

尧桂龙. 居民小区高品质饮用水入户建设与改造策略探讨[J]. 净水技术, 2024, 43(3): 1-6,38.

YAO G L. Discussion on the construction and renovation strategies of high-quality drinking water for residential areas[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3): 1-6,38.

## 居民小区高品质饮用水入户建设与改造策略探讨

尧桂龙\*

(上海浦东建筑设计研究院有限公司,上海 201206)

**摘要** 为增强人民群众获得感、幸福感与安全感,供水行业应立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展,全面提升城市供水安全保障能力,实现饮用水的高品质供给。在水源、水厂、管网等环节提升改造的同时,二次供水“最后一公里”环节成为目前高品质饮用水建设的重点与焦点。目前老旧小区实现高品质饮用水入户的工程建设与改造还缺少相关成熟经验,也没有统一的实施路径。文章以问题为导向,结合调查分析与试验研究,分析了现状住宅小区二次供水设施存在的主要问题,提出了供水模式优化、涉水材质选择、标准泵房建设、系统水龄控制、智能监控管理等二次供水入户工程改造实施策略与技术要求,供相关工程建设参考。

**关键词** 高品质饮用水 二次供水改造 供水方式 涉水材质 泵房建设 智能化监控

**中图分类号**: TU991 **文献标识码**: A **文章编号**: 1009-0177(2024)03-0001-07

**DOI**: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.001

## Discussion on the Construction and Renovation Strategies of High-Quality Drinking Water for Residential Areas

YAO Guilong\*

(Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

**Abstract** In order to enhance people's sense of gain, happiness and security, the water supply industry should base itself on the new development stage, implement the new development concept, build a new development pattern, promote high-quality development, comprehensively improve the urban water supply security assurance ability, and achieve high-quality drinking water supply. While improving and renovating links such as water sources, water treatment plants, and pipelines, "the final one kilometer" of secondary water supply has become the focus of high-quality drinking water construction. At present, there is a lack of mature experience in the construction and renovation of high-quality drinking water for households in old residential areas, and there is no unified implementation path. This paper was problem-oriented, combining investigation and experimental research to analyze the main problems of secondary water supply facilities in current residential communities. It proposed implementation strategies and technical requirements for the renovation of secondary water supply projects, such as water supply mode optimization, selection of wading materials, construction of standard pump rooms, system water age control, and intelligent monitoring management.

**Keywords** high-quality drinking water secondary water supply renovation water supply mode drinking water related material pump house construction intelligent monitoring

[收稿日期] 2023-07-17

[基金项目] 上海城投(集团)有限公司科技创新计划项目;上海高品质饮用水入户方案研究(CTKY-ZDXM-2022-002)

[通信作者] 尧桂龙(1978—),男,硕士,高级工程师,主要从事给排水设计工作,E-mail:7361172@qq.com。



尧桂龙,男,高级工程师,主要从事给排水设计工作,参与了大量的二次供水改造工程、高品质饮用水入户改造工程等的设计工作,同时也参与编制《临港新片区高品质饮用水入户技术规程》《上海市居民住宅二次加压与调蓄供水设施改造工程技术导则》《上海市新建居民住宅饮用水高品质入户工程技术规程》《城镇二次加压与调蓄供水设施改造技术标准》《住宅二次供水技术标准》《住宅二次供水智慧化建设与运行维护技术规程》等多项二次供水及高品质饮用水相关行业或地方标准及研究工作。

饮用水是人民群众最基本的民生需求,不断提高饮用水品质,是满足人民对美好生活向往的重要组成部分。为了保障饮用水稳定达标,上海市建成“两江并举、集中取水、水库供水、一网调度”的水源地供应格局,全面启动全市水厂深度处理改造工程,加快推进供水管网更新改造,有效提升了供水系统安全保障能力。2018年,《上海市城市总体规划(2017—2035年)》提出,至2035年上海市基本建成卓越的全球城市,供水方面要加大二次供水设施改造力度,减少老旧管网二次污染,提高入户水质,满足直饮需求,二次供水“最后一公里”环节成为目前饮用水的重点与焦点。本文通过对上海二次供水设施现状的系统调查,梳理针对二次供水现状存在的问题,提出高品质饮用水入户改造实施策略。

## 1 上海市现状二次供水设施存在的问题

根据上海市公共数据开放平台以及上海市统计年鉴相关统计数据,截至2023年12月底,上海市存量住宅小区建筑面积共计7.49亿 $\text{m}^2$ 。上海市自2007年启动二次供水改造工作以来,共计完成2000年前的住宅二次供水改造接管工作约2.2亿 $\text{m}^2$ ,另有约0.5亿 $\text{m}^2$ 二次供水设施状况较好的小区已经

完成供水企业接管工作。故总计有2.7亿 $\text{m}^2$ 住宅小区完成了供水企业接管,但仍有近4.79亿 $\text{m}^2$ 住宅二次供水设施还未改造接管。

本次研究以中心城区2278个约2.05亿 $\text{m}^2$ 的2000年后住宅小区为样本,采用现场实地调查的方式,对2278个小区的二次供水设施进行了全面调查,调查发现现状二次供水设施在供水系统设置、涉水材质、环境卫生、运行模式及管理上均存在一定的问题,与实现高品质饮用水入户还存在一定的差距,其具体情况如下。

(1)供水系统设置不合理,影响居民用水舒适度,且存在水质及管理安全风险

2000年后建成住宅小区的建筑类型分布与供水方式如图1所示。数据显示,2000年后建成住宅小区主要以高层住宅(8层及以上)为主,高层与多层(8层以下)并存的混合住宅小区次之,多层住宅小区最少。供水方式上,多层住宅小区以市政直供和变频供水为主,占小区总数的81%,但仍有12%的小区为水泵水箱联合供水;高层住宅以水泵水箱联合供水为主,占小区总数的84%,约13%为变频供水。

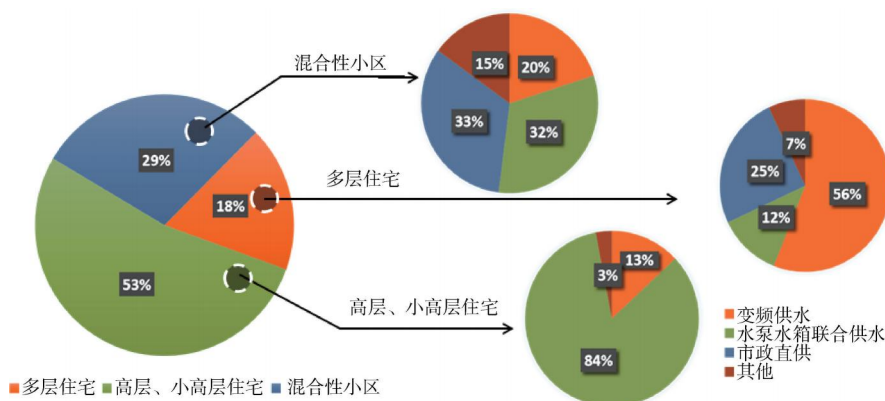


图1 住宅小区建筑类型与供水方式分布

Fig. 1 Distribution of Residential Building Types and Water Supply Modes

其中,水泵水箱供水主要存在问题如下。①从供水水质安全角度来看,水泵水箱联合供水存在水

池(箱)、屋顶水箱敞开等问题,增加了水质污染的安全风险。大部分小区水池、水箱总调蓄容积普遍

偏大,在用水低谷时容易造成水龄偏长的问题,影响供水水质安全。存在一定数量生活给水系统和消防给水系统合用情况,包括水池(箱)生消合用、管道生消合用、泵房生消合用,由于消防系统中水为“死水”,平常不流动,生消合用容易造成消防储水回流生活供水的风险,存在水质安全隐患。另外,从管理角度,两者的权属及管理主体也不一致,国家四部委《关于加强和改进城镇居民二次供水设施建设与管理确保水质安全的通知》(建城[2015]31号)要求供水企业逐步“管水到表”,生活给水系统将由供水企业进行专业化管理。而消防给水系统是由物业进行管理,两者管理主体不一致,生消合用容易产生职责不清、互相推诿的现象。②从居民用水体验角度,屋顶水箱供水方式的顶层居民用水水压普遍偏小,影响了居民用水的舒适度。③另外,在调查中还发现部分小区私自将水池废除,采用水泵直接抽取市政管网的情况,违反了《城市供水条例》的有关规定,给公共供水造成安全隐患。

(2) 涉水设施设备材质落后,带来水质风险

调查数据显示,2000年后住宅小区室外埋地管道仍存在一定数量的铸铁管、水泥管等,小区爆管或水浑投诉等情况时有发生;楼宇立管也存在一定数量镀锌钢管、硬聚氯乙烯(UPVC)塑料管等禁用或落后管材(图2)。由于镀锌钢管易腐蚀,长时间使

用后产生铁锈,影响了水质与居民观感,且其易结垢特性使得管道过水断面大大减少,极易发生爆管的现象,目前该管材已经被严禁使用在给水管网工程中。UPVC管由于连接方式为黏结,黏结剂老化后管道连接处也容易发生爆管。同时,存在少量立管位于居民家中的情况,不便于后期维护管理。

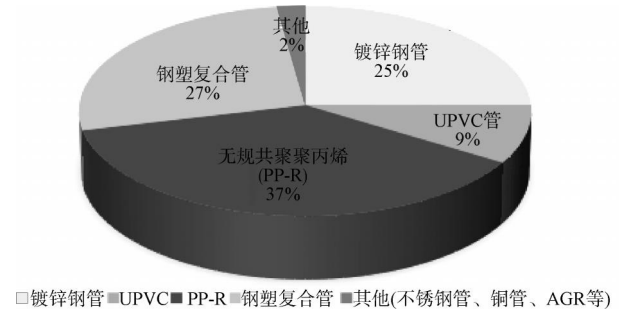


图2 楼宇管道材质分布

Fig. 2 Distribution of Building Pipe Materials

水池(箱)中59.53%为不锈钢材质,同时有40.47%为钢筋混凝土材质(图3)。钢筋混凝土材质水池(箱)虽然内壁贴有瓷砖,但是易出现瓷砖脱落现象,造成水池(箱)难以清洗干净,并且由于水池(箱)内表面凹凸不平,容易滋生微生物,影响供水水质安全。部分不锈钢材质水池(箱)由于产品质量问题或者水中氯离子长时间聚集,不锈钢腐蚀破坏漏水等现象发生。

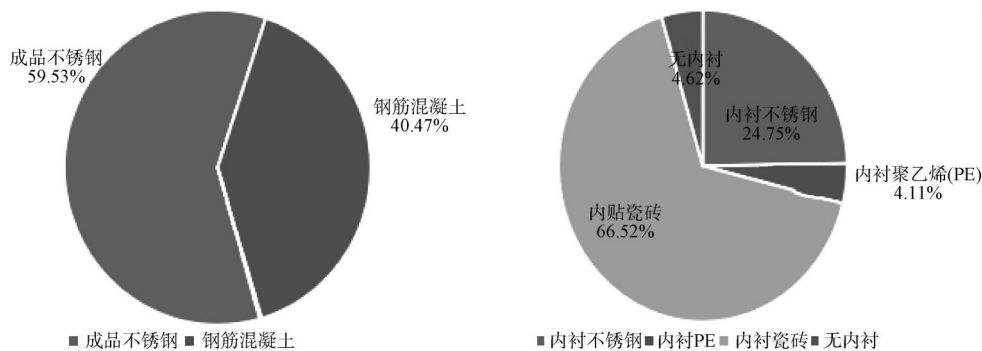


图3 水池(箱)材质分布

Fig. 3 Distribution of Water Tank Materials

水泵材质存在铸铁材质水泵,约占水泵总量的31%(图4)。由于铸铁泵长期处于潮湿环境中,泵体普遍出现较为严重的锈蚀,部分出现漏水,影响了供水水质及水压等。

(3) 泵房环境不佳,存在卫生安全隐患

调查发现,大部分泵房环境卫生状况不佳,泵房地面、墙面未作任何处理,泵房管理不到位,地下泵

房阴暗潮湿,排水沟集水坑常年积水,夏季蚊虫滋生,部分泵房废弃杂物堆砌,上述情况严重影响供水安全,同时也给居民用水信心造成了一定的负面影响。

(4) 运行模式不科学,水龄较长带来水质风险

现有水池进水采用遥控浮球阀的进水方式,但浮球阀可调节的液位一般只有100~200mm,所以

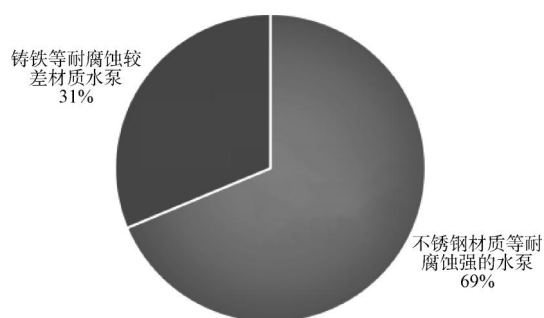


图4 水泵材质调查统计分布

Fig. 4 Distribution of Water Pump Materials

只要用户用水,水池液位下降到浮球阀开启液位时,水池就进行补充,导致池内水位长期处于高水位运行,造成水池水龄较长,余氯衰减,带来水质风险。

(5)智能化管理缺乏,安全管理存在漏洞,无法进行有效监管

水质监测方面,缺少水质在线监测,无法及时有效掌握水质情况;泵房安全管理方面,基本采用人工管理模式,极少有设置智能化监控设施,缺少安防、门禁及入侵报警系统,安全管理存在漏洞,无法有效应对外人入侵对供水安全造成的隐患;二次供水运行监管方面,缺少环境温度、湿度、水浸、液位、水泵、能耗等关键监测系统,缺少补充消毒设施或者补充消毒设施属于废弃状态,对设施故障、泵房浸水等突发状况无法及时应对。

综上,居民小区二次供水设施在供水系统、供水材质、水龄控制以及智慧化运维管理上还存在较多的问题,与实现龙头直饮的高品质饮用水入户目标还有一定的差距。

## 2 二次供水高品质入户工程建设与改造策略

为了稳定二次供水水质,提升用户对饮用水的信任感,针对二次供水系统与设施设备存在的主要问题,从供水系统模式、设施设备材质、泵房环境安全、智能化监控等方面,提出二次供水系统改造与建设的技术要求与策略。

### 2.1 供水系统改造

#### 2.1.1 二次供水模式对水质的影响

二次供水环节越多,水质风险点越多,同时会增加维护管理的困难。根据张骏鹏等<sup>[1]</sup>开展了不同二次供水模式下的余氯衰减及异养菌总数(HPC)情况对比研究,结果显示:水池+变频供水模式小区

用户表前总氯较泵房进水管有一定下降,下降幅度不大,为17%左右,且质量浓度仍较高( $>0.7$  mg/L),HPC未有显著上升,基本位于150 CFU/mL以下;水池+水箱供水模式小区水箱供水用户表前总氯较泵房进水管有明显下降(下降超过50%),HPC出现大幅度增加,基本接近了500 CFU/mL限值。综合结果表明,从水质稳定性角度,直接供水模式最优,其次是水池与变频泵联合供水模式,最后是水池水箱联合供水模式。

#### 2.1.2 供水系统改造建议

通过上述研究,在供水模式的选择上,在市政管网水量及水压有充分保障时,建议充分利用市政供水管网水压直接供水,例如,位于水厂或加压泵站附近小区的多层或低层建筑可采取市政直接供水模式。对于市政水压无法满足直接供水的,建议采用“水池(箱)+水泵变频调速增压”的供水方式,现状为屋顶水箱供水的高层或多层建筑多可采取这种方式进行改造。对于部分小区由于场地受限,没有条件进行水池+变频模式改造的,在不影响市政供水管网正常供水前提下,经评估后可考虑采用叠压供水方式,该方式无需设置调蓄水池,且占地面积小,目前技术应用也较为成熟。

同时,针对现状生消合用带来的水质风险及管理问题,应将现状水池(箱)生消合用、管道生消合用、泵房生消合用等情况进行生消分离改造,消除因满足消防用水储备要求而引起的存水水量偏大等问题。

### 2.2 涉水设施设备材质

供水设施材质是输配过程水质稳定的关键影响因素之一,主要包括室内外给水管道、阀门等附属设施、水池(箱)、水泵等所有与水接触的设备设施,要防止因涉水材质锈蚀、渗析等引起的水质变化。

#### 2.2.1 不同材质对水质的影响研究

给水管道是二次供水系统的重要涉水组成,目前常用供水管材包括球墨铸铁管、钢塑复合管、PP-R管、PE管、PVC管、不锈钢管等。根据李欣等<sup>[2]</sup>对供水管材对供水水质的影响研究中发现,塑料管存在在水中发生溶解反应并浸出化学物质以及土壤污染物通过管壁渗入管内污染水质的现象。另外,童祯恭等<sup>[3]</sup>分析了美国、德国、英国等国家以及我国台北市的供水管材使用情况,发现球墨铸铁管是城市供水管网的主要管材,并提出由于球墨管的卫

生性能、承压力、延伸率、刚度、规格、接口及使用寿命等均较其他金属或非金属材料性能优,是城市供水的理想管材。钟丽锦等<sup>[4]</sup>对日本东京供水管网漏损预防管理研究发现,东京通过二十世纪七八十年代开始逐步将配水管更换为球墨铸铁管以及将供水入户管网更换不锈钢材质管道的工作后,其管网漏损率从20%降到2007年仅有3.3%,这也大大减少了浑水的发生。故球墨铸铁管及不锈钢管道的使用对供水安全包括供水水质均有极大的提升和保障。

另外,针对管道生物膜及消毒副产物的影响研究,陈停等<sup>[5]</sup>通过模拟了实际供水情况对PE管、铸铁管、不锈钢管3种管材生物膜特征及消毒副产物生成势影响进行研究,试验中发现不锈钢管总有机碳(TOC)、HPC、三磷酸腺苷(ATP)、三卤甲烷(THMs)及卤乙酸(HAAs)生成明显优于其他两种管材,且不锈钢管在生物膜中细菌菌落丰度最低;分析认为主要是由于不锈钢材质表面光滑且为疏水,在pH值为7的条件下略带负的表面电荷,容易形成耐腐蚀的铬氧化膜,使得细菌不易附着在不锈钢表面,故其生物膜附着最少,且与氯反应生产的消毒副产物最少。Percival等<sup>[6]</sup>研究不同管材对生物膜生成的影响,认为316不锈钢管较304不锈钢管更不利于生物膜的附着。可见,从水质稳定性来看,不锈钢管具有明显的优势。

从标准来看,《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)已将不锈钢管及铜管列入评分加分项,《建筑与小区管道直饮水系统技术规程》(CJJ/T 110—2017)、北京市《城镇二次供水技术规程》(DB 11/T 1494—2017)、《深圳市优质饮用水入户工程建设指引(试行修订)》等均推荐室内管道采用不锈钢管。

### 2.2.2 涉水设施设备材质建议

通过上述研究,从水质稳定、管道维护、用户信任感等角度综合考虑,高品质饮用水入户工程建设建议:室外埋地管公称直径 $\geq 100$  mm管道采用球墨铸铁管,管道公称直径 $< 100$  mm采用覆塑不锈钢管道;建筑楼宇内管道管材推荐使用不锈钢管材。目前的不锈钢管道材质主要有S30408、S31603等多种牌号,根据《薄壁不锈钢管道技术规范》(GB/T 29038—2012)规定,S30408及S30403允许的氯化物质量浓度为 $\leq 200$  mg/L,S31608、S31603及

S11972(SUS444)允许的氯化物质量浓度 $\leq 1\ 000$  mg/L。上海市水务局官网公布近7年(2015年9月—2023年2月)中心城区出厂水水质指标数据,显示氯化物质量浓度基本维持在70 mg/L以内,仅在2019年12月和2022年10月—2023年2月达到145~194 mg/L,并考虑楼宇立管一般敷设于管道井或外敷防冻措施,对管材有一定保护作用。因此,上海供水管道不锈钢材质选用S30408即可,在经济条件许可情况下可选用耐氯离子腐蚀更强的S31603不锈钢管。

水池(箱)是重要的调蓄设施,考虑到水池(箱)水面与顶盖之间存在气水混合面,水箱外表面时常接触潮湿、灰尘等环境,均易发生点蚀,因此,水池(箱)建议采用耐腐蚀更强的S31603或S11972(SUS444)材质。水泵及阀门等设施,其材质与管道材质一样,可采用S30408不锈钢材质。

### 2.3 泵房环境卫生

供水泵房是二次供水的核心区域,泵房环境不仅影响供水水质,也影响居民对供水水质安全的信任度,应从环境卫生、噪音震动防护、泵房安全等方面提升泵房建设要求。

噪音振动方面,为减少泵房噪声对居民的影响,建议泵房设置在住宅建筑投影线外,选用的水泵噪声和振动应分别符合国家标准《泵的噪声测量与评价方法》(GB/T 29529—2013)及《泵的振动测量与评价方法》(GB/T 29531—2013)中的A级要求。

环境卫生方面,应该按食品存储安全的环境进行要求,保证清洁、干燥、宽敞明亮;建议泵房地面、墙面进行瓷砖贴面,顶板进行吊顶,房间内保证良好的通风;潮湿地区为防止冷凝结露等影响,还应设置除湿设备;泵房应做好防蚊、防鼠、防尘措施,泵房及周边5 m范围内不得存放易燃、易爆、易腐蚀的物品,距渗水坑、堆放垃圾等污染源不应小于10 m,泵房内不应有排水管道穿越。泵房内应设置独立排水系统和地面积水探测报警装置。

### 2.4 水龄控制及智能化管理措施

高品质饮用水的建设关系到居民的身心健康,故需要对供水的各个环节进行全时段的有效监管,光靠人工的手段是无法实现的,只有通过智能化手段进行监控才可实现用户龙头的水持续稳定达标。

#### 2.4.1 水龄控制措施

应通过信息化手段优化水池的水龄,降低水在

水池内的停留时间,稳定水质。水龄控制系统主要包括液位传感器、电控阀门、液位控制阀和逻辑控制器。电控阀门的启闭与设置于水池内的液位传感器联动,其启闭液位可调,从而实现水池调蓄容量可调;启闭液位的确定主要根据水池长时段进水量和用水量,通过算法编程预测计算得出。采用水龄控制系统后,水池的调节容积可根据用水高低峰时段进行变化,即在用水高峰时段水池不进水,在其余时段进水,达到“低进高出”,真正发挥水池的调峰作用,从而达到控制水池水龄最优。这不仅实现了水池容积根据用水季节及用水人数的变化可变,保证水池供水水质基本与市政水质同质,同时削峰填谷进水模式还可以有效降低市政管网压力波动,实现市政供水的运行安全及节能降耗<sup>[7-8]</sup>。

#### 2.4.2 二次供水智能化监管

(1)设置水质在线监测系统。二次供水设置水质在线监测系统,随时掌握小区供水水质,并根据水质情况及时预判或处理供水环节中出现的安全隐患。水质在线监测重点指标包括浊度、余氯、水温等,监测位置宜设置在二次供水设备出水管处。

(2)设置安防、门禁及入侵报警系统。二次供水设施量大范围广,传统的人工监管模式无法实现安全保障,建议通过设置视频监控、门禁及入侵报警系统来确保管理安全。

(3)设置环境监测系统。环境监测系统主要由温湿度传感器、水浸传感器、数据采集及辅助设施组成,可实时监测泵房运行环境,包括温度、湿度、地面积水、柜门状态。其中,水浸传感器在积水时发出报警信号,并可联动关闭该泵房进水总阀。温湿度传感器可与泵房送排风、除湿设备进行联动。通过环境监测系统,保障了泵房环境的干燥,降低了细菌滋生的风险。

(4)在泵房内设置显示屏,显示在线水质实时信息,并传入小区公共显示平台中,让物业、居民能够随时掌握小区水质的具体情况,增强居民用水信心。

(5)设置能源管理系统。基于“双碳目标”背景,为实现二次供水的绿色低碳发展,建议对二次供水涉及的能耗系统进行监测管理,主要包括水泵、紫外消毒设备、除湿机、风机、照明等,通过设置智能电表等方式,掌握耗电情况,为优化管理提供依据。

(6)建立云平台,存储记录泵房设施、设备相关

运行参数的实时数据。

### 3 结论

二次供水“最后一公里”环节成为目前饮用水的重点与焦点,是实现高品质饮用水目标的核心环节。目前上海市居民住宅小区二次供水设施现状在供水系统、供水材质、水龄控制以及智慧化运维管理上还存在较多的问题,与实现龙头直饮的高品质饮用水入户目标还有一定的差距。本研究通过提出优化供水模式、提高材质要求、规范泵房建设、加强水龄控制、推动智能监控等措施与手段,来实现提升二次供水系统的水质保障能力,提升居民用水的获得感和对饮用水安全的信任感,为满足直饮需求目标的高品质饮用水入户建设提供技术解决路径。

#### 参考文献

- [1] 张骏鹏,王一廉. 基于季节规律和二次供水模式的饮用水水质安全风险[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 69-74, 152.  
ZHANG J P, WANG Y L. Water quality safety risks of different secondary water supply systems in different seasons[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 69-74, 152.
- [2] 李欣,王郁萍,赵洪宾. 给水管材材质对供水水质的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(5): 592-595.  
LI X, WANG Y P, ZHAO H B. Effect of material quality of pipeline on quality of water supply [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(5): 592-595.
- [3] 童祯恭,刘遂庆,陶涛. 供水管网中管材对水质影响的探讨[J]. 城市公用事业, 2006, 20(1): 22-24.  
TONG Z G, LIU S Q, TAO T. Probe into effect of pipe materials for water supply pipeline on water quality[J]. Public Utilities, 2006, 20(1): 22-24.
- [4] 钟丽锦,傅涛,孔德艳. 日本东京供水管网的漏损预防管理[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(2): 1-4, 30.  
ZHONG L J, FU T, KONG D Y. Prevention management of water leakage in Tokyo [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(2): 1-4, 30.
- [5] 陈婷,徐叶琴,李冬平,等. 供水管网生物膜特征及对消毒副产物生成势的影响[J]. 供水技术, 2019, 13(1): 1-5.  
CHEN T, XU Y Q, LI D P, et al. Characteristics of biofilm and influence on the potential of disinfection by-products in pipe wall of water supply network[J]. Water Technology, 2019, 13(1): 1-5.
- [6] PERCIVAL S L, KNAPP J S, EDYVEAN R, et al. Biofilm development on stainless steel in mains water [J]. Water Research, 1998, 32(1): 243-253.

(下转第 38 页)

- 10.1016/J.CEJ.2019.01.188.
- [47] FAN Q S, CHENG X X, ZHU X W, et al. Secondary wastewater treatment using peroxymonosulfate activated by a carbon nanofiber supported  $\text{Co}_3\text{O}_4$  ( $\text{Co}_3\text{O}_4 @ \text{CNF}$ ) catalyst combined with ultrafiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 287 (2): 120579. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.120579.
- [48] LIU J W, ZHAO M F, DUAN C, et al. Removal characteristics of dissolved organic matter and membrane fouling in ultrafiltration and reverse osmosis membrane combined processes treating the secondary effluent of wastewater treatment plant [J]. *Water Science and Technology*, 2021, 83(3): 689–700.
- [49] LIU X, CHEN R, WANG Z, et al. Effect of  $\text{Fe}(\text{II})$ -activated peroxymonosulfate (PMS) on the performance of ultrafiltration (UF) process for secondary effluent treatment and reuse [J]. *Water*, 2022, 14(11): 1726. DOI: 10.3390/w14111726.
- [50] QIU J L, LI D W, JING S C, et al. Advanced technique of catalytic ozonation-enhanced coagulation for the efficient removal of low coagulability refractory organics from secondary effluent [J]. *Chemosphere*, 2022, 303(3): 135157. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135157.
- [51] SU T, WANG Z K, ZHOU K, et al. Advanced treatment of secondary effluent organic matters (EfOM) from an industrial park wastewater treatment plant by Fenton oxidation combining with biological aerated filter [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 784 (25): 147204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147204.
- [52] WEI K J, WANG Z, OUYANG C P, et al. A hybrid fluidized-bed reactor (HFBR) based on arrayed ceramic membranes (ACMs) coupled with powdered activated carbon (PAC) for efficient catalytic ozonation: A comprehensive study on a pilot scale [J]. *Water Research*, 2020, 173 (15): 115536. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115536.
- [53] 傅利, 幸韵欣, 王梦玉, 等. 不同臭氧耦合混凝工艺深度处理造纸废水的对比[J]. *净水技术*, 2022, 41(10): 85–91. FU L, XING Y X, WANG M Y, et al. Research and application progress of advanced treatment of dyeing wastewater [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(10): 85–91.
- [54] WANG J, SONG Y, QIAN F, et al. Removal characteristics of effluent organic matter (EfOM) in pharmaceutical tailwater by a combined coagulation and  $\text{UV}/\text{O}_3$  process [J]. *Water*, 2020, 12 (10): 2773. DOI: 10.3390/w12102773.
- [55] BAI Z Y, WANG J L, YANG Q. Advanced treatment of municipal secondary effluent by catalytic ozonation using  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{CeO}_2$ /MWCNTs as efficient catalyst [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(10): 9337–9349.
- [56] PUSPITA P, RODDICK F, PORTER N. Efficiency of sequential ozone and UV-based treatments for the treatment of secondary effluent [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 268(15): 337–347.
- [57] CLEM V, MENDONÇA H V D. Ozone reactor combined with ultrafiltration membrane: A new tertiary wastewater treatment system for reuse purpose [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315 (1): 115166. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115166.
- [58] TU Y M, SHAO G Y, ZHANG W J, et al. The degradation of printing and dyeing wastewater by manganese-based catalysts [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 828 (1): 154390. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154390.
- [59] GAO Y, DUAN Y T, FAN W, et al. Intensifying ozonation treatment of municipal secondary effluent using a combination of microbubbles and ultraviolet irradiation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(21): 21915–21924.

(上接第6页)

- [7] 祁司亮, 徐强, 陈求稳. 基于遗传算法的二次供水水箱调控优化[J]. *给水排水*, 2013(s1): 520–525. QI S L, XU Q, CHEN Q W. Optimization of secondary water supply tank control based on genetic algorithm [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013(s1): 520–525.
- [8] 高雨妃, 周立典, 张雪, 等. 基于遗传算法的二次供水低位水箱调度方案优化[J]. *净水技术*, 2022, 41(4): 121–125. GAO Y F, ZHOU L D, ZHANG X, et al. Optimization of scheduling solution for low-level water tank in secondary water supply system based on genetic algorithm [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(4): 121–125.