DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.005 文章编号:1671-2579(2025)02-0046-09

城市道路地下病害识别及塌陷风险评价研究

田岗[1],张海军[1],王成亮[2],杜衍庆[3],师海[4]

(1.中电投工程研究检测评定中心有限公司,北京市 100142;2.中路高科交通检测检验认证有限公司,北京市 100088;3.天津市政工程设计研究总院有限公司,天津市 300051;4.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京市 100044)

摘要:该文以探地雷达技术为基础,通过分析城市道路地下典型病害的形成特点、电性特征和形态差异,总结分析不同道路地下病害的雷达图谱特征,这不仅有利于地下病害的精确辨识,还为后续道路塌陷评价工作的开展提供了评估依据。同时,该文通过将地下病害等因素融入道路塌陷风险评价工作中,建立了用于道路塌陷风险评价的"5级"评估模型,形成了道路地下病害探测与塌陷风险评价的一体化研究机制,并以北京市某道路工程为例,运用梯形隶属度函数,对影响道路塌陷的各指标隶属度进行赋值,并通过模糊运算得出实例道路病害体1#、2#、3#和4#发生塌陷风险的等级分别为Ⅱ级(较低风险)、Ⅲ级(一般风险)、Ⅲ级(一般风险)和Ⅴ级(高风险)。研究结果表明:对于处于较低风险的病害体1#,应加强日常巡视工作;对于处于一般风险的病害体2#、3#,应加强定期检测;对于处于高风险的病害体4#,应及时进行注浆加固或开挖回填处理。

关键词:探地雷达;雷达图谱;地下病害;道路塌陷;风险评价

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Research on Identification of Subsurface Defects of Urban Roads and Collapse Risk Assessment

TIAN Gang[1], ZHANG Haijun[1], WANG Chengliang[2], DU Yanqing[3], SHI Hai[4]

(1. C+E Center for Engineering Research Test and Appraisal Co., Ltd., Beijing 100142, China; 2. China-Road Transportation Verification & Inspection Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300051, China; 4. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on ground-penetrating radar (GPR) technology, this paper examined the formation characteristics, electrical properties, and morphological variations of common subsurface defects of urban roads. The paper summarized the radar spectrum characteristics of various subsurface defects, aiding in precise identification and providing a basis for subsequent assessment of road collapse risks. In addition, the paper integrated various factors, including subsurface defects, into the assessment of road collapse risk and established a "five-level" assessment model. This led to an integrated research approach for detecting subsurface defects and assessing collapse risks. A road project in Beijing was used as a case study, and a trapezoidal membership function was applied to assign values to collapse-related indicators. Fuzzy calculations were employed to determine the collapse risk levels for subsurface defects 1#, 2#, 3#, and 4#, classified as Level Ⅱ (low risk), Level Ⅲ (medium risk), Level Ⅲ (medium risk), and Level Ⅴ (high risk), respectively. The results indicate that low-risk defect 1# requires enhanced routine inspections; medium-risk defects 2# and 3# necessitate regular inspections; high-risk defect 4# demands immediate grouting reinforcement or excavation and backfilling.

Keywords: GPR; radar spectrum; subsurface defect; road collapse; risk assessment

收稿日期:2024-08-30(修改稿)

基金项目:天津市交通运输科技发展计划项目(编号:2019B25);中国电子工程设计院科研项目(编号:KJ2230)

作者简介:田岗,男,博士,高级工程师. E-mail:tiangang08009x@163.com

0　引言

随着中国城市化进程的不断加快，人类活动随之增加，以及受到各种内外因素的综合性影响，致使中国城市道路地下病害频发，道路塌陷风险逐步孕育和累积，最终诱发城市道路塌陷灾害的发生[1-3]。近年来，在中国北京、西宁、杭州、广州等城市中道路塌陷事件屡见报端，由此造成了巨大经济损失和不良社会影响，城市道路塌陷已然成为中国城市发展建设中的一个共性问题。

城市道路属于典型的线性工程，其塌陷隐患多呈点状或片状分布，具有明显的空间随机性和破坏突发性[4-5]。工程上针对这类道路破坏形式，多以预防为主，即通过地球物理探测手段，如利用探地雷达法、地震反射波法或面波法等，及早探测获取引发道路塌陷风险的孕灾体信息并予以处治，提前预防道路塌陷灾害的发生。目前，与其他探测方法相比，探地雷达具有操作简便、工作效率高等优势，已被广泛应用于城市道路病害探测研究工作中。如：栗宝鹃等[6]、刘国超等[7]针对道路浅表地质隐患，利用探地雷达并辅以钻探、内窥镜等技术，实现了对地下病害的精确探测；陈昌彦等[8]、聂俊丽等[9]以探地雷达技术为基础，根据地下病害体的特征差异，对病害类型进行划分，为病害雷达图谱的分类识别提供了依据；杜豫川等[10]、张海如等[11]基于大量探地雷达图谱数据，利用人工智能技术，挖掘不同地下病害的细节特征，实现了对多种地下病害体的自动识别。在道路塌陷风险研究方面，邹长文等[12]利用层次分析法，将岩溶道路塌陷风险划分为稳定、基本稳定、较不稳定、不稳定4个等级；周子勇等[13]采用层次-熵权-云模型组合评价方法，构建了道路塌陷风险评估模型，并在深圳部分道路的塌陷风险评价中进行了应用；张昌新等[14]根据关键影响因子建立了半定量风险评价模型，预测了不同地段地铁施工诱发地面塌陷的风险。

从上述研究可以看出，虽然关于探地雷达探测识别和道路塌陷风险评估的研究均已取得了一定成果，但是探测与评估尚未被有机地整合在一起，相关研究普遍存在测而未评或评而未测的现象，即针对城市道路测评结合的研究相对较少。基于此，本研究主要考虑将道路地下病害的探测与评估工作相结合，在开展基于探地雷达技术的病害识别研究的同时，建立基于多指标因素的城市道路塌陷风险评价体系，用于实现以探地雷达法为基础的地下病害探测识别与风险评价的一体化研究，以便于今后城市道路管理者可以科学应对城市道路地下病害及塌陷风险，降低道路塌陷隐患对城市发展可能产生的不利影响。

1　探地雷达原理及图谱特征

目前，探地雷达技术是探测识别道路地下病害最有效的手段，掌握探地雷达基本工作原理和相关典型地下病害的雷达图谱特征，是后续开展地下病害探测、识别及道路塌陷评估工作的前提条件。

1.1　探地雷达工作原理

探地雷达工作原理是由发射天线（Tx）向道路地下介质发射高频宽带电磁脉冲，随着电磁波在地下介质中的传播，当其透过存在电性差异的地下介质交界面时，电磁波会发生反射和折射，其中反射波由接收天线（Rx）接收。再通过处理接收到的电磁波反射信号，可以得到地下潜在病害目标体的深度、大小和形态等几何信息及电性差异特征，从而实现对地下隐蔽病害体的探测识别（图1）。

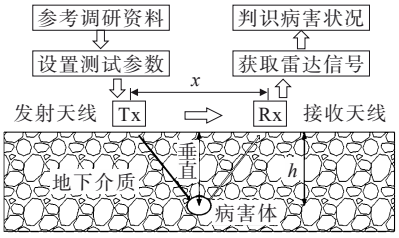


图1　探地雷达工作原理示意图

Figure 1　Working principle of GPR

（1）电磁波传播时间[15]

$$t=\frac{\sqrt{4h^2+x^2}}{v} \tag{1}$$

$$v=\frac{c}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} \tag{2}$$

式中：t为电磁波在介质中传播时间（ns）；v为电磁波在介质中传播速度（m/ns）；h为地下病害体的埋深（m）；x为发射天线和接收天线的水平间距（m）；c为电磁波在真空中的传播速度（m/ns）；μ_r为介质的相对磁导率，常取1；ε_r为介质的相对介电常数。

（2）探测目标的埋深

根据电磁波的双程走时、波速和收发天线的水平间距等参数，可以推算探测道路地下目标的埋深，即：

$$h=\frac{\sqrt{(vt)^2-x^2}}{2} \tag{3}$$

当h远大于x时，则有：

$$h\approx\frac{vt}{2}=\frac{c\cdot t}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{4}$$

1.2 道路地下病害分类

城市道路地下病害一般可分为疏松、富水、脱空和空洞4类[16-17]。其中，疏松病害表现为道路下方介质松散、不密实，道路承载力存在明显不足等现象；富水病害表现为道路下方介质潮湿、含水量较高，或存在储水构造，富藏大量水体或水囊；脱空病害表现为道路结构存在层状脱离现象，致使上下结构层之间形成空隙；空洞病害表现为道路下方土体介质严重缺失，并形成洞穴。

研究还发现，疏松、富水、脱空和空洞等病害均是诱发道路塌陷的相关因素。其中，脱空与空洞属于道路塌陷的主要诱因，疏松与富水是脱空与空洞形成的早期阶段，是道路塌陷的次要诱因。因此，准确有效地识别各类地下病害的种类和规模，是进行后续道路塌陷评价的关键。

1.3 典型病害图谱特征

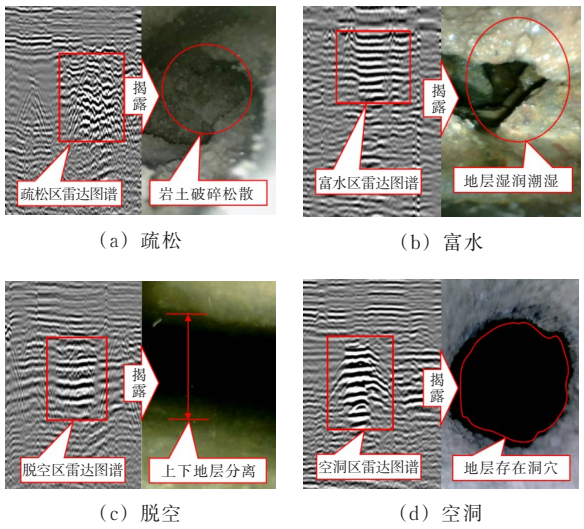
不同城市地下病害的电性特征和结构形态存在一定的差异性，这种差异导致地层电磁波阻抗不同，它们在探地雷达成果图像上也反映出不同的图谱特征[18-19]（图2），总体可以归纳为：

（1）疏松病害雷达特征：地层疏松时，土体为松散、不密实状，地层存在大量裂隙或层间错位等现象，导致土体电性分布不均，反射界面不规整。当电磁波透射这种疏松地层时，其反射波的同相轴往往呈现不连续、杂乱无章、断裂和变形等特征，且在同一深度同相轴高低不平，甚至产生局部缺失。

（2）富水病害雷达特征：地层富水时，土体含水率较高，地层电性趋同于水体，且电性较为单一，电磁反射波同相轴相对连续，整体振幅较强，衰减较快，富水体顶部反射波与入射波反向，富水体底部反射波与入射波同向，整体频率低于背景场。

（3）脱空病害雷达特征：地层脱空时，上下两层地层分离，中间形成空隙，呈现出地层-空隙-地层的夹心结构状态。当电磁波透射这种脱空地层时，上下两层界面会形成两次似平板状的异常强反射，且易在脱空区两端发生绕射现象。

（4）空洞病害雷达特征：地层存在空洞时，土体内部形成似圆球形空腔结构。当电磁波透射这种空洞结构时，电磁反射波在其上界面呈现出开口向下的双曲线形强反射，且因其中部的电性改变比两侧的大，空洞区两侧表现为曲线下滑的反射波，两端幅值逐渐减弱。



（a）疏松　（b）富水　（c）脱空　（d）空洞

图2 典型病害雷达图谱及揭露情况

Figure 2 Radar spectra of typical subsurface defects and revealed conditions

2 道路塌陷风险评价方法

2.1 风险评价的指标集

通过参考文献[20]对影响城市道路塌陷的主要指标进行细化分类，形成两层级指标集。其中，第一层的指标集U和第二层的指标集U_i分别为：

$$U=\{U_1,U_2,\cdots,U_m\},i=1,2,\cdots,m \tag{5}$$

$$U_i=\{U_{i1},U_{i2},\cdots,U_{in_i}\},j=1,2,\cdots,n_i \tag{6}$$

式中：U_i为第一层第i个指标；U_{ij}为第一层第i个指标下的第二层第j个指标。其中，第一层指标共有4个，包括区域水文、道路现状、地下病害和周边环境等；第二层指标共有14个，包括年降水量、交通流量、病害类型和施工情况等（图3）。

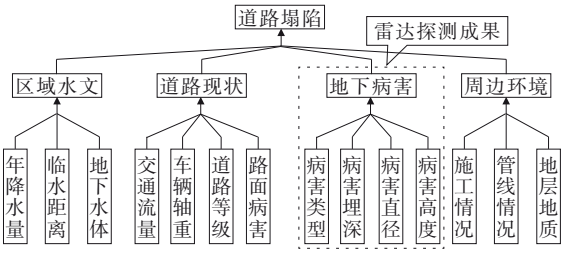


图3 道路塌陷风险评价指标体系

Figure 3 Road collapse risk assessment indicator system

2.2　风险评价的评语集

为了便于对城市道路塌陷风险进行综合性评价，现以两层级影响指标为基础，构建出城市道路塌陷风险综合评价体系，建立“5级”评语集 V，即：

$$V=\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}=\{\text{Ⅰ}, \text{Ⅱ}, \text{Ⅲ}, \text{Ⅳ}, \text{Ⅴ}\} \quad (7)$$

式中：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级分别表示道路存在塌陷的风险低、风险较低、风险一般、风险较高、风险高，具体如表1所示。

表1　道路塌陷风险评价标准

Table 1　Risk assessment standards for road collapse

风险等级	区域水文			道路现状				地下病害				周边环境		
	年降水量/mm	临水距离/m	地下水体	交通流量	车辆轴重/kN	道路等级	路面病害	病害类型	病害埋深/m	病害直径/m	病害高度/m	施工情况	管线情况	地层地质
Ⅰ级	$a<200$	$l\geqslant1000$	无地下水，土体干燥	车流量小	$m<20$	高速公路	无病害	一般疏松	$h\geqslant7$	$d<1$	$H<1$	无施工	无管线	地层地质很好
Ⅱ级	$200\leqslant a<400$	$500\leqslant l<1\,000$	地下水含量较少，土体较湿润	车流量较小	$20\leqslant m<60$	一级公路	病害较小	严重疏松	$5\leqslant h<7$	$1\leqslant d<3$	$1\leqslant H<2$	施工影响较小	管线数量较少	地层地质较好
Ⅲ级	$400\leqslant a<800$	$100\leqslant l<500$	地下水含量一般，土体潮湿	车流量一般	$60\leqslant m<100$	二级公路	病害一般	富水	$3\leqslant h<5$	$3\leqslant d<5$	$2\leqslant H<3$	施工影响一般	管线数量一般	地层地质一般
Ⅳ级	$800\leqslant a<1\,200$	$20\leqslant l<100$	地下水较丰富，土体富水	车流量较大	$100\leqslant m<140$	三级公路	病害较大	脱空	$1\leqslant h<3$	$5\leqslant d<7$	$3\leqslant H<4$	施工影响较大	管线数量较多	地层地质较差
Ⅴ级	$a\geqslant1200$	$l<20$	地下水丰富，土体有涌、漏水点	车流量大	$m\geqslant140$	四级公路	病害严重	空洞	$h<1$	$d\geqslant7$	$H\geqslant4$	施工影响很大	管线数量很多	地层地质很差

2.3　综合模糊算法

(1) 指标权重集

由于第二层指标是评价体系的最底层，设最底层评价指标权重为 a_{ij}，则基于最底层指标的权重集 $\boldsymbol{A}$ 为：

$$\boldsymbol{A}=\{\boldsymbol{A}_1, \boldsymbol{A}_2, \cdots, \boldsymbol{A}_m\}, \boldsymbol{A}_i=\left[a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{in_i}\right] \quad (8)$$

(2) 模糊关系矩阵

根据建立的道路塌陷风险评价体系，对于整个评价体系 U 而言，其模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_1\\ \boldsymbol{R}_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{R}_m\end{bmatrix}, \boldsymbol{R}_i=\begin{bmatrix}r_{i11} & \cdots & r_{i1l}\\ \vdots & & \vdots\\ r_{in_i1} & \cdots & r_{in_il}\end{bmatrix} \quad (9)$$

(3) 评价结果

根据综合模糊评价理论，将评价指标的权重集 $\boldsymbol{A}$ 与模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$ 进行叉乘运算[21]，所得的评价集 $\boldsymbol{B}$ 为：

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{R}=\{\boldsymbol{A}_1, \boldsymbol{A}_2, \cdots, \boldsymbol{A}_m\}\times\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_1\\ \boldsymbol{R}_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{R}_m\end{bmatrix}=$$

$$(b_1, b_2, \cdots, b_l) \quad (10)$$

再对评判集 $\boldsymbol{B}$ 进行归一化处理[22]，则有：

$$\tilde{\boldsymbol{B}}=\left(\frac{b_1}{\sum_{i=1}^{l}b_i}, \frac{b_2}{\sum_{i=1}^{l}b_i}, \cdots, \frac{b_l}{\sum_{i=1}^{l}b_i}\right)=\left(\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \cdots, \tilde{b}_l\right) \quad (11)$$

按照最大单元隶属度原则[23]，则有：

$$\tilde{b}_{i0}=\max\left\{\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \cdots, \tilde{b}_l\right\} \quad (12)$$

$\tilde{b}_{i0}$ 值对应的风险等级即为道路塌陷风险的最终评价结果。

3　指标权重的确定

3.1　AHP确权方法

AHP确权实现步骤主要包括：① 构建各层判断矩阵；② 计算重要性排序；③ 进行一致性检验分析；④ 最终确定指标权重。整个道路塌陷风险评价体系中最底层指标的最终权重：

$$a_{ij}=W_i\cdot W_j \quad (13)$$

式中：W_i 为第一级层次的第 i 评价指标的权重分配值；W_j 为与第一层对应的第二级层次的第 j 评价指标权重分配值。

3.2　风险指标权重

为了综合确定道路塌陷风险主要指标的权重，本研究采用头脑风暴方法，邀请本领域10名专家进行小组讨论，凝聚专家集体智慧，并依据表2中的规

则，分别对包含地下病害等指标的第一层级各指标和包含病害类型等指标的第二层级各指标进行重要性对比分析，最终构建出道路塌陷风险指标判断矩阵，具体如下：

表2 重要性标度含义

Table 2 Interpretation of significance scale

标度	含义
1	表示元素 u_i 与 u_j 相比，具有同等重要性
3	表示元素 u_i 与 u_j 相比，前者比后者稍重要
5	表示元素 u_i 与 u_j 相比，前者比后者明显重要
7	表示元素 u_i 与 u_j 相比，前者比后者强烈重要
9	表示元素 u_i 与 u_j 相比，前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值，即1～3,3～5,5～7,7～9的中值
倒数	若元素 u_i 与元素 u_j 的重要性之比为 u_{ij}，反之则为 $u_{ji}=1/u_{ij}$

（1）第一层级指标的判断矩阵为：

$$P_u=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1/3 & 1\\ 1 & 1 & 1/3 & 1\\ 3 & 3 & 1 & 2\\ 1 & 1 & 1/2 & 1\end{bmatrix}$$

（2）第二层级指标的判断矩阵为：

$$P_{u_1}=\begin{bmatrix}1 & 2 & 1\\ 1/2 & 1 & 1/2\\ 1 & 2 & 1\end{bmatrix}$$

$$P_{u_2}=\begin{bmatrix}1 & 1/2 & 1 & 1/2\\ 2 & 1 & 2 & 1\\ 1 & 1/2 & 1 & 1/2\\ 2 & 1 & 2 & 1\end{bmatrix}$$

$$P_{u_3}=\begin{bmatrix}1 & 2 & 2 & 2\\ 1/2 & 1 & 1 & 1\\ 1/2 & 1 & 1 & 1\\ 1/2 & 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

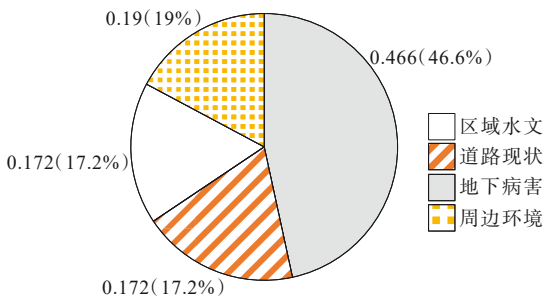
$$P_{u_4}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 2\\ 1 & 1/2 & 1\end{bmatrix}$$

通过对第一层级指标和第二层级指标的判断矩阵进行计算，R_{CR}值均小于0.1，满足一致性要求（表3），求得的各级指标权重详见图4。

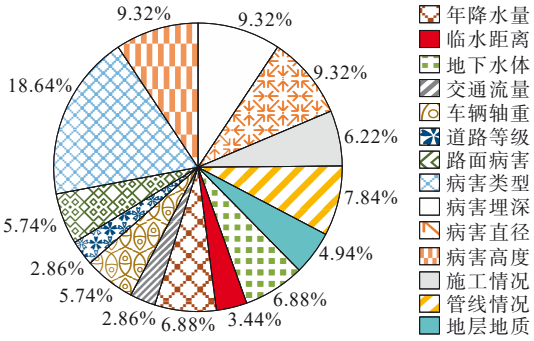
表3 判断矩阵一致性比率

Table 3 Consistency ratio of judgment matrix

项目	第一层级	第二层级			
	P_u	P_{u_1}	P_{u_2}	P_{u_3}	P_{u_4}
R_{CR}值	0.008	0.000	0.000	0.000	0.052



（a）一级指标权重



（b）二级指标权重

图4 指标权重

Figure 4 Indicator weights

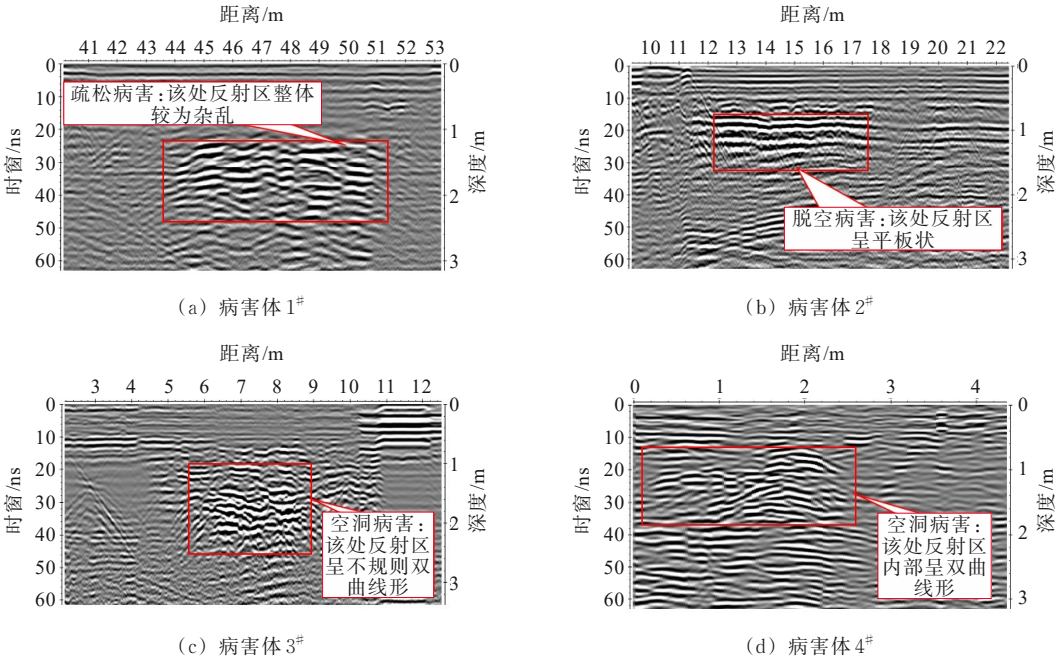
从图4可以看出：在影响道路塌陷的第一级指标中，地下病害对道路塌陷风险的影响最大，周边环境的影响次之，区域水文和道路现状的影响最小；而在影响道路塌陷的第二级指标中，病害类型、病害埋深、病害直径和病害高度等指标对道路塌陷风险的影响最大，管线情况、年降水量、地下水体、施工情况、路面病害和车辆轴重等指标的影响次之，地层地质、临水距离、交通流量和道路等级等指标的影响最小。因此，建议在对道路塌陷风险评价时，应重点加强对地下病害体的探测与识别，以便于使后期评价工作更具针对性。

4 实例分析

4.1 工程概况

以北京市某段主干道路为例，通过调查该段主干道路现场情况，整理勘察资料，分析雷达探测结果，在该段主干道路共获取4处地下病害体（病害编号1#、2#、3#和4#）及其相关评价指标信息（图5和表4）。同时，由于在道路塌陷风险评价体系中，年降水量、临水距离、车辆轴重、病害埋深、病害直径和病害高度6个因素属于定量指标，地下水体、交通流量、道路等级、路面病害、病害类型、施工情况、管线状况和地层地质

8个因素属于定性指标。因此，本文针对定性指标的特点，采用100分制打分法，将相关定性指标进行量化处理，设：Ⅰ级为90～100分；Ⅱ级为70～90分；Ⅲ级为50～70分；Ⅳ级为30～50分；Ⅴ级为0～30分。



（a）病害体1#　（b）病害体2#　（c）病害体3#　（d）病害体4#

图5　地下病害体雷达图谱

Figure 5　Radar spectra of subsurface defects

表4　地下病害体周边情况及评价信息

Table 4　Surrounding conditions and evaluation information for subsurface defects

地下病害编号	区域水文			道路现状				地下病害				周边环境		
	年降水量/mm	临水距离/m	地下水体	交通流量	车辆轴重/kN	道路等级	路面病害	病害类型	病害埋深/m	病害直径/m	病害高度/m	施工情况	管线情况	地层地质
1#	648	420	含量较少，土体稍湿润（80分）	车流量较大（40分）	100	一级公路（80分）	病害较小（80分）	严重疏松（80分）	1.2	8.0	1.2	施工影响较小（80分）	管线数量较多（40分）	地层地质一般（60分）
2#	648	230	含量一般，土体潮湿（60分）	车流量较大（40分）	100	一级公路（80分）	病害一般（60分）	脱空（40分）	0.8	5.0	0.8	施工影响较小（80分）	管线数量多（25分）	地层地质一般（60分）
3#	648	1 100	含量一般，土体潮湿（60分）	车流量较大（40分）	100	一级公路（80分）	病害一般（60分）	空洞（25分）	1.0	3.0	1.5	施工影响一般（60分）	管线数量较多（40分）	地层地质一般（60分）
4#	648	1 100	含量一般，土体潮湿（60分）	车流量较大（40分）	100	一级公路（80分）	病害较多（40分）	空洞（25分）	0.5	2.5	1.3	施工影响较大（40分）	管线数量多（25分）	地层地质一般（60分）

4.2　指标隶属度

为了获取各指标隶属度信息，采用梯形隶属度分布形式，对道路塌陷风险评价体系中的6个定量指标和8个定性指标分别构建相应的梯形隶属度函数，计算指标隶属度值，其表达式为[24-25]：

$$U_{\mathrm{I}}(x)=\begin{cases}1 & x<a\\ \dfrac{b-x}{b-a} & a\leqslant x\leqslant b\\ 0 & x>b\end{cases}\tag{14}$$

$$U_{\text{Ⅱ}}(x)=\begin{cases}0 & x<a\\ \dfrac{x-a}{b-a} & a\leqslant x\leqslant b\\ 1 & b<x<c\\ \dfrac{d-x}{d-c} & c\leqslant x\leqslant d\\ 0 & x>d\end{cases}\tag{15}$$

$$U_{\text{Ⅲ}}(x)=\begin{cases}0 & x<c\\ \dfrac{x-c}{d-c} & c\leqslant x\leqslant d\\ 1 & d<x<e\\ \dfrac{f-x}{f-e} & e\leqslant x\leqslant f\\ 0 & x>f\end{cases}\tag{16}$$

$$U_{\text{Ⅳ}}(x)=\begin{cases}0 & x<e\\ \dfrac{x-e}{f-e} & e\leqslant x\leqslant f\\ 1 & f<x<g\\ \dfrac{h-x}{h-g} & g\leqslant x\leqslant h\\ 0 & x>h\end{cases}\tag{17}$$

$$U_{\text{Ⅴ}}(x)=\begin{cases}0 & x<g\\ \dfrac{h-x}{h-g} & g\leqslant x\leqslant h\\ 1 & x>h\end{cases}\tag{18}$$

式中：a、b、c、d、e、f、g、h分别为与各指标风险等级划分相关的参数。

由此，基于上述梯形隶属度函数，考虑实例道路地下病害体1#、2#、3#和4#的自身及周边情况，可分别求得道路地下病害体1#、2#、3#和4#的模糊关系矩阵，即：

$$\boldsymbol{R}_{1^{\#}}=\begin{bmatrix}0&0&1&0&0\\0&0.1&0.9&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0.5&0.5&0\\0&1&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&0&0.4&0.6\\0&0&0&0&1\\0.5&0.5&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&1&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{2^{\#}}=\begin{bmatrix}0&0&1&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0.5&0.5&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\\0&0&0.5&0.5&0\\1&0&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&0&0&1\\0&0&1&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{3^{\#}}=\begin{bmatrix}0&0&1&0&0\\1&0&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0.5&0.5&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&0&1\\0&0&0&0&1\\0&0.5&0.5&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&1&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{4^{\#}}=\begin{bmatrix}0&0&1&0&0\\1&0&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0.5&0.5&0\\0&1&0&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\\0&0&0&0&1\\0&1&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\\0&0&1&0&0\end{bmatrix}$$

4.3 综合评价及建议

将实例道路地下病害体1#、2#、3#和4#的风险指标权重与模糊关系矩阵进行计算和归一化处理，可得地下病害体1#、2#、3#和4#发生塌陷风险的综合评判集$\tilde{\boldsymbol{B}}_{1^{\#}}$、$\tilde{\boldsymbol{B}}_{2^{\#}}$、$\tilde{\boldsymbol{B}}_{3^{\#}}$和$\tilde{\boldsymbol{B}}_{4^{\#}}$，即：

$\tilde{B}_{1^{\#}}=(0.046\,6, 0.453\,4, 0.177\,9, 0.173\,0, 0.149\,1)$

$\tilde{B}_{2^{\#}}=(0.046\,6, 0.453\,4, 0.177\,9, 0.173\,0, 0.149\,1)$

$\tilde{B}_{3^{\#}}=(0.034\,4, 0.168\,4, 0.381\,9, 0.135\,8, 0.279\,6)$

$\tilde{B}_{4^{\#}}=(0.034\,4, 0.215\,0, 0.215\,8, 0.176\,8, 0.358\,1)$

根据最大隶属度原则，本实例道路地下病害体1#、2#、3#和4#发生塌陷风险等级分别为Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅲ级和Ⅴ级（图6）。其中，地下病害体1#的Ⅱ级风险占比具有明显优势，属于较低风险病害，建议进行日常巡视时，加强对该区域的重点监测；地下病害体2#和3#的Ⅲ级风险占比最高，属于一般风险病害，但考虑到它们的Ⅳ级和Ⅴ级风险占比同样较高，地下病害体2#和3#在一定条件下，有从Ⅲ级风险向Ⅳ级或Ⅴ级风险转化的可能，建议制定定期检测计划，及时掌握地下病害体2#和3#的风险发展和变化情况，当转化为Ⅳ级或Ⅴ级风险时，应尽快予以加固处理；地下病害体4#的Ⅴ级风险占比最高，属于高风险病害，随时有可能发生道路塌陷的风险，建议尽快进行注浆加固或开挖回填处理，以保证该处道路的运营安全。

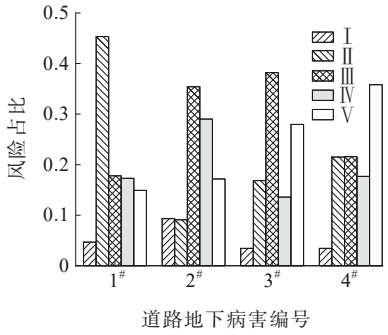


图6　不同病害的塌陷风险等级

Figure 6　Collapse risk levels of different defects

5　结论

（1）基于探地雷达电磁波在电性差异地层的反射机理，总结分析了道路地下疏松、富水、脱空和空洞4类病害体对应的地质雷达图谱特征。

（2）通过将前期地下病害的雷达测试结果融入塌陷风险评价体系，建立了包含地下病害等指标在内的道路塌陷风险“5级”评价模型。同时认为在各类指标中地下病害对道路塌陷风险的影响最大，建议日常应加强对地下病害体的探测识别工作。

（3）依托北京市某实例道路工程，运用模糊评价方法，求得该段道路中病害体1#、2#、3#和4#发生塌陷风险的等级分别为Ⅱ级（较低风险）、Ⅲ级（一般风险）、Ⅲ级（一般风险）和Ⅴ级（高风险），并依据病害体风险等级差异给出了相应的处理建议。

参考文献：

References：

[1] 陈雨昂，唐荣，方建，等.2014—2018年中国城市路面塌陷时空规律与原因分析[J].水利水电技术，2020，51(7)：108-116.
CHEN Yuang, TANG Rong, FANG Jian, et al. Analysis on spatio-temporal law and causation of urban road collapse in China from 2014 to 2018[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2020,51(7): 108-116.

[2] 董耿志，星文太，周程，等.基于InSAR及综合物探方法的道路塌陷分析[J].测绘通报，2023(3)：104-110.
DONG Gengzhi, XING Wentai, ZHOU Cheng, et al. Road collapse analysis based on InSAR and integrated physical survey methods[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(3): 104-110.

[3] 戴轩，李朝，蔡靖，等.考虑脱空深度影响的机场刚性道面工作性能研究[J].中外公路，2024，44(4)：37-46.
DAI Xuan, LI Zhao, CAI Jing, et al. Working performance of rigid airfield runway considering influence of cavity depth[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(4): 37-46.

[4] 胡聿涵，白玉川，徐海珏.近10年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J].公路，2016，61(9)：130-135.
HU Yuhan, BAI Yuchuan, XU Haijue. Analysis of reasons for urban road collapse and prevention and control countermeasures in recent decade of China[J]. Highway, 2016,61(9): 130-135.

[5] 郭士礼，段建先，张建锋，等.探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用[J].地球物理学进展，2019，34(4)：1609-1613.
GUO Shili, DUAN Jianxian, ZHANG Jianfeng, et al. Application of GPR in urban road hidden diseases detection[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1609-1613.

[6] 栗宝鹃，刘栋臣，王志豪，等.基于电磁原理的浅地表地质病害探测方法及应用[J].工程地球物理学报，2022，19(6)：753-761.
LI Baojuan, LIU Dongchen, WANG Zhihao, et al. Electromagnetic method and application for geological defects detection in shallow surface[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2022,19(6): 753-761.

[7] 刘国超，彭卫平，杨水华，等.地质雷达+三维测量内窥镜的城市道路病害检测与应用[J].测绘通报，2022(7)：134-137.
LIU Guochao, PENG Weiping, YANG Shuihua, et al. Detection and application of urban road disease based on ground penetrating radar+3D measuring endoscope[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2022(7): 134-137.

[8] 陈昌彦，肖敏，贾辉，等.城市道路地下病害成因及基于综合探测的工程分类探讨[J].测绘通报，2013(增刊2)：5-9.

CHEN Changyan,XIAO Min,JIA Hui,et al.Discussion on the causes of urban road underground diseases and engineering classification based on comprehensive detection[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2013(sup 2): 5-9.

[9] 聂俊丽,李法滨,张磊,等.路基病害及检测技术研究综述[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(2): 35-38.
NIE Junli, LI Fabin, ZHANG Lei, et al. Summary of subgrade disease and detection technology research[J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition),2019,15(2): 35-38.

[10] 杜豫川,都州扬,刘成龙.基于极限梯度提升的公路深层病害雷达识别[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(12): 1742-1750.
DU Yuchuan, DU Zhouyang, LIU Chenglong. Road diseases recognition of ground penetrating radar based on extreme gradient boosting[J].Journal of Tongji University (Natural Science),2020,48(12): 1742-1750.

[11] 张海如,王国富,张法全.基于探地雷达信号频带介电谱特征的公路早期病害检测[J].科学技术与工程,2018,18(4): 344-348.
ZHANG Hairu,WANG Guofu,ZHANG Faquan.Dielectric spectrum feature vector of ground penetrating radar signal in frequency bands for detecting expressway subgrade diseases[J].Science Technology and Engineering,2018,18(4): 344-348.

[12] 邹长文,郑明新.昌栗高速公路K48+040—K53+582段岩溶塌陷稳定性评价[J].华东交通大学学报,2016,33(2):15-21.
ZOU Changwen,ZHENG Mingxin.Stability evaluation of Karst roadbed along K48+040–K53+582 of Nanchang–Shangli freeway[J]. Journal of East China Jiaotong University,2016,33(2):15-21.

[13] 周子勇,石浩宇,董毓良,等.基于层次熵权–云模型城市道路塌陷风险评价研究[J].安全与环境学报,2023,23(6): 1752-1761.
ZHOU Ziyong,SHI Haoyu,DONG Yuliang,et al.Research on road collapse risk evaluation based on cloud model and AHP-EWM[J].Journal of Safety and Environment,2023,23(6): 1752-1761.

[14] 张昌新,余志江,郑太航.基于半定量法的地铁工程地面塌陷风险评估[J].铁道工程学报,2014,31(12): 93-95,105.
ZHANG Changxin, YU Zhijiang, ZHENG Taihang. Risk assessment of ground collapse caused by metro construction based on the qualitatsnive semi-quantitative method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(12): 93-95,105.

[15] 张海军,金春峰,田岗,等.基于地质雷达法的城市道路地下病害探测及实例应用[J].智能建筑与智慧城市,2022(12):6-9.
ZHANG Haijun, JIN Chunfeng, TIAN Gang, et al. Underground disease detection of urban roads based on GPR and its application[J]. Intelligent Building & Smart City,2022(12): 6-9.

[16] 王鹏.探地雷达在人行道地下病害体检测中的应用[J].测绘通报,2019(增刊1): 199-203.
WANG Peng. Application of ground penetrating radar in detection of underground diseases on sidewalks[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2019(sup 1): 199-203.

[17] 彭湘桂.探地雷达在北京市道路下方病害检测中的研究[D].北京: 中国地质大学(北京),2011.
PENG Xianggui. Research on application of GPR to the detection of disease in urban road in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences,2011.

[18] 马永辉,郑文青,迟晓双.基于GPRSIM的道路地下病害体探地雷达正演模拟研究[J].科学技术与工程,2020,20(22): 8898-8903.
MA Yonghui,ZHENG Wenqing,CHI Xiaoshuang.Forward simulation of ground penetration radar based on GPRSIM for the road underground disasters[J].Science Technology and Engineering,2020,20(22): 8898-8903.

[19] 李长生,杜翠,刘杰,等.基于探地雷达的路桥过渡段病害检测识别方法[J].铁道建筑,2022,62(8): 19-22.
LI Changsheng, DU Cui, LIU Jie, et al. Detection and identification method of subgrade-bridge transition section diseases based on ground penetrating radar[J]. Railway Engineering,2022,62(8): 19-22.

[20] 北京市勘察设计研究院有限公司,北京市道路与市政管线地下病害工程技术研究中心.城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准: JGJ/T 437—2018[S].北京: 中国建筑工业出版社,2018.
BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing Municipal Engineering and Technology Research Center of Road and Municipal Pipeline Underground Disea. Standard for comprehensive detection and risk evaluation of underground disasters in urban area: JGJ/T 437—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2018.

[21] 杨培丰.重庆涂山湖片区岩溶塌陷形成机制及危险性评估[D].重庆: 重庆交通大学,2018.
YANG Peifeng.Formation mechanism and risk assessment of Karst collapse in Tushan Lake area, Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2018.

[22] 田岗.高速公路岩溶化边坡施工灾变特征及危险性评价研究[D].北京: 北京交通大学,2019.
TIAN Gang. Study on disaster characteristics and risk assessment of Karst slope construction in express highway [D].Beijing: Beijing Jiaotong University,2019.

[23] 白日华.沥青路面病害检测与养护决策研究[D].长春: 吉林大学,2013.
BAI Rihua. The research on detecting asphalt pavement disease and maintenance decision making[D].Changchun: Jilin University,2013.

[24] YAN J L,CHENG Y,ZHANG A H,et al.The evaluation of highway collapse hazard based on the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Applied Mechanics and Materials,2012,253/254/255: 1593-1597.

[25] 阮永芬,张虔,闫明,等.基于AHP-信息熵权–模糊集的岩溶塌陷风险评价[J].安全与环境学报,2022,22(6):2986-2993.
RUAN Yongfen, ZHANG Qian, YAN Ming, et al. Karst collapse risk assessment based on AHP-EWM-FT[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 2986-2993.