

给水管网中污染物的存在形式、溯源特性及 解决方案研究现状

朱远建^{1,2}, 邓凯予³, 梁一为^{2,4}, 陈静^{1*}, 岑敬明¹, 刘晓娟¹, 陈祈安⁵, 滕文熙¹, 侯辉^{6*}

¹广西贵港北控水务有限公司, 广西 贵港

²广西南宁北控水务有限公司, 广西 南宁

³桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林

⁴广西慧水科技有限公司, 广西 南宁

⁵桂林理工大学土木工程学院, 广西 桂林

⁶桂林理工大学图书馆, 广西 桂林

收稿日期: 2026年5月18日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

给水管网作为连接水厂与用户终端的关键基础设施, 其内部污染物来源复杂、形态多样, 迁移与转化过程相互耦合, 长期以来制约着饮用水的安全供给。本文围绕管网中污染物的赋存形态展开综述, 涵盖悬浮态颗粒物、溶解态金属离子、管壁腐蚀产物、消毒副产物(DBPs)、生物膜及病原微生物等主要类型; 在此基础上, 分别沿水力模型驱动、机器学习数据驱动以及化学-生物指纹示踪三条技术路径, 对现有污染溯源方法的原理与适用条件进行了评述; 此外, 从管材更新、水力调度优化、消毒工艺协同以及在线监测预警等方面探讨了管网污染控制的可行策略。本文认为, 管网污染防控的重心应当从被动应急逐步转向主动预防, 而实现这一转变的关键在于打通从水源到用户终端各环节之间的信息壁垒, 推动监测手段、仿真模型与数据分析方法的协同融合。

关键词

给水管网, 污染物存在形式, 污染溯源, 二次污染, 消毒副产物, 生物膜, 智慧水务

Research Progress on Pollutant Occurrence Forms, Source Tracing Characteristics and Countermeasures in Water Distribution Systems

*通讯作者。

文章引用: 朱远建, 邓凯予, 梁一为, 陈静, 岑敬明, 刘晓娟, 陈祈安, 滕文熙, 侯辉. 给水管网中污染物的存在形式、溯源特性及解决方案研究现状[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(6): 1121-1132. DOI: 10.12677/aep.2026.166114

Yuanjian Zhu^{1,2}, Kaiyu Deng³, Yiwei Liang^{2,4}, Jing Chen^{1*}, Jingming Cen¹, Xiaoxian Liu¹, Qi'an Chen⁵, Wenxi Teng¹, Hui Hou^{6*}

¹Guangxi Guigang BEWG Water Co., Ltd., Guigang Guangxi

²Guangxi Nanning BEWG Water Co., Ltd., Nanning Guangxi

³College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

⁴Guangxi Huishui Technology Co., Ltd., Nanning Guangxi

⁵College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

⁶Library of Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: May 18, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

Water distribution networks (WDNs), serving as critical infrastructure connecting treatment plants to end users, are subject to complex contamination processes characterized by diverse pollutant sources, multiple occurrence forms, and coupled migration-transformation mechanisms, which have long posed challenges to the safe delivery of drinking water. This paper presents a comprehensive review of pollutant occurrence forms within distribution systems, encompassing suspended particulate matter, dissolved metal ions, pipe corrosion products, disinfection by-products (DBPs), biofilms, and pathogenic microorganisms. Building upon this foundation, the current state of contamination source identification methodologies is critically evaluated along three technical pathways: hydraulic model-driven simulation-optimization approaches, machine learning-based data-driven methods, and chemical-biological fingerprint tracing techniques, with particular attention to their underlying principles and applicable conditions. Furthermore, feasible strategies for pollution control in distribution networks are discussed from the perspectives of pipe material renewal, hydraulic scheduling optimization, synergistic disinfection process control, and online monitoring with early warning systems. This review argues that the focus of WDN contamination management should progressively shift from reactive emergency response toward proactive prevention, and that the key to achieving this transition lies in bridging the information gaps across all stages from source water to end-user taps, and in promoting the deep integration of monitoring technologies, simulation models, and data-driven analytical methods.

Keywords

Water Distribution Network, Pollutant Occurrence Forms, Contamination Source Identification, Secondary Contamination, Disinfection by-Products, Biofilm, Smart Water Management

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

饮用水安全事关民生福祉与社会稳定。经过数十年的技术积累，我国城镇水厂出厂水水质已普遍达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)的要求[1]，但用户龙头水的达标率却长期低于出厂水。这一落差的根源并非水处理工艺缺陷，而是水从水厂输送至用户末端过程中发生了复杂的物理化学与生物学变化[2] [3]。有研究统计显示，经过管网输配与二次供水设施后，出厂水合格率可下降近 20% [4]。管网本

身既是输水通道，也是一个持续运行的反应器——管壁腐蚀、消毒剂衰减、微生物再生长等过程相互叠加，构成了所谓的二次污染[5]。

联合国可持续发展目标明确提出保障可持续、充足、清洁饮用水供给的战略要求。在此背景下，管网水质安全保障已成为给水行业研究的前沿热点。Web of Science 数据库检索显示，以“drinking water distribution systems”为主题的论文已超过 7000 篇，研究热点集中在管道腐蚀、生物膜、消毒副产物和污染物检测等方面[5]。已有研究表明，管网质量劣化的成因具有多源性与交互性，单一的管龄因素或水源质量因素均不能对此作出完整解释。其本质是多类基质在特定管网条件下经历复杂赋存、迁移与转化过程的综合结果。因此，对管网污染问题的认识需要在三个递进层面上建立：首先是厘清基质在管网中的形态与赋存规律，这是问题诊断的基础；其次是发展溯源技术，实现从异常信号到污染源头的快速定位；最后是在此基础上制定有效的治理方案。本文据此组织综述结构，整体研究框架如图 1 所示。

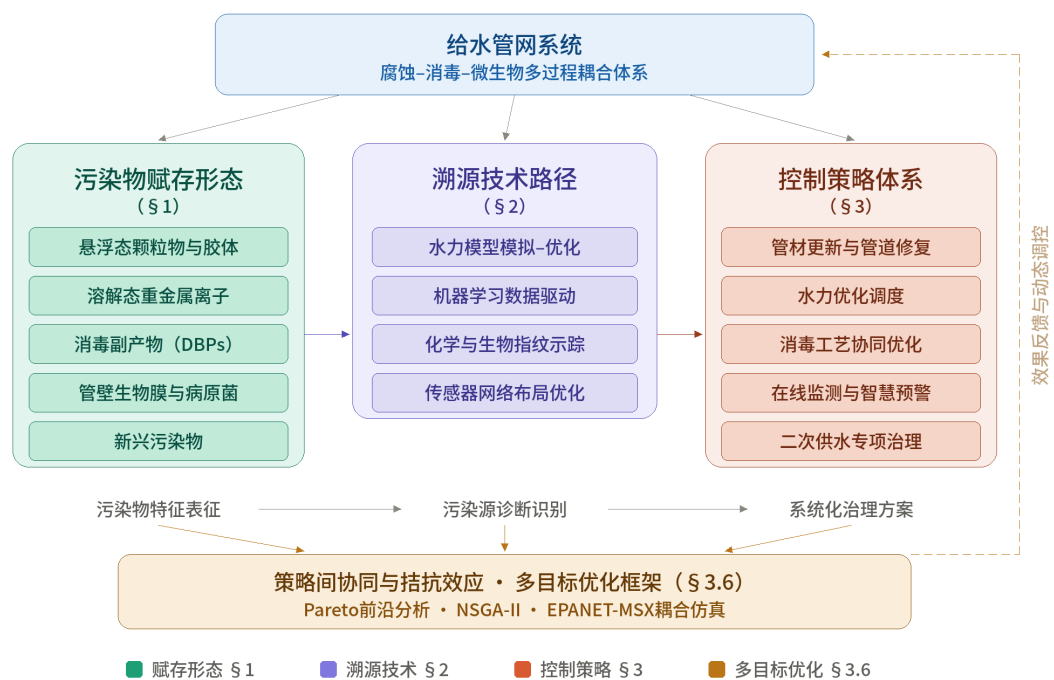


Figure 1. Research framework for contaminant occurrence, source tracing, and control in drinking water distribution networks and diagram of multi-objective optimization coupling mechanism

图 1. 饮用水分配网络中污染物赋存、溯源及控制的研究框架及多目标优化耦合机制图

2. 管网中污染物的存在形式

给水管网中的污染物不是以单一形态存在，而是呈现出物理态、化学态和生物态多重交织的复杂格局。对这些赋存形式的准确把握，是开展溯源分析和制定治理对策的认知前提。表 1 对管网中主要污染物的分类及特征进行了归纳。

Table 1. Classification and characteristics of major pollutants in pipeline networks

表 1. 管网中主要污染物分类及特征

污染物类别	典型代表物质	主要来源	关键影响因素	潜在危害
悬浮态颗粒物	α -FeOOH, γ -FeOOH, Fe_3O_4	管壁腐蚀剥落、水厂残余颗粒	水力瞬变、流速变化	浊度异常，吸附富集污染物

续表

溶解态重金属	Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , Pb ²⁺ , Cu ²⁺	管材腐蚀溶出	pH、碱度、溶解氧、消毒剂	重金属超标, 慢性健康风险
消毒副产物	THMs, HAAs, N-DBPs	消毒剂与有机前驱体反应	余氯浓度、管壁催化、水龄	致癌/致突变风险
生物膜及病原菌	Proteobacteria、Legionella 等	管壁微生物附着生长	管材、营养物、温度、消毒剂残留	水媒传染病风险
新兴污染物	微塑料、ARGs、抗生素残留	塑料管材析出、基因水平转移	管材类型、微生物群落组成	生态健康风险(评估中)

2.1. 悬浮态颗粒物与胶体

管网中悬浮态颗粒物的主要有两个来源: 水厂出水残余颗粒在低流速区段的沉积累积, 以及管道内壁腐蚀产物的剥落和再悬浮[6]。后者在工程实践中更为普遍。当管网发生水力瞬变(如阀门启闭、消火栓开启、水锤效应)时, 沉积物受冲刷而重新进入水体, 导致龙头水浊度骤升。研究表明, 铸铁管腐蚀产生的颗粒态铁氧化物(主要矿物相为 α -FeOOH、 γ -FeOOH 和 Fe₃O₄)是我国管网浊度异常的首要贡献者[7]。这些颗粒物不仅直接影响感官水质, 还具有较强的表面吸附能力, 可富集重金属、有机微量污染物甚至病原微生物, 在水力扰动时集中释放, 引发突发性水质恶化[8]。Mian 等[9]对管网颗粒物采样策略的系统评估也证实了科学设定监测频率和采样位置对掌握颗粒物动态分布的重要性。

2.2. 溶解态重金属与无机离子

管道材质腐蚀溶出是管网中溶解态重金属的主要来源[10]。铸铁管释放铁离子和锰离子, 铜管释放铜离子, 历史遗留的铅质接头和焊料则是铅溶出的主要贡献源。金属溶出速率受水化学条件显著影响: pH、碱度、溶解氧浓度、消毒剂种类与残留量、天然有机物组成等因素共同控制着腐蚀动力学过程[11]。微生物腐蚀——硫酸盐还原菌(SRB)通过胞外电子传递将管壁铁氧化物还原, 加速局部腐蚀[5]。这种化学腐蚀与微生物腐蚀的协同效应在实际管网中远比实验室模拟复杂。Chu 等对老旧建筑内部管道的调查结果显示, 铅和铜的溶出量与管材使用年限以及停水时长之间存在显著的正相关关系, 这一发现进一步说明了建筑末端管道水质管理不容忽视。

2.3. 消毒副产物

消毒副产物(DBPs)是管网水质安全中一个极为棘手的问题, 其本质上是微生物安全与化学安全之间的矛盾体。目前已鉴定的 DBPs 种类超过 800 种, 以三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)最受关注[12]。管网条件下 DBPs 的形成具有特殊性: 管壁铜腐蚀产物(CuO, Cu₂O, Cu²⁺)对次氯酸的催化分解作用显著加速消毒剂衰减, 使末端余氯不达标; 管壁生物膜中的胞外聚合物(EPS)作为富含蛋白质的有机基质, 与氯或氯胺反应后可生成含氮消毒副产物(N-DBPs), 其细胞毒性远高于传统碳基 DBPs [13]。Hua 等[14]的研究进一步证实, 管道内壁铁质沉积物不仅加速余氯衰减, 还改变了 THMs 和 HAAs 的生成比例。DiLoreto 等[15]对美国八个水厂系统的大规模调查显示, 消毒方式(氯与氯胺)和管网水力条件是决定 DBPs 时空变异性的主导因素。这些发现表明, 管壁界面反应在 DBPs 生成中扮演着关键角色, 而传统水质管理对此普遍估计不足。

2.4. 管壁生物膜与病原微生物

生物膜是管网生物态污染的核心载体。给水管网中超过 95%的微生物以附着态生物膜的形式存在于

管壁表面[16]。生物膜形成经历从初始吸附、不可逆附着、微菌落形成到成熟生物膜建立的多阶段过程[17]，受管材性质、水力条件、营养物质浓度和消毒剂残留量的共同控制。16S rRNA 基因高通量测序技术的广泛应用使研究者能更全面地解析管网生物膜群落结构——大量研究表明，Proteobacteria、Actinobacteria 和 Bacteroidetes 是管网生物膜中的优势菌门[18]。Tang 等[19]的研究系统比较了不同管材(铸铁、水泥、PVC)上生物膜群落结构和机会致病菌基因标记的差异，发现铸铁管上的致病菌基因丰度显著高于塑料管材。Ke 等[20]通过宏基因组拼接技术揭示，管网生物膜中抗生素抗性基因(ARGs)组成呈现显著的季节性变化，Pseudomonas 属是主要的初始定殖者。

生物膜问题难以根治的根本原因在于其强大的自我保护机制——EPS 基质提供物理屏障阻隔消毒剂渗透，群体感应信号调控生物膜结构和代谢状态[21]。常规管网冲洗虽能暂时减少生物膜量，但残余基层生物膜会迅速恢复。因此，生物膜治理的重心不应仅放在杀灭层面，更应关注抑制其恢复的策略。

2.5. 新兴污染物

微塑料、ARGs 和抗生素残留等新兴污染物在给水管网中的检出日益受到关注。Fan 等[22]的研究通过超高分辨率质谱和宏基因组学联合分析表明，塑料管材(PVC, PPR, PE)的有机物析出可为微生物提供碳源，诱导机会致病菌和 ARGs 的富集。Erdei-Tombor 等[17]总结了不同管材表面生物膜的形成差异及耐氯菌的富集规律。宏基因组研究显示，管网生物膜是 ARGs 的重要储存库，水平基因转移频率显著高于悬浮态群落[20][23]。这些发现提示，管网水质安全的内涵正从传统理化指标和微生物指标向更广泛的生态健康风险评估方向拓展。

3. 管网污染溯源的技术路径与特性

污染溯源的核心任务是在检测到管网水质异常后，快速准确地定位污染源位置、注入时间、污染物种类与浓度。该问题在数学上本质是逆问题(inverse problem)，求解难度远大于正向水质模拟[24]。近年来，溯源方法大致沿三条技术路径发展。三条路径的综合比较见表 2。

Table 2. Comparison of technical approaches for pollution source tracing in pipeline networks

表 2. 管网污染溯源技术路径比较

比较维度	水力模型驱动	机器学习数据驱动	化学/生物指纹示踪	发展趋势
核心原理	正向模拟 + 优化反演	从监测数据学习传播模式	污染物组成特征解析	物理 - 数据融合框架
数据需求	管网拓扑、水力参数	大量传感器时序数据	水样实验室分析	多源异构数据集成
时效性	中等(受计算量限制)	较快(训练后可实时推断)	较慢(分析周期长)	向实时化发展
主要优势	物理机理明确，可解释性强	不依赖精确物理模型	可识别污染物种类来源	互补优势整合
主要局限	精度依赖模型参数准确性	训练数据多为仿真模拟	成本高，不适合实时应用	标准化方法尚未建立
适用场景	GIS 数据较完善的管网	传感器密集部署区域	事后归因与来源调查	综合性智慧管网平台

3.1. 基于水力模型的模拟 - 优化方法

此类方法利用 EPANET 等管网水力 - 水质模拟软件构建正向模型，通过优化算法反复调整污染源参数(位置、时间、浓度)，使传感器处模拟值与实测值的误差最小化[24][25]。早期多采用遗传算法、粒子群算法等启发式方法，但管网规模增大后搜索空间呈指数增长，计算效率成为瓶颈。Grbčić 等[26]提出将随机森林与仿真优化耦合的方法，利用机器学习预筛选缩小搜索空间。Alnajim 和 Abokifa [27]引入贝叶

斯优化框架,通过构建显式获取函数平衡探索与利用,仅需少量目标函数评估即可收敛至近最优解。Qian 等[28]提出深度学习引导的进化算法(DLGEA),显著提升了大规模管网溯源的计算效率。

然而,基于水力模型的溯源方法存在一个根本性假设:管网拓扑结构和水力参数是已知且准确的。实际工程中,这一假设往往难以满足——许多城市的管网 GIS 数据更新滞后,阀门状态信息不完整,用水模式存在显著时空变异[29]。模型输入的不确定性会直接传导到溯源结果中。因此,将模型校核与不确定性量化纳入溯源框架,是提高其工程实用性的关键。

3.2. 基于机器学习的数据驱动方法

数据驱动方法绕开对精确水力模型的依赖,直接从传感器监测数据中学习污染物传播模式来推断污染源信息。Li 等[30]利用生成对抗网络(GAN)融合多站点多参数水质时序数据,实现了对管网污染事件的实时检测,其空间特征提取能力优于传统方法。CNN 和图神经网络(GNN)能更好地捕捉管网空间拓扑与时序特征的耦合关系,在大规模管网中展现出较强的泛化能力[24]。Eliades 等[31]对管网污染事件诊断方法进行了全面综述,指出异常检测技术在饮用水管网中的应用前景广阔。

然而,数据驱动方法在管网溯源领域面临一个根本性挑战:数据的稀疏性与明显不足。真实的管网污染事件极为罕见且不可重复,现有研究的训练数据几乎全部来自 EPANET 等软件的模拟仿真,模型在面对真实事件时的迁移性,问题表现在三个方面:首先,仿真场景对管网水力参数的简化假设(如需求量模式固定、管壁均匀度一致)导致生成数据与真实工况存在系统性偏差;其次,管网运行数据中污染事件样本与正常样本之间存在过度的类不平衡,常规分类模型很容易对大多数分类过度而忽略需要真正识别的少数类(即污染事件);第三,传感器数据首先得包含噪声、缺失和致命,而大多数模型在开发阶段未充分考虑这些数据质量问题——在仿真数据上预训练模型后,用少量真实数据进行偏差;以及数据增强距离策略——利用 GAN 生成配制的辐射场景来增强训练集。但这些方法目前仍处于概念验证阶段,工程应用尚有距离。

另一个否定数据驱动方法在管网质量管理中实际部署的关键障碍是模型可解释性不足。深度学习模型(CNN, LSTM, GNN 等)通常被视为“黑箱”——管网管理员无法理解模型做出源判断的内在逻辑,在涉及公共安全的决策场景中难以接受。近年来,可解释人工智能(Explainable AI, XAI)这项技术的发展因此提供了可能的解决方案。SHAP (Shapley Additive Explanations, 沙普利加法性解释)方法可以定量输入特征(如不同监测节点的余氯、混浊度数据)对模型输出的边际贡献,帮助管理者理解“哪些传感器信号对溯源结论起决定性作用”。注意力机制(attention)然而,可解释性与模型性能之间往往权衡——过度追求可解释性可能会牺牲复杂模型的预测精度,如何在两者之间取得平衡仍然是问题。

更便捷的技术路线等于物理模型与数据驱动方法深度融合,构建物理信息增强的机器学习框架。这种融合并不是简单的模型架构,而是在网络架构和损失功能方面嵌入物理约束。物理知识引导的神经网络(Physics-Informed Neural Networks, PINNs)将管网质量模型的控制方程(如对流反应方程)作为损失函数的正化项,使神经网络的预测在满足数据重复的同时不违反基本物理逻辑,从而在数据稀疏条件下显着提升模型的泛化能力和物理一致性。最新研究表明,分层物理神经网络(Hierarchical PINN, HPINN)通过构建全局物理模型与管段级迁移学习的层次结构,在 40 管段管网中实现了 0.24%的平均绝对百分比投影,显着优于传统 BP、SVM 和 LSTM 模型。时空图物理信息神经网络(ST-GPINN)则进一步将 GNN 的图结构表达能力与 PINN 的物理约束相结合,通过虚拟节点离散化提升空间分辨率,在 920 节点的大规模真实管网中余氯集中度预测的 R^2 达到 98.91%。这些进展表明,物理-数据融合框架正从理论走向实用,但其在多节点协同预测、非导致工况适应以及跨管网泛化方面的能力仍需进一步验证。

纯粹的数据驱动方法在管网溯源领域很难独立发挥作用——训练数据通常来自仿真而非真实污染事

件, 模型迁移性存疑。更可行的路线是将物理模型与数据驱动方法耦合, 构建物理信息增强的机器学习框架, 用物理约束引导模型学习方向[32]。

3.3. 基于化学指纹与生物标志物的示踪方法

化学指纹和生物标志物方法从污染物组成特征出发进行来源解析。荧光光谱(EEM)结合平行因子分析(PARAFAC)可快速区分管网中不同来源的溶解性有机物[33]。稳定同位素分析($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 等)为有机污染物来源判别提供独立于浓度的指示信息。宏基因组和宏转录组手段可通过解析微生物群落组成及功能基因谱识别特定污染指示种[20][34]。这类方法的独特价值在于能回答污染物从何而来, 弥补了水力模型在种类识别上的不足。但其分析周期较长、成本较高, 更适合事后归因调查。如何实现化学指纹的快速现场检测, 是该方向的关键突破口。Su 等[35]提出基于样品过滤的终端水质智能分析方法, 将仪器检测与智能算法结合, 为管网末端水质快速评估提供了新思路。

3.4. 传感器网络布局优化

溯源方法性能高度依赖传感器的数量与空间分布。传感器布局优化本质是组合优化问题——在预算约束下选择管网中有限节点安装水质传感器, 使检测覆盖率或溯源精度最优[36]。Palma 等[37]提出基于加权拓扑分析的监测系统设计方法, 可综合考虑管道破裂引发的低压入侵风险。最新研究开始将管网分区计量(DMA)与传感器布局优化结合——在独立计量区域入口和关键节点部署传感器, 既降低投资又利用 DMA 水力隔离特性缩小溯源搜索范围[38]。

4. 管网污染控制的系统性解决方案

认识污染物的存在形式是知其然, 掌握溯源技术是知其所以然, 而制定并实施有效的解决方案才是最终目的。管网污染控制不应是零散技术措施的拼凑, 而应构建从源头防控到末端保障、从日常管理到应急响应的系统性框架。

4.1. 管材更新与管道修复

管材劣化是管网二次污染的物质基础。对腐蚀严重的老旧铸铁管和镀锌钢管, 有计划地更换为球墨铸铁管、不锈钢管或适宜的塑料管材(如 PE100、PVC-O)是根本解决方法。但大规模管道更新面临资金压力大、施工周期长的现实制约。非开挖修复技术(紫外光固化内衬、水泥砂浆内衬和环氧树脂喷涂等)可在不开挖路面的前提下恢复管道内壁防腐性能。需要指出的是, 管材选择并非塑料一定优于金属那么简单——Fan 等[22]的研究表明, PVC 管在使用初期释放氯乙烯单体和增塑剂等有机物质, 这些析出物不仅影响水质, 还可能成为管壁微生物生长的碳源, 引发化学-微生物级联风险。因此, 管材选型须综合考虑水源水质、管网水力条件和当地气候环境等因素。

4.2. 水力优化调度

水力条件是影响管网水质的关键因素。水龄过长是导致余氯衰减、微生物再生长和 DBPs 累积的直接原因[39]。通过优化泵站调度、调整阀门开度、合理设置水池运行水位, 可有效降低管网末梢水龄。定期冲洗是清除沉积物的常规手段。研究表明, 单向冲洗(UDF)比双向冲洗能更有效清除管壁沉积物[40], 且重复冲洗可对管壁生物膜施加有利的选择压力。但冲洗只能治标——如果不解决水龄过长和余氯不足的根本问题, 沉积物和生物膜会在冲洗后迅速恢复。管网分区计量(DMA)的推广为精细化管理提供了基础平台[38]。DMA 不仅是漏损管理工具, 更应作为水质管理的基本单元——在 DMA 入口安装多参数水质在线监测仪, 将水力数据与水质数据实时关联分析, 可大幅提高异常发现速度与溯源精度。

4.3. 消毒工艺的协同优化

管网消毒是平衡微生物安全与化学安全的关键环节。单一消毒工艺各有局限：氯消毒持久性差且 THMs 生成量高，氯胺消毒虽 DBPs 较低但对硝化菌抑制不足[41]。Oliveira 等[21]对管网生物膜消毒策略的系统综述指出，臭氧/氯和紫外/氯等联合消毒策略通过前端强氧化降解有机前驱体、后端投加余氯维持管网残留量，在控制 DBPs 的同时兼顾微生物安全。Shi 等[42]发现不同缓蚀剂条件下生物膜表面的余氯衰减速率存在显著差异。消毒策略的选择必须与管网实际条件匹配——更务实的做法是结合水力模型和水质衰减模型，针对不同管段制定差异化投加方案：短水龄主干管减少投加以控制 DBPs，长水龄末梢区域增设补氯点以维持微生物安全。这种精准消毒理念尚处于探索阶段，但已展现良好前景[42]。

4.4. 在线监测与智慧预警体系

传统管网水质管理依赖人工采样和实验室分析，数据获取滞后且覆盖面有限。多参数水质传感器的小型化和低成本化使管网关键节点的连续监测成为可能。物联网通信技术将分散传感器数据实时汇集至云平台，结合机器学习算法实现异常事件自动检测。智慧水务平台通过整合 SCADA 系统、GIS 管网模型、水力-水质仿真引擎和数据分析模块，可实现从异常检测到应急决策的全链条智能化响应[43]。部分先行城市已在实践中取得初步成效——如通过 AI 算法联合分析管网流量、压力和水质在线数据，实现漏损与水质异常的协同预警。但坦率地说，目前国内多数智慧水务平台仍处于数据采集多、智能分析少的阶段，数据的深度利用和跨系统协同决策能力有待提升。

4.5. 二次供水系统的专项治理

高层建筑日益普及的背景下，二次供水系统(含蓄水池、加压泵组和楼内立管)已成为管网末端水质安全的薄弱环节。水箱中停留时间远大于管网主干水龄，余氯衰减快，微生物再生长风险高[8]。Lee [44]对韩国住宅终端设施的调查显示，淋浴喷头和水龙头生物膜中检出了多种条件致病菌。解决思路应包括：推广无负压供水设备减少蓄水环节、强化水箱定期清洗消毒、在水箱出水管设置紫外消毒或微量补氯装置，以及将二次供水设施纳入供水企业统一管理。

4.6. 控制策略间的协同与拮抗效应及多目标优化思路

上述各项控制策略在单独实施时各具优势，但在实际管网管理中往往需要同时兼顾多个目标，不同策略之间存在显著的协同效应与拮抗冲突，对相关交互作用缺乏充分考量，可能导致问题治理过程中出现风险转移与负效应外溢现象，从而造成新的治理困境。

首先，消毒强化与腐蚀控制之间存在本质矛盾。提高余氯浓度或采用游离氯消毒虽可增强对管壁生物膜的抑制效果，但强氧化性消毒剂同时加速铸铁管和铜管的电化学腐蚀，导致铁、铜、铅等重金属溶出量增加，而腐蚀产物的释放又反过来催化消毒剂衰减并改变 DBPs 的生成比例。磷酸盐缓蚀剂的投加虽可抑制金属溶出，但 Shi 等的研究表明不同缓蚀剂对生物膜表面余氯衰减速率的影响存在显著差异，说明腐蚀控制措施可能改变消毒效能。这种“消毒-腐蚀-DBPs”三角矛盾是管网水质管理中最具代表性的多目标冲突。

其次，管材更新策略面临挑战。以塑料管材替换腐蚀严重的金属管可消除重金属溶出问题，但 Fan 等[22]的研究揭示 PVC、PPR 等塑料管材在使用初期会析出有机物，为管壁微生物提供碳源，诱导机会致病菌和抗生素抗性基因的富集，这意味着解决了化学腐蚀问题的同时可能加剧了生物安全风险。管材选型因此不能遵循简单的“塑料优于金属”逻辑，而需要根据具体水源水质和管网水力条件进行权衡。

第三，水力调度优化与生物膜控制之间的关系并非单一正向。管网冲洗可短期降低沉积物量和浊度，但水力扰动同时可能促使生物膜碎片脱落并向下游扩散，引发下游管段的微生物二次污染。此外，2.4 节

已指出残余基层生物膜在冲洗后可迅速恢复,这意味着单纯依赖水力手段无法实现生物膜的持久控制,必须与消毒策略协同配合。

上述多重矛盾表明,管网污染控制本质上是一个多目标优化问题——需要在微生物安全、化学安全(重金属与DBPs)、管材寿命、运行成本等相互竞争的目标之间寻求最优折衷。借鉴其他领域的成功经验,建议未来研究引入多目标优化框架(如Pareto前沿分析、NSGA-II等多目标进化算法),将消毒剂投加量、缓蚀剂类型与浓度、冲洗频率与流速、管材选型等决策变量纳入统一的优化模型,以余氯达标率、DBPs生成总量、重金属溶出浓度和运行成本等作为同步优化的目标函数。水力-水质耦合仿真模型(如EPANET-MSX)可为这一框架提供机理支撑,而3.2节讨论的机器学习代理模型则可加速多目标优化的求解过程,使其具备工程实用性。

不同策略之间也存在积极的协同效应可供利用。例如,DMA分区管理不仅降低水龄,也为差异化消毒投加和精准传感器布局提供了空间框架;智慧水务平台所整合的实时监测数据则为多目标优化模型提供了动态反馈机制,使管理策略可根据管网实际状态进行自适应调整。因此,构建跨策略、跨环节的系统级协同优化框架是必然方向。

5. 研究展望

回顾近年来管网污染物研究的进展,以下几个方向值得持续关注。第一,建立覆盖水源、管网到用户终端的全链条水质风险管控体系。当前各环节之间缺乏信息贯通和协同响应机制,未来应以数字孪生技术为支撑,构建全流程水质模拟与预测模型。第二,推动管网污染物的多维度协同溯源。将传感器浓度时间序列、SCADA运行数据、化学指纹与微生物分子标记纳入统一贝叶斯推理框架,可显著提高溯源结果的可靠性。第三,重视管网条件下新兴污染物的生态健康风险。微塑料、ARGs、内分泌干扰物在管网中的行为规律尚不明确,传统水质标准体系也尚未将其纳入。第四,加强管网生物膜的原位控制技术研发。新型抗生物膜策略(如群体感应淬灭剂、噬菌体、纳米材料涂层等)虽在实验室层面效果良好,但工程转化仍面临成本与安全性挑战。第五,数据驱动技术与物理模型的深度融合——如何从海量监测数据中提取有价值的水质信息,如何用数据校正物理模型的不确定性,将在很大程度上决定管网智慧化管理的实际水平。第六,发展面向管网多目标管理的决策优化方法。现有控制策略的研究多在目标下独立评价,缺乏对策略间关系交互效应的系统分析。未来应建立包含消毒、腐蚀控制、水力调度、管材选型等多决策指标的联合优化模型,利用Pareto优化方法量化各目标之间的权衡,为管网管理者提供科学的决策支持工具。

6. 结语

给水管网中的污染物以物理态、化学态和生物态相互交织的形式存在,其来源涵盖管材腐蚀溶出、消毒反应副产物、管壁微生物代谢释放以及外源性入侵等多个方面。污染溯源技术从基于水力模型的模拟-优化方法发展到数据驱动方法,再到化学指纹和分子生物学综合示踪,正朝着更快速、更精准、更多维的方向演进。污染控制策略需从管材更新、水力优化、消毒协同和智慧监测等多个层面系统推进。管网水质安全保障的终极目标不是在污染发生后亡羊补牢,而是建立一套能够防患于未然的主动式风险管理体系。这套体系的建立,既需要深化对管网内复杂过程的基础认知,也需要推动监测、模型与决策方法的迭代升级,更需要正视不同控制策略之间的良好与严格抗关系,在多目标优化的框架下寻求系统最优解,打通各管理阶段的壁垒,实现数据共享与良好管控。

致 谢

本文受中央引导地方科技发展资金项目“桂科ZY24212055”的资助支持。

参考文献

- [1] 陈文秀, 安伟, 杨敏. 《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)中高氯酸盐指标及限值的制定思路[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3468-3473.
- [2] Liu, G., Zhang, Y., Knibbe, W., Feng, C., Liu, W., Medema, G., *et al.* (2017) Potential Impacts of Changing Supply-Water Quality on Drinking Water Distribution: A Review. *Water Research*, **116**, 135-148. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.031>
- [3] Douterelo, I., Husband, S., Loza, V. and Boxall, J. (2016) Dynamics of Biofilm Regrowth in Drinking Water Distribution Systems. *Applied and Environmental Microbiology*, **82**, 4155-4168. <https://doi.org/10.1128/aem.00109-16>
- [4] Zhou, Q., Bian, Z., Yang, D. and Fu, L. (2023) Stability of Drinking Water Distribution Systems and Control of Disinfection By-Products. *Toxics*, **11**, Article 606. <https://doi.org/10.3390/toxics11070606>
- [5] Wang, Z., Yang, X., Fu, L. and Li, M. (2025) A Review of Secondary Contamination of Drinking Water Quality in Distribution Systems: Sources, Mechanisms, and Prospects. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, **74**, 118-141. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.284>
- [6] Sun, H., Shi, B., Bai, Y. and Wang, D. (2014) Bacterial Community of Biofilms Developed under Different Water Supply Conditions in a Distribution System. *Science of The total Environment*, **472**, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.017>
- [7] Sarin, P., Snoeyink, V.L., Bebee, J., Jim, K.K., Beckett, M.A., Kriven, W.M., *et al.* (2004) Iron Release from Corroded Iron Pipes in Drinking Water Distribution Systems: Effect of Dissolved Oxygen. *Water Research*, **38**, 1259-1269. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.022>
- [8] Zhang, H., Liu, S., Chang, S. and Liu, Y. (2022) Corrosion Inhibition of Iron Pipes in Drinking Water Distribution Systems by a Nitrate-Reducing Bacterium with Varied Nitrate Concentrations. *Desalination and Water Treatment*, **271**, 16-26. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28738>
- [9] Mian, H.R., Hu, G., Hewage, K., Rodriguez, M.J. and Sadiq, R. (2021) Drinking Water Quality Assessment in Distribution Networks: A Water Footprint Approach. *Science of the Total Environment*, **775**, Article ID: 145844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145844>
- [10] Agatemor, C. and Beauchemin, D. (2011) Matrix Effects in Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: A Review. *Analytica Chimica Acta*, **706**, 66-83. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.08.027>
- [11] Videla, H.A. and Characklis, W.G. (1992) Biofouling and Microbially Influenced Corrosion. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **29**, 195-212. [https://doi.org/10.1016/0964-8305\(92\)90044-o](https://doi.org/10.1016/0964-8305(92)90044-o)
- [12] Boorman, G.A. (1999) Drinking Water Disinfection Byproducts: Review and Approach to Toxicity Evaluation. *Environmental Health Perspectives*, **107**, 207-217. <https://doi.org/10.1289/ehp.99107s1207>
- [13] Zheng, S., Lin, T., Chen, H., Zhang, X. and Jiang, F. (2023) Characterization of Young Biofilm Morphology, Disinfection Byproduct Formation Potential and Toxicity of Renewed Water Supply Pipelines by Phosphorus Release from Corroded Pipes. *Science of the Total Environment*, **884**, Article ID: 163813. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163813>
- [14] Hua, P., Gao, Q., Wang, Z., Jiang, S., de Oliveira, K.R.F. and Macedo, D.O. (2021) Modeling and Elucidation the Effects of Iron Deposits on Chlorine Decay and Trihalomethane Formation in Drinking Water Distribution System. *Water Research*, **207**, Article ID: 117804. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117804>
- [15] DiLoreto, S., He, H., Yang, J., Milne, P., Li, J., Impellitteri, C.A., *et al.* (2025) Identification of Factors Influencing Variability in Disinfection Byproducts and Their Toxicity in Chlorinated and Chloraminated Drinking Water Distribution Systems across the United States. *Environmental Science & Technology*, **60**, 1241-1252. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c12121>
- [16] Fish, K.E. and Boxall, J.B. (2018) Biofilm Microbiome (re)growth Dynamics in Drinking Water Distribution Systems Are Impacted by Chlorine Concentration. *Frontiers in Microbiology*, **9**, Article 2519. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02519>
- [17] Erdei-Tombor, P., Kiskó, G. and Taczman-Brückner, A. (2024) Biofilm Formation in Water Distribution Systems. *Processes*, **12**, Article 280. <https://doi.org/10.3390/pr12020280>
- [18] Calero Preciado, C., Soria-Carrasco, V., Boxall, J. and Douterelo, I. (2022) Climate Change and Management of Biofilms within Drinking Water Distribution Systems. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, Article 962514. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.962514>
- [19] Tang, W., Li, Q., Chen, L., Zhang, W. and Wang, H. (2021) Biofilm Community Structures and Opportunistic Pathogen Gene Markers in Drinking Water Mains and the Role of Pipe Materials. *ACS ES&T Water*, **1**, 630-640. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00137>

- [20] Ke, Y., Sun, W., Chen, X., Zhu, Y., Guo, X., Yan, W., *et al.* (2023) Seasonality Determines the Variations of Biofilm Microbiome and Antibiotic Resistome in a Pilot-Scale Chlorinated Drinking Water Distribution System Deciphered by Metagenome Assembly. *Environmental Science & Technology*, **57**, 11430-11441. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01980>
- [21] Oliveira, I.M., Gomes, I.B., Simões, L.C. and Simões, M. (2024) A Review of Research Advances on Disinfection Strategies for Biofilm Control in Drinking Water Distribution Systems. *Water Research*, **253**, Article ID: 121273. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121273>
- [22] Fan, M., Wang, Z., Yao, M., Li, X., van der Meer, W., Tao, Y., *et al.* (2025) Unveiling Chemical-Microbial Cascade Risk Factors from Plastic Pipe Leaching in Drinking Water. *Environmental Science & Technology*, **59**, 22887-22900. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c10244>
- [23] Potgieter, S., Dai, Z., Havenga, M., Vosloo, S., Sigudu, M., Pinto, A., *et al.* (2021) Reproducible Microbial Community Dynamics of Two Drinking Water Systems Treating Similar Source Waters. *ACS ES&T Water*, **1**, 1617-1627. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00093>
- [24] Gong, J., Guo, X., Yan, X. and Hu, C. (2023) Review of Urban Drinking Water Contamination Source Identification Methods. *Energies*, **16**, Article 705. <https://doi.org/10.3390/en16020705>
- [25] Palma, L., Hatam, F., Di Nardo, A. and Prévost, M. (2024) Contaminations in Water Distribution Systems: A Critical Review of Detection and Response Methods. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, **73**, 1285-1302. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.125>
- [26] Grbčić, L., Kranjčević, L. and Družeta, S. (2021) Machine Learning and Simulation-Optimization Coupling for Water Distribution Network Contamination Source Detection. *Sensors*, **21**, Article 1157. <https://doi.org/10.3390/s21041157>
- [27] Alnajim, K. and Abokifa, A.A. (2024) Bayesian Optimization for Contamination Source Identification in Water Distribution Networks. *Water*, **16**, Article 168. <https://doi.org/10.3390/w16010168>
- [28] Qian, K., Jiang, J., Ding, Y. and Yang, S. (2021) DLGEA: A Deep Learning Guided Evolutionary Algorithm for Water Contamination Source Identification. *Neural Computing and Applications*, **33**, 11889-11903. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05894-y>
- [29] Berglund, E.Z., Pesantez, J.E., Rasekh, A., Shafiee, M.E., Sela, L. and Haxton, T. (2020) Review of Modeling Methodologies for Managing Water Distribution Security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **146**, 1-23. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001265](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001265)
- [30] Li, Z., Liu, H., Zhang, C. and Fu, G. (2023) Generative Adversarial Networks for Detecting Contamination Events in Water Distribution Systems Using Multi-Parameter, Multi-Site Water Quality Monitoring. *Environmental Science and Ecotechnology*, **14**, Article ID: 100231. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100231>
- [31] Eliades, D.G., Vrachimis, S.G., Moghaddam, A., Tzortzis, I. and Polycarpou, M.M. (2023) Contamination Event Diagnosis in Drinking Water Networks: A Review. *Annual Reviews in Control*, **55**, 420-441. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.011>
- [32] Sun, L., Yan, H., Xin, K. and Tao, T. (2019) Contamination Source Identification in Water Distribution Networks Using Convolutional Neural Network. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 36786-36797. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06755-x>
- [33] Yang, L., Shin, H. and Hur, J. (2014) Estimating the Concentration and Biodegradability of Organic Matter in 22 Wastewater Treatment Plants Using Fluorescence Excitation Emission Matrices and Parallel Factor Analysis. *Sensors*, **14**, 1771-1786. <https://doi.org/10.3390/s140101771>
- [34] Chan, S., Pullerits, K., Keucken, A., Persson, K.M., Paul, C.J. and Rådström, P. (2019) Bacterial Release from Pipe Biofilm in a Full-Scale Drinking Water Distribution System. *npj Biofilms and Microbiomes*, **5**, Article No. 9. <https://doi.org/10.1038/s41522-019-0082-9>
- [35] Su, Z., Liu, T., Men, Y., Li, S., Graham, N. and Yu, W. (2022) Understanding Point-Of-Use Tap Water Quality: From Instrument Measurement to Intelligent Analysis Using Sample Filtration. *Water Research*, **225**, Article ID: 119205. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119205>
- [36] He, G., Zhang, T., Zheng, F. and Zhang, Q. (2018) An Efficient Multi-Objective Optimization Method for Water Quality Sensor Placement within Water Distribution Systems Considering Contamination Probability Variations. *Water Research*, **143**, 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.041>
- [37] Palma, L., Hatam, F., Di Nardo, A. and Prévost, M. (2025) Design of Monitoring Systems for Contaminant Detection in Water Networks under Pipe Break-Induced Events. *Sensors*, **25**, Article 5320. <https://doi.org/10.3390/s25175320>
- [38] Khoa Bui, X., S. Marlim, M. and Kang, D. (2020) Water Network Partitioning into District Metered Areas: A State-Of-The-Art Review. *Water*, **12**, Article 1002. <https://doi.org/10.3390/w12041002>
- [39] Abokifa, A.A., Yang, Y.J., Lo, C.S. and Biswas, P. (2016) Water Quality Modeling in the Dead End Sections of Drinking Water Distribution Networks. *Water Research*, **89**, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.025>

- [40] Husband, P.S. and Boxall, J.B. (2011) Asset Deterioration and Discolouration in Water Distribution Systems. *Water Research*, **45**, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.021>
- [41] Villanueva, C.M., Gracia-Lavedan, E., Julvez, J., Santa-Marina, L., Lertxundi, N., Ibarluzea, J., *et al.* (2018) Drinking Water Disinfection By-Products during Pregnancy and Child Neuropsychological Development in the INMA Spanish Cohort Study. *Environment International*, **110**, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.017>
- [42] Shi, X., Clark, G.G., Huang, C., Nguyen, T.H. and Yuan, B. (2022) Chlorine Decay and Disinfection By-Products Formation during Chlorination of Biofilms Formed with Simulated Drinking Water Containing Corrosion Inhibitors. *Science of the Total Environment*, **815**, Article ID: 152763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152763>
- [43] Chachula, K., Słojewski, T.M. and Nowak, R. (2022) Multisensor Data Fusion for Localization of Pollution Sources in Wastewater Networks. *Sensors*, **22**, Article 387. <https://doi.org/10.3390/s22010387>
- [44] Lee, Y. (2013) An Evaluation of Microbial and Chemical Contamination Sources Related to the Deterioration of Tap Water Quality in the Household Water Supply System. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **10**, 4143-4160. <https://doi.org/10.3390/ijerph10094143>