

李兰娟, 孟珊. 基于层次分析法和风险矩阵法的城镇供水管道安全风险评估[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 52-59.

LI L J, MENG S. Safety risks assessment of urban water supply pipelines based on AHP and risk matrix methods[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 52-59.

## 基于层次分析法和风险矩阵法的城镇供水管道安全风险评估

李兰娟\*, 孟珊

(江苏省城镇供水安全保障中心, 江苏南京 210036)

**摘要** 【目的】 为了推动城市生命线安全风险防控智慧化,我国提出了推进城市燃气、桥梁、隧道、供水、排水等城市基础设施生命线安全工程的工作要求,采用信息化和智能化技术对城市基础设施运行状况进行实时监测、动态预警、精准溯源、协同处置。风险评估是城市生命线安全工程的重要内容之一。【方法】 基于供水行业特点和风险管理理论,建立了城镇供水管道安全风险评估体系。评估体系包含可能性指标和后果性指标两类,同时考虑安全管理水平作为可能性修正指标。指标体系共分为三级,其中可能性一级指标2个、二级指标4个、三级指标15个。采用层次分析法(AHP)计算各评估指标权重。通过风险矩阵法,综合考虑可能性等级和后果性等级、后续管控措施的分级设置等判定风险等级,风险等级共划分为四级。【结果】 开展了评估指标体系的实际案例应用,首先基于服役年限、管材等因素开展管道初筛,然后开展指标权重确定、评估单元划分、风险分析等。评估结果表明,导致较大以上风险的主要方面是可能性指标,具体为管材老旧、压力变化幅度大、漏损量大、管道间距不足等因素。【结论】 评估结果可为供水企业和相关行业主管部门的日常运行管理、行业监管和后续计划安排提供依据和参考。

**关键词** 供水爆管 风险管理 风险评估 层次分析法(AHP) 风险矩阵

**中图分类号:** TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)03-0052-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.007

## Safety Risks Assessment of Urban Water Supply Pipelines Based on AHP and Risk Matrix Methods

LI Lanjuan\*, MENG Shan

(Security Support Center for Urban Water Supply of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

**Abstract** [Objective] In order to promote the intelligentization of urban lifeline safety risk prevention and control, China has put forward the requirements for promoting the safety project of urban gas, bridges, tunnels, water supply, drainage and other urban infrastructure lifelines, and adopt information technology and intelligent technology carry out real-time monitoring, dynamic early warning, precise traceability and collaborative disposal of the operation status of urban infrastructure. Risk assessment is one of the important contents of lifeline safety project. [Methods] Based on the characteristics of the water supply industry and risk management theory, the safety risk assessment system for urban water supply pipelines was established. The evaluation system includes two types of indices: possibility indices and consequence indices, and the safety management level was considered as the possibility modification index. The index system was into three levels, including 2 primary indices of possibility, 4 secondary indices, and 15 tertiary indices. The weights of each evaluation index are calculated by the analytic hierarchy process(AHP). The risk level was determined by using the risk matrix method, which comprehensively considered the possibility level and the consequence level, and the risk level divided into four levels. [Results] The practical application of the evaluation index system was carried out. Firstly, the pipeline was screened based on the service life and pipe, and then the determination of index weight, the division of evaluation unit and risk analysis were carried out. The result of the evaluation showed that the main aspects leading greater risk are the possibility indices, specifically the old pipe material, large pressure change amplitude, large leakage, insufficient pipeline spacing and other factors. [Conclusion] The

[收稿日期] 2024-11-11

[通信作者] 李兰娟(1985—),女,高级工程师,研究方向为城镇供排水及城市生命线等技术政策,E-mail:290834772@qq.com。

evaluation can provide basis and reference for the daily operation and management of water supply enterprises and relevant industry authorities, industry supervision and follow-up planning.

**Keywords** water supply pipeline burst risk management risk assessment analytic hierarchy process(AHP) risk matrix

截至 2023 年底,我国城镇化率已经超过 65%,保障城市正常运行的基础设施在经历爆发式增长后正逐步进入老化期。据统计,我国每年城市基础设施相关安全事故数以千计,且处于快速上升趋势,严重威胁城市运行和发展。2023 年,中华人民共和国住房和城乡建设部印发《关于推进城市基础设施生命线安全工程的指导意见》,拟依托现代信息化和智能化技术对城市燃气、桥梁、隧道、供水、排水等基础设施运行状况进行实时监测、动态预警、精准溯源、协同处置,推动城市生命线安全风险防控智慧化<sup>[1]</sup>。供水作为城市生命线重要场景之一,需要重点关注。《全国地下管线事故统计分析报告》显示:2022 年 10 月—2023 年 9 月,全国 1 137 起地下管线事故中,供水管道事故占比接近 60%<sup>[2]</sup>。风险评估是风险隐患和薄弱环节识别的重要手段,更是工程措施和监控手段落实的重要基础,对城市生命线工程有重要的指引性。

美国国家环境保护局(EPA)发布了输配水系统状态评估技术,建立了针对管道结构及物理性能的评价,重点对管道未来运行寿命进行评估。英国的《管道风险管理手册》中给出了管道风险管理的系统方法,重点考虑了第三方损害指数、腐蚀指数、设计指数和误操作指数以及泄漏影响系数等几个方面<sup>[3]</sup>。近年来,国内学者对供水管网风险评估作了相关研究。任瑛<sup>[4]</sup>从管道腐蚀性、水力水质等方面建立风险评估体系,利用灰色关联度、模糊层次分析评估管网运行状况,研究表明,供水管网低流速运行较为普遍,地裂缝区域 DN100 以上管道爆管与地裂缝的活动密切相关。郑成志等<sup>[5]</sup>依托管道水力模型、综合风险概率和失效后果构建风险评估模型,可指导阀门的布置和管道设计规划,并提出降低管道失效后果的措施。张明媛等<sup>[6]</sup>借助水力模型,将管网爆裂和渗漏结合起来,提出关闭管段和发生漏失情况下的水力模型。周灵俊等<sup>[7]</sup>采用随机森林算法构建供水管网漏损风险评估模型,识别影响漏损的关键因素,预测管道在未来不同管龄下的生存概率。戚雷强等<sup>[8]</sup>选取管道埋深、管压、管材等评估指标,构建了供水管网风险评估模型进行风险评估。

欧阳佳娇等<sup>[9]</sup>建立供水管道破损事件预测模型,评估破损后果。朱贵兵等<sup>[10]</sup>采用管道内检测机器人对供水管网进行内窥检测,检测和评估管道运行状态。现有研究成果归纳起来分为 3 类:(1)指标评估法,即确定多因素的管道风险评估体系,开展风险评估;(2)机理模型分析法,通过试验和数值模拟建立相应模型和力学表达式;(3)老化失效概率模型分析法,建立预测模型,对供水管网的安全性和可靠性进行预测。总体而言,国内供水管网风险评估处于理论研究阶段,实际应用的案例偏少。针对上述研究现状,文章基于供水行业特点、现有基础情况和江苏工作实践,采用定性与半定量相结合方式,对供水管网开展安全风险评估研究与应用,以期为行业发展贡献有益参考。

## 1 风险评估方法

### 1.1 指标选取

根据江苏省内多家自来水公司调研情况统计,供水管道爆管事件的发生与管材、管龄、建设施工质量、外部荷载均匀性、冷热急剧变化程度、第三方施工破坏等关联较大。供水爆管发生后,除了会造成限供、停供、断供等极端事件外,还会造成场地淹没、地基冲刷和道路塌陷等次生灾害,威胁城市的正常运转和居民人身安全。基于上述考虑,风险评估指标体系从风险发生的可能性和风险发生后产生的后果 2 个层面建立,分为可能性指标和后果性指标两大类。安全管理水平的高低直接影响爆管的发生,为此,在上述 2 类指标基础上,设计了企业管理水平指标对爆管可能性评估结果进行修正,以达到接近实际现状的目的。指标设计上,综合考虑行业特点和供水管理现状及水平,对于目前企业尚未采集或者无采集能力的指标(如土壤应力)进行剔除,具体评估指标体系如图 1 所示。

#### 1.1.1 可能性评估

管道本质情况是影响管道安全的重要因素之一,如管材、管龄、管龄及所处周边环境。管网运行管理工作的好坏会直接影响日常运行中管网的稳定状况。因此,可能性评估指标的一级指标层从管道本质情况、管网运行管理 2 个方面考虑。

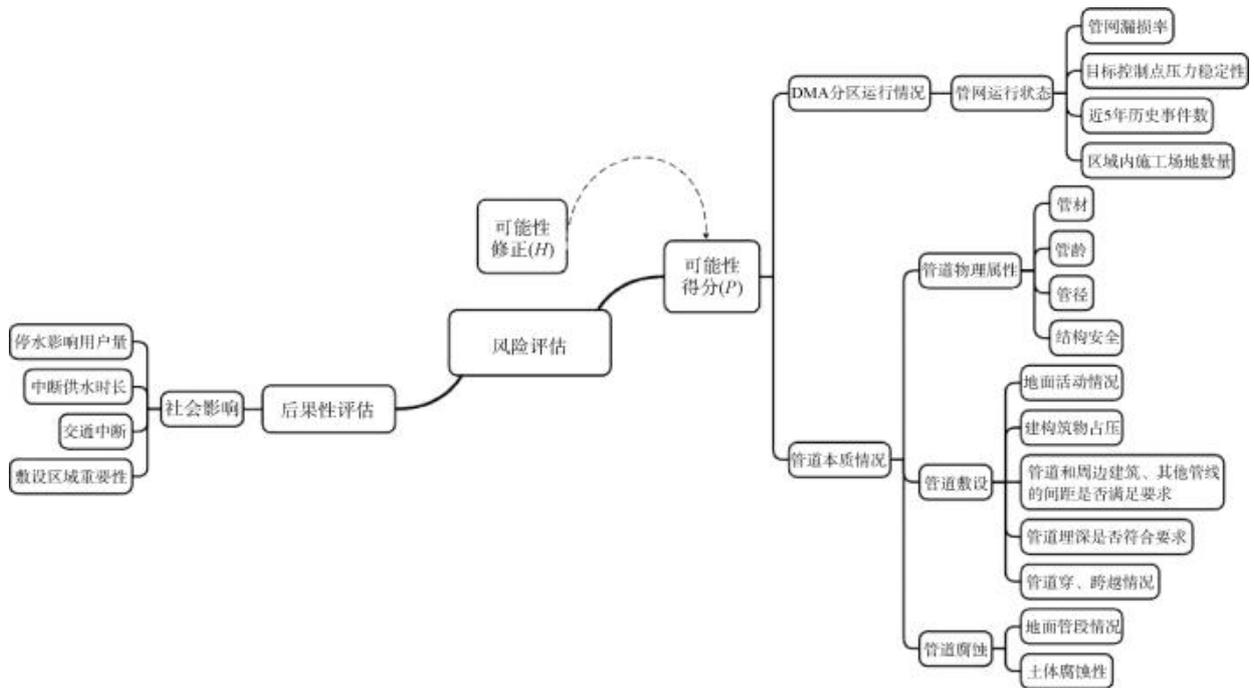


图1 指标体系框架

Fig. 1 Framework of Evaluation Indices System

管道本质情况主要包括管道物理属性、管道敷设、管道腐蚀 3 个二级指标。运行管理主要考虑供水 DMA 分区运行情况。

管道物理属性包括管材、管龄、管径、结构安全 4 个三级指标。管道的敷设情况包括地面活动情况、构筑物占压、管道和周边建筑、其他管线的间距是否满足要求、管道埋深是否符合要求、管道穿、跨越情况 5 个三级指标；管道腐蚀包括地面管段情况和土体腐蚀性 2 个三级指标，该指标为可选指标，宜结合监测或监测数据确定。供水 DMA 分区运行情况主要涉及管网的运行状态，包括管网漏损率、目标控制点压力稳定性、历史事件、区域内施工场地数量 4 个三级指标。

### 1.1.2 可能性修正

外力破坏是造成供水爆管的一个重要因素，而且城市的第三方施工管控水平是整体影响、不因某一管段而有差异，所以选取该指标为修正性指标。由于企业安全管理水平也会整体影响所管理范围内供水管道安全风险发生的可能性，所以将企业安全管理水平作为可能性的修正性指标。因此，选取第三方施工管控水平、企业安全管理水平 2 个安全管理水平指标作为可能性指标的修正

系数。

第三方施工管控水平主要包括第三方施工破坏历史事件率、四方交底、信息报告与共享、智慧监测等 4 个二级指标。

企业安全管理水平包括管道工程竣工验收、信息化系统建设管理、安全培训、安全机构及人员配备、应急救援、日常运行管理 6 个二级指标。其中，应急救援又包含抢险救援能力、应急预案的制订、应急演练 3 个三级指标；日常运行管理包含管道检查制度/计划/记录/处理、巡检周期、操作记录和日志、压力监测点布置密度 4 个三级指标。

### 1.1.3 后果性评估

供水主干管爆管往往会导致大面积停水事件发生，给居民生活、企业生产带来不便，影响社会正常生产生活，并会造成一定经济损失，还可能因水流冲刷造成地下空洞，尤其是穿越重要交通（如下穿隧道、轨道交通、高速公路、铁路等）的管道，一旦爆管将可能引发公共安全事件。因此，后果性指标的一级指标层为后果影响。

基于供水行业民生工程的特点，后果性指标重点从社会影响考虑，后果性指标的二级指标为社会影响。

社会影响又主要包括停水影响用户量、中断供水时长、交通中断、敷设区域等 4 个三级指标。

### 1.2 权重计算

采用层次分析法计算各评估指标权重。层次分析法是定性和定量分析相结合,适用于多目标、多层次、多因素的复杂系统决策,可用于系统的综合评价与决策及评价系统中各个要素的权重大小<sup>[11-13]</sup>。层次分析法是将决策问题按目标层和准则层的顺序分解为不同的层次结构,然后用求解判断矩阵特征向量的办法,求得准则层每一元素对目标层的优先权重。计算步骤包括:建立层次结构模型、构造判断(成对比较)矩阵、层次排序及其一致性检验。

### 1.3 风险分级判定

可采用数据统计、数值计算、规范参考、专家问卷等方法设定指标评分。不同指标的评分按照其指标数值等级与供水管道爆管事件概率打分,分值在 0~10 分,分值越高表示该指标对管道安全影响越大,分值越低表示该指标对管线安全影响越小。可能性评估采用半定量评估方法,计算出可能性评估分值。采用半定量评估方法计算,将第三方施工管控、企业安全管理水平的评估结果作为可能性等级的修正系数。根据修正后的管道可能性计算分值,确定可能性等级。可能性评估按照极低、低、中等、较高、高分为 1~5 级。后果性评估将各类因素采用半定量评估方法,计算后果性评估分值。后果性评估按照后果影响小、一般、较大、重大、特大分为 1~5 级。具体以可能性评估等级分级为例进行说明,如表 1 所示。可能性修正系数如表 2 所示。

表 1 可能性等级分级

Tab. 1 Classification of Probability Levels

可能性分值	等级	说明
$0 \leq P < 2$	1	可能性极低
$2 \leq P < 4$	2	可能性低
$4 \leq P < 6$	3	可能性中等
$6 \leq P < 8$	4	可能性较高
$8 \leq P \leq 10$	5	可能性高

综合考虑可能性等级和后果等级、后续管控措施的分级设置,通过风险矩阵判定风险等级。风险等级划分为 I (低)、II (一般)、III (较大)、IV (重大)4 个等级,如表 3 所示。

表 2 可能性修正系数

Tab. 2 Correction Factors of Probability

安全管理对应分值	修正系数
$0 \leq H < 1$	0.95
$1 \leq H < 2$	1.00
$2 \leq H < 3$	1.05
$3 \leq H < 4$	1.10
$4 \leq H < 5$	1.15
$H \geq 5$	1.20

表 3 风险矩阵

Tab. 3 Risk Matrix

风险等级	后果性等级				
	1	2	3	4	5
5	III	III	IV	IV	IV
4	II	III	III	IV	IV
可能性等级 3	II	II	III	III	IV
2	I	II	II	II	III
1	I	I	II	II	III

### 1.4 评估周期及要求

为确保评估结果的时效性和指导性,应每年开展管道筛查工作。筛查首先确定范围为 DN300 及以上的供水管道;再基于服役年限、管材、管网漏损率、高流速管道、周边环境等信息,同时考虑投诉工单、企业管道抢维修及检漏记录、重要道路下的主要管线、主干管、浑水管等因素。满足筛查条件的管道安全风险评估周期为 3 年,其他管道安全风险评估周期宜为 6 年。当出现管道或管道设备进行重大修理改造、运行工况发生重大变化、沿线环境发生重大改变、其他可能导致风险等级提高或降低的情况等情况之一时,对产生变化的管道立即重新进行评估。风险评估周期如图 2 所示。评估组应由从事城镇供水管道设计、施工、运行、管理等工作 5 年及以上经验丰富的人员组成,人数不少于 5 人。

评估流程主要包括计划与准备、管道筛查、前期调研、分析评估、提出管控措施、编制评估报告,具体流程如图 3 所示。

## 2 应用分析

### 2.1 基本情况

某市供水规模为 30 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,市域 DN80 以上供水管道长度约为 2 700 km, DN300 及以上管道长度为 828 km,其中球墨铸铁管长度约为 654 km、占



图2 风险评估周期

Fig. 2 Risk Assessment Cycle

比为 79%，钢管长度约为 71 km、占比为 8%；PE 管长度约为 29 km、占比为 4%；PVC 管长度约为 15 km、占比为 2%；玻璃钢及钢筋砼管长度约为 59 km、占比为 7%。根据 1.4 节中筛查条件，本次共筛选确定供水管道长度 58 km 优先开展评估，约占 DN300 及以上总管网长度的 27%。

### 2.2 评估权重确定

按照 1.1 节构建的评估指标体系，选择经验丰富 5 名专家组成专家组。采用层次分析法，通过 1~

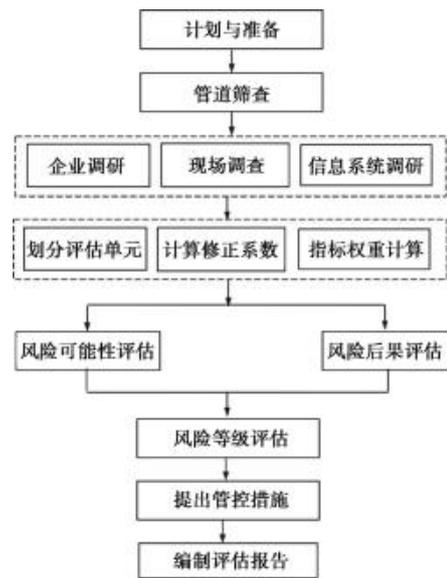


图3 评估流程

Fig. 3 Evaluation Process

9 标度法，对评估体系中各指标进行独立打分，取其平均分(向上取整)，作为最终打分结果，构造判断矩阵，据此计算各指标权重，并对所形成的权重参数矩阵进行数据标准化处理，用于实际评估计算。每位专家均对所有指标进行权重计算，最后取平均值，详细权重值如表 4~表 6 所示。

表 4 可能性评估指标权重

Tab. 4 Weights of Possibility Evaluation Indices

一级指标	一级指标权重取值	二级指标	二级指标权重取值	三级指标	三级指标权重取值
管网运行管理	1	供水 DMA 分区运行情况	1.00	管网漏损率	0.22
				目标控制点压力稳定性	0.30
				历史事件	0.33
				区域内施工场地数量	0.15
管道本质安全	1	管道物理属性	0.65	管材	0.53
				管龄	0.32
				管径	0.15
				结构安全	
		管道敷设	0.35	地面活动情况	0.25
				建、构筑物占压	0.17
				管道和周边建筑、其他管线的间距是否满足要求	0.14
				埋深是否符合要求	0.30
		管道穿、跨越情况	0.14		

根据各管段实际状况，按照道路名称进行分类归纳，综合考虑评估管段所在道路、管材、管径、建设和投用时间、敷设方式等属性及管段沿线区域环境等因素，进行评估单元划分。经核对后，对

部分管段管材、管龄、管道所处环境、运行状态类似的评估单元进行合并或拆分。若相同属性管道沿线的区域环境类似，则该段管道作为同一个评估单元。如某道路下管网总长度为 1.186 km，但

表5 安全管理水平评估指标权重  
Tab. 5 Weights of Safety Management Level Evaluation Indices

一级指标	一级指标权重取值	二级指标	二级指标权重取值	三级指标	三级指标权重取值
第三方施工 管控水平	0.55	第三方破坏历史事件率	0.35	/	/
		信息报告与共享	0.29	/	/
		四方交底率	0.16	/	/
		智慧监测	0.20	/	/
企业安全 管理水平	0.45	管道工程竣工验收资料	0.10	/	/
		信息化系统建设管理	0.20	/	/
		安全培训	0.08	/	/
		安全机构及人员配备	0.11	/	/
		应急救援	0.35	抢险救援能力	0.52
				应急预案的制定	0.25
				应急演练	0.23
		日常运行管理	0.16	管道检查制度/计划/记录/处理	0.36
		巡检周期	0.25		
		操作记录和日志	0.16		
		压力监测点布设密度	0.23		

表6 后果性指标评估权重  
Tab. 6 Weights of Consequence Evaluation Indices

一级指标	一级指标权重取值	二级指标	二级指标权重取值	三级指标	三级指标权重取值
后果影响	1	社会影响	1	停水影响用户量	0.36
				交通中断	0.22
				中断供水时长	0.17
				敷设区域	0.25

由于管材有钢管和球墨铸铁管两种,且与4条不同道路交叉,所以该道路划分为3个评估单元,评估单元长度分别为663、132、391 m。本次共划分评估单元为144个。

### 2.3 分析评估

#### 2.3.1 可能性评估

根据资料调研和现场调研结果,按照指标体系和计算方法,对各评估单元进行可能性评估,确定可能性等级。以可能性二级指标管道物理属性中管材、管龄、结构安全3个三级指标为例进行说明。根据管材安全性和可靠性对管材属性指标进行赋分,其中球墨铸铁管分值为[1,2];钢管、不锈钢管分值为[3,4];预应力混凝土、PE管分值为[5,6];其他化学建材管道分值为[7,8];灰口铸铁分值为[9,10]。针对管龄指标,管龄越长、认为风险越高,管龄(A)<10年分值为[1,3];10≤A<20年分值为[3,5];20≤A<30年分值为[5,8];30≤A<50年分值为[7,

8];50年及以上分值为[6,9]。针对结构安全指标,由于缺乏相关数据本次暂不做评估。以评估单元72为例,管材为玻璃钢夹砂,管材打分为7、乘以权重0.53后得分为3.71分;A为15年,采用内插法计算为3.8、乘以权重0.32后分数为1.22分。

144个评估单元中有67个评估单元可能性评估等级为3级,可能性中等;有70个评估单元可能性等级为4级,可能性较高;有7个评估单元可能性等级为5级,可能性高。从整体看,该企业各评估单元供水管道爆管可能性较高,主要因为管网的压力变化幅度偏大,老旧管材占有一定比例(7个评估单元),部分单元发生历史漏损事件(31个评估单元),部分单元为过路主干管或过河主干管(≥DN500,38个评估单元)等因素导致。

#### 2.3.2 可能性修正

对该地区的第三方施工管控、企业安全管理水平进行评估,其中第三方施工破坏历史事件率、信息

报告与共享、智慧监测、管道工程竣工验收等得分较高,但第三方施工管控、信息报告与分享等方面还需要加强,最终确定安全管理指标的得分为 3.68 分,修正系数为 1.10。

### 2.3.3 后果性评估

144 个评估单元中共有 111 个评估单元后果影响指标等级为 1 级,影响较小;33 个评估单元后果影响指标等级为 2 级,后果影响一般。后果影响指标中停水影响用户及敷设区域影响较大,停水影响用户主要是因为评估单元中大管径单元较多,其中 $\geq$ DN700 的评估单元共 59 个,敷设区域中附近 200 m 范围内涉及 2 个及以上重点保障对象的评估单元共 41 个。

矩阵耦合后的管道风险等级结果为:风险等级为 II 级(一般风险)的评估单元共 128 个,长度共计为 46 km,占评估管网总长度的 80%;风险等级为 III 级(较大风险)的评估单元共 16 个,长度共计为 12 km,占评估管网总长度的 20%。

## 2.4 结果分析

进一步分析 16 个 III 级风险评估单元的可能性

与后果性间比值,比值为 2~5,由此可以判定,导致评估单元较大风险的原因主要是可能性。其中,可能性等级为较高(4 级)的共 10 个,可能性等级为高(5 级)的共 6 个。涉及评估单元编号和主要因素为:57 号(压力变化幅度偏大、发生过历史事件、管材老旧、管径较大、主要位于人行道,与其它管线间距不足)、58 号(压力变化幅度偏大、发生过历史事件、管材老旧、管径较大)、59 号(压力变化幅度偏大、发生过历史事件、老旧管材、管径较大)、63 号(压力变化幅度偏大、发生过历史事件、老旧管材、主要位于人行道)、65 号(压力变化幅度偏大、发生过历史事件、管材老旧、管径较大、主要位于人行道)、67 号(压力变化幅度偏大、发生过历史事件、管材老旧、管道敷设于人行道且与其它管线间距不足)。

各评估单元应按照风险等级采取不同程度的管控措施,如表 7 所示。建议该市对于风险等级 III 级的管段应重点关注,采取相应的维修、更新改造措施或加强管理等风险管控措施。

表 7 风险管控原则

Tab. 7 Principles of Risk Management and Control

风险等级	管控原则	其中:高可能性评估单元管控建议
IV	不可接受风险,应当立即采取维修、更新改造措施,直至风险水平降至可接受范围内	
III	应采取维修、更新改造措施或加强管理,将风险降至一般风险及以下,若仍不能降低风险等级,应对管道实施检测和监测	57 号:尽快实施改造,目前正在改造中,后续计划废除; 58,59,63,65,67 号:尽快实施改造,改造前加强综合调 度,降低压力变化幅度,日常加强巡查巡检及听漏检测
II	增加巡检频次	
I	定期巡查维护	

整体来看,该地区大部分供水管道状况较好,少部分需要重点关注。评估结果与自来水企业掌握情况进行了对比,比较符合实际情况,评估结果可用于指导后续管网改造、传感器安装、智慧化管理及日常巡检等工作。

## 3 结论与建议

(1)文章中建立了供水管道安全风险评估的指标体系,通过层次分析法和风险矩阵法来开展供水管道安全风险评估。实际案例应用表明,本文构建的指标体系及评估方法可行,能够识别出供水管道风险点和主要影响因素,可为供水企业和相关行业主管部门的日常运行管理、行业监管和后续工作计划安排提供依据和参考。

(2)根据本次案例应用和江苏多地应用情况看,部分指标如管道腐蚀、管道结构安全等因资料较难获取而未进行评价,后果性部分指标量化也有一定难度,后续研究中可考虑对部分指标做适当简化处理或者采取替代指标。

(3)为提高评估结果的准确性,建议评估人员选取熟悉供水行业、现场经验丰富的技术人员,并根据各个企业的实际情况合理确定各指标的权重系数,且评估过程中与供水企业、相关主管部门进行多轮次的深入对接与核实。

(4)目前的评估分析过程为人工计算,希望未来可以建立信息化平台开展评估工作,通过数据批量处理分析和模型分析计算等方式提高评估效率,

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, 李饮华, 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 ] 谢李坚, 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.