

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.009

# 基于安全综合评价的管网监测点选址优化及应用

解子藤<sup>1</sup>, 王 圃<sup>1</sup>, 王峰青<sup>2</sup>, 黄善钦<sup>1</sup>, 王良超<sup>3</sup>, 田胜海<sup>2</sup>,  
江珊珊<sup>3</sup>, 张 晋<sup>4</sup>

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044; 2. 重庆水务集团股份有限公司, 重庆 400000; 3. 重庆水务集团水质检测有限公司, 重庆 400000; 4. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 城市供水面临水力、水质等多种安全风险威胁,仅考虑单一风险因素的管网监测点布置方案具有一定的局限性。因此,在综合考虑影响供水安全的水力、水质等多种潜在风险的基础上,利用模糊层次分析法建立了供水安全综合评价体系,并形成了节点安全风险指数,同时建立以节点覆盖安全风险指数最大、节点覆盖水量最大、监测点数量占比最小为目标函数的监测点选址多目标优化模型。以重庆某典型山地城市管网为例,通过EPANET 2.0软件构建管网水力水质模型,并运用NSGA-II算法对多目标数学模型进行求解分析,结果表明基于安全综合评价的管网监测点布置优化模型能有效挖掘管网各类安全风险信息,覆盖高安全风险节点,得到的监测点分布较为均匀,可为城市供水管网监测点布置提供参考。

**关键词:** 供水管网; 监测点选址; 安全综合评价; 模糊层次分析法; 多目标优化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0059-09

## Optimization and Application of Pipe Network Monitoring Point Location Based on Comprehensive Safety Evaluation

XIE Zi-teng<sup>1</sup>, WANG Pu<sup>1</sup>, WANG Feng-qing<sup>2</sup>, HUANG Shan-qin<sup>1</sup>,  
WANG Liang-chao<sup>3</sup>, TIAN Sheng-hai<sup>2</sup>, JIANG Shan-shan<sup>3</sup>, ZHANG Jin<sup>4</sup>

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Chongqing Water Group Co. Ltd., Chongqing 400000, China; 3. The Water Quality Testing Co. Ltd. of Chongqing Water Group, Chongqing 400000, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjin 210098, China)

**Abstract:** Urban water supply faces many safety risks such as hydraulic safety risk and water quality safety risk, and the arrangement scheme of pipe network monitoring points considering only a single risk factor has certain limitations. Based on comprehensive consideration of various potential risks such as hydraulic condition and water quality that affect water supply safety, a system for comprehensive evaluation of water supply safety was established to form a node safety risk index by using fuzzy analytic hierarchy process, and a multi-objective optimization model of monitoring point location was established, which took the maximum node coverage security risk index, the maximum node coverage water quantity

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404706); 重庆水务环境集团控股有限公司科技创新项目(KC2023-14)  
通信作者: 王圃 E-mail: wpu2120@sina.com

and the minimum number of monitoring points as the objective functions. The hydraulic and water quality model of pipe network in a typical mountainous city, Chongqing was constructed by EPANET 2.0 software, and the multi-objective mathematical model was solved and analyzed by NSGA- II algorithm. The optimization model of pipe network monitoring point arrangement based on comprehensive safety evaluation was capable of effectively exploring all kinds of safety risk information, covering high-safety risk nodes, and obtaining a more uniform distribution of monitoring points, which could provide reference for the monitoring point arrangement of urban water supply network.

**Key words:** water supply network; monitoring point location; comprehensive safety evaluation; fuzzy analytic hierarchy process; multi-objective optimization

安全稳定的供水系统是城市发展、人民幸福的保障。随着我国城市建设的快速发展,城市供水管网系统愈发庞大复杂,供水安全管理面临的挑战日益严峻。加强管网安全监测、提高水务安全管理、强化防控风险能力刻不容缓。供水安全保障是综合性问题,供水的安全性、稳定性都需要充分考量,爆管、停水、水质污染等事故的发生都将严重影响城市供水安全。目前在深圳、上海、重庆等地已逐步建立起智慧水务监测管理系统,新型的管网监测系统兼具采集水量、水压、流速、水质指标等数据的功能,合理的监测点布局和丰富的监测数据是新时代水务管理的发展基础,将为城市安全供水和水务管理发展提供有力支持。

传统的管网监测点一般按照人工经验布置,每2万人布置一个监测点,该布置方案缺少科学性,监测效果难以保障。目前关于供水管网常态监测点选址优化的研究可分为两类,一类是针对管网漏损、爆管等管网水力风险进行的优化布置,在选址优化模型中考虑节点水量、水压变化、管道等因素,以及时检测管道爆管情况、提高对管网漏损的感知灵敏度等为优化目标,建立管网监测点布置优化模型<sup>[1-3]</sup>;另一类则是以监测余氯、浊度、细菌总数等水质指标异常变化为目标进行优化选址,通过综合考虑水龄、余氯、水流方向变化等可能影响管网水质的因素<sup>[4-7]</sup>,提高管网监测的实效性和代表性。以上研究所设置的监测点布置方案往往单一地聚焦于供水水质安全或水力安全,忽视了除水质风险和水力风险外的其他安全风险因素,例如不同城市地形特征和供水模式对供水分界线上节点的影响,政府、医院、学校等特殊用户的供水安全保障及遭受供水事故后的社会影响。并且在智慧水务

不断发展的趋势下,管网监测应涵盖水质和水力数据等信息,全面监测管网可能遭受的水力、水质及其他易遭受的风险因素,无论是依靠人工经验布置监测点,还是仅考虑水质安全监测或水力安全监测的管网监测点布置方案都具有一定的局限性,应逐步发展为基于综合考虑管网水质、水力及多种安全风险的选址优化方案。

笔者在充分考虑多种安全风险和监测点代表性的情况下,利用模糊层次分析法(FAHP)进行供水管网安全综合评价并形成节点安全风险指数,表征管网内各节点可能受到的安全风险。结合覆盖水量法和实际应用情况,建立兼顾管网安全风险、监测点覆盖水量和布置方案经济性的三目标优化模型,利用NSGA- II算法对问题进行求解,通过调整监测点数量阈值可得到在不同监测点数量下的Pareto解集,为同类城市监测点布置方案的选择提供量化的数据参考。

## 1 节点安全综合评价

城市供水安全的影响因素广泛,从布置监测点的角度考虑,其供水安全问题主要源于输配水过程中产生的风险和供水节点自身的性质。本研究将结合水力、水质、管道和区位等影响因素,综合考察各类因素对供水安全的影响。水力影响因素包括节点流量、需水量、节点水压等,水质影响因素包括细菌总数、浊度、余氯等,管道影响因素包括管材、管龄、管径、管道埋深等管道属性,区位影响因素包括供水分界线、重要节点等特殊位置<sup>[8-11]</sup>。在考虑以上影响因素的基础上,通过模糊层次分析法建立供水管网安全评价体系,形成节点安全风险体系指标。

### 1.1 管网安全综合评价指标

在水力影响因素中,选取节点需水量和节点水压作为指标。需水量较大的节点其人口较多,对供水安全敏感<sup>[12]</sup>,影响范围广泛,更容易出现水量或水压不足状况<sup>[13]</sup>;水压越大的供水管段其管网需承受的压力越强,出现漏损、爆管等问题风险更大,管段内的生物膜也更易在水流冲击下脱落而污染水质。

在水质影响因素中,选取余氯、浊度、节点水龄作为指标。保持一定的余氯浓度能有效控制管网内生物膜的生长,降低水质的微生物污染风险,出厂水的余氯浓度在输送过程中会逐渐衰减,导致部分管网的余氯浓度过低,面临生物污染风险。浊度是评价管网水质最主要的感官特性,也是水质监测的重要指标之一。节点水龄越大,水流在管网中停留时间越长,受到污染的风险越大,水体浊度、生物可同化有机碳(AOC)浓度、微生物数量等水质指标与水龄具有正相关性<sup>[14]</sup>。

在管道影响因素中,选取管材、管龄、管径作为指标。给水管作为运输载体,腐蚀、水压变化、使用年限等因素的影响都将直接增大水质污染、漏损、爆管等供水安全事故的风险。根据管材的不同,一般可将管道分为金属和非金属两类,常用的有球墨铸铁管、无缝钢管、混凝土管等,其抗压性、耐腐蚀性等均有所差别。国内大部分管道为金属管材,在长期使用过程中因水力变化、管网腐蚀等因素更容易产生供水安全风险。管径的选择会直接影响流速等水力特性,管径越小的管道其发生故障的概率越大,并且随着管道腐蚀加剧和生长环的增大,小管径管道更容易发生故障<sup>[15]</sup>。

在区位影响因素中,将供水分界线上的节点和对供水保证敏感的节点作为衡量因素。政府、学校、医院、部队等用水单位对供水安全较一般用户更为敏感,发生供水事故后其造成的影响较大,且更容易受到战争等极端事件的影响,因此要重点考虑此类节点。在城市供水系统中,多水源供水系统十分常见,在供水分界线上的节点受到来自多个供水系统工况的影响,水流方向变化较为频繁,水压、流速等水力条件不稳定,在布置监测点时应当重点考虑<sup>[16]</sup>。

### 1.2 模糊层次分析法

模糊层次分析法是一种基于层次分析法和模

糊数学发展起的复合方法,已广泛应用于风险评价、方案优化等领域<sup>[17]</sup>。其基本原理是对问题进行拆分细化,分析影响问题的因素,构造递阶层次结构图,根据FAHP评价尺度(见表1)将同一层级的各因素进行打分,构造满足式(1)的模糊互补矩阵 $B$ 。将 $B$ 按式(3)、式(4)进行变换后可得模糊一致判断矩阵 $B'$ 。根据式(5)、式(6)对 $B'$ 进行处理,然后按照式(7)即可得层次分析各因素的权重向量 $w_i$ 。

$$b_{ij} + b_{ji} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$B = (b_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0.5 & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & 0.5 & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\xi_i = \sum_{k=1}^n b_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$B' = (b'_{ij})_{n \times n} = \left( \frac{\xi_i - \xi_j}{2n} + 0.5 \right)_{n \times n} \quad (4)$$

$$B'' = (\bar{b}_{ij}')_{n \times n} = \left( \frac{b'_{ij}'}{\sum_{k=1}^n b'_{kj}'} \right)_{n \times n} \quad (5)$$

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}' \quad (6)$$

$$w_i = \bar{w}_i / n \quad (7)$$

表1 FAHP评价尺度

Tab.1 Evaluation of FAHP

标度	定义
0.5	同等重要
0.6	稍微重要
0.7	明显重要
0.8	非常重要
0.9	绝对重要
0.1、0.2、0.3、0.4	反比较

根据模糊层次分析的基本原理,建立管网节点安全综合评价问题的递阶层次结构(见图1)。其中目标层为节点安全风险最大,准则层包含水力、水质、管道和区位等影响因素,因素层包含节点需水量、水压、余氯、水龄等9个因素。

邀请行业专家根据表1进行打分,根据模糊层次分析原理计算各层次因素的权重值(见表2)。值得注意的是,不同地区因其城市特征、基础设施建设等条件的不同,各影响因素的权重会有所变化,在不同地区应用该方法确定各因素权重时要因地制宜,根据当地条件对各因素进行比较,求得合理



的权重矩阵。

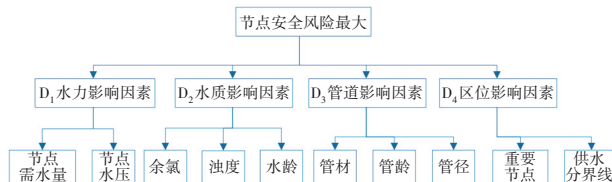


图1 节点安全风险递阶层次结构

Fig.1 Hierarchical structure of node security risk

表2 模糊层次分析各因素权重值

Tab.2 Weight values of each factor of fuzzy analytic hierarchy process

项目	D <sub>1</sub> 水力	D <sub>2</sub> 水质	D <sub>3</sub> 管道	D <sub>4</sub> 区位	权重值 $w_i$
	0.269 5	0.269 5	0.238 0	0.225 3	
D <sub>11</sub> 水量	0.5				$w_1=0.134 7$
D <sub>12</sub> 水压	0.5				$w_2=0.134 7$
D <sub>21</sub> 余氯		0.356			$w_3=0.095 9$
D <sub>22</sub> 浊度		0.356			$w_4=0.095 9$
D <sub>23</sub> 水龄		0.288			$w_5=0.077 6$
D <sub>31</sub> 管材			0.367		$w_6=0.087 3$
D <sub>32</sub> 管龄			0.345		$w_7=0.082 1$
D <sub>33</sub> 管径			0.288		$w_8=0.068 5$
D <sub>41</sub> 重要节点				0.576 7	$w_9=0.129 9$
D <sub>42</sub> 供水分界线				0.423 3	$w_{10}=0.095 3$

将各节点对应的需水量、水压、余氯、浊度、水龄等从供水企业数据库进行提取并建立水力水质模型后,按式(8)进行标准化处理,其中管径取该节点连接管道的最大值,重要节点及供水分界线上的节点取1,否则取0。将标准化处理的节点数据按照模糊层次分析得到的权重值加权求和后,即可得到该节点的安全风险指数  $R_i$ 。

$$A_i = \begin{cases} \frac{a_i - a_{\max}}{a_{\min} - a_{\max}} \\ \frac{a_i - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \end{cases} \quad (8)$$

$$R_i = 100 \times \sum_{i=1}^N A_i w_i \quad (9)$$

式中:  $a_i$  为节点数据信息;  $A_i$  为标准化后的管网节点数据;  $R_i$  为节点安全风险指数;  $w_i$  为各影响因素权重值。

## 2 监测点布置多目标优化模型

### 2.1 多目标优化函数

管网监测点布置应当充分考虑监测点的代表性,监测点布置优化的核心目的在于以最少的监测

点数量获得更具代表性的管网监测数据,实现对管网的全态势感知和有效管理,提高供水安全性和可靠性。除应考虑安全风险外, Lee 等<sup>[18]</sup>提出的覆盖水量法也是广泛使用的提高监测点代表性的方法,该方法认为当下游节点有超过一定比例的水量来自上游节点时,表明该节点能覆盖上游节点;当下游节点的水质达标时,上游节点处的水质也能达标,可通过 EPANET 2.0 软件模拟管网水量比例矩阵,从而计算节点的覆盖矩阵,再根据所覆盖节点的水量即可得到管网的覆盖水量矩阵  $S$  (覆盖水量标准值一般取 50%)。实际应用中,监测点布置往往受到经济条件的制约,要求在一定投资限额或监测点数量的情况下实现管网监测。综合考虑,分别建立对应的最大化覆盖水量指标 ( $Z_2$ )、以优化方案经济性为目标的最小化监测点占比指标 ( $Z_3$ ),并与节点安全风险指标 ( $Z_1$ ) 共同构建管网监测点多目标优化模型。

$$\text{St.} \begin{cases} X_i = \begin{cases} 1 & \text{该节点为监测点} \\ 0 & \text{该节点无监测点} \end{cases} \\ \sum_{i=1}^N X_i \leq C_j \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \max Z_1 = \sum_{i=1}^N R_i \cdot X_i \\ \max Z_2 = \sum_{i=1}^N S_i \cdot X_i \\ \min Z_3 = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $Z_1$  为节点安全风险指标;  $Z_2$  为最大覆盖水量;  $Z_3$  为监测点覆盖占比;  $S_i$  为节点覆盖水量;  $R_i$  为节点安全风险指数;  $X_i$  为监测节点;  $N$  为管网节点总数;  $C_j$  为监测点数量阈值。

### 2.2 管网模型

利用 EPANET 2.0 软件模拟供水管网水力水质,实现计算水头损失、节点水龄、覆盖水量、模拟反应物在管网中的扩散情况等功能。将 AUTOCAD 工程文件转换后导入软件,并输入管长、管径、节点需水量、节点水压、出厂水质指标等供水数据,通过调整主体反应系数、管壁反应系数等软件模拟参数,并与实际检测数据进行校核,可建立供水管网水力水质准动态模型,同时进行延时模拟,得到可供模型分析的水力水质数据。通过 EPANET 2.0 软件的

源头跟踪功能,可得到全部管网节点的水量比例矩阵,进而获得管网的覆盖水量矩阵和相关数据。

2.3 NSGA-II 求解

多目标优化问题在工程应用中十分常见,相比于单目标优化,多目标优化的解集一般不唯一,而是一组 Pareto 最优解,常用的求解方法有进化算法、模拟退火算法、蚁群优化算法等。NSGA-II 是一种非支配序列遗传算法<sup>[19]</sup>,已经被广泛应用于车间调度、工程设计优化、资源调配等多个使用场景,相较于 NSGA 算法,其主要通过提出快速非支配排序算法、采用拥挤度和拥挤度比较算子、引入精英策略,有效提高了计算效率和种群的整体水平,获得的 Pareto 解集更加均匀。NSGA-II 算法的流程如图 2 所示。

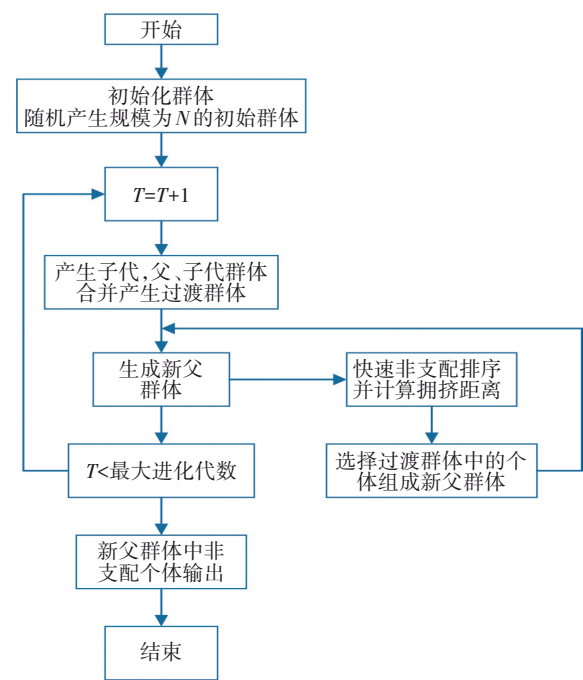


图2 NSGA-II 算法流程  
Fig.2 Flow chart of NSGA-II algorithm

3 工程实例分析

通过实际工程案例论证所提出的管网监测点选址优化模型的合理性,该案例为重庆市某区域供水管网,以嘉陵江为饮用水水源,供水规模为 $6\times10^4$  m<sup>3</sup>/d,实际供水人口约 30 万人,共有 135 个供水节点,如图 3 所示,图中红色节点表示政府、学校等重

要节点。

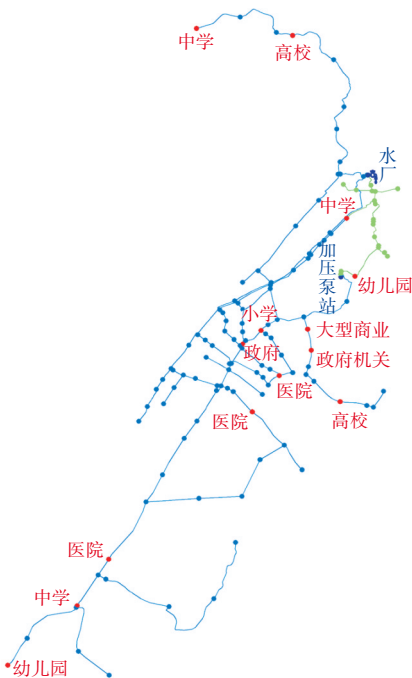


图3 工程管网拓扑图  
Fig.3 Topology of project pipe network

该区域地势高差大,最大高差达到 100 m,新、旧城区划分明显,采取高低压分区供水模式,在水厂中设有高压、低压两套供水系统,出厂水压力为 0.41~0.85 MPa,并在低压供水管网末端设置加压泵站,将饮用水输送至高压区域,供水分界线明显,是典型的山城城市供水模式,现对该管网的监测点布置方案进行求解分析。

3.1 管网数据处理

由供水企业提供的管网 GIS 系统数据库获取管网数据,利用 EPANET 2.0 软件建立管网水力水质模型。通过调整管网水力模型参数并将数据与实际监测数据进行校核,进行 72 h 水力延时动态模拟,获得余氯、浊度、水龄,计算得到其覆盖水量矩阵 S(见表 3,覆盖水量标准值取 50%)等数据。该区域管材为球墨铸铁管和无缝钢管,根据其抗腐蚀能力将球墨铸铁管的管道赋值为 1,无缝钢管赋值为 2;政府、医院、学校等 14 个节点作为重要节点,9 个节点位于供水分界线上;将以上数据整理后得到管网节点安全风险指数基础数据,见表 4。

表3 覆盖水量矩阵

Tab.3 Coverage water matrix L·s<sup>-1</sup>

节点	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	...	$X_{135}$
覆盖水量	60.97	78.38	46.08	42.6	47.92	113.9	119.51	82.28	88.69	...	138.36

表 4 节点数据信息

Tab.4 Node data information

名称	需水量/ ( $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )	压力/ MPa	余氯/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	浊度/ NTU	水龄/ h	管径/ mm	管龄/a	管材	重要 节点	供水 分界线
$X_1$	4.24	0.39	0.5	0.37	0.04	200	14	1	0	0
$X_2$	2.27	0.45	0.46	0.07	0.05	200	14	1	0	0
$X_3$	72.84	0.41	0.51	0.23	0.04	500	17	1	1	0
$X_4$	1.73	0.26	0.49	0.09	0.05	500	17	1	0	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$X_{135}$	3.32	0.55	0.03	0.31	0.58	300	10	1	0	0

利用式(8)对节点安全风险影响因素进行归一化处理,以消除量纲和数据差异带来的影响;将节点安全风险影响因素数据加权计算后可以得到该

节点的安全风险指数,如表5所示。节点安全风险指数最大值为 61.32,最小值为 1.69,平均值为 21.47。

表 5 节点安全风险指数

Tab.5 Node safety risk index

节点	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	...	$X_{135}$
安全风险指数	19.71	31.82	24.15	24.75	38.32	10.85	2.06	34.85	10.56	...	17.65

将全部节点的安全风险指数绘制 3D 散点图,如图 4 所示(节点安全风险指数正比于散点大小)。

要节点和供水分界线的节点有良好的覆盖效果。

### 3.2 模型求解及分析

在 MATLAB 平台上利用 NSGA-II 算法对管网监测点布置多目标优化进行求解,设置初始种群大小为 100、循环代数数为 500、染色体长度为 135、交叉概率为 0.9、变异概率为 0.1,在不设置监测点数量阈值时,得到监测点布置优化的 Pareto 最优解集,如图 5 所示。可知,随着监测点数量的增加,节点覆盖水量和节点覆盖安全风险指数也随之增加。

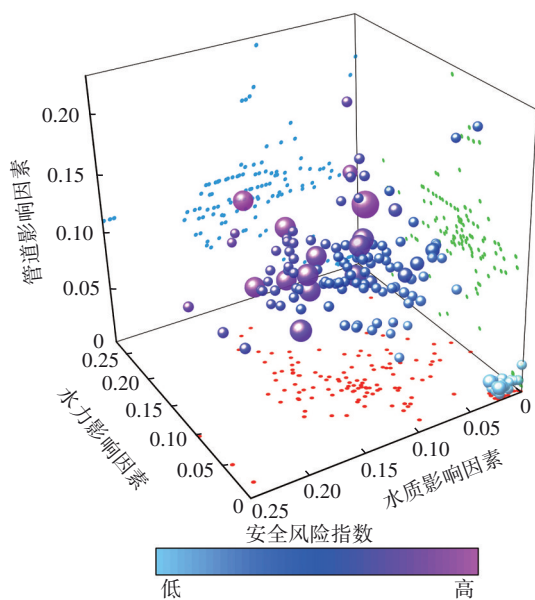


图 4 节点安全风险指数三维散点图

Fig.4 Three dimensional scatter diagram of node safety risk index

由图 4 可知,各准则层影响因素的独立性较好,无明显的线性相关性,说明现有评价维度较为合理、全面;部分节点在各个准则层上安全风险指数较低,在右下角位置,可认为该类节点较为安全,发生供水安全事故的风险较低;同时区位风险较大的点其整体安全风险指数偏高,表示该评价体系对重

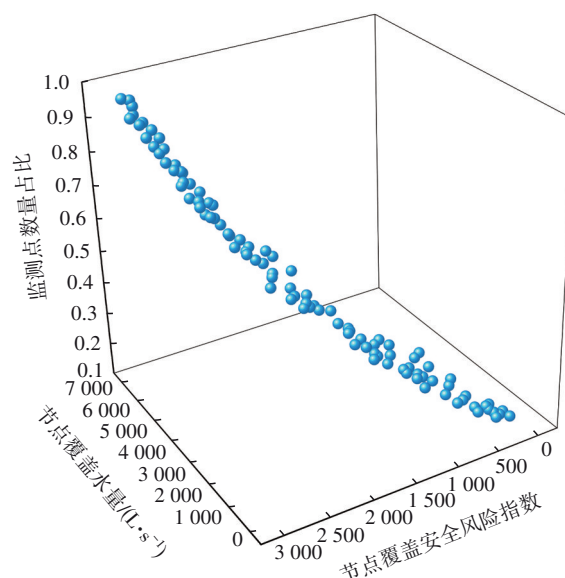


图 5 无监测点数量阈值的 Pareto 解集

Fig.5 Pareto solution set without threshold of monitoring point numbers

为进一步比较各方案的合理性,并为实际决策提供参考,在算法中加入约束条件 $C_j$ [见式(10)],通过改变监测点数量阈值 $C_j$ ,可获得不同参数条件下对应的 Pareto 解集,在各组方案中挑选节点覆盖安全风险指标前 3% 的方案作为可行参考方案,如表 6 所示。

表 6 不同监测点数量阈值下的典型方案信息  
Tab.6 Typical scheme information under threshold of different monitoring point numbers

监测点数量阈值 $C_j$	方案编号	管网监测点数量	节点覆盖安全风险指数	覆盖水量总和/ ( $L \cdot s^{-1}$ )	监测节点平均安全风险指数
15	方案 1	15	510.97	1 420.55	34.06
	方案 2	14	469.95	1 556.49	33.56
	方案 3	14	457.26	1 710.40	32.66
20	方案 4	20	670.40	1 963.70	33.52
	方案 5	20	667.41	2 100.17	33.37
	方案 6	19	619.22	2 200.72	32.59
25	方案 7	25	798.24	2 391.95	31.92
	方案 8	22	777.02	2 619.92	35.31
	方案 9	23	752.09	2 708.61	32.69
30	方案 10	27	899.37	2 671.23	33.31
	方案 11	28	898.71	3 056.53	32.09
	方案 12	29	906.98	2 804.02	31.27
原有按经验布置方案		21	601.02	1 809.98	28.62

在表 6 的 12 个布置方案中,各方案的监测节点平均安全风险指数均在 30 以上,明显高于管网节点安全风险指数均值 21.47,且优化方案的考核指标明显优于原有经验布置方案。在各组中选取监测节点平均安全风险指数较高、覆盖水量总和较大的方案,即方案 1、方案 5、方案 8、方案 11 作为各组的代表方案进行分析比较,图 6 为各方案对应的管网监测点分布图。可知,各方案的监测点分布较为均匀,大部分监测点为安全风险指数较高的节点和水量覆盖较多的节点,对于政府、医院、学校等重要节点也有很好的覆盖。方案 8 共布置了 22 个管网监测点,覆盖水量总和为 2 619.92 L/s,节点覆盖安全风险指数为 777.02,监测节点平均安全风险指数为各方案中最高值 35.31;在相较于方案 5 仅增加了 2 个监测点的情况下,节点覆盖水量增加了 24.75%,节点覆盖安全风险指数增加了 16.42%,优化效果显著,较好地平衡了工程经济投入和监测效果;在算法求得的解集中,该方案在各方面的考核指标均

较为优良,故推荐方案 8 作为监测点布置方案。实际应用中,可根据城市基础建设情况、工程经济投入情况和城市发展规划调整监测点数量阈值 $C_j$ ,得到在不同监测点数量下的布置方案及对应的优化函数值,为实际决策提供数据支持。

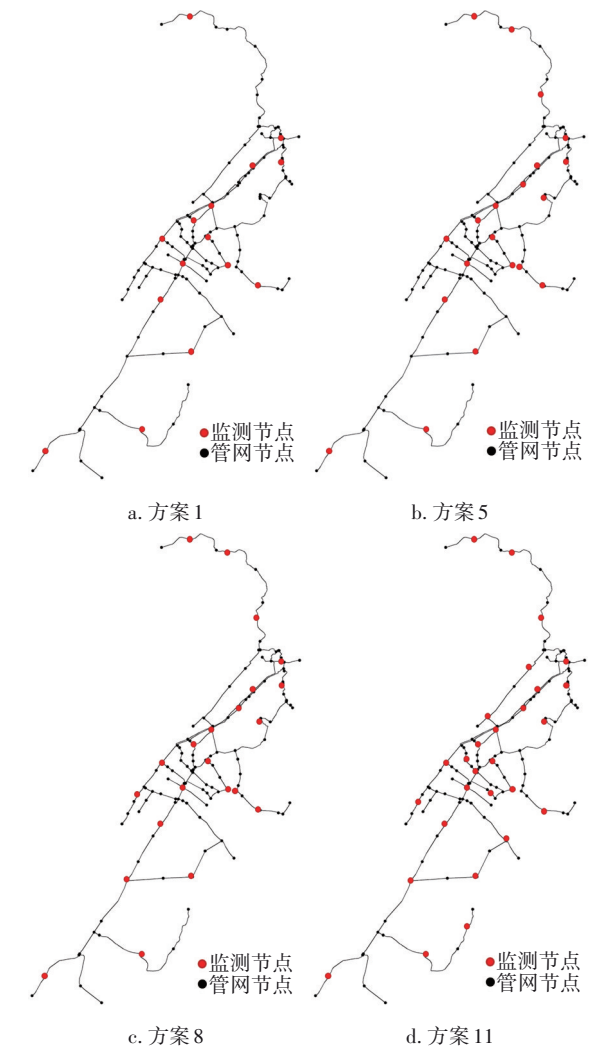


图 6 不同监测点数量阈值下的典型方案  
Fig.6 Typical schemes under threshold of different monitoring point numbers

调整 $C_j$ 计算不同方案过程中,发现多个节点在不同阈值条件下出现的频次较高,以表 6 所列的 12 个方案为例,节点 $X_6$ 、 $X_{23}$ 等 8 个节点被设置为监测点的次数超过了 9 次,且这 8 个节点的安全风险指数在 135 个节点中均处于前 10%,均属于潜在供水安全风险较大的节点。其中 $X_{23}$ 、 $X_{101}$ 、 $X_{123}$ 为高校和政府等重要节点,且 $X_{23}$ 节点处供水压力超过 0.8 MPa,属于节点水压较高的供水点; $X_6$ 因位于管网末端,其余氯水平较低且水龄较长,输水管道为管龄



17年的钢管,水质安全风险较大; $X_{53}$ 、 $X_{78}$ 节点处需水量较大,且位于输水干管附近,水量覆盖节点多。该现象说明在管网中存在潜在供水安全风险较大或是对其他节点影响较大的部分节点,应对其作为重点监测对象进行管理,尤其是在监测点布置数量有限时,应优先考虑在该类节点布置管网监测点。根据监测节点优化布局情况,每个节点可以覆盖或反映一定区域范围内的供水安全风险和水质水压情况,通过监测代表性节点可以实现对管网全局的表征。以优化得到的方案8为例,不同节点的覆盖范围如图7所示(同一颜色的管网由该供水区域监测点覆盖表征其供水安全风险)。

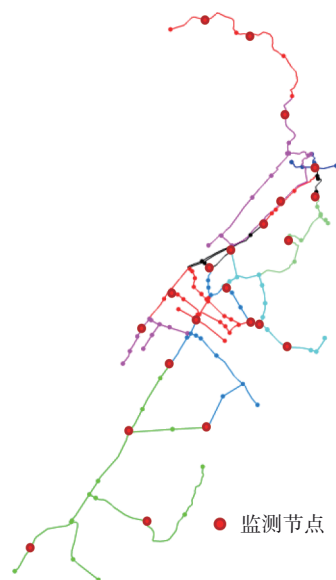


图7 监测节点覆盖范围示意

Fig.7 Schematic diagram of monitoring node coverage

#### 4 结论

① 利用模糊层次分析法建立了兼顾多种安全风险的管网安全综合评价体系,该评价体系涵盖了影响供水安全的多个因素,并将覆盖水量、经济性目标与安全目标一同考虑进行监测点选址优化。所设监测点能有效反映供水区域的安全风险,符合未来水务管理发展的方向,更加具有科学性和实用性,也为城市管网监测点布置优化提供了新思路。

② 常用的优化算法较多,本研究提出的优化模型能有效挖掘节点风险信息,较好地覆盖高风险节点。在多个方案中出现频次较高的节点具有较大潜在供水安全风险或监测价值,该部分节点应当在供水管网监测时作为重点监测目标。

③ 管网监测点的数量与覆盖水量、节点覆盖

安全风险指数有明显的正相关性,在实际应用中可以根据工程投资和当地基础设施建设条件选择适宜的布置方案,逐步加大投资,完善管网监测体系建设。

#### 参考文献:

- [1] ZHAO M K, ZHANG C, LIU H X, *et al.* Optimal sensor placement for pipe burst detection in water distribution systems using cost-benefit analysis [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2020, 22(3/4):606-618.
- [2] BLES A J, NEJJARI F, SARRATE R. Robust sensor placement for leak location: analysis and design [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2016, 18(1):136-148.
- [3] ARAL M M, GUAN J, MASLIA M L. Optimal design of sensor placement in water distribution networks [J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2010, 136(1):5-18.
- [4] HU C Y, DAI L G, YAN X S, *et al.* Modified NSGA-III for sensor placement in water distribution system [J]. *Information Sciences*, 2020, 509:488-500.
- [5] 李云, 王志红, 王琦, 等. 改进 NSGA-II 算法在水质监测点多目标优化研究中的应用[J]. *广东工业大学学报*, 2018, 35(2):35-40.  
LI Yun, WANG Zhihong, WANG Qi, *et al.* A study of multi-objective optimal placement of water quality monitoring stations based on improved NSGA-II algorithm [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2018, 35(2):35-40(in Chinese).
- [6] KRAUSE A, LESKOVEC J, GUESTIN C, *et al.* Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks [J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2008, 134(6):516-526.
- [7] LEE C W, YOO D G. Decision of water quality measurement locations for the identification of water quality problems under emergency link pipe operation [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(8):2707.
- [8] 丁相毅, 石小林, 凌敏华, 等. 基于因子分析的供水管网健康状态评价指标遴选[J]. *水资源保护*, 2021, 37(6):67-73.  
DING Xiangyi, SHI Xiaolin, LING Minhua, *et al.* Selection of evaluation indicators for water supply network health status based on factor analysis[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6):67-73(in Chinese).



- [9] 周华,姜石磊,周琮辉,等. 针对大型城市供水管网健康评估及修复指数模型的探索[J]. 给水排水, 2021, 47(S2):491-494.  
ZHOU Hua, JIANG Shilei, ZHOU Conghui, *et al.* Exploration of health assessment and model restoration for urban water supply network[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S2): 491-494(in Chinese).
- [10] 童桢恭,方菊,谌贻胜. 供水管网水质评价方法的探讨及其应用[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(9): 201-204.  
TONG Zhengong, FANG Ju, CHEN Yisheng. Water quality assessment method of water supply pipe [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(9): 201-204(in Chinese).
- [11] 王吉亮,吕谋,邵迎旭. 供水管网安全综合评价体系的建立与应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5):51-54.  
WANG Jiliang, LÜ Mou, SHAO Yingxu. Building and application of comprehensive safety assessment system for water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(5): 51-54(in Chinese).
- [12] 陈炳瑞,张震,付浩,等. 基于水力模型的多因子水质监测点优化布置方法研究[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(4):92-100.  
CHEN Bingrui, ZHANG Zhen, FU Hao, *et al.* Research on optimal arrangement of multi-factor water quality monitoring points based on the hydraulic model [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(4): 92-100(in Chinese).
- [13] 刘书明,王欢欢,徐鹏,等. 多目标大规模供水管网监测点的优化选址[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(1):78-83.  
LIU Shuming, WANG Huanhuan, XU Peng, *et al.* Multiobjective genetic algorithms for optimal monitoring station placement in large water distribution systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(1): 78-83(in Chinese).
- [14] 李寻,张土乔,翁风永,等. 基于节点水龄的供水管网水质研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(19):103-105.  
LI Xun, ZHANG Tuqiao, WENG Fengyong, *et al.* Study on water quality in water distribution system based on water age of nodes [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(19): 103-105(in Chinese).
- [15] 张静. 北方县镇供水管网水质保障技术评估研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.  
ZHANG Jing. Research on Water Quality Maintenance Technology Evaluation of Water Supply Pipe Network in Northern County [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021(in Chinese).
- [16] 李常虹. 沈阳市供水管网水质在线监测点优化布置与应用效能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.  
LI Changhong. Study on Layout Optimization and Application Performance for Online Water Quality Monitoring Points in Shenyang Water Supply Network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [17] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.  
ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88 (in Chinese).
- [18] LEE B H, DEININGER R A, CLARK R M. Locating monitoring stations in water distribution systems [J]. Journal American Water Works Association, 1991, 83(7): 60-66.
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.

作者简介:解子藤(1999- ),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为给水工程。

E-mail:15835787333@163.com

收稿日期:2023-06-27

修回日期:2023-09-06

(编辑:任莹莹)