Environmental Protection Agency. EPA at 50: Progress in providing safe drinking water [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-50-progress-providing-safe-drinking-water>.
- [11] National Health and Medical Research Council. Australia drinking water guidelines [M/OL]. [2024-10-20]. <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/australian-drinking-water-guidelines>.
- [12] European Union. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) (Text with EEA relevance) [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>.
- [13] Attorney General's Chambers. Environmental public health act 1987 [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://sso.agc.gov.sg/Act/EPHA1987>.
- [14] Australian Drinking Water Guidelines. National water quality management strategy [EB/OL]. [2023-06-05]. <https://www.waterquality.gov.au/guidelines>.
- [15] 上海市人民政府. 上海市水务局关于贯彻实施《生活饮用水水质标准》的通知 [EB/OL]. (2019-04-28) [2024-10-20]. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20200813/0001-12344-58847.html>.
- Shanghai Municipal People's Government. Shanghai Water Affairs Bureau notice on the implementation of the *Standards for Drinking Water Quality* [EB/OL]. (2019-04-28) [2024-10-20]. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20200813/0001-12344-58847.html>.
- [16] 深圳市南山区水务局. 关于印发深圳市《生活饮用水水质标准》的公示 [EB/OL]. (2020-05-07) [2024-10-20]. https://www.szns.gov.cn/nsqhsj/gkmlpt/content/7/7631/post_7631346.html#15215.
- Shenzhen Nanshan District Water Affairs Bureau. Public notice on the issuance of Shenzhen's *Standards for Drinking Water Quality* [EB/OL]. (2020-05-07) [2024-10-20]. https://www.szns.gov.cn/nsqhsj/gkmlpt/content/7/7631/post_7631346.html#15215.
- [17] HUERTA-SAENZ L, IRIGOYEN M, BENAVIDES J, et al. Tap or bottled water: Drinking preferences among urban minority children and adolescents [J]. *Journal of Community Health*, 2012, 37: 54-58. DOI: 10.1007/s10900-011-9415-1.
- [18] VIEUX F, MAILLOT M, REHM C D, et al. Trends in tap and bottled water consumption among children and adults in the United States: Analyses of NHANES 2011-16 data [J]. *Nutrition Journal*, 2020, 19: 10. DOI: 10.1186/s12937-020-0523-6.
- [19] FLEGAL K M, KRUSZON-MORAN D, CARROLL M D, et al. Trends in obesity among adults in the United States, 2005 to 2014 [J]. *The Journal of the American Medical Association*, 2016, 315: 2284-2291. DOI: 10.1001/jama.2016.6458.