宋源, 刘世光, 戚宇瑶, 等. 城市综合市政管网安全评价方法[J]. 净水技术, 2023, 42(4):151-160,175.
SONG Y, LIU S G, QI Y Y, et al. Safety assessment and analysis for urban municipal pipeline networks[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4):151-160,175.

城市综合市政管网安全评价方法

宋 源,刘世光,戚宇瑶,谢 磊*
(中国城市规划设计研究院上海分院,上海 200335)

摘 要 随着我国城市化进程的加速,地下市政管网建设发展迅猛且越来越复杂,城市市政管网的安全对于保障城市的可持续发展至关重要。在综合考虑多种影响因素后,采用多层次模糊综合评价法,建立集单一管网安全因素、综合管网安全因素、外部环境因素于一体的综合评价体系,明确各安全影响因子及其权重,对涵盖多种管线的市政管网实现定量化地评价。在此基础上,对丽水市中心城区市政管网开展了安全性评价分析,得出实际管网的安全性评价结果,对城市市政管网安全预测具有一定的参考价值。

关键词 市政管网 城市安全 综合评价体系 层次分析法 评价等级 工程实例
中图分类号:TU992 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-0177(2023)04-0151-11
DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.019

Safety Assessment and Analysis for Urban Municipal Pipeline Networks

SONG Yuan, LIU Shiguang, QI Yuyao, XIE Lei*
(*China Academy of Urban Planning & Design, Shanghai Branch, Shanghai 200335, China*)

Abstract With the expansion of urbanization and the increasing complexity of underground municipal pipelines, the safety of urban municipal pipe network is essential to ensure the sustainable development of cities. After considering a variety of factors, this paper used a multi-level fuzzy comprehensive evaluation method to establish a comprehensive evaluation system, including single pipe network safety factors, comprehensive pipe network safety factors and external environmental factors. This evaluation system defined the safety impact factors and their weights, achieved the quantitative evaluation of municipal pipe network covering a variety of pipelines. On this basis, the safety evaluation and analysis of municipal pipe network in downtown Lishui were carried out and the safety evaluation results were obtained. This safety evaluation system has certain reference significance for safety prediction of urban municipal pipe network.

Keywords municipal pipeline network city safety comprehensive assessment system analytic hierarchy process (AHP) evaluation level project example

随着国家经济建设持续发展和城市化进程不断推进,市政管网作为城市关键基础设施的重要组成部分,在维系现代城市功能和区域经济功能方面发挥着不可替代的作用[1]。近年来,随着城市快速发展,地下管线建设规模不足、管理水平不高等问题凸显,一些城市相继发生大雨内涝、管线泄漏爆炸、路面塌陷等事件,严重影响了人民群众生命财产安全和城市运行秩序。因此,如何提高地下市政管网的安全性和可靠性是目前城市建设管理部门考虑的重要问题,建立管网安全评价体系刻不容缓[2-4]。

目前,国内外学者针对市政管网安全性评价展开了大量研究。1985 年,美国 Battelle Columbus 研究院发表了《风险调查指南》,首先在管道风险分析方面运用了评分法[5]。俄罗斯学者 Seleznev[6] 提出了基于同时创建和数值分析的燃气管道故障分析计算方法,可以对运行管道进行多目标风险评估。赵睿等[7]采用多层次模糊综合评价法,建立涵盖外部因素、内部因素、水流特性的综合评价体系,对一次供热管网主线和整体管网的安全性进行了定性定量

[收稿日期] 2021-09-30
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2016YFC0802400)
[作者简介] 宋源(1989—),男,硕士,研究方向为城市市政管网规划与城市防灾减灾,E-mail:492334243@qq.com。
[通信作者] 谢磊,男,硕士,研究方向为城市市政基础设施规划设计,E-mail:38246477@qq.com。

分析;朱庆杰等[8]构建了基于地理信息系统的多准则安全评价的权重线性组合法模型,运用层次分析法计算了各影响因子的权重,得到了常州市埋地天然气管网安全评价结果;彭玲等[9]采用模糊数学综合评价法,建立基于管材、人口密度、交通属性和建筑物属性等因素的供水管网安全性评价体系;李东升等[10]采用蒙德评价法建立了燃气管网单元的危险性评价方法,并对低压庭院管道进行了开挖检测验证。上述研究在一定程度上能够取得不错的结果,但针对安全性评价的研究都基于单一管网,缺乏涵盖多种管线的综合评价。同时,方法的应用多局限于管道本身,对市政管网周边环境的安全影响考虑不足。

针对上述问题,采用模糊数学综合评价法,对给水管网、排水管网、燃气管网 3 种市政管网安全性的评估因素进行研究,建立针对多种市政管网并基于管道本身、管网系统及管线周边环境的管网安全性综合评价体系,通过计算管网安全性值,确定管网安全性等级,从而实现对市政管网系统的安全性评价。

1　管网安全评价方法建立

1.1　评价方法

多层次模糊综合评判法是一种基于模糊数学的综合评价方法[11-12],具有结果清晰、系统性强的特点,适合各种非确定性问题的解决。因此,本文以此方法建立管网安全性评价分析体系。

管网安全性评价体系的建立必须在综合考虑多种影响因素后,确立主要的评价指标,并确定各个指标的权重值,依据权重和各指标间的联系划分管网安全等级,并进行相应的评价,建立集管网外部因素和内部因素于一体的综合评价体系[13]。

1.2　评价体系

1.2.1　评价指标

评价指标的选取要遵循全面性、代表性和独立性原则。根据前述管网安全评价体系结构,本文将管网安全分为 3 个层次,选取单项管网安全指标(B1)、管网综合安全间距指标(B2)、管网区域环境安全指标(B3)3 个方面作为一级评价指标,下设 8 个二级评价指标和 25 个三级指标,如图 1 所示。

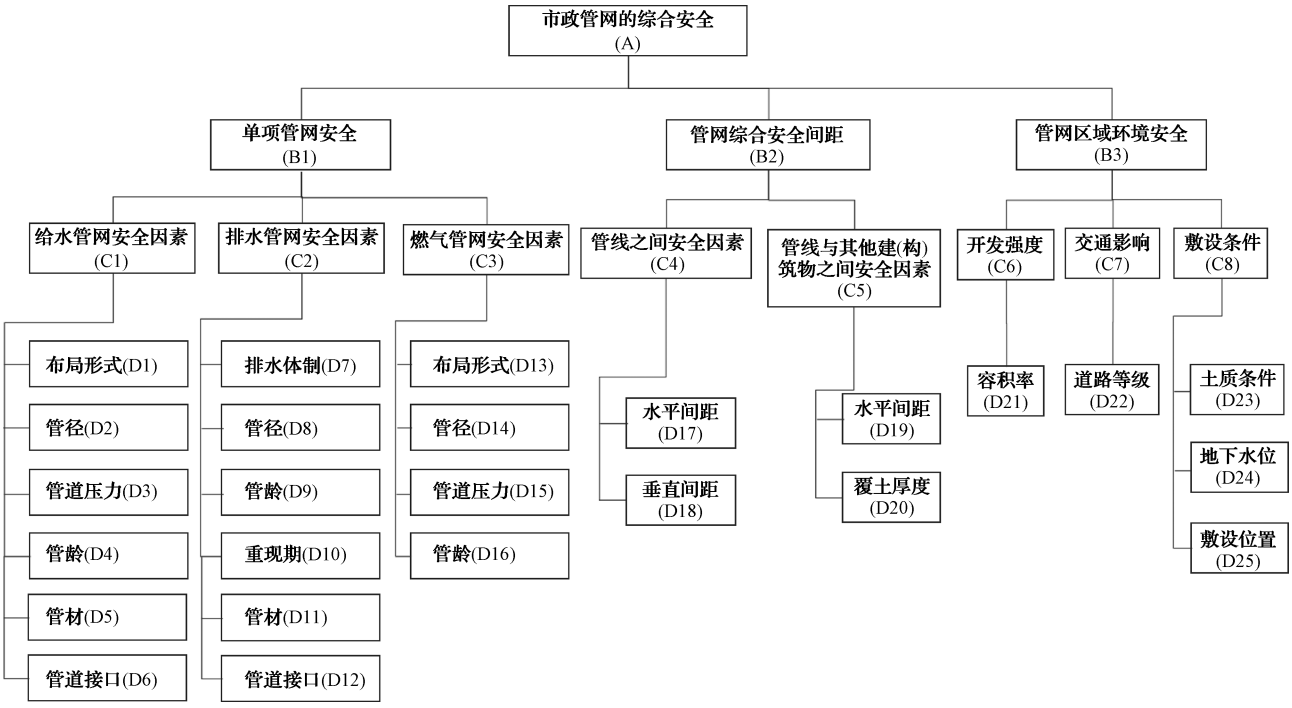

图 1　市政管网安全性评价指标体系

Fig. 1　Evaluation Index System of Municipal Pipeline Network Safety

1.2.2　指标权重分析

根据层次分析法[14-15]中取值的规则,按照两两重要性程度之比代表两个指标的相应重要性程度等级,同等重要量化为 1,稍微重要为 3,较强重要为 5,强烈重要为 7,极端重要为 9,若在上述判断中间则取值 2、4、6、8[16]。

参考相关文献和实际调研情况,构建比较矩阵并经过计算得出各指标权重值如表 1 所示。

表 1 层次排序的计算权重结果

Tab. 1 Result of Calculating Weight of Hierarchical Sorting

矩阵	层次单排列的权重向量
A-B	$(0.674, 0.244, 0.082)^T$
B1-C	$(0.162, 0.309, 0.529)^T$
B2-C	$(0.500, 0.500)^T$
B3-C	$(0.143, 0.286, 0.571)^T$
C1-D	$(0.176, 0.063, 0.070, 0.452, 0.176, 0.063)^T$
C2-D	$(0.196, 0.045, 0.435, 0.084, 0.196, 0.045)^T$
C3-D	$(0.124, 0.066, 0.352, 0.458)^T$
C4-D	$(0.500, 0.500)^T$
C5-D	$(0.500, 0.500)^T$
C6-D	$(1)^T$
C7-D	$(1)^T$
C8-D	$(0.333, 0.333, 0.333)^T$

在此基础上,求得各影响因子对目标层的权重,如表 2 所示。

1.2.3 指标计算

(1)给水管网安全指标

综合供水管网安全性评价体系各指标因素,结合供水管网的实测数据,得出管网安全性评价指标,包括管网布局形式、管龄、管道压力、管径等[9,17-20],如表 3 所示。

① 管网布局形式

给水管网的布局形式主要有树状网和环状网两种。从供水可靠性着想,以布置几条接近平行的干管形成环状网为宜[21]。

② 管龄

管龄越大,敷设年代越早,供水安全性越低[22]。

③ 管道压力

管内水压力是指管网在输水过程中水给管道带来的压力。管网平均供水压力不宜低于 0.28 MPa,管网压力过高不利于管网安全运行和控制漏损[23],

表 2 市政管网安全评定指标体系

Tab. 2 Assessment Index System of Municipal Pipe Network Safety

核心目标	一级指标	二级指标	三级指标	权重
市政管网的综合安全系数(A)	单项管网安全指数(B1)	给水管网安全指数(C1)	布局形式(D1)	1.92%
			管径(D2)	0.69%
			管道压力(D3)	0.76%
			管龄(D4)	4.93%
			管材(D5)	1.92%
			管道接口(D6)	0.69%
		排水管网安全指数(C2)	排水体制(D7)	4.07%
			管径(D8)	0.94%
			管龄(D9)	9.05%
			重现期(D10)	1.75%
			管材(D11)	4.07%
			管道接口(D12)	0.94%
		燃气管网安全指数(C3)	布局形式(D13)	4.44%
			管径(D14)	2.35%
			管道压力(D15)	12.57%
			管龄(D16)	16.34%
	管网综合安全间距指数(B2)	管线之间安全指数(C4)	水平间距(D17)	6.09%
			垂直间距(D18)	6.09%
		管线与其他建(构)筑物之间安全指数(C5)	水平间距(D19)	6.09%
			覆土厚度(D20)	6.09%
	管网区域环境安全指数(B3)	开发强度(C6)	容积率(D21)	1.17%
		交通影响(C7)	道路等级(D22)	2.34%
		敷设条件(C8)	土质条件(D23)	1.56%
			地下水位(D24)	1.56%
			敷设位置(D25)	1.56%

表 3　给水管网安全评价指标权重及取值

Tab. 3　Weight and Value in Safety Evaluation of Water Supply Network

二级指标	三级指标	影响因子	评价取值
给水管网安全指标(C1)	管网布局形式(D1)	树状管网	0. 5
		环状管网	1. 0
	管径(D2)	>DN1000	0. 5
		DN500~DN1000	0. 7
		DN300~DN500	0. 8
		<DN300	1. 0
	管道压力(D3)	<0. 2 MPa	1. 0
		0. 2~0. 3 MPa	0. 9
		0. 3~0. 4 MPa	0. 8
		0. 4~0. 5 MPa	0. 7
	管龄(D4)	<5 年	1. 0
		5~10 年	0. 8
		10~20 年	0. 6
		20~40 年	0. 4
		>40 年	0. 1
	管材(D5)	钢管及玻璃钢管	1
		球墨铸铁管	0. 9
		聚乙烯(PE)管	0. 8
		预应力混凝土管	0. 7
		灰口铸铁管	0. 6
	管道接口(D6)	球墨管胶圈	1. 0
		混凝土胶圈	0. 8
		塑料管法兰配件	0. 6
		铅口	0. 5
		石棉水泥	0. 4

应控制管网压力。

④ 管径

管径决定了发生事故时安全影响程度,输水管、主干管发生事故的损失要高于干管、支管,因此,根据管径大小进行安全敏感性评价。

⑤ 管道材质及接口

目前国内外常用的输配水管道主要有钢管、球墨铸铁管、玻璃钢管、预应力混凝土管、PE 管等,并对应有不同的接口形式。根据不同管材基于漏损控制和爆管风险确定其评价值。

(2)排水管网安全指标

排水管网安全性评价指标及取值[24]如表 4 所示。

① 排水体制

排水体制分为雨污合流制、雨污分流制、截留式合流制 3 种。除干旱地区外,城市新建地区和旧城改造地区的排水系统应采用分流制;不具备改造条件的合流制地区可采用截流式合流制[25]。

② 管龄

管龄越大,敷设年代越早,排水管网安全性越低[26]。

③ 重现期

近年来城市内涝发生频率越来越高,排水管网的排渍除涝能力也愈发对城市安全有着显著的影响,管网重现期可较为客观地反映现状及规划管网的排涝能力[27]。

④ 管径

管径决定了发生事故时安全影响程度,排水主干管发生事故的损失要高于干管、支管,因此,根据

表 4 排水管网安全评价指标权重及取值

Tab. 4 Weight and Value in Safety Evaluation of Drainage Pipeline Network

二级指标	三级指标	影响因子	评价取值
排水管网安全指标(C2)	排水体制(D7)	分流制	1.0
		截留式合流制	0.6
		直排式合流制	0.2
	管径(D8)	>DN1500	0.5
		DN1000~DN1500	0.7
		DN500~DN1000	0.8
		<DN500	1.0
	管龄(D9)	<5 年	1.0
		5~10 年	0.8
		10~20 年	0.6
		20~40 年	0.4
		>40 年	0.1
	重现期(D10)	>5 年	1.0
		3~5 年	0.8
		2~3 年	0.6
		1~2 年	0.4
		<1 年	0.2
	管材(D11)	钢塑排水管	1.0
		聚氯乙烯(PVC)管	0.8
		PE 管	0.8
		钢筋混净土管	0.6
		混凝土管	0.5
	管道接口(D12)	柔性接口	1.0
		刚性接口	0.8

管径进行安全敏感性评价。

⑤ 管道材质及接口

根据耐久性、施工标准化、管材质量控制,以及排水管网的维修和公开报道的事故统计等方面的综合考虑,对管材及接口形式进行评价取值。

(3)燃气管网安全指标

燃气管网安全性评价指标及取值[28]如表 5 所示。

①管网布局形式

燃气管网的布局形式主要有树状网和环状网两种。从燃气可靠性着想,以布置几条接近平行的干管形成环状网为宜。中心城区规划人口大于 100 万人的城市,燃气主干管应选择环状管网[29]。

②管龄

管龄越大,敷设年代越早,燃气管道的安全性越低[30]。

③管网内压力

管内水压力是指管网在输气过程中给管道带来的压力。城镇燃气管道设计压力共分为 7 级[31],其中低压燃气管道一般不敷设于市政道路下方,因此,根据其余 6 级压力系统进行安全评价,压力越大安全风险越高。

④管径

管径决定了发生事故时安全影响程度,主干管发生事故的损失要高于干管、支管。

(4)管线之间安全指标

工程管线之间的间距决定了某类管道发生安全事故时对管网系统的影响程度[32],各类工程管线之间应满足一定的间距要求[33]。因此,根据管线是否

表 5　燃气管网安全评价指标权重及取值

Tab. 5　Weight and Value in Safety Evaluation of Gas Pipeline Network

二级指标	三级指标	影响因子	评价取值
燃气管网安全指标(C3)	管网布局形式(D13)	树状	0.5
		环状	1.0
	管径大小(D14)	>DN450	0.5
		DN300~DN450	0.7
		DN200~DN300	0.8
		<DN200	1.0
	管道压力(D15)	中压 B(0.01 MPa<P<0.2 MPa)	1.0
		次高压 B(0.2 MPa<P<0.4 MPa)	0.9
		次高压 B(0.4 MPa<P<0.8 MPa)	0.8
		次高压 A(0.8 MPa<P<1.6 MPa)	0.7
		高压 B(1.6 MPa<P<2.5 MPa)	0.6
		高压 A(2.5 MPa<P<4.0 MPa)	0.5
	管龄(D16)	<5 年	1.0
		5~10 年	0.8
		10~20 年	0.6
		20~30 年	0.4
		>30 年	0.1

满足《城市工程管线综合规划规范》(GB 50289—2016)中相关间距规定作为管线之间安全指数的评价条件,如表 6 所示。

表 6　管线之间安全评价指标权重及取值

Tab. 6　Weight and Value in Safety Evaluation of Comprehensive Pipelines

二级指标	三级指标	评价因子	评价取值
管线之间安全指数(C4)	水平间距(D17)	全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.9 要求	1
		未全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.9 要求	0
	垂直间距(D18)	全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.14 要求	1
		未全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.14 要求	0

(5)管线与其他建(构)筑物之间安全指标

工程管线与其他建(构)筑物之间的间距决定了管线发生安全事故时对构筑物的影响以及建(构)筑物对管线的反馈影响[32]。因此,根据管线是否满足《城市工程管线综合规划规范》(GB 50289—2016)中相关间距规定作为管线之间安全指数的评价条件,如表 7 所示。

表 7　管线与其他构筑物之间安全评价指标权重及取值

Tab. 7　Weight and Value in Safety Evaluation between Pipelines and Other Structures

二级指标	三级指标	评价因子	评价取值
管线与其他建(构)筑物之间安全指数(C5)	最小净距(D19)	全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.9 要求	1
		未全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.9 要求	0
	最小覆土(D20)	全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.1 要求	1
		未全部满足《城市工程管线综合规划规范》表 4.1.1 要求	0

(6)管网区域环境安全基本指标

① 城市开发强度指标

城市建设用地是市政管网规划建设的前提,是市政管网服务的主体对象。当市政管网发生安全事故时,对城市安全的影响与城市开发强度有很大关系。建设用地开发过程中,容积率是衡量建设用地使用强度的一项重要指标。容积率越高,市政管网发生安全事故后造成的影响越大;容积率越低,市政管网发生安全事故后造成的影响越小。因此,将道路两侧地块的平均容积率作为衡量城市开发强度对管线安全风险的评价指标。

② 交通重要程度指标

道路是管线敷设的载体,管网安全直接影响到道路的安全运行,对于城市主干道等重要道路,管线安全事故将导致重大交通要道中段运行,对城市的正常运转影响较大,而在支路等非重要道路发生管线安全事故对城市交通造成的影响则相对较小。因此,将道路等级作为评价交通重要程度对管线安全风险的评价指标。

③ 敷设条件指标

作为地下管道敷设的载体,土质结构、地下水位和敷设位置对于管网安全也有十分重要的影响。不同的土质结构对管道的荷载和腐蚀性都不相同,各类土质也会带来不同的地基抗震承载力;地下水位下降引起的局部地基沉降会对管道安全运行造成一定影响;敷设位置则决定了对管道的动荷载,敷设于绿化带或人行道下动载荷较小,而敷设于车道下方则动载荷较大。

因此,将此 3 项指标作为对管道安全风险的影响因子(表 8)。

表 8 管网区域环境安全指标权重及取值

Tab. 8 Weight and Value in Safety Evaluation of Network Zone

二级指标	三级指标	评价因子	评价取值
城市开发强度指数(C6)	容积率(D21)	容积率<1	1.0
		1≤容积率<3	0.8
		容积率≥3	0.6
交通重要程度指数(C7)	道路等级(D22)	支路	1.0
		次干路	0.9
		主干路	0.8
		快速路	0.7
敷设条件(C8)	土质条件(D23)	岩石、密实的碎石土、粉质黏土	1.0
		砾砂、粗砂、中砂	0.8
		粉砂、细砂、砂质粉土	0.7
		淤泥、松散的砂、杂填土	0.5
	地下水位(D24)	地下水位<管内底标高	1.0
		地下水位≥管内底标高	0.5
	敷设位置(D25)	绿化带、人行道下方	1.0
		车道下方	0.5

1.2.4 计算方法

市政管网综合安全系数计算如式(1)~式(3)。

$$A = \sum_{i=1}^{n} b_i \times B_i \quad (1)$$

$$B_i = \sum_{i=m}^{l} c_i \times C_i \quad (2)$$

$$C_i = \sum_{i=j}^{k} d_i \times D_i \quad (3)$$

其中:A——管线综合安全系数;

B_i——一级安全指标系数;

C_i——二级安全指标系数;

D_i——三级安全指标系数,即表 3~表 8 中评价因子取值;

b_i——一级安全指标权重;

c_i——二级安全指标权重;

d_i——三级安全指标权重;

n——一级安全指标数量;

m、l——某一级安全指标对应的二级安全指标首、末项编号;

j、k——某二级安全指标对应的三级安全指标首、末项编号。

1.3　评定步骤与结论

1.3.1　评定步骤和要求

进行市政管网安全评定,一般应采取以下步骤:(1)踏勘现场,调查搜集、整理、评估基础资料;(2)确定评定区,划分评定单元,选择采用的评定指标、评定参数;(3)选择评定方法,进行定性、定量计算评判;(4)根据定性评判、定量计算评判的判定标准,判定各评定区域的市政管网安全风险等级类别;(5)编制市政管网安全评定报告和评定图。

市政管网安全性的综合评定,应符合以下规定:一是应选择适宜的评定指标;二是应重点分析对市政管网安全影响突出的主导因素。

市政管网安全性评定是开展市政管网规划、建设以及修复等相关工作的重要基础,应根据市政管网安全性综合评定的结果,对市政管网安全规划与建设提出相应的意见和建议。

1.3.2　评定指标分级标准

市政管网安全评定基本指标的定性分级,根据其对市政管网安全的影响程度分为“低风险、中低风险、中风险、中高风险”四级。

评定指标的定量分值,应与其定型分级对应设置,并应符合表 9 的规定。

表 9　评定指标的定量分值

Tab. 9　Quantitative Score of the Evaluation Index

指数名称	安全风险等级	安全评分	备注
管网综合安全风险指数	低风险	≥0.8	以分值大者为优
	中低风险	[0.6, 0.8]	
	中风险	[0.4, 0.6]	
	中高风险	<0.4	

2　案例应用

2.1　应用背景

丽水市位于浙江省南部,中心城区常住人口为 41.7 万人,建成区面积为 41.6 km^2,是一个典型的中小城市。丽水市现已形成较为完善的地下市政管线系统,但由于部分管网建设年代久远,现状管线已经老化严重,同时部分管道设计的标准偏低,已经不能满足城市发展的使用需求,亟待更新改造。

在此背景下,采用本次“城市综合市政管网安全评价方法”,基于浙江省丽水市中心城区范围管线普查结果,对该范围内主、次干路网下敷设的供水管网、排水管网和燃气管网进行安全性综合评定,管道总长度约为 320 km。

2.2　评价结果

根据安全性评价结果,该区域市政管网安全性总体处于良好状态,有 78.21% 的管道处于安全和较安全的等级状态,有 13.62% 的管道处于较不安全等级应当引起重视,而有 8.17% 的管道处于较高的损坏风险并远低于设计标准(表 10)。

由图 2 可知,市政管网安全风险较高的区域主要集中于老城区。一方面,老城区管网敷设年代较为久远,管线老化严重,同时部分管道设计标准偏低;另一方面,老城区地下空间开发局限性较多,加之各专项管线建设未与道路系统建设衔接,致使部分道路下方管线重复建设敷设密集,管位空间不足而导致未满足规范规定的安全间距要求,因而存在相对较高的安全风险。此评价结果也与各类市政管网运行管理部门的经验判断基本吻合。

表 10　丽水市中心城区市政管网安全性等级划分及评价结果统计

Tab. 10　Municipal Pipe Network Safety Grade Classification and Evaluation Results Statistics in Downtown Lishui City

风险等级	风险描述	管段长度/km	占比
安全	适应未来预期功能要求,处于优良状态	130.67	40.83%
较安全	处于良好状态,部分有一般的安全隐患,应该引起关注	119.60	37.38%
较不安全	处于一般状态,存在安全风险,应该引起重视	43.59	13.62%
不安全	处于较高的损坏风险并远低于设计标准,直接影响其功能和安全	26.13	8.17%

根据丽水市中心城区市政管网安全评价结果,风险等级越高的地方,埋地管网破坏的可能性就越大。对于安全高风险路段的管线,一方面,应进行管道检测,对破损管道进行修复与保护;另一方面,应加大对其日常运行的安全监测,避免安全事故发生。同时,对于地面沉降区域、土壤腐蚀严重区域等外部安全环境风险较高的地段,未来在进行管网铺设时应采取特殊保护措施。

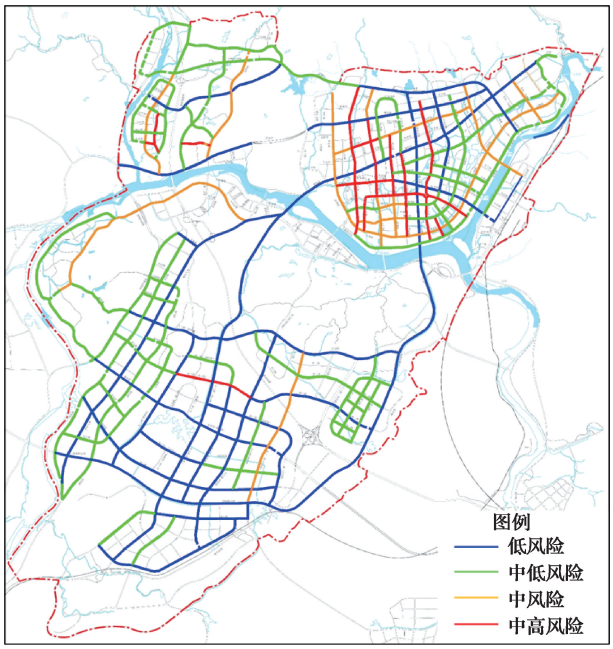

图 2 丽水市中心城区市政管网安全评价结果

Fig. 2 Municipal Pipeline Network Safety Evaluation Results in Downtown Lishui City

3 结语

(1)分析市政管网安全运行涉及要素,在考虑独立管线的安全要素研究基础上,耦合管线之间的安全风险要素和区域环境安全要素,采用模糊数学综合评价法确定了评定指标和评价步骤,制定了涵盖多种管线的市政管网安全评价方法体系,实现了对市政管网系统的安全性评价。

(2)对丽水市中心城区 320 km 市政管网开展安全性评价,其中安全性评价结果较差的管线与运行管理部门的经验判断筛选结果基本吻合,验证了评价方法体系的可行性和可信度。

(3)方法既为现状管网安全水平提供定量化的评价标准,也可作为后续单系统管线规划和管线综合规划的参考依据。对于管线安全性较低的区域应作为管线规划的重点提升目标,可提升管线规划方案的合理性和针对性。

参考文献

[1] 李杰. 生命线工程抗震——基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LI J. Seismic resistance of lifeline——Basic theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[2] 吉忠平. 大型供热管网安全问题的分析与思考[J]. 同煤科技, 2011(1): 20-21.
JI Z P. Analyzing and thinking the safety problems in large-size heating network[J]. Datong Coal Science & Technology, 2011(1): 20-21.

[3] 任腾飞. 供热管网安全评价及隐患预测[J]. 区域供热, 2015(1): 86-89.
RENG T F. Safety evaluation and hidden danger prediction of heating network[J]. District Heating, 2015(1): 86-89.

[4] 罗彩霞. 太原市集中供热安全隐患分析探讨[J]. 智能城市, 2016, 2(1): 169-171.
LUO C X. Analysis of security risks in Taiyuan City centralized heating[J]. Intelligent City, 2016, 2(1): 169-171.

[5] 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. Handbook of pipeline risk management[M]. YANG J Y, ZHANG D Y, LI Q H, et al, Translation. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.

[6] SELEZNEV V, ALESHIN V. Computation technology for safety and risk assessment of gas pipeline systems[M]. 2014. DOI: 10.1142/9789812702685_0056.

[7] 赵睿, 王伟. 基于模糊综合评价法的供热一次管网安全性评价研究与应用[J]. 区域供热, 2020(4): 110-114.
ZHAO R, WANG W. Research and application of fuzzy comprehensive evaluation method based on safety evaluation of heating primary pipeline network[J]. Regional Heat Supply, 2020(4): 110-114.

[8] 朱庆杰, 胡士明, 陈艳华, 等. 常州市埋地天然气管网多准则安全评价[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(11): 22-26, 39.
ZHU Q J, HU S M, CHEN Y H, et al. Multi-criteria safety

evaluation of buried natural gas pipeline network in Changzhou City[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(11): 22-26, 39.

[9] 彭玲, 刘玉菲, 郑建春, 等. 城市供水管网安全性评估分析方法[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 140-148.
PENG L, LIU Y F, ZHENG J C, et al. Safety assessment and analysis for urban water supply distribution network[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(10): 140-148.

[10] 李东升, 费宏伟, 朱晓鸣. 城市燃气管网的安全性评价[J]. 压力容器, 2007(7): 47-50.
LI D S, FEI H W, ZHU X M. Safety evaluation of city gas pipeline networks[J]. Pressure Vessels, 2007(7): 47-50.

[11] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
HU B Q. Foundations of fuzzy theory[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004.

[12] 郭亚军. 综合评价理论、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
GUO Y J. Comprehensive evaluation theory, methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[13] 李思文. 北方 A 市老旧城区供水管网安全风险评价研究[D]. 吉林: 吉林建筑大学, 2016.
LI S W. Research on safety risk evaluation of water supply network in old urban areas of northern city A[D]. Jilin: Jilin University of Construction, 2016.

[14] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004(3): 65-70.
JIN J L, WEI Y M, DING J. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 65-70.

[15] 罗云, 樊运晓, 马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994.
LUO Y, FAN Y X, MA X C. Risk analysis and safety evaluation[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1994.

[16] 周泽炯, 刘洋. 农业发展绩效的多层次模糊综合评价——基于安徽的数据分析[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 246-253.
ZHOU Z J, LIU Y. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation of agricultural development performance—Analysis of data based on Anhui Province[J]. Journal of Liaoning University (Natural Science Edition), 2021, 48(3): 246-253.

[17] 宋朝阳, 刘威, 姚天野. 市政管网运行风险发生机理及评价指标体系[J]. 油气储运, 2019, 38(6): 629-634, 641.
SONG Z Y, LIU W, YAO T Y. Mechanisms of risk occurrence and evaluation index system for municipal pipeline network operation[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2019, 38(6): 629-634, 641.

[18] 李燕京, 司鹏敏. 城市供水管网漏失安全性评价模型研究[J]. 供水技术, 2014, 8(2): 22-26.
LI Y J, SI P M. Study of leakage safety evaluation model of urban water supply network[J]. Water Supply Technology, 2014, 8(2): 22-26.

[19] 周全, 陈汝硕, 高红涛, 等. 基于模糊综合评价法的城市供水管网黄水风险区域预测及应对措施[J]. 给水排水, 2015, 51(8): 101-104.
ZHOU Q, CHEN R S, GAO H T, et al. Regional prediction and countermeasures of yellow water risk in urban water supply network based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Water Supply and Drainage, 2015, 51(8): 101-104.

[20] 吕谋, 王吉亮, 张洪国. 城市供水网络的综合安全评判方法及运用[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1489-1494.
LÜ M, WANG J L, ZHANG H G. Comprehensive safety assessment method for water supply network in urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1489-1494.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市给水工程规划规范: GB 50282—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Planning specifications for urban water supply projects: GB 50282—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.

[22] 方丹霞. 基于 GIS 的城市供水管网隐患分析及安全管理[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
FANG D X. GIS-based analysis and safety management of urban water supply pipeline network[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.

[23] 周中健. 基于水力和水龄信息耦合的供水管网 DMA 分区研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
ZHOU Z J. Research on DMA zoning of water supply pipe network based on coupled hydraulic and water age information[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.

[24] 刘威, 董婉琪. 基于 AHP-熵权法组合赋权的排水管网风险评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 949-956.
LIU W, DONG W Q. Study on the risk assessment method of drainage network based on AHP-entropy weighting[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 949-956.

[25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市排水工程规划规范: GB 50318—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for urban drainage engineering planning: GB 50318—2017[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017.

[26] 李晓峰. 城镇污水管网健康状况评价与修复技术优选研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
LI X F. Evaluation of the health condition of urban sewage network and the preferential selection of rehabilitation technology[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019.

(下转第 175 页)

将 SBR 工艺改为 AAO 工艺,在现有 SBR 池型内设置隔墙形成厌氧、缺氧、好氧区,强化脱氮除磷能力,且污泥的沉降性能好,二沉池出水 SS≤20 mg/L,为后续深度处理采用微絮凝过滤创造良好条件。

(5)当生物处理出水水质指标较好、后续化学除磷加药量不大,用地有限时,采用微絮凝过滤工艺,用地省、投资省、运行费低,适用于污水厂提标改造。通过提标改造后出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

参考文献

[1] 邓伟斌. 南方某污水处理厂 CAST 工艺提标改造[J]. 中国给水排水, 2016, 32(16): 77-79.
DENG W B. Upgrading of cyclic activated sludge technology in a wastewater treatment plant in southern China[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(16): 77-79.

[2] 吴振国, 孙永军. 污水处理厂提标改造工程设计实例[J]. 净水技术, 2019, 38(1): 93-97.
WU Z G, SUN Y J. Design case of upgrading and reconstruction project of a wastewater treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(1): 93-97.

[3] 王社平, 鞠兴华, 彭党聪. 城市污水处理厂初沉池对污染物去除效果的研究[J]. 中国给水排水, 2006, 38(5): 96-98.
WANG S P, JU X H, PENG D C. Study on removal of pollutants from primary settling tanks of municipal wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2006, 38(5): 96-98.

[4] 赵群英, 张辉, 赵炎. 陇西县城区污水处理厂改造工程设计及运行[J]. 中国给水排水, 2015, 31(18): 83-85.
ZHAO Q Y, ZHANG H, ZHAO Y. Design and operation of retrofitting project of sewage treatment plant in Longxi County [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(18): 83-85.

[5] 张彪. 海滨污水厂提标改造工程水处理工艺设计[J]. 净水技术, 2020, 39(12): 19-24.
ZHANG B. Design of wastewater treatment process for upgrading and reconstruction project of Haibin WWTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(12): 19-24.

(上接第 160 页)

[27] 许红师. 沿海城市多维致灾洪涝风险分析与灾防决策模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
XU H S. Multi-dimensional flood risk analysis and disaster prevention decision model for coastal cities[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[28] 王清树, 谭羽非, 齐华云. 燃气管网安全影响因素相互耦合分析[J]. 煤气与热力, 2010, 30(11): 22-26.
WANG Q S, TAN Y F, QI H Y. Mutual coupling analysis of safety influencing factors of gas pipeline network[J]. Gas and Thermal Power, 2010, 30(11): 22-26.

[29] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇燃气规划规范: GB/T 51098—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for planning of city gas: GB/T 51098—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[30] 张乃方. 城市燃气管网的风险评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHANG N F. Risk assessment of urban gas pipeline network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇燃气设计规范: GB 50028—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of city gas engineering: GB 50028—2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[32] 董孟能, 何平, 谢自强, 等. 房屋建筑和市政工程勘察设计质量通病防治措施技术手册[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2019.
DONG M N, HE P, XIE Z Q, et al. Technical manual of prevention and control measures for common quality problems of housing construction and municipal engineering survey and design [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2019.

[33] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市工程管线综合规划规范: GB 50289—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for urban engineering pipelines comprehensive planning: GB 50289—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.