

赵欣, 孙良志, 姜蕾. 供水系统水龄对供水水质的影响[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 27-34, 59.

ZHAO X, SUN L Z, JIANG L. Effect of water age on drinking water quality in water supply systems[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 27-34, 59.

供水系统水龄对供水水质的影响

赵 欣^{1,*}, 孙良志², 姜 蕾¹

(1. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘 要 【目的】近年来,随着城市化进程的加快和供水系统规模的扩大,饮用水水质成为社会关注的焦点之一。水龄作为评价供水系统水质的重要指标,不仅反映了水在管网中的滞留时间,还间接反映水质的稳定性和安全性,基于供水系统水龄的估算以评价供水水质方法具有预测及管理等方面的优越性。【方法】文章综述了近年来国内外关于供水系统水龄对供水水质影响的研究进展,对输配管网及二次供水环节中的水龄测算方法、基于水龄的供水系统水质模拟及评估及供水系统水龄调控方法等内容进行总结。【结果】系统性地分析了供水系统中不同水龄测算方法的适用性和局限性,讨论了水力模型模拟供水系统水龄及水龄性能函数对水质的评估。同时,阐述了供水改造、优化调度及水箱(池)进水调控等各种基于水龄调控对水质进行优化的方法。【结论】文章通过整理和比较现有的研究成果,明确水龄与水质之间的关系,可以有效利用水龄作为水质的替代指标,为后续供水系统水质的评估及优化研究提供参考。未来利用水龄评估水质的研究方向应着重建立适用不同供水系统的水龄-水质模型,以优化水龄管理。此外,应全盘考虑供水系统水龄计算,以提升供水水质和服务效能的潜力。

关键词 供水管网 二次供水 水龄 水质 水龄调控

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)03-0027-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.004

Effect of Water Age on Drinking Water Quality in Water Supply Systems

ZHAO Xin^{1,*}, SUN Liangzhi², JIANG Lei¹

(1. Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract [Objective] In recent years, with the acceleration of urbanization and expansion of the scale of water supply system, drinking water quality has become one of the focuses of social concern. As an important index for evaluating water quality of water supply system, water age not only reflects the retention time of water in pipe network, but also indirectly reflects the stability and safety of water quality, based on the estimation of water age of the water supply system in order to evaluate the water quality of the water supply method has the superiority of prediction and management. [Methods] This paper reviews the research progress on the impact of water age of water supply system on water quality at home and abroad in recent years, and summarizes the water age measurement method in diversion and distribution pipeline network and secondary water supply link, water quality simulation and assessment of water supply system based on water age, and water age regulation method of water supply system. [Results] This paper systematically analyzes the applicability and limitations of various water age measurement method used in water supply systems. It also discusses the assessment of water quality through hydraulic model simulations of water age and the performance functions associated with it. Additionally, various method for optimizing water quality based on water age regulation are described, including water supply renovation, optimal scheduling, and water tank intake regulation. [Conclusion] This paper clarifies the relationship between water age and water quality by organizing and comparing the existing research result, which can effectively utilize the indirect monitoring of water quality by water age and provide reference for the subsequent research on water quality assessment and optimization of water

[收稿日期] 2024-07-26

[基金项目] 上海市“科技创新行动计划”启明星项目(22QB1401500)

[通信作者] 赵欣(1987—),女,高级工程师,研究方向为饮用水安全保障,E-mail: qdzhaoxin2@126.com。

supply systems. The future research direction of using water age to assess water quality should focus on establishing water age-water quality models applicable to different water supply systems in order to optimize water age management. In addition, water age calculation for water supply systems should be considered holistically to enhance the potential for water quality and service performance.

Keywords water supply pipelines network secondary water supply water age water quality water age control

水是生命之源,对于维持人类健康和社会发展至关重要。供水系统作为最重要的民生工程之一,承担着向城镇输送清洁饮用水的重要职责,经过水厂处理后的饮用水,其输水环节通常由供水管网及二次供水系统组成。随着社会经济的快速发展,人民对生活质量的追求不断提升,龙头出水水质已经成为影响公众幸福指数的关键因素。供水水质的好坏直接关系到人民的生命健康安全,世界卫生组织的调查显示,80%的全球疾病与不安全的饮用水质量相关^[1-2]。因此,随着城镇用水需求的增加,供水系统规模不断扩大,饮用水深度处理规模不断扩大,输水管网拓扑结构日益复杂,输配管网及二次供水环节水质安全是水务部门的首要任务。在此背景下,水龄作为一种替代性指标因其计算简便且无需额外高昂的监测设备而受到越来越广泛的关注,已经成为评估供水系统水质的重要指标^[3]。水龄测算作为水质评估的前期工作是必不可少的,随着供水水质的公众关注度不断增加,水务部门和研究机构在水龄对供水水质影响的研究上取得了显著进展。基于软件的水质模拟和在线监测,研究者们深入探讨了水龄对水质性能的影响机制,并结合水龄调控对供水水质进行优化。然而,现有的水龄研究对供水管网以及二次供水的水龄是分割开的,尚未从全盘的角度统一考虑。

本文基于国内外相关研究内容,系统地描述了供水系统输配管网及二次供水水龄评估水质的重要性。不仅为优化供水系统运行提供了理论指导,也为实际工程应用提供了创新的解决方案^[4-5]。最后,文章根据当前供水系统的智能化和信息化发展趋势,展望了未来基于水龄的水质评估的研究方向。

1 水龄测算

1.1 管网水龄测算

管网水龄是指清洁饮用水从水源点经过输配水管道到达用户点(入户总管)所花费的时间^[6]。管网水龄是一个衡量饮用水在供水管网中停留时间长短的参数,通常用于评估供水系统的运行效率和水质变化,可作为管网水质的替代指标^[7-8]。管网水

龄在供水管网中沿程变化,其取决于管道长度、管径、管道配件及节点用水规律等影响^[9]。管网水龄的测算有示踪剂法、水质波动估算法、余氯-水龄模型法、传统节点水龄算法等多种方法。

1.1.1 示踪剂法

示踪剂法通过向水体中添加已知浓度的示踪剂(如卤素离子及碳同位素等标记物质),然后通过水体采样测量示踪剂在水样中浓度随时间的变化^[10]。根据示踪剂的输入浓度和输出浓度,结合水体流速等参数,可以推算出水体水龄。这也要求示踪剂拥有能够在水体中稳定存在、易于测量、不会引起环境污染以及能够在水中均匀分布等特性。示踪剂法也可以结合模型对水龄进行测算,以减少水体采样等时间成本的开销。Ding等^[11]基于D2Q5晶格中的晶格玻尔兹曼方法,建立了一种有效的示踪剂年龄拉格朗日模型,并将其应用于南水北调工程中线饮用水源丹江口水库2种不同水库运行方案下示踪剂的年龄计算。然而,目前采用示踪剂法的水龄测算多用于自然水体水文参数的确定。由于出水余氯不能向管网系统添加额外的氯化物等因素,使用氯化物示踪剂法具有一定的局限性^[12]。

1.1.2 水质参数波动估算法

目前,水务部门已经基于监测与数据采集(SCADA)系统及地理信息系统(GIS)建立了供水系统的信息化管理平台,能够实时向运维人员提供在线水质监测数据曲线^[13]。水质波动法通过监测水质参数在不同时间点和管网位置的变化,可以推算出饮用水在管网中的平均停留时间。由于该方法不需向管网中投加示踪剂,而是依赖于在线监测的水质波动进行估算,在特定情况下更为实用高效。陆瑞珏^[12]通过管网监测点的浑浊度波动变化的时间差对水龄进行估算,与示踪剂法测水龄得出的结果大致相同。但该方法只提供管网位置中某一时间段的估算数值,无法分析每一时刻的水龄。同时,传感器的异常数据波动会导致水龄的误判。

1.1.3 余氯-水龄模型

余氯-水龄模型基于管网余氯浓度随着水龄的

增大而减少的原理,通过建立余氯与水龄之间的拟合方程对管网水龄进行测算^[14]。李璞等^[15]采用EPANET软件对管网进行水质模拟,计算出每个节点的水龄值及余氯值,并利用从水源到管网末梢节点的实测余氯值,拟合方程余氯值进行余氯衰减参数的率定,进而构建余氯-水龄模型。然而,部分供水区域的余氯值并非完全贴近余氯-水龄拟合曲线,该水龄测算方法还需进一步地研究。

1.1.4 传统节点水龄算法

传统节点水龄算法将管网拓扑分解为节点和管段,利用节点之间的水流动态和质量平衡方程来计算不同节点水龄^[16]。该方法考虑了管网的拓扑结构、管长、流速及管径等因素,通过水力计算对节点水龄进行测算,具体如式(1)。该算法对于简单的供水管网较为友好,但当供水管网拓扑复杂时,人工计算消耗大量的时间成本。

$$T_i = \frac{\sum_{n=1}^N q_{0i}^n T_{0i}^n}{\sum_{n=1}^N q_{0i}^n}; \quad N \in L_i \quad (1)$$

其中: T_i ——节点*i*的水龄,h;

T_{0i}^n ——从水源流到节点*i*的第*n*条供水路径水流所流经时间,h;

q_{0i}^n ——从水源流到节点*i*的来自第*n*条供水路径的水量, m^3/h ;

L_i ——流向节点*i*所有上游水源供水路径的集合。

1.2 二次供水水龄测算

二次供水水龄是指假定管网水龄为0的前提下,饮用水经过配水构筑物及配水管道到达用户龙头所花费的时间,其主要受到二次供水设施及用户用水规律的影响。据统计,我国97%的住宅建筑安装了二次供水系统。其中,二次供水系统多为水泵与水箱(池)结合的联合供水模式,上海二次供水系统就建造了超20万个二次供水水箱(池)^[17]。因此,本节主要介绍水箱(池)的水龄测算,包括静态估算法、动态混合水龄算法、总氯-水龄模型法等二次供水水龄测算方法。

1.2.1 静态估算法

静态估算法是一种简化的水龄计算方法,主要适用于基于住宅用户的平均用水量和水箱(池)的

有效容积来估算水箱(池)的平均水龄^[18]。该方法并不能提供水箱(池)在不同时刻的具体水龄,而是通过式(2)来进行初步估算。目前,水务部门为减小二次供水系统水龄,采用水箱(池)液位控制补水的方式进行水量调蓄。耿冰^[19]基于液位控制补水的水龄周期规律,对传统的静态估算法进行改进,改进后如式(3)~式(4)。该改进方法是基于居民用水稳定、忽略阀门开关时间、瞬时补水及存水与补水均匀混合等假设建立的情况下,是一种理想水龄计算方法。该方法提供的是水箱(池)水龄的上下边界范围,而非二次供水系统的动态水龄,具有一定的局限性。静态估算法简化了计算过程,在管理和监测供水系统中仍具有一定的实用性,特别是在需要快速估算水龄而无需复杂数据的情况下。

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{q} \quad (2)$$

其中: T ——水龄,h;

V_i ——水箱(池)的有效容积, m^3 ;

q ——住宅用户平均用水量, m^3/h 。

$$t_{\min} = \frac{bV}{q} \quad (3)$$

$$t_{\max} = \frac{V}{q} \quad (4)$$

其中: $t_{\min}$ ——水箱(池)最小水龄,h;

b ——水箱(池)存水与总有效容积的比例;

V ——水箱(池)总有效容积, m^3 ;

$t_{\max}$ ——水箱(池)最大水龄,h。

1.2.2 动态混合水龄算法

与静态估算法不同,动态混合水龄算法考虑了饮用水在二次供水系统中的实际流动情况和混合过程。其通过监测水箱(池)及管道进出水量,利用数学模型来模拟和计算饮用水在二次供水系统中的停留时间,具体如式(5)。该种算法能够动态预测二次供水系统中任意时刻的水龄,并且能够帮助水务管理者更好地优化供水系统的运行,确保水质达到所需标准。动态混合水龄算法应用于水龄控制系统中,其在水质优化中具有重要作用。何依静^[20]基于动态混合水龄算法的智能调控对试点居民小区的水质进行优化,结果表明,该算法在降低水龄的同时,

能够有效提升龙头出水水质。

$$o = \begin{cases} o_{in}, & V_s < V_{in} \\ \frac{V_{in} o_{in} + (V - V_{in}) \times (o_p + \Delta t)}{V_s}, & V_s \geq V_{in} \end{cases} \quad (5)$$

其中: o_{in} ——进水水龄, h;

V_{in} ——当前时刻进水量, m^3 ;

o_p ——上一时刻水龄, h;

V_s ——当前时刻水箱(池)水量或配水管道容积, m^3 ;

o ——当前时刻水龄, h。

1.2.3 基于液位控制的总氯-水龄模型

基于液位控制的总氯-水龄模型是通过总氯实测值对总氯衰减系数进行参数率定,在一个水龄周期内建立总氯与余氯关系的数学模型方法。Geng等^[17]根据温度与水箱(池)有效容积对总氯衰减系数进行拟合,基于液位控制下的水龄周期规律建立了总氯-水龄模型,该模型可根据总氯最低限制计算水箱(池)最大水龄,具体如式(6)。但该模型是基于居民用水稳定、瞬时补水及存水与补水均匀混合及不考虑进水总氯衰减等假设建立,与实际水龄会有一定偏差。同时,该计算方法只可确定水箱(池)保证总氯不低于限制时的最大水龄,是静态估算算法的一种改进形式。然而对于数据资料较少及总氯估算的特定场景下,该方法具有简便高效的特性。

$$e^{kT} = \left(\frac{C}{C_{st}} - 1 \right) \times a + e^{kT} = \left(\frac{C}{C_{st}} - 1 \right) \times a + 1 \quad (6)$$

其中: k ——总氯衰减系数, h^{-1} ;

C ——该区管网末端总氯平均质量浓度, mg/L ;

C_{st} ——总氯最低限制质量浓度, mg/L ;

a ——补水百分比。

2 基于水龄的供水系统水质模拟与评估

我国供水管网拓扑复杂,庞大的供水系统使得全面水质监测成为一项挑战。研究表明,水龄与水质之间存在密切关系,随着水龄的增加,供水系统中的余氯浓度下降,可能导致饮用水中细菌数量的增加。然而,水龄过短也可能导致用户龙头出水带有异味,从而影响用户的用水体验^[21-22]。因此,基于水龄的水质评估尤为重要。水龄-余氯模型也是一

种基于水龄的水质评估方法,该方法已在1.1.3节以及1.2.3节中描述,故在本节中不做过多赘述。

2.1 供水管网及二次供水水质模拟

供水管网水质模拟通过建立复杂的水力和水质模型,考虑管网的拓扑结构、流速及水质参数等因素,模拟饮用水在管道中的传输过程和水质变化。目前,国内外的水质模拟软件采用的传统算法包括广度优先搜索算法及拉格朗日传输算法。广度优先算法对单个节点水龄的计算较为迅速,但前期建模的时间成本较大,而拉格朗日传输算法在计算水龄过程中则会出现过多的信息冗余^[16]。现有主流的水质模型软件包括EPANET、WaterGEMS及WaterDesk等^[23],三者进行水质模拟的前提是管网水力模型的搭建。EPANET是由美国国家环境保护局开发的开源软件,并于2009年由李树平对该软件进行汉化。由于EPANET的开源性,其为水力模拟软件的开发及基于算法的管网优化作出了巨大贡献。WaterGEMS是一款由本特利公司开发的商业软件,其引入了空间分析、WIN界面及ArcGIS数据接口。WaterDesk是一款国产免费模拟软件,其具有强大的建模工具、主流的数据接口及便捷的可视表达,为建模人员提供了简便高效的建模流程。

吴雪等^[24]利用EPANET软件对常州市某供水管网进行水质模拟,通过模拟计算节点水龄判断管网余氯的分布情况,研究发现,结合管网余氯实际数据,较大的节点水龄增加了余氯偏低的可能性。侯煜堃等^[25]结合基于EPANET软件内置余氯衰减模型与管网节点水龄矩阵建立了加氯量优化模型,利用遗传算法求解获得最优加氯量。季京宣等^[26]以水龄代表水质变化,利用EPANET软件模拟计算多水源供水管网节点水龄,并构建区域综合水龄对水质进行评估。班福忱等^[27]基于WaterGEMS软件建立单水源供水管网并进行水质模拟,研究发现,节点水龄与余氯呈现周期性变化,在某一节点的水龄与余氯呈现负相关性。二次供水系统水质模拟的前提是需要利用水质模拟软件对二次供水系统中的泵组、配水构筑物及配水管道进行水力建模,对模型的水力及水质参数进行配置。该方法的优点在于可以根据住宅用户实际用水规律进行水质延时模拟,从而获得水龄在每一时刻的动态数值。但在实际建模过程中,数据收集和模型校核是一大难点。张素琼等^[28]利用WaterDesk对深圳某居民小区构建水力

水质模型,在模拟分析后得出水龄与水质存在一定的相关性。当用户水龄超过 40 h 时,末端龙头的余氯质量浓度无法达到 0.05 mg/L 的风险显著增大。Julien 等^[29]采用 EPANET 软件建立全尺度住宅建筑水力模型,并对该住宅建筑水质进行单独采样,研究发现,模拟计算水龄与样本中的军团菌浓度的相关性为 0.666,可间接利用水龄表示水质好坏。

现有供水管网及二次供水水质的模拟研究中,基本采用模拟计算得出的水龄作为供水水质的评价指标,并在研究过程中发现两者之间具有一定的相关性。由此可见,采用基于水龄的供水管网及二次供水水质模拟对于水质评估具有显著的适用性。对于无水质监测点的供水系统而言,利用水力水质模型的水龄模拟对水质进行评估具有一定的优越性。

2.2 水龄性能函数

水龄性能函数作为基于水质目标的性能曲线,旨在评估供水系统的性能表现并提供水龄参考值,间接反映了水质评估的有效性。水龄性能函数是以水龄为自变量,水龄性能值为因变量的分段函数,主要受水体水质指标包括氯、微生物以及消毒副产物等的影响。然而,现有研究显示,目前提出的水龄性能函数[式(7)~式(12)]通常建立在特定案例基础上,如表 1 所示。这些函数尚未统一适用于各种不同的供水系统,其推广性和普适性受到一定限制。因此,未来的研究可能需要通过更广泛的数据集和更全面的系统性能评估来进一步优化和统一水龄性能函数的设计,以更精确地量化和管理供水系统的水质性能。但从表 1 中的水龄性能函数可以看出,供水系统的水质性能与水龄呈现着明显的负相关性。

表 1 水龄性能函数

Tab. 1 Performance Function of Water Age

参考文献	性能函数	研究依据	描述
[30]	$\begin{cases} P_1 = 1, W_A \leq 6 \text{ h}; \\ P_1 = -0.12 \times (W_A - 6) + 1, 6 \text{ h} < W_A < 10 \text{ h}; \\ P_1 = 0, W_A \geq 10 \text{ h} \end{cases}$	(7) 水龄界限根据英国爱丁堡的单个案例分析而设定	当水龄不超过 6 h 时,供水系统表现最优;当水龄从 6 h 增加到 10 h 时,性能呈线性下降;当水龄超过 10 h 时,性能较差
[31]	$\begin{cases} P_1 = 1, W_A \leq 8 \text{ h}; \\ P_1 = -0.12 \times (W_A - 8) + 1, 8 \text{ h} < W_A < 48 \text{ h}; \\ P_1 = 0, W_A \geq 48 \text{ h} \end{cases}$	(8) 在实验室管道试验台上进行了水龄对主体水中细菌总数影响的研究,确定了 8 h 和 48 h 的水龄界限	该性能函数与 Coelho 所提出的结论相比,Shokoohi 等 ^[31] 基于水龄与总细菌数量的关系提高了水龄上限
[32]	$\begin{cases} P_1 = -0.0188 \times W_A + 1, W_A < 48 \text{ h}; \\ P_1 = 0, W_A \geq 48 \text{ h} \end{cases}$	(9) 将该性能函数与氯和三卤甲烷性能函数相结合,作为水质指标的子指标	该性能函数主要用于水库的性能评估,自来水进入系统后随时间线性下降,直到在 48 h 时接近于 0
[9]	案例 1: $\begin{cases} P_1 = 0.0319 \times W_A + 0.7395, W_A \leq 8 \text{ h}; \\ P_1 = 1, 8 \text{ h} < W_A \leq 17 \text{ h}; \end{cases}$	(10) 评估水龄和节点处游离氯浓度之间的相关性	基于余氯的性能函数及余氯-水龄模型建立,能够根据不同实际案例建立各种供水管网的水龄性能函数,该方法具有普适性
	$\begin{cases} P_1 = -0.2067 \times W_A + 4.5078, 17 \text{ h} < W_A \leq 21 \text{ h}; \\ P_1 = 0, W_A > 21 \text{ h} \end{cases}$	(11) -	-
	案例 2: $\begin{cases} P_1 = 1, W_A \leq 93 \text{ h}; \\ P_1 = -0.0175 \times W_A + 2.6105, 93 \text{ h} < W_A \leq 147 \text{ h}; \\ P_1 = 0, W_A > 147 \text{ h} \end{cases}$	(12) -	-

注: W_A 表示水龄, h; P_1 表示供水系统性能值。

2.3 平均(最大)水龄

平均水龄法最早由美国国家环境保护局提出,其利用水质模型的延时模拟获得各个节点在某一供水时段内水龄的平均值,并对各个节点水龄进行正态统计分析,将平均水龄频数落入最多的区间作为

整个供水系统水龄的代表值^[33]。最大水龄指供水系统在某一供水时段内水龄的最大值,平均水龄及最大水龄通常用于粗略评估供水系统中饮用水水质的好坏。Machell 等^[34]对英国某供水管网的模拟水龄和水质特征的相关性调查结果显示,计算出的平

均水龄、最大水龄和水质参数之间存在有限的关联,无法充分反映该供水管网的一般水质,应当考虑水体混合效应对水质的影响。2014年,Machell等^[35]利用水质模型模拟出实际供水系统的平均水龄,并对研究区域内的饮用水进行采样,以获得供水区域的真实水质。研究结果表明,模拟出的平均水龄与实测获得的水质存在着一定的关系,然而相关性并不理想。但对于管道内水体无明显扰动的流动路线中,大多数的水质参数与平均水龄有着较强的关系。朱斌^[36]考虑到单独采用平均水龄对水质评价的局限性,在研究过程中将平均水龄与其他水质指标共同作为水质分指数来构建水质评价指标,并划定水质指标范围,从而实现对居民小区的水质进行分级。由此可见,采用平均水龄或最大水龄对水质进行评估,可能会受到其他因素的干扰,存在着时空上的不确定性。但考虑到其计算的简便性及在其他因素对水质干扰程度较小的情况下,在短时间内对供水系统水质情况的粗略评估方面具有一定的优越性。

3 供水系统水龄调控方法

供水系统中的水龄与水质间存在着直接关系。较长的水龄会增加饮用水在供水系统中暴露于污染物的时间,可能导致余氯消失、细菌繁殖及水质降低等问题。相反,通过控制水龄,可以减少这些不利影响,保持水质的稳定性和安全性。此外,优化水龄还能降低管道及二次供水设施的腐蚀和水质变化的风险,从而提升供水系统的整体运行效率和服务质量。本节主要介绍了供水管网及二次供水的水龄调控方式。

3.1 供水系统改造

供水系统改造是通过重新调整原有供水管网布局结构及管径等参数,基于水力计算来优化饮用水流动路径和停留时间以控制水龄的一种有效方式。通过合理设计和规划管网,可以缩短从水源到用户龙头的输水时间。这种改造不仅可以提高供水系统的运行效率,还能有效降低水龄带来的水质下降风险。优化后的供水系统能够更快速、更稳定地向用户提供高质量的饮用水,满足城市发展和居民生活的需求。曾佳榆等^[37]对基于EPANET软件对某小区的供水系统进行优化,通过改造方案水龄对比发现,结合水箱水位调控的管径优化能够有效降低最不利点水龄。此外,吴潇勇^[38]对某小区部分水箱停

用的试验发现,冬季停用超过2个水箱能够有效降低水龄,进一步验证了供水系统改造对水龄控制的有效性。

3.2 优化调度

优化调度结合优化算法和水力模型,将水龄作为优化目标纳入目标函数中,通过优化供水系统的管网布局、水箱容量和水流动调度,旨在最大化减少水龄的同时,保持供水质量和系统效率^[39]。该优化算法能够综合考虑管长、管径、流速及压力等因素,通过精确的水力计算和优化策略,有效地缩短供水系统中饮用水的停留时间。该方法不仅提升了供水系统的整体运行效率和稳定性,还能够显著改善居民的用水质量和体验,适应城市化进程和人口增长带来的挑战。信昆仑等^[21]提出采用综合水龄指数作为算法的目标函数,将供水管网中的节点按水龄值的大小划分为近水源节点、管网中段节点和管网末梢节点3类,分别考虑每一类监测节点的水龄相对于流量的加权平均值。最后,通过设定合理的权重系数,得到该工况下的综合水龄指数,通过对区域内的水量及水压进行优化调度能够有效提升供水水质。

3.3 水箱(池)进水调控

由于城镇用水需求的增加以及高层建筑的增多,水箱(池)的容积和数量普遍呈现增长趋势。然而,现实中居民实际用水量与水箱(池)设计用水量存在严重差异,这导致了居民龙头出水的水质下降问题,采用传统的水箱(池)的分区、分格及合并等方式已经无法有效降低水龄。现有的水箱(池)进水多采用浮球阀控制、液位控制及时间控制。传统浮球阀通过最高液位控制进水阀门,随用随补的进水方式无法适应居民早中晚高峰用水的特点,造成水箱(池)中的水大部分时间处于静止状态,无法及时得到有效利用,甚至会出现死水区。液位智能调控改变传统浮球阀的进水控制方式,通过对水箱(池)设置液位传感器,基于水龄控制系统预测居民小时级用水,利用算法反推水箱(池)水龄,从而获得实时停补水液位,从而实现水龄控制^[20]。水箱(池)水位对水龄控制也有一定影响,曾佳榆等^[37]在水池水位的优化试验中发现,优化后的水池水位有效缩短了1h的水龄,停补水液位的合理设置也是一项控制水龄的手段。吴潇勇^[38]对试点小区采用了时间控制水池进水的方式,使得水池进水发生

在水泵吸水、水池水位下降之后,使得水池存水能够及时得到利用,但最低水位需要得到合理的设置。

4 总结与展望

供水系统水龄作为评估供水水质的一个替代指标,因其简明有效的特点得到了广泛的研究。文章以管网水龄及二次供水系统水龄对供水水质的影响为出发点,系统综述了现有水龄测算方法的发展和应用,并分析了不同水龄测算方法的优缺点。然而,目前的研究仅简要地表明水龄与水质呈现负相关性,并未建立统一的水龄-水质数学模型。文章还探讨了基于水龄控制的水质优化策略,包括水箱(池)进水调控、供水系统改造及优化调度等方面研究成果和实践案例。通过这些研究内容,文章全面展示了利用水龄调控手段来提升供水水质安全性的潜力,为未来相关领域的研究与实践提供了借鉴意义。最后,针对基于供水系统水龄的水质影响,提出以下2个未来研究方向的展望。

(1)从水龄测算的方法来看,管网水龄与二次供水系统水龄被单独划分,但两者对供水水质均有影响,应将管网水龄与二次供水水龄通盘考虑,建立供水系统水龄模型。

(2)从水龄对水质的影响来看,目前的研究只是基于具体案例建立的水龄-水质数学模型,且基本为水龄-总氯模型,并未将水质的全部影响指标纳入考虑,应当深入研究水龄与水质微生物、亚硝酸等指标的相关关系,建立适用于不同供水系统的水龄-水质模型。

参考文献

- [1] WANTZEN K M, ALVES C B M, BADIANE S D, et al. Urban stream and wetland restoration in the global South—A DPSIR analysis [J]. Sustainability, 2019, 11 (18): 4975. DOI: 10.3390/su11184975.
- [2] ZHAO Z Y, WANG H R, GONG S X, et al. Water quota system in China: Problems and countermeasures [J]. Water Supply, 2021, 21(4): 1701-1717.
- [3] 陈燕, 宋玉晶. 水龄对不锈钢水箱内水质的影响[J]. 净水技术, 2021, 40(s1): 298-302.
- CHEN Y, SONG Y J. Effect of water age on water quality in stainless steel water tank [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s1): 298-302.
- [4] 庞榆文. 不同材质水箱在不同水龄下的水质情况对比[J]. 净水技术, 2021, 40(s1): 326-331.
- PANG Y W. Comparative on water quality of water tank with different materials under different water ages [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s1): 326-331.
- [5] 杨琦, 王学良, 冯家俊, 等. 基于建筑水龄的高品质生活给水系统设计研究[J]. 给水排水, 2022, 48(10): 130-138.
- YANG Q, WANG X L, FENG J J, et al. Design and research of high quality drinking water supply system based on buliding water age [J]. Water & Wasterwater Engineering, 2022, 48(10): 130-138.
- [6] ROSSMAN L A. EPANET 2 users manual [M]. Cincinnati: Environmental Protection Agency, 2000.
- [7] KUREK W, OSTFELD A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 115: 189-197. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.11.030.
- [8] CALVO O O M, QUINTILIANI C, ALFONSO L, et al. Robust optimization of valve management to improve water quality in WDNs under demand uncertainty [J]. Urban Water Journal, 2018, 15(10): 943-952.
- [9] MONTEIRO L, ALGARVIO R, COVAS D. Enhanced water age performance assessment in distribution networks [J]. Water, 2021, 13(18): 2574-2574.
- [10] ZUBER A, ROZANSKI K, KANIA J, et al. On some methodological problems in the use of environmental tracers to estimate hydrogeologic parameters and to calibrate flow and transport models [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19: 53-69. DOI: 10.1007/s10040-010-0655-4.
- [11] DING Y, LIU H F, YI Y J. A Lagrangian model for the age of tracer in surface water [J]. International Journal of Modern Physics C, 2018, 29 (2): 1850013. DOI: 10.1142/S0129183118500134.
- [12] 陆瑞珏. 供水系统管网水龄计算方法研究[J]. 供水技术, 2019, 13(3): 9-11.
- LU R J. Study on calculation method of water age in water supply network [J]. Water Technology, 2019, 13(3): 9-11.
- [13] 李鹏, 付苑婷. 供水管网综合信息服务平台的设计与实现 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(8): 21-25.
- LI P, FU Y T. Design and implementation of water supply network comprehensive information service platform [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(8): 21-25.
- [14] 谈勇. 饮用净水管网余氯与细菌总数的相关性研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 105-107.
- TAN Y. Research on correlation of residual chlorine and total baterial count in water distribution network [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(13): 105-107.
- [15] 李璞, 吕谋, 董深, 等. 多水源供水管网余氯与节点水龄关系研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(19): 61-64.
- LI P, LÜ M, DONG S, et al. Relationship between residual chlorine and node age in multi-source water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(19): 61-64.

- [16] 王永,刘遂庆,信昆仑,等. 供水管网水龄的逐节点遍历简化算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(20): 199-201.
WANG Y, LIU S Q, XIN K L, et al. Simplified and junction by junction algorithm to calculate water age in urban water supply and distribution network [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(20): 199-201.
- [17] GENG B, FAN J J, SHI M H, et al. Control of maximum water age based on total chlorine decay in secondary water supply system [J]. Chemosphere, 2022, 287: 132198. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132198.
- [18] 章旻. 二次供水水龄的评估计算及水质提升探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 250-252, 304.
ZHANG M. Discussion on evaluation and calculation of secondary water supply water age and water quality improvement[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 250-252, 304.
- [19] 耿冰. 基于液位控制下的水池(箱)水龄估算方法及优化建议[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 142-145.
GENG B. Estimation of water age in water pool(tank) based on water level control and suggestion for optimization [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(5): 142-145.
- [20] 何依静. 水龄智能调控对二次供水水质的影响[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 84-89, 243.
HE Y J. Influence of intelligent regulation of water age on water quality of secondary water supply [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 84-89, 243.
- [21] 信昆仑,瞿玲芳,陶涛,等. 基于综合水龄指数评价的供水管网优化调度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1579-1584.
XIN K L, QU L F, TAO T, et al. Optimal scheduling of water supply network based node water age [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, 44(10): 1579-1584.
- [22] WANG F, LI W, LI Y, et al. Molecular analysis of bacterial community in the tap water with different water ages of a drinking water distribution system[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2018, 12(3): 6. DOI: 10.1007/s11783-018-1020-4.
- [23] 李明凯. 基于EPANET水力模型的H市供水管网可靠性研究[D]. 张家口:河北建筑工程学院, 2023.
LI M K. Reliability study of water supply pipe network in City H based on EPANET hydraulic model [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture and Engineering, 2023.
- [24] 吴雪,肖磊,孟凡琳,等. 常州市供水管网余氯分布规律研究[J]. 给水排水, 2020, 56(8): 121-125.
WU X, XIAO L, MENG F L, et al. Research on the residual chlorine distribution in Changzhou water distribution system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(8): 121-125.
- [25] 侯煜堃,赵硕,冯玉冠. 基于管道节点水龄的供水管网中途加氯优化[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 71-79, 160.
HOU Y K, ZHAO S, FENG Y G. Optimization of pipelines midpoint chlorination in water supply distribution networks based on water age of pipelines nodes [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 71-79, 160.
- [26] 季京宣,俞亭超,杨玉龙,等. 多水厂供水管网的供水分界带水质改善研究[J]. 给水排水, 2022, 58(8): 116-122.
JI J X, YU T C, YANG Y L, et al. Water quality improvement for mixed water supply boundary in a multi-waterworks water distribution system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(8): 116-122.
- [27] 班福忱,吴丹,黑月明. 基于WaterGEMS的节点水龄与余氯变化规律分析[J]. 城镇供水, 2017(6): 48-52.
BAN F C, WU D, HEI Y M. Analysis of the change rule of node water age and residual chlorine based on WaterGEMS[J]. City and Town Water Supply, 2017(6): 48-52.
- [28] 张素琼,冀滨弘,郭姣,等. 深圳市典型小区供水水力水质模型建设与应用[J]. 净水技术, 2024, 43(s1): 63-70.
ZHANG S Q, JI B H, GUO J, et al. Construction and application of hydraulic and water quality model of residential water supply in Shenzhen City [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(s1): 63-70.
- [29] JULIEN R, PALMEGANI M, LEE J, et al. Modeling water age in a full-scale residential plumbing system[J]. AWWA Water Science, 2023, 5(3): e1347. DOI: 10.1002/aws2.1347.
- [30] COELHO S T. Performance in water supply and distribution [M]. Edinburgh: Heriot-Watt University, 1996.
- [31] SHOKOOHI M, TABESH M, NAZIF S, et al. Water quality based multi-objective optimal design of water distribution systems [J]. Water Resources Management, 2017, 31(1): 93-108.
- [32] NYIRENDA M S, TANYIMBOH T T. Appraisal of water quality indices for service reservoirs in water distribution networks[J]. Water Science and Technology, 2020, 81(8): 1606-1614.
- [33] 郭姣,刘遂庆,信昆仑. 供水管网水质监测点布置方法研究与应用[J]. 给水排水, 2007, 33(8): 113-116.
GUO J, LIU S Q, XIN K L. Research and application on layout of water quality examination points in municipal water distribution networks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(8): 113-116.
- [34] MACHELL J, BOXALL J. Field studies and modeling exploring mean and maximum water age association to water quality in a drinking water distribution Network [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138(6): 624-638.
- [35] MACHELL J, BOXALL J. Modeling and field work to investigate the relationship between age and quality of tap water[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(9): 0000383. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000383.
- [36] 朱斌. 居民小区饮用水水质评价指数构建与应用[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 40-46, 173.

(下转第59页)

并实现评估成果可视化和动态管理。同时,为便于评估成果的信息化管理、动态更新和闭环管理,建议留存标准化数据成果,至少包含评估单元名称、评估单元唯一标识、关联管段编号、评估单元位置、评估单元管道长度、风险描述及风险分级等字段。

参考文献

- [1] 戴玉珍. 全面实施城市生命线安全工程建设高水平推动城市高质量发展[J]. 城乡建设, 2024(13): 9-9.
DAI Y Y. Comprehensive implementation of urban lifeline safety engineering construction, high-level promotion of urban high-quality development [J]. Urban and Rural Development, 2024 (13): 9-9.
- [2] 北京地下管线综合管理研究中心. 2023 年全国地下管线事故统计分析报告[R]. 北京:中国测绘学会地下管线专业委员会, 2023.
Beijing Urban Underground Pipeline Network Comprehensive Management Research Center. 2023 national urban underground pipeline network accident statistics and analysis report [R]. Beijing: Society of Surveying and Mapping, Urban Underground Pipeline Network Professional Committee, 2023.
- [3] MUHLBAUER W K. 管道风险管理手册[M]. 杨嘉瑜, 张德彦, 李钦华, 等. 译. 北京: 中国石化出版社, 2005.
MUHLBAUER W K. Pipeline risk management manual [M]. Translated by YANG J Y, ZHANG D Y, LI Q H, et al. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [4] 任瑛. 城市供水管网风险分析与评价 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.
REN Y. Risk analysis and evaluation on the municipal water supply network. [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [5] 郑成志, 高金良, 陈兵, 等. 城市供水管道失效后果评价模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 56-60.
ZHENG C Z, GAO J L, CHEN B, et al. The failure consequence evaluation model of urban water supply pipeline [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 56-60.
- [6] 张明媛, 刘超, 袁永博. 灾害环境中供水管网失效研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(4): 142-146.
ZHANG M Y, LIU C, YUAN Y B. Failure of water supply network in disaster environment [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(4): 142-146.
- [7] 周灵俊, 陶涛, 李建勤, 等. 基于随机生存森林的供水管道漏损风险评估[J]. 净水技术, 2024, 43(s1): 29-36, 141.
ZHOU L J, TAO T, LI J Q, et al. Risk assessment of water supply pipe leakage based on random survival forest. [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(s1): 29-36, 141.
- [8] 戚雷强, 刘思维, 孙晓峰. 基于动态模拟的城市供水管网风险评估研究[J]. 市政技术, 2022, 40(3): 140-144.
QI L Q, LIU S W, SUN X F. Study on risk assessment of urban water supply network based on dynamic simulation [J]. Municipal Engineering Technology, 2022, 40(3): 140-144.
- [9] 欧阳佳娇, 侯本伟. 基于风险模型的城市供水管道失效后果评估研究[J]. 城镇供水, 2023(6): 86-92.
OUYANG J J, HOU B W. Risk mode for assessing the consequences of failure in urban water supply pipelines [J]. City and Town Water Supply, 2023(6): 86-92.
- [10] 朱贵兵, 李俊, 苏善昭. 管内检测机器人在城镇供水管网评估中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 183-190.
ZHU G B, LI J, SU S Z. Application of in-pipe inspection robot in evaluation of urban water supply pipelines network [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 183-190.
- [11] 邓兵兵, 徐亚博, 谢昱姝, 等. 基于层次分析法的区域安全风险评估研究[J]. 安全, 2022, 43(2): 47-52.
DENG B B, XU Y B, XIE Y S, et al. Research on regional safety risk assessment based on analytic hierarchy process [J]. Safety & Security, 2022, 43(2): 47-52.
- [12] 杨文涛, 张悦, 徐帅, 等. 城市重特重大事故风险管控体系运行测评研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 162-167.
YANG W T, ZHANG Y, XU S, et al. Study on assessment of urban safety risks management and control system for preventing particularly serious accidents and major accidents [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(10): 162-167.
- [13] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
XIE J J, LIU C P. Fuzzy mathematics methods and its application [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000.
- (上接第 34 页)
- ZHU B. Construction and application of evaluation index for drinking water quality in shanghai residential district [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 40-46, 173.
- [37] 曾佳榆, 陆瑶, 曹昊晨, 等. 小区优质饮用水改造工程方案多维度比选[J]. 广东工业大学学报, 2023, 40(3): 122-126.
ZENG J Y, LU Y, CAO H C, et al. Multi-dimensional comparison and selection of high-quality drinking water renovation project schemes for communities [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2023, 40(3): 122-126.
- [38] 吴潇勇. 二次供水设施水龄优化可行性研究[J]. 给水排水, 2019, 55(2): 87-91.
WU X Y. Feasibility study on water age optimization in secondary water supply facilities [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(2): 87-91.
- [39] BRENTAN B, MONTEIRO L, CARNEIRO J, et al. Improving water age in distribution systems by optimal valve operation [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(8): 0001412. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001412.