

农村集中供水水质安全现状及净化改良技术应用分析

陈 刚

莒南县大店供水有限公司 山东 临沂 276612

摘 要: 本文系统梳理了当前我国农村集中供水水质安全面临的主要挑战,深入剖析了水源性、过程性和管理性三类风险的成因与表现;在此基础上,全面评述了适用于农村场景的常规处理、深度处理及消毒技术,并重点探讨了针对微污染水源的强化常规处理、膜分离技术(超滤、纳滤)以及二氧化氯、次氯酸钠等主流消毒工艺的应用特点与优化路径;最后,从构建全链条保障体系的角度,提出了强化水源保护、推动工艺升级、完善标准规范和创新运维模式等综合性对策建议。研究表明,唯有通过“源头防控-过程强化-末端保障-智慧管理”的多维协同,才能系统性地提升农村集中供水水质安全保障水平,切实让广大农民喝上“放心水”。

关键词: 农村集中供水;水质安全;微污染水源;净化技术;消毒工艺

引言

水是生命之源,饮用水安全关乎群众健康。随着脱贫攻坚全面胜利,农村“有水喝”问题基本解决,工作重心正转向“喝好水、喝放心水”。水利部2025年报告显示,截至2023年底,全国仍有114万人依赖水窖、水柜等分散式供水,水质难保障;已建集中供水工程中,91%为村级单村工程,普遍设施简陋,缺乏水处理与水质检测能力。国家“十四五”规划明确要求农村自来水普及率稳定在88%以上,并提升水质达标率。然而,当前农村供水仍面临双重挑战:一是工业、城镇点源污染与农业面源污染叠加,导致水源微污染甚至重污染;二是大量小型集中供水工程处理工艺简单、消毒设施缺失或运行不规范,难以应对复杂水质风险。因此,系统分析水质安全现状,科学评估并推广适配的净化改良技术,对补齐农村基础设施短板、推进乡村振兴具有重大意义。

1 农村集中供水水质安全现状与主要风险

1.1 水源性风险:污染负荷持续加重

农村供水水源主要依赖地表水(河流、水库、湖泊)和地下水。这两类水源均面临着日益严重的污染威胁。(1) 农业面源污染:这是最主要的污染源。化肥、农药的过量施用,使得氮、磷等营养盐以及多种有机污染物(如莠去津、草甘膦等)通过地表径流和淋溶作用进入水体,导致水体富营养化,并可能检出农药残留。(2) 畜禽养殖污染:规模化 and 散养式畜禽养殖产生的大量粪便和废水,若未经有效处理直接排放,会将高浓度的有机物、病原微生物(如大肠杆菌、寄生虫卵)、抗生素及重金属带入周边水体,造成严重的生物性和化学性污染^[1]。(3) 生活与工业污染:农村生活污水和垃圾的无序排放,以及部分乡镇企业偷排、漏排的工业废水(可能含有重金属、氰化

物、酚类等有毒有害物质),进一步加剧了水源水质的恶化。这些污染物种类繁多,包括物理性(悬浮物、浊度)、化学性(硝酸盐、氟化物、铁锰、有机物)和生物性(细菌、病毒、贾第鞭毛虫、隐孢子虫)三大类。

1.2 过程性风险:处理能力普遍不足

许多已建的农村集中供水工程,尤其是早期建设的小型水厂,其水处理工艺与当前水源水质状况严重不匹配。(1) 工艺过于简化:大量水厂仅采用简单的“沉淀+过滤”甚至仅有“过滤”工艺,缺乏有效的预处理和深度处理单元,对溶解性有机物、氨氮、臭味物质、微量污染物等去除效果甚微。(2) 消毒环节薄弱:消毒是保障微生物安全的关键屏障,但部分水厂未配备消毒设备,或虽有设备但因成本、管理等原因长期闲置。即使进行消毒,也常因投加量控制不当,导致消毒副产物(如三卤甲烷)超标或消毒不彻底,无法有效灭活耐氯性强的病原微生物(如隐孢子虫、贾第鞭毛虫)。

1.3 管理性风险:运维体系尚不健全

“重建轻管”现象在农村供水领域普遍存在。(1) 专业人才匮乏:村级供水站多由村干部或村民兼职管理,普遍缺乏专业的水处理知识和操作技能,难以保证处理工艺的的稳定高效运行。(2) 监测体系不完善:受限于资金和技术,许多地方对出厂水和末梢水的水质检测频次低、项目少,无法及时发现水质异常,风险预警和应急响应能力不足。(3) 长效机制缺失:水费收缴困难、维修养护资金短缺等问题,导致供水设施老化失修,进一步影响水质安全。

2 农村集中供水净化与改良技术体系

2.1 常规处理工艺的强化与优化

2.1.1 强化混凝

通过优化混凝剂（如聚合氯化铝PAC、聚合硫酸铁PFS）种类、投加量和pH值，可显著提高对浊度、胶体和部分有机物的去除率。例如，在处理低温低浊水（水温 $<5^{\circ}\text{C}$ ，浊度 $<20\text{ NTU}$ ）时，可投加活化硅酸或粘土作为助凝剂，形成更密实的矾花。研究表明，通过优化PAC投加量（通常在 $10\text{--}30\text{ mg/L}$ 范围）和pH值（ $6.5\text{--}7.5$ ），对CODMn的去除率可提升。

2.1.2 生物预处理

对于氨氮（ $>1.0\text{ mg/L}$ ）、有机物含量较高的微污染水源，可在常规处理前增设生物接触氧化池或生物滤池。利用附着在填料上的硝化菌群降解氨氮，异养菌降解可生物降解有机物（BDOC）^[2]。该工艺不仅能将氨氮降至 0.5 mg/L 以下，减轻后续氯消毒负担，还能有效控制管网中亚硝酸盐的积累和生物稳定性，防止“黄水”、“红水”现象。

2.1.3 臭氧-生物活性炭（O₃-BAC）

这是一种成熟的深度处理工艺。臭氧（O₃）能将大分子难降解有机物氧化为小分子易降解物质，并提高水的可生化性；后续的生物活性炭（BAC）则通过吸附和生物降解双重作用，高效去除有机物、臭味物质和消毒副产物前体物。该工艺对CODMn的去除率可达 $50\%\text{--}70\%$ ，对UV254（表征芳香族有机物）的去除率更高。虽然其投资和运行成本（主要来自臭氧发生器的电耗）相对较高，但对于服务人口较多、经济条件较好的中心水厂，是提升水质口感和安全性的理想选择。

2.2 膜分离技术的应用

2.2.1 超滤（UF）

超滤膜孔径在 $0.01\text{--}0.1$ 微米之间，能几乎 100% 地去除水中的悬浮物、胶体、细菌（ $>6\text{ log}$ ）、病毒（ $>4\text{ log}$ ）和大部分原生动物（如隐孢子虫、贾第鞭毛虫）。其出水浊度极低（ $<0.1\text{ NTU}$ ），生物安全性极高，能从根本上解决微生物风险。超滤工艺流程短（通常只需“预处理+超滤”）、自动化程度高、占地面积小，非常适合无人值守的农村小型水厂。市场上已有多种一体化超滤设备，日处理规模从几十吨到上千吨不等，便于模块化部署。其主要局限在于对溶解性小分子有机物和离子态污染物（如硝酸盐、氟化物）无效，且存在膜污染问题。可通过加强前处理（如砂滤、盘滤）来减轻污染，并设置自动反冲洗程序（通常每 $30\text{--}60$ 分钟一次）以维持通量。

2.2.2 纳滤（NF）

纳滤膜孔径更小（约 1 纳米），兼具筛分和Donnan电荷排斥效应，不仅能去除超滤所能去除的所有污染物，还能有效截留二价及高价离子（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} ，截

留率 $>90\%$ ）、大部分有机物（分子量 $>200\text{--}300\text{ Da}$ ）以及部分一价离子（如 Na^+ 、 Cl^- ，截留率约 $20\text{--}80\%$ ）。对于同时存在硬度高（导致结垢）、有机物污染和特定离子（如氟 $>1.0\text{ mg/L}$ 、砷 $>0.01\text{ mg/L}$ ）超标问题的水源，纳滤是极具潜力的解决方案。它能在保证良好口感的同时，有效降低特定健康风险。其运行压力（ $5\text{--}15\text{ bar}$ ）高于超滤（ $1\text{--}3\text{ bar}$ ），能耗和成本也相应增加，但远低于反渗透（RO），且产水率更高（ $>90\%$ ），浓水处理压力较小。

2.3 消毒技术的选择与精准控制

2.3.1 次氯酸钠（NaClO）

原料（食盐）易得、安全，无运输储存风险；设备（电解发生器或投加泵）成本较低，操作管理相对简单；具有持续消毒能力，能维持管网余氯（通常要求末梢水余氯 $\geq 0.05\text{ mg/L}$ ）。在处理含腐殖酸、富里酸等前体物较多的水源时，易生成三卤甲烷（THMs）等消毒副产物；对隐孢子虫等耐氯性病原体灭活效果不佳；高pH值（ >8.0 ）会显著降低其消毒效率（因为有效成分HOCl比例下降）^[3]。适用于水质较好、pH值不超过 8.0 的水源，是当前农村推广最广泛的消毒方式。应严格控制投加量，确保CT值（消毒剂浓度C与接触时间T的乘积）满足灭活目标的要求。

2.3.2 二氧化氯（ClO₂）

氧化能力强，杀菌效率远高于氯，能在较宽的pH范围内（ $6\text{--}10$ ）有效灭活细菌、病毒乃至隐孢子虫；几乎不与水中有机物反应生成氯代副产物（THMs、HAAs），主要副产物为亚氯酸盐（ ClO_2^- ）和氯酸盐（ ClO_3^- ），可通过控制投加量（通常 $0.1\text{--}0.5\text{ mg/L}$ ）和优化制备工艺加以管理；能有效去除水中的铁、锰、酚类及土霉味等臭味物质。气体不稳定，需现场制备（通常采用氯酸钠+盐酸法或亚氯酸钠+氯气/盐酸法），设备相对复杂，对操作有一定要求；原料属于危化品，需规范管理。特别适用于微污染水源、高pH值水源以及对消毒副产物控制要求较高的场合，是农村供水消毒技术升级的重要方向。其综合效益（安全性、口感、副产物控制）优于次氯酸钠。

2.3.3 紫外线（UV）消毒

物理消毒，瞬间完成（接触时间 <10 秒），不改变水的化学性质，不产生任何消毒副产物；对所有病原微生物均有良好灭活效果。无持续消毒能力，无法防止管网二次污染；消毒效果受水的浊度（要求 $<1\text{ NTU}$ ）和UV透光率（UVT）影响较大，需保证良好的前处理。常作为主消毒工艺的补充，用于进一步提高微生物安全裕度，或用于小型、直供式供水系统的终端消毒。

3 提升农村集中供水水质安全的综合对策

技术是基础,但要实现水质安全的长效保障,还需系统性的制度和管理创新。

3.1 强化水源保护,从源头控制污染

严格执行《饮用水水源保护区污染防治管理规定》,依法划定并严守农村集中式饮用水水源保护区。加强农业面源污染治理,大力推广测土配方施肥、水肥一体化、绿色防控等技术,从源头上减少化肥农药流失。规范畜禽养殖废弃物资源化利用,推行种养结合模式,严禁养殖废水直排。严厉打击工业废水偷排行为。建立由水利、生态环境、农业农村等多部门参与的水源保护联动机制,实现信息共享和协同执法。

3.2 推动工艺升级,实施分类指导

制定针对不同水源水质特征和供水规模的技术导则。对于水质良好、规模较小($<1000\text{ m}^3/\text{d}$)的工程,推广“超滤+次氯酸钠”等一体化集成设备,实现即插即用。对于微污染源或规模较大的中心水厂($>5000\text{ m}^3/\text{d}$),鼓励采用“生物预处理+常规处理+臭氧-活性炭”或“纳滤”等深度处理工艺^[4]。设立中央和地方财政专项资金,采取以奖代补等方式,支持老旧水厂的提标改造,重点解决消毒设施缺失和处理能力不足的问题。

3.3 完善标准与监测体系

加快修订和完善农村供水水质相关标准,使其既与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)接轨,又符合农村实际,明确不同规模工程的必检项目和频次。构建“水厂自检(日检/周检)、县域巡检(月检/季检)、市级抽检(半年检)”相结合的三级水质监测网络。重点加强对微生物指标(总大肠菌群、耐热大肠菌群)、消毒剂余量及副产物(余氯、 ClO_2 、THMs)、以及当地特征污染物(如氟、砷、硝酸盐)的检测。推广低成本、易操作的在线水质监测设备,实现对浑浊度、pH、余氯等关键指标的实时监控和风险预警。

3.4 创新运维管理模式

打破“单村单管”的碎片化模式,大力推行以县为单位的城乡供水一体化或区域规模化经营。通过引入专业化水务公司,实现统一规划、统一建设、统一运营、统一服务,发挥规模效益。建立健全合理的水价形成和水费收缴机制,水价应能覆盖成本并有合理收益,确保工程“有钱管、有人管、可持续”。加强对基层管理人员的技术培训,定期组织考核,提升其专业素养和应急处置能力。探索利用物联网、大数据等技术,建设智慧供水管理平台,实现远程监控、智能诊断和精准调度。

4 结语

保障农村集中供水水质安全是一项复杂的系统工程,既是重大的民生工程,也是重要的生态工程。当前,农村供水水质安全的核心矛盾在于日益增长的安全饮水需求与不平衡不充分的处理保障能力之间的矛盾。解决这一矛盾,不能仅仅依赖单一技术的突破,而必须坚持系统思维,构建覆盖“从源头到龙头”全链条的保障体系。在技术层面,应根据水源水质特征,科学选择和组合常规强化、膜分离、高级氧化及精准消毒等技术,形成经济、高效、可靠的处理方案。在管理层面,亟需通过强化水源保护、完善标准监测、创新运营模式和加强人才培养等综合措施,为技术的有效应用提供坚实的制度支撑。唯有如此,才能真正筑牢农村饮水安全屏障,为亿万农民的健康福祉和乡村的全面振兴奠定坚实的基础。

参考文献

- [1]张兴旺.农村供水工程智能调控与水质安全保障技术[J].农村科学实验,2026,(06):67-69.
- [2]龙涛.农村饮水安全工程供水水质检测技术[J].湖南水利水电,2025,(04):62-63+75.
- [3]马云.农村供水管网运行维护与水质保障体系建设[J].农村科学实验,2025,(11):63-65.
- [4]寇宝峰.农村供水水质提升高质量发展探究[J].城镇供水,2024,(04):103-108.