

农村供水工程水质问题分析与优化策略研究

李睿淼, 施凤宁*

云南省水文水资源局, 云南 昆明

收稿日期: 2025年3月5日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年6月27日

摘要

为探究云南省农村供水工程水质问题, 综合评估水质达标率及其影响因素, 保障农村供水安全, 以云南省31项农村供水工程监测数据为基础, 系统分析水源水、出厂水及末梢水的达标情况。结果显示, 末梢水合格率(72.7%)显著低于水源水(91.3%)和出厂水(80.6%), 主要问题为消毒副产物超标(三氯甲烷占比26.7%)、管网二次污染(总大肠菌群超标率46.7%)、金属元素污染(铁/锰超标率13.3%)及pH异常(超标率33.3%)。成因分析表明, 消毒工艺粗放、管网老化渗漏及运行管理不足是核心风险点。提出开展水源水、出厂水、末梢水同步监测; 建立“工艺优化-管网改造-智能监测”三位一体策略, 包括升级消毒工艺、建立自动化水质检测与调控系统; 提升自动化与信息化水平等, 为全面提升农村供水水质达标率提供科学支撑, 并为同类地区水质保障提供参考。

关键词

农村供水工程, 水质问题, 消毒副产物, 管网二次污染, 优化策略, 智能监测

Analysis and Optimization Strategies Research on Water Quality Issues in Rural Water Supply Projects

Ruimiao Li, Fengning Shi*

Yunnan Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources, Kunming Yunnan

Received: Mar. 5th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

To investigate water quality issues in rural water supply projects in Yunnan Province, this study comprehensively evaluates the compliance rates of water quality and its influencing factors to ensure rural water

作者简介: 李睿淼, 女, 工程师, 主要从事水质水生态监测评价, Email: 176501420@qq.com

通讯作者 Email: 435400735@qq.com

文章引用: 李睿淼, 施凤宁. 农村供水工程水质问题分析与优化策略研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(3): 319-323.

DOI: 10.12677/jwrr.2025.143034

supply safety. Based on monitoring data from 31 rural water supply projects in Yunnan Province, the compliance rates of source water, finished water, and tap water are systematically analyzed. The results show that the tap water compliance rate (72.7%) is significantly lower than that of source water (91.3%) and finished water (80.6%). The main issues include excessive disinfection by-products (trichloromethane accounting for 26.7%), secondary pollution in pipelines (total coliform exceedance rate: 46.7%), metal element contamination (iron/manganese exceedance rate: 13.3%), and abnormal pH (exceedance rate: 33.3%). Causative analysis indicates that inadequate disinfection processes, aging and leaking pipelines, and insufficient operational management are the core risk factors. Proposed strategies include synchronized monitoring of source water, finished water, and tap water; establishing a tripartite optimization framework of “process enhancement-pipeline renovation-intelligent monitoring”; upgrading disinfection processes, implementing automated water quality detection and regulation systems; improving automation and informatization levels. These measures provide scientific support for enhancing water quality compliance rates in rural water supply projects and serve as a reference for similar regions.

Keywords

Rural Water Supply Projects, Water Quality Issues, Disinfection By-Products, Pipeline Secondary Pollution, Optimization Strategies, Intelligent Monitoring

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. 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

农村饮水安全是乡村振兴战略的重要环节。近年来,云南省通过实施农村供水保障专项行动,显著改善了饮水条件[1]。但由于云南省是典型多山多矿地区,受复杂地质条件及季节性水源波动影响,水质达标仍面临挑战[2][3]。现有研究多聚焦工程建设、管理、水价等方面[4][5],农村供水水质达标是一个系统工程,涉及引水水源、处理工艺、供水管网、运行管理等,云南省农村供水水源水质水量季节性波动较大[6],对处理工艺、运行管理要求更高,水源水、出厂水、末梢水的水质监测是优化农村供水工程建设、运行、管理,保障供水水质达标的重要手段。而目前农村供水工程水源水、出厂水、末梢水的水质监测分属于不同部门,且采样时间、监测频次等不一致,致使监测数据支撑供水工程的运行、管理不足,供水达标率提升缓慢[7]。本文基于2024年随机抽取31件供水工程的水源水、出厂水、末梢水水质同步监测数据,进行系统分析对比和统计,揭示农村供水工程隐患环节和风险点,提出针对性优化策略,期望推广水源水、出厂水、末梢水同步水质取样监测,为供水工程提供科学技术支撑,以期同类地区提供参考。

2. 研究方法数据来源

2.1. 数据采集

2024年11月,在云南省范围内随机抽取31项工程,覆盖云南省15个州市,按“水源水+出厂水”、“出厂水+末梢水”、“水源水+出厂水+末梢水”三种方式采集76组样本。检测指标包括地表水42项、出厂水及末梢水47项,评价方法水源水采用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)进行水质分类和超标评价(III类),出厂水和末梢水采用《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022)进行合格评价。检测方法采用现行有效标准方法。

2.2. 分析方法

供水工程:根据样品的水体类型进行单因子水质评价,对不达标的样品所对应的供水工程进行检测数据比

对分析, 识别超标主因, 开展成因诊断。给出厂水或末梢水设定风险预警阈值(合格评价限值的 0.9 或 1.1 倍), 对数据进行比对分析, 查找工程隐患环节和风险点。

行业管理: 分类统计水源水、出厂水及末梢水的达标率, 归纳共性问题, 量化各因素影响权重, 结合供水工程运行管理情况, 反应目前农村供水工程存在的主要问题, 为运行管理和监督部门提供完善措施和管理监督重点。

3. 结果与分析

抽取的 31 项工程中, 按工程统计, 18 个工程的水源水、出厂水或末梢水水质达标或合格, 达标率为 80.3%。其余工程有 5 件出厂水不合格, 4 件末梢水不合格, 2 件是出厂水和末梢水均不合格, 2 件为水源水不达标。按水质样品统计, 76 个水质样品有 61 个达标或合格, 达标或合格率为 80.3%, 其中 23 个水源水质达标率为 91.3%; 31 个出厂水合格率为 80.6%; 22 个末梢水合格率为 72.7%。不达标样品涉及总大肠菌群超标的有 7 个水质样品, 三氯甲烷超标的有 4 个水质样品, pH 值超标的有 5 个水质样品(水源水评价限值为 9, 出厂水评价限值为 8.5), 铁、锰超标的有 2 个水质样品。

3.1. 典型工程问题案例分析

从不达标工程中, 归类水源水、出厂水或末梢水不达标样品, 选择具有代表性工程进行典型案例分析。

3.1.1. 工程 1 水源不达标案例

工程水源水质相对稳定, 水体浑浊, 铁、锰长期超标, 二氧化氯消毒, 聚合氯化铝沉淀, 药剂添加相对自动化。该工程特点为水源稳定但不达标, 工程设施及运行管理为标准式, 精细化不足。水源水的铁(0.367 mg/L)、锰(0.103 mg/L)分别超标 1.2 倍、1.5 倍。结合水源区地质和水质状况分析, 原因为地质层中菱铁矿(FeCO_3)与软锰矿(MnO_2)溶解导致原生污染。同时与之对应的出厂水/末梢水的铁、锰含量显著降低(达标), 说明水处理工艺与水源特点相匹配, 处理工艺运行正常, 因此出厂水达标[8]。但出厂水三氯甲烷($36.79\text{ }\mu\text{g/L}$)接近限值, 需优化消毒工艺控制, 监控消毒剂投加量。

3.1.2. 工程 2 运行管理案例

工程水源季节波动性较大, 取样时段水源水为 I 类水质, 加药方式为人工添加, 工程建设运行时间较长, 净水设施及管网均老化, 管理方式粗犷。其出厂水三氯甲烷($71.70\text{ }\mu\text{g/L}$)超标, 可能为消毒剂投加过量导致副产物超标, 但是末梢水三氯甲烷不超标, 为总大肠菌群($75\text{ CFU}/100\text{ 毫升}$)超标, 可能因管网二次污染或管网损坏及接口渗漏引入污染物。

3.1.3. 工程 3 高 pH 案例

工程水源为小型水库, pH 长期大于 8.6, 工程无 pH 调节单元和在线水质检测设备, 试剂添加方式为人工添加, 监测时段水源水为 II 类水质, 未同步开展末梢水水质检测。水源水 pH 为 8.98, 出厂水 pH (8.92)和三氯甲烷($77.53\text{ }\mu\text{g/L}$)均超标, 因处理工艺缺少 pH 调节单元且无在线水质检测设备, 消毒剂投加过量致使消毒副产物超标。因未开展末梢水同步监测, 高 pH 及消毒剂条件下的供水管网情况未知。

3.1.4. 工程 4 供水管网污染案例

工程为在原有供水工程中添加消毒设施, 药剂添加为半自动化方式, 原有工程在未配备净化消毒设施条件下长期运行。出厂水总大肠菌群($2\times 10^2\text{ CFU}/100\text{ 毫升}$)超标, 消毒单元运行不正常或消毒剂投放不足。末梢水铁(0.34 mg/L)、总大肠菌群($1\times 10^4\text{ CFU}/100\text{ 毫升}$)超标, 可能为管网腐蚀导致铁析出, 同时存在供水管网二次污染[9][10]。

3.2. 水质达标率分布

抽取的 31 项工程中, 末梢水合格率显著低于水源水与出厂水, 表明工程运行管理与管网环节是水质劣化的

主要风险点(表 1)。不达标或不合格的 15 个水质样品中, 总大肠菌群超标的有 7 个水质样品, 三氯甲烷超标的有 4 个水质样品, 主要与消毒方式、药剂投放量、供水管网有关; 涉及 pH 值超标的有 5 个水质样品, 原因是水源水 pH 大于 8.5 (水源水评价限值为 9, 出厂水评价限值为 8.5), 可能原因是工程缺少 pH 调节单元或调节单元运行不正常; 铁、锰超标的有 2 个水质样品, 一个为水源含有铁锰, 另一个为管网腐蚀或管网渗漏。其中 4 个水质样品为多项目超标, 说明工程运行管理风险较高。

表 1. 供水工程水质超标类型与成因统计

问题类型	数量	超标率	主要影响因素
铁/锰超标	2	13.30%	水源水质和供水管网
总大肠菌群超标	7	46.70%	供水管网和工程运行管理
pH 异常(>8.5)	5	33.30%	水源和处理工艺

4. 讨论

4.1. 消毒工艺优化

云南农村供水工程的水源多为山箐水, 腐殖酸、富里酸等有机物含量较高, 各种微生物含量也较大, 且都随季节变化显著。三氯甲烷超标集中发生于采用传统氯消毒的工程中, 有研究表明, 有机质含量较高时, 副产物生成量显著增加[11]。所以采用氯消毒很难控制余氯、副产物浓度, 可以通过更换水处理方式, 或加强进水和出水水质检测, 在现有基础上配置自动化控制系统并加强运行管理, 确保水质达标[12] [13]。

4.2. 管网改造与维护

总大肠菌群超标的 7 个水质样品中有 5 个工程出厂水合格, 而末梢水不合格, 可能是供水管网损坏及接口渗漏引入污染物, 或者是管网老化本身二次污染。另 2 个水质样品为同一个工程, 出厂水和末梢水不合格, 末梢水总大肠菌群远大于出厂水, 叠加末梢水铁超标且大于出厂水, 说明工程运行管理和供水管网管理维护不正常。因此可通过加强供水管网排查与管理, 同时加强出厂水和末梢水水质检测, 在保障达标基础上适当提高出厂水有效杀菌剂浓度, 以及二次加氯、建立管网渗漏实时监测网络等方式[14] [15], 提升维护效率等方式提升末梢水水质达标率。

4.3. 智能监测体系构建

5 个 pH 超标水质样品中有 3 个水源水的 pH > 8.5, 可能工程缺少 pH 调节单元或调节单元运行不正常, 可配置在线检测与 pH 调节控制设备, 实时控制 pH 值。因此可通过建立信息与自动化系统, 以保障水质达标的前提下, 提升运行效率、降低运行成本、提高运行保障率[16] [17]。

5. 结论和建议

5.1. 结论

水质达标率存在显著梯度差异, 农村供水工程末梢水合格率(72.7%)显著低于水源水(91.3%)和出厂水(80.6%), 表明管网二次污染与运行管理粗放是主要风险点。其核心问题集中于工艺与管网, 消毒副产物(三氯甲烷超标占比 26.7%)、总大肠菌群超标(46.7%)及 pH 异常(33.3%)是主要水质问题, 成因包括消毒工艺粗放、管网老化渗漏、自动化监测不足等。最终表现出管网运行管理存在不足, 水质检测重视度不足、管网维护滞后、自动化水平低等方面, 导致达标率低。

5.2. 建议

1) 强化水质监测。推动水源水、出厂水、末梢水同步采样检测,统一监测频次与标准,加强监测数据分析和结果运用,为工程运行管理和优化提供技术支撑;开展出厂水与末梢水消毒副产物检测,优化消毒剂添加量,做到净化消毒及运行管理精准化;开展风险点排查,分析供水水质不达标的主要原因,查找工程运行管理中薄弱环节和存在的问题,监督供水工程运行管理机构优化工程运行管理措施,完善运行管理制度,全力提升农村供水水质达标率。

2) 开展“工艺优化-管网改造-智能监测”三位一体策略,整体提升农村供水水质达标率。推广紫外-氯联合消毒技术,减少副产物生成;配置自动化加药系统,实现消毒剂投加量与水质变化的动态匹配;加强对供水管网的排查力度,根据管网目前状况,制定管网更新替换方案,采用多种方式有序并逐步替换老旧的供水管网,有效防止供水末端水体受二次污染,不具备管网更换条件的供水工程,可根据末梢水检测结果,适当提升出厂水水体中消毒剂的含量,确保末梢水水质达标;根据水质状况配置在线水质检测设备,实时监测水源水、出厂水、末梢水,及时为运行管理提供数值参考。

3) 提升自动化与信息化水平。推广智能监控平台,集成水质、流量、压力等参数实时反馈,根据水质状况完善运行管理措施,提升供水工程自动化管理水平,精细化运行管理措施,不断提升供水水质达标的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] 胡朝碧. 新阶段云南省农村供水高质量发展的思路与方法[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 22-26.
- [2] 陈小洪. 云南省农村供水现状评价及“十四五”供水保障规划要点分析[J]. 水利发展研究, 2021, 21(6): 74-77.
- [3] 陈小洪, 韦耀东, 胡开富. 云南省农村饮水工程现状及存在的主要问题分析[C]//云南省水利学会. 云南省水利学会 2018 年度学术交流会论文集. 2018: 361-367.
- [4] 张汝成, 吴继元, 赖元威. 云南省脱贫攻坚中农村供水工程建设与管理的思考[J]. 水利发展研究, 2021, 21(1): 71-73.
- [5] 时元智, 张学明, 施海祥, 等. 云南农村饮水安全工程现状分析与思考[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 186-189+193.
- [6] 沈明蕊, 施凤宁. 云南农村饮水达标关键因素及水处理工程研究[J]. 人民长江, 2017, 48(S1): 51-54.
- [7] 曹彬琴. 农村供水工程水质检测模式研究[J]. 智能城市, 2021, 7(13): 104-105.
- [8] 张立岩. 深圳市供水水源铁锰含量调查及去除方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [9] 梁琳, 周书林. 影响管网水质的因素及对策[J]. 东北水利水电, 2008(4): 55-56.
- [10] 范孟帆, 宋家骏, 高奇奇, 等. 农村供水管网供水二次污染原因及防治措施[J]. 水利发展研究, 2021, 21(8): 46-50.
- [11] 王怡, 塔娜, 安乌云. 饮用水中三卤甲烷的生成机理与影响因素研究进展[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(4): 500-506.
- [12] 贺斌, 张静怡, 李伟光. 城市给水厂紫外-氯消毒工艺运行效能的综合评价[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3463-3470.
- [13] 王光辉, 张行, 兰隽如, 等. 我国城镇污水处理厂紫外消毒工艺运行情况调研及优化建议[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 1-8.
- [14] 段婷, 王琦. 供水管网分区后加氯策略优化方法[J]. 中国给水排水, 2025, 41(7): 56-62.
- [15] 郑雪梅. 农村饮用水供水管网改造施工技术分析[J]. 水上安全, 2025(1): 13-15.
- [16] 视频识别水质系统与供水自动化系统联动的应用——北京市潮白河管理处[J]. 北京水务, 2024(4): 11.
- [17] 侯清洋. 自动化监控系统在农村供水工程中的应用研究——评《农村供水工程自动化监控技术与应用》[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 147.