

基于AHP与GIS的供水管道风险分析研究

黄和玉, 马静汝, 汪奇生, 孙晗瑞, 曾杨诺

湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年3月16日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月18日

摘要

随着经济的不断发展, 管道的运行状况对人民日常生活愈发重要。本文以湘潭大学供水管道为例, 分析湘潭大学供水管道可能存在的问题。依托层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)对供水管道故障的影响因素进行分析排序, 本文得到了湘潭大学的供水管道故障的影响因素权重, 同时本文以GIS为主要分析工具, 通过网站获取某区域的管线图及相关管线数据, 以此为数据源与AHP分析得到的供水管道故障的影响因素排序数据结合本文得到供水管道风险等级图, 判断出可能发生故障的管道。本文采用AHP与GIS方法结合应用的方式得到供水管道风险等级图, 可以为评定其他管道的风险等级、在管道出现故障时可以尽可能准确并快速地判断管道故障位置提供一种思路和方法。

关键词

供水管道, 层次风险法, GIS, 管道故障, 风险等级

Research on Risk Analysis of Water Pipeline Based on AHP and GIS

Heyu Huang, Jingru Ma, Qisheng Wang, Hanrui Sun, Yangnuo Zeng

School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

Received: Mar. 16th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 18th, 2025

Abstract

With the continuous development of economy, the operation condition of pipeline is more and more important to people's daily life. This paper takes Xiangtan University water supply pipeline as an example to analyze the possible problems of Xiangtan University water supply pipeline. Relying on the Analytic Hierarchy Process to analyze and rank the influencing factors of water pipeline failure, this paper obtains the influencing factor weights of the water pipeline failure of Xiangtan University,

and at the same time, this paper takes the GIS as the main analytical tool, obtains the pipeline map of a certain area and the related pipeline data through the website, and uses this as the data source to analyze and rank the influencing factors of the water pipeline failure with the AHP. This is the data source and the AHP analysis of the influencing factors of water supply pipeline failure sorting data obtained in combination with this paper to obtain the risk level map of water supply pipeline, to determine the pipeline that may fail. This paper adopts AHP and GIS method to get the risk rank map of water supply pipeline, which can provide a way of thinking and method for assessing the risk rank of other pipelines and judging the location of pipeline failure as accurately as possible when the pipeline failure occurs.

Keywords

Water Pipeline, AHP, GIS, Pipeline Failure, Risk Rank

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的不断发展,供水管道(含地下供水管道)的运行状况对人民日常生活愈发重要,然而大多数建校较早的高校或者城市在基础设施建设方面出现了规模不够和设备老化方面,经常出现停水、停电等情况。为更好地了解供水管道的运行状况,在管道出现故障时可以尽可能准确并快速地判断管道故障位置这成为了有关部门和学者重点关注的内容。

目前针对如何更清晰了解供水管道的运行状况,在管道出现故障时可以尽可能准确并快速地判断管道故障位置等方面,许多供水公司、学者开展了较多的研究。同时由于 GIS 具备了强大的数据处理和分析能力、空间信息的可视化展示、以及实时监测和预测功能,在供水管网的应用中使用 GIS 技术可以提高供水系统的效率、可靠性、安全性,以及实现智能化管理。故从现有研究上看,研究主要以数学模型或方法结合地理空间信息技术(Geographic Information System, GIS)来实现。李震等人[1]引入模糊层次分析法确定各因素引发爆管相对重要性的权重对爆管的众多影响因素进行定量分析,解决了单纯利用 GIS 空间叠置分析技术的不足,为更好地利用 GIS 空间分析技术进行爆管研究提供了理论依据,但其未结合 GIS 实现管道风险的可视化。张建鹏等人[2]在已有的 GIS 基础上,设计了一套供水管网系统,实现供水管网的可视化管理,优化了供水管网管线布局,解决了信息化水平不足等问题。同时,采用图论原理,将供水管网抽象为有向网络图,模拟展示爆管事件发生后影响区域范围,提出一种快速定位所需关闭的上流阀门算法。在爆管事件发生后,还能对抢修人员快速制定精确、高效的关阀策略,但该方法在事件发生后起较大作用,在爆管等事件发生前不能确定主要的风险管道,缺少管道失效总结、失效的原理,未构建供水管网运行安全风险评价体系。彭慧馨等人[3]提出基于 GIS 的城市供水管网管线爆管状态实时监测方法。利用无线传感器感知供水管网管线状态数据,提取管线爆管状态特征,并且识别管线爆管状态。利用 GIS 技术建立城市供水管网管线三维模型,对管线爆管节点定位以及量化管线爆管状态等级,并作出相应的预警监测响应。经试验证明,该方法具有良好的应用前景,但大部分高校、城市的供水管道中并未安装无线传感器,目前无法做到感知管线状态,故仍需通过构建供水管网运行安全风险评价体系,进行提前预测,对管道风险等级高的管道进行重点巡检,消除隐患。

故笔者将通过查找文献、实地走访相关部门和对相关数据的统计确定引发管道失效的各因素,确定

各因素之间相对重要性的权重,对众多影响因素进行定量分析,构建管道分析评价体系后再利用 GIS 空间分析、网络分析技术进行供水管道风险研究,将供水管道风险进行可视化。

2. 基于 AHP 的管道分析评价体系的构建与分析

2.1. 供水管道风险因素分析

供水管道风险隐患包含管道爆管、管道漏损等,故供水管道风险影响因素众多,本文选取湘潭大学供水管道作为研究对象,通过查找文献[4]-[13]、走访相关部门和对相关数据的统计,发现原因主要分为两大方面:长期作用因素和短期作用因素。

a. 长期因素

1) 年代久远致使管道失效,存在风险。研究区域恢复建校,距今已 50 周年。一方面,年限已久,存在老化情况;另一方面,随着学校的扩招和用地面积的增大,用水量增加导致管道超出负荷。

2) 腐蚀致使管道爆裂出现风险隐患。造成腐蚀的原因多种多样,pH 值、各类金属物质的腐蚀和管道自身的腐蚀,对于管道造成的影响不是一天形成的,通过长期作用,对管道本身的材质进行破坏,导致管身破裂。

3) 沉降致使管道爆裂导致管道风险。管道埋置地下,除了地面上对管道的影响,管道自身也存在重量,导致发生沉降,当沉降不均匀时,超过管道承载的范围,会导致管道的受损。

4) 荷载致使管道爆裂。管道埋置地下,由于校区人流量多、车流量大会对管道造成荷载,荷载本身的内陷致使管道形状的变形,各个方向受力不同,致使管道受损,结构变形。

b. 短期因素

1) 季节周期性的变化。季节周期性的温度是一个重要衡量指标。外界温度的周期性变化会引起管道材质的物理性变化。当气温较高时,管壁的金属材料会发生一定程度的膨胀;当气温较低时,土壤中孔隙水会冻结且体积变大,会对管道产生冻胀力,挤压并损坏管道,特别是管道接头及阀门部位,引起漏水[10]。

2) 施工质量不良致使管道爆裂等出现风险。大多数管道的材质已经不能满足如今用水的需求,又因招生扩招,满足师生基本的生活和学习需求,学校新建公寓、食堂等众多工程,在施工时由于管道埋设位置不熟悉,导致误挖,致使管道破裂,出现风险。

3) 接头脱落致使管道漏损。管道与管道连接处有大量的阀门连接,阀门之间的接头脱落会造成管道漏损,但是大部分的接头处是暗漏情况,且不易发现,也是造成用水浪费的情况。

2.2. 层次分析法模型

层次分析法(AHP)是美国运筹学家 T. L. Saaty 在 20 世纪 70 年代提出的一种定性和定量分析相结合的多准则决策方法[14]-[17]。通过分析复杂系统所包含的因素和相关关系,根据不同层次的要素及其关联关系建立一个多层次分析结构模型,我们可以把一个复杂的多目标决策问题视为一个整体,将总目标分解成为多个子目标或准则,再进一步分解成为多指标或多准则、多约束的若干个层次,进而建立判断矩阵,确定出单层排序(或权重)向量和总排序(或权重)向量,从而为方案的选择或系统综合评价提供依据。层次分析法的基本步骤及分析如下:

明确目标,建立评价层次模型。本文从湘潭大学学校供水管道特性出发,本着客观、有代表性、定性与定量相结合等原则,通过查找文献、走访相关部门和对相关数据的统计得到供水管道风险因素分析结果后,根据层次分析法原理,以长期作用因素和短期作用因素作为一级指标,并在此基础上建立了评价层次模型,如表 1 所示。

Table 1. Pipeline risk analysis and evaluation system
表 1. 管道风险分析评价体系

目标	一级指标	二级指标
管道风险分析评价体系(A)	长期作用因素(B1)	年代(C1)
		腐蚀(C2)
		沉降(C3)
		荷载(C4)
	短期作用因素(B2)	季节(C5)
		施工(C6)
		接头脱落(C7)

对同层次的各因素两两之间进行充分比较, 构建同层次的判断矩阵。两因素之间比较其重要性用 1~9 标度来评分, 具体参照如表 2 所示。判断矩阵形式如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2)$$

Table 2. 1~9 scale definitions and descriptions
表 2. 1~9 标度定义与说明

标度	定义(因素 i 与因素 j)	说明
1	重要	对于某目标因素 i 和因素 j 同样重要
3	稍微重要	对于某目标因素 i 比因素 j 稍微重要
5	明显重要	对于某目标因素 i 比因素 j 明显重要
7	重要很多	对于某目标因素 i 比因素 j 重要很多
9	绝对重要	对于某目标因素 i 比因素 j 绝对重要
2,4,6,8	介于两个标度之间	两因素重要程度介于上述两标度之间
1/2,1/3, ..., 1/9	为上述标度的互反数	两因素重要程度为上述标度的互反数

根据判断矩阵计算权向量并进行一致性检验。先分别求出各判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} , 对应特征向量, 再归一化处理得到对应层次相应的权重向量 w_i , 利用一致性指标 CI 、随机一致性指标 RI 和一致性比率 CR 做一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

其中： λ_{\max} 表示矩阵的最大特征值； n 为判断矩阵阶数。

随机一致性指标 RI 与判断矩阵的阶数有关，如表 3 所示。

Table 3. Randomized consistency RI control table

表 3. 随机一致性 RI 对照表

n 阶	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵具有可以接受的一致性，否则需要重新调整和修正，直至满足条件。

层次总排序及一致性检验。利用组合权向量的计算公式(最下层因素层各归一化向量与决策层权向量各因素的相关量相乘)，求出最下层对目标层的组合权向量，并进行组合一致性检验。即：若本层次因素与上一层中各因素的一致性指标为 CI_i ，随机一致性指标为 RI_i ，上层各因素权重为 a_i ，则层次总排序一致性比例为：

$$CR = \frac{a_1CI_1 + a_2CI_2 + \dots + a_kCI_k}{a_1RI_1 + a_2RI_2 + \dots + a_kRI_k} \tag{5}$$

当层次总排序一致性比例 $CR < 0.1$ 时，认为层次总排序具有可以接受的一致性。最终即可根据权向量表示的各影响因素的权重等信息以及一致性检验结果进行决策。否则需重新确定判断矩阵或者模型使模型层次总排序一致性检验通过且符合要求。即运用层次分析法的步骤、思路如图 1 所示。

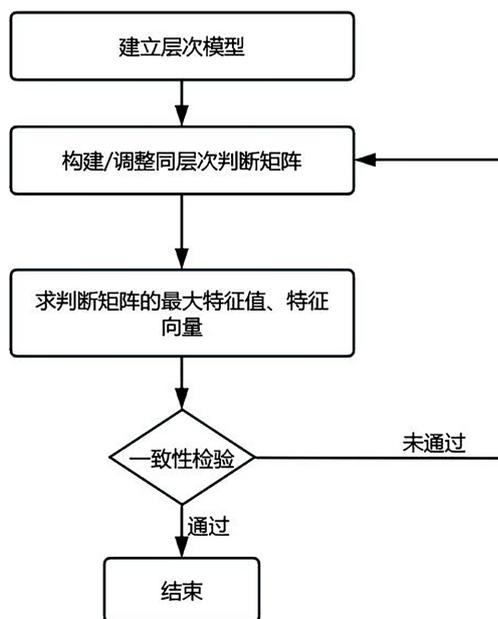


Figure 1. AHP solution step
图 1. 层次分析法求解步骤

2.3. 层次分析法分析结果与验证

2.3.1. 层次分析法分析结果

根据湘潭大学供水管网实际与层次分析法步骤得到的各层判断矩阵及相应的最大特征根、权向量，一致性结果及层次总排序结果如下：

1) 计算得到的一级指标 B 对目标 A (管道风险分析评价体系) 的判断矩阵及相应的最大特征根、权向量, 一致性检验结果如下:

A-B 判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7 \\ 1/7 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得判断矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max} = 2$, 归一化权重向量 $w = [0.8750 \quad 0.1250]^T$, 一致性指标 $CI = 2$ 、一致性比率 $CR = 0 < 0.1$, 判断矩阵 A 通过一致性检验。

2) 判断矩阵 B_1 :

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 \\ 1/4 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得判断矩阵 B_1 的最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.0601$, 归一化权重向量 $w_1 = [0.4875 \quad 0.3226 \quad 0.1033 \quad 0.0867]^T$, 一致性指标 $CI = \frac{4.0601-4}{4-1} = 0.02$ 、一致性比率 $CR = \frac{0.02}{0.89} = 0.0225 < 0.1$, 判断矩阵 B_1 通过一致性检验。

3) 判断矩阵 B_2 :

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/5 \\ 4 & 1 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

同理计算得判断矩阵 B_2 的最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.0858$, 归一化权重向量 $w_2 = [0.0936 \quad 0.2797 \quad 0.6267]^T$, 一致性指标 $CI = \frac{3.0858-3}{3-1} = 0.0429$ 、一致性比率 $CR = \frac{0.0429}{0.52} = 0.0825 < 0.1$, 判断矩阵 B_2 通过一致性检验。

4) 计算层次总排序及一致性检验:

计算求得二级指标(最底层)的各因素的权重为

$$w^3 = [0.4265 \quad 0.2822 \quad 0.0904 \quad 0.0759 \quad 0.0117 \quad 0.0350 \quad 0.0783]^T, \text{ 见表 4 所示。}$$

计算一致性检验有:

$$CR_{\text{总}} = 0.0271 < 0.1$$

因此, 层次总排序通过一致性检验。

Table 4. Weighting of evaluation indicators for pipeline risk analysis

表 4. 管道风险分析评价指标权重

目标	一级指标	权重	二级指标	权重
管道风险分析评价体系(A)	长期作用因素(B ₁)	0.8750	年代(C1)	0.4265
			腐蚀(C2)	0.2822
			沉降(C3)	0.0904
			荷载(C4)	0.0759

续表

管道风险分析评价体系(A)	短期作用因素(B ₂)	0.1250	季节(C5)	0.0117
			施工(C6)	0.0350
			接头脱落(C7)	0.0783

2.3.2. 层次分析法实例验证

从学校后勤等相关部门获取的数据显示, 某一时期内记载有 42 例供水管道发生故障案例, 管道受年代或自然腐蚀损坏有 29 例, 占比 69%, 受地面沉降或荷载影响有 8 例, 占比 19%, 接头脱落有 2 例, 占比 5%, 其他原因致管道损坏有 3 例, 占比 7%, 见图 2。

供水管道故障分析图

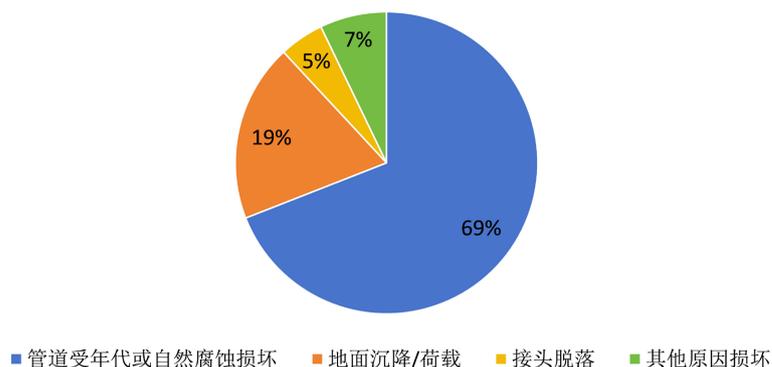


Figure 2. Failure analysis chart for water supply pipes
图 2. 供水管道故障分析图

根据层次分析法结果显示, 各判断矩阵均通过一致性检验, 同时结合学校数据, 我们可以得知建立的层次分析法模型得到的权重结果与实际故障记载数据影响因素占比大致相符。故通过综合评价, 我们可以得出湘潭大学供水管网受长期作用因素影响较大, 其中, 管道主要受年代因素或受到自然环境土壤酸碱腐蚀因素影响较大。

3. 基于 GIS 的管道风险等级模型构建

由于供水管道受年代老化、地表沉降、土壤腐蚀等原因, 供水管道面临着多种风险。为了可以更有效地管理这些风险, 保障供水安全, 我们可以将供水管道、管网的数据录入到地理信息系统的数据库中, 再利用供水管道影响因子与地理信息系统数据库的管道数据(如: 管径、管材、埋设时间、埋设深度、防腐形式等)进行匹配, 对不同影响因子进行评分, 再将各管道中的不同影响因子的分数乘对应权重即可得到供水管网、管道的风险等级图。

供水管道、管网数据中, 包含描述型数据和数值型数据, 其中描述型数据比如管道材质、防腐形式、土质类型等需要对其进行评分量化; 对于数值型数据比如管径、埋设时间, 如果直接根据其本身数值进行权重分配, 不仅使权重分配工作失去了意义, 还会使评价结果得到的是错误结果。因此也应对数值型数据进行评分。故本文根据郎鹏凯学者[11]通过统计分析等方法得到的不同影响因子的评分、郭芝瑞等[12][13]学者的文献中对管道的不同影响因子的分析作为参考, 制定了管道数据的评分表, 综合考虑后, 本文对供水管道、管网风险所利用的管道数据为埋设时间、管材、防腐形式、土质类型、埋设深度和管

径。由于研究区——湘潭大学的供水管道缺少相关管道数据，为更好地显示 AHP 与 GIS 相结合的应用效果和提供思想，本文选择哔哩哔哩“90 后大学青年教师”在该平台中分享的另一管道数据来进行评分、制作风险等级图。

管道的爆管、漏损等风险与管道使用年限的关系并不是一个突变的过程，不可能存在明显的分界点，但为便于量化分析，暂根据现有的研究资料对管道使用年限进行评分，具体评分如下表 5 所示，评分越高代表风险越高，评分越低代表风险越低。在 ArcGIS 中如管道缺少管道使用年限或服役时间等数据，则将该管道此项评分设为 5。管道使用年限风险图见图 3(a)。

Table 5. Pipeline age rating scale

表 5. 管道使用年限评分表

管道使用年限	0~5	5~15	15~30	30~理论使用年限	大于理论使用年限
评分	3	2	4	2	5

管道材质、管道防腐形式、土质类型和温度等都会对管道产生腐蚀的影响，由于影响因素过多，本文考虑管道风险评价体系中的腐蚀指标只考虑管道材质、管道防腐形式和土质类型对管道的影响，对管道材质、管道防腐形式、土质类型分别评分，占比分别定为 50%、25%、25%，最后可得到管道腐蚀评分图。由于管道防腐形式存在多样，较为复杂，为量化分析，本文管道防腐形式评分仅考虑管道是否有防腐措施，如果管道存在防腐形式，则该项评分为 2 分，如果管道不存在防腐形式，则该项评分为 5 分。同时由于研究区域范围内大部分土壤为红粘土，地下管道被红粘土覆盖，地上管道无土壤覆盖，结合学者研究，故土质评分分两部分，地下供水管道土质评分设为 3 分，地上管道评分设为 1 分。管道材质评分表见表 6，管道腐蚀评分图见图 3(b)。

Table 6. Pipe material rating scale [11]

表 6. 管道材质评分表[11]

管道材质	评分
镀锌管	5
灰口铸铁管	5
石棉水泥管	4
钢管	4
塑料管	3
预应力钢筋混凝土管	2
球墨铸铁管	1

管道受地面沉降或荷载影响与管道埋设、管道所处位置、地面交通等有关，由于地面交通是一个随机事件，不好确定评分，故本文针对管道受地面沉降或荷载影响仅考虑管道埋设深度的影响。管道埋设深度评分表见表 7，管道受地面沉降或荷载风险评分图见图 3(c)。

Table 7. Pipeline burial depth rating scale

表 7. 管道埋深评分表

管道埋深(米)	评分
<0 (位于地面上)	1
0~0.7	5

续表

0.7~1.2	3
1.2~1.4	1
>1.4	2

管道短期作用因素中的季节影响因素，在 2.1 供水管道风险因素分析中提及外界温度的周期性变化会引起管道材质的物理性变化，或者水对管道产生压力使管道存在爆管风险，从物理学角度考虑，管径越大，水接触面积则越大，则水对管道产生的压力越小，故针对该影响因子我们采取管道埋深和管径双评分，各占 50%的权重得到管道受季节影响图，此时位于地面以上的管道在管道埋深时的评分为 5 分。管径评分见表 8。

Table 8. Pipe diameter rating scale
表 8. 管径评分表

管径	评分
<DN50	5
[DN50, DN150]	4
(DN150, DN300]	3
(DN300, DN400]	2
>DN400	1

管道受施工因素影响是一个短期作用影响且与管道所处位置有关，故我们需根据实际施工位置来调整各管道在该影响因子下的评分。如无施工影响，则评分为 1 分。

管道的接口形式一般跟管材类型有关，比如灰铸管一般为承插刚性接口，而球铸管则多为承插柔性接口，因此接口形式可归管材类型进行分析[11]。

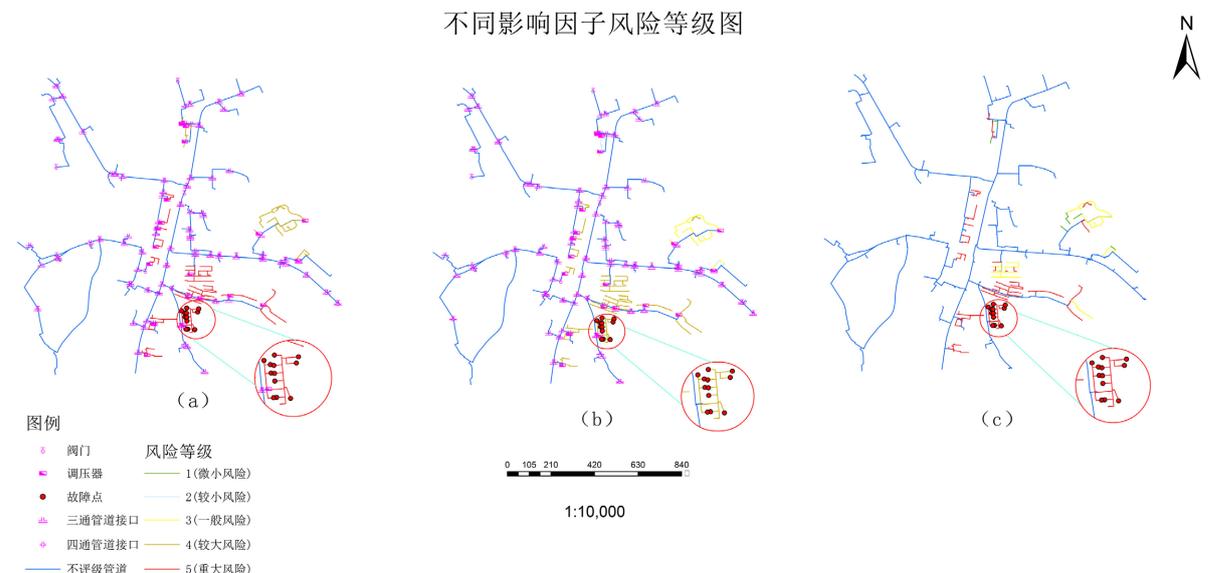


Figure 3. Risk level maps for different impact factors
图 3. 不同影响因子风险等级图

通过对不同影响因子风险等级的计算我们可以得到管道在不同影响因子的风险等级图，计算出所有可参评管段的风险等级，得到的风险等级图见图 4。从图中可知管道评分结果在 ArcGIS 上可清晰直观的表现，该地区管道风险值较高，整体运行安全较低，具有一定发生事故的风险，日常需加大巡检力度，以确保可以尽早发现隐患或者风险，保障人民的生命财产安全，或者可以在发生事故时可以尽快确定事故影响区域，减少对居民的损失和影响。

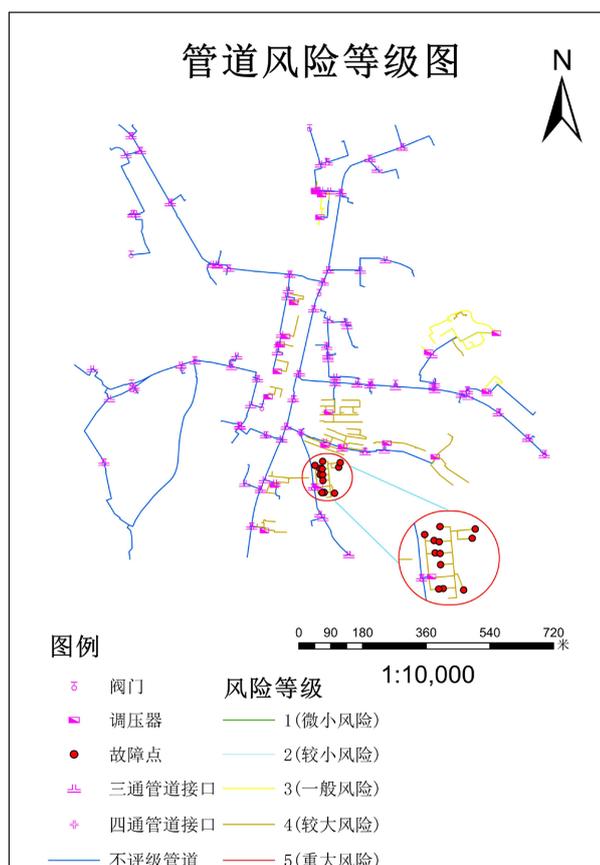


Figure 4. Pipeline risk classification chart

图 4. 管道风险等级图

4. 结束语

本文针对供水管道风险问题，将 AHP 与 GIS 技术相结合，研究了供水管道的影响因素，建立了供水管道风险分析模型，结合实例进行验证后，再利用 GIS 进行数据处理、空间分析，将区域内的管道风险等级可视化，显示了较强的可操作性，可以为评定其他管道的风险等级、在管道出现故障时可以尽可能准确并快速地判断管道故障位置提供一种思路和方法。但如果需要建立更为准确的管道管网安全预警的统计模型或风险等级，我们需要更多准确的管道、管网的属性数据短缺，学校方面也需要与有关部门、供水公司加强合作，来记载不同的管段维护管理、铺设记录，将更多的管道管网数据资料电子存档、录入系统，使管道数字化，这样才能得到更准确的结果。

致 谢

本研究的开展、完成得益于多方支持与帮助，在此谨致以诚挚的谢意。

首先感谢汪奇生老师在课题设计、论文撰写中的悉心指导与建议,也感谢汉斯期刊审稿人对本文提出的改进建议,未来笔者将谨记这些专业建议进一步完善论文的写作水平,拓展研究深度、采用更科学的数据处理方法提高论文质量。

同时本文得到湖南省大学生创新性实验计划资助项目的资助,由衷感谢资助机构的资助,为本文提供了重要的资金保障。

此外,感谢学校后勤部门的支持,为本文层次分析法实例验证提供了学校的数据,确保了研究的实例数据,给予了本研究数据资源保障。

最后,谨向本文涉及的各位学者们致以谢意。你们的开创性研究为本文的层次分析法模型、基于 GIS 的管道风险等级模型构建提供了理论基础与方法借鉴,再次感谢各位学者。

基金项目

湖南省大学生创新性实验计划资助项目(S202310530101)。

参考文献

- [1] 李震,裴亮,田一梅. 基于 FAHP 的供水管道爆管因素权重的确定[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 75-78.
- [2] 张建鹏,罗晓军,陈加荣. 基于 GIS 的供水管网系统爆管分析研究[J]. 金华职业技术学院学报, 2022, 22(3): 43-48.
- [3] 彭慧馨,魏超. 基于 GIS 的城市供水管网爆管状态实时监测方法[J]. 供水技术, 2023, 17(6): 30-33.
- [4] 王智恺. 城市市政排水管网运行安全风险评估及工程示范[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [5] 李成,刘建发,周兴兴,等. 对埋地 PE 燃气管道安全风险分级管控的研究[C]//中国城市燃气协会安全管理委员会. 2021 第五届燃气安全交流研讨会论文集(上册). 2023: 311-316.
- [6] 李晓路. 使用 GIS 进行城镇天然气管道完整性管理[C]//中国土木工程学会燃气分会. 中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会 2019 年学术年会论文集(中册). 2019: 510-516.
- [7] 王勇. 基于 ArcGIS 的供水管网地理信息系统的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2013.
- [8] 杨东赫,王筱菊,曹红亮. 城市供水管网安全评价指标体系确定[J]. 北京水务, 2024(1): 35-39.
- [9] 王超. 基于复杂网络和变权重层次分析法的城市供水管网安全评价[J]. 水利技术监督, 2024(3): 289-295.
- [10] 叶新旺. 高校配水管网漏损原因及控制措施探讨——以 AB 大学为例[J]. 居舍, 2018(25): 255+132.
- [11] 郎鹏凯. 基于 GIS 系统的城市供水管网漏损评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [12] 黄文春,朱卫方. 基于车辆荷载作用对埋地排水管道的影响分析[J]. 工程与建设, 2021, 35(1): 6-9.
- [13] 郭芝瑞. 基于专家系统理论的城市供水管网安全预警系统构建[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [14] 陈彧. 基于层次分析法的农产品冷链物流效率评价研究[J]. 天津科技, 2023, 50(S1): 14-17+23.
- [15] 张鑫伟,李亚雄,严晓鹏,等. 基于 GIS 与 AHP 的导弹发射阵地选址分析[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(12): 168-174.
- [16] Ghavami, S.M., Borzooei, Z. and Maleki, J. (2020) An Effective Approach for Assessing Risk of Failure in Urban Sewer Pipelines Using a Combination of GIS and AHP-DEA. *Process Safety and Environmental Protection*, **133**, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.036>
- [17] 孟凡奇,高峰,林波,等. 基于 AHP 和信息量模型的地质灾害易发性评价——以鲁东片区为例[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 111-117.