

基于案例推理的公路自然灾害应急保通方案制定研究

王安勳¹, 赵梓皓², 李巍¹, 王言然¹, 孙居锴²

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082; 2. 长安大学, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了探究公路自然灾害应急保通决策方法, 提出了一种基于案例推理(CBR)与组合赋权法的推理模型。通过整合熵权法与专家打分法, 构建了灾害特征指标的综合权重分配机制, 并结合加权欧氏距离算法优化案例相似度匹配精度。以典型滑坡案例为历史库, 以对比滑坡案例为查询目标, 验证模型的有效性。结果显示, 对比滑坡案例与案例库中案例2的相似度最高(总相似度为0.999 0), 推荐采用“抗滑桩+排水系统+坡脚反压”的抢修方案, 与实际工程逻辑高度吻合。与单一赋权方法相比, 组合赋权法兼顾数据客观性与专家经验。研究同时指出, 模型性能受限于案例库的完备性与参数敏感性, 未来需通过数据标准化建设、抗灾能力系数动态优化及多模型交叉验证进一步强化鲁棒性。为滑坡灾害的快速响应与科学决策提供了可推广的理论框架与技术路径。

关键词: 自然灾害; 案例推理; 道路工程; 最小距离原理

中图分类号: U417; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0034-07

Research on Preparation of Emergency Traffic Protection Schemes for Highway Natural Disasters Based on Case-based Reasoning

WANG Anmeng¹, ZHAO Zihao², LI Wei¹, WANG Yanran¹, SUN Jukai²

(1. Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 2. Changan University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To explore the emergency traffic protection decision-making methods for the natural disasters on highways, a reasoning model based on case-based reasoning (CBR) and combined weighting method is proposed. By integrating the entropy weight method and expert scoring method, a comprehensive weight allocation mechanism for disaster characteristic indicators is constructed, and the weighted Euclidean distance algorithm is combined to optimize the accuracy of case similarity matching. Using the typical landslide cases as a historical database and comparing the landslide cases as the query objective, the effectiveness of the model is verified. The results show that the similarity between the landslide case and Case 2 in the case library is the highest (with a total similarity of 0.999 0). It is recommended to adopt the repair scheme of "anti-slide pile+drainage system+slope foot back pressure", which is highly consistent with the actual engineering logic. Compared with a single weighting method, the combined weighting method takes into account both data objectivity and expert experience. The study also points out that the performance of the model is limited by the completeness and parameter sensitivity of the case library. In the future, it is necessary to further strengthen the robustness through data standardization construction, dynamic optimization of disaster resistance coefficient, and cross validation of multiple models, which provides a propagable theoretical framework and technical path for the rapid response and scientific decision-making of landslide disasters.

Keywords: natural disaster; case-based reasoning; road engineering; minimum distance principle

收稿日期: 2025-04-30

基金项目: 北京市市政工程设计研究总院有限公司研发项目“公路基础设施应急抢修关键技术与设计文件编制办法研究”(2024-KYDL-010)

作者简介: 王安勳(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路市政工程设计工作。

通信作者: 赵梓皓(2002—), 男, 硕士, 从事交通运输研究工作。电子信箱: 2024221368@chd.edu.cn

0 引言

公路作为国民经济发展的命脉, 其安全畅通直接关系到社会运行效率与人民生命财产安全。然而, 受复杂地质条件、极端气候频发等因素影响, 滑坡、塌方、泥石流等自然灾害已成为威胁公路交通安全的重大隐患。2024年5月1日, 梅州至大埔高速公

路东延线 K11+900~K11+950 路段发生东方半幅路堤塌方灾害,导致 23 辆车掉落,造成重大人员伤亡和财产损失,该路段交通中断,严重影响了当地的交通运输和经济发展^[1]。2018 年 8 月 11 日,北京市房山区 X209 军红路 k18+350 处发生大规模滑坡,导致交通中断。这些案例表明,自然灾害会直接损毁公路基础设施,造成人员伤亡与巨额经济损失^[2]。据统计,我国每年因公路自然灾害导致的直接经济损失超百亿元。特别是,抢通延误更可能对已受灾地区造成次生灾害与社会连锁反应,为灾区抢救造成极大阻碍。

当前在公路灾害应急领域的研究主要集中于边坡加固、路基修复等单一技术优化,以及应急预案编制、部门协同机制等管理体系构建,从而通过灾害风险评估模型、资源调度算法等支撑决策科学性^[3-5]。然而,现有方法对历史灾害案例的深度价值挖掘存在显著局限:一方面,既有案例库多采用事件描述型数据架构,缺乏对公路灾害参数、处置措施时序链、抢通成效反馈等多维度信息的数据化表征,导致案例知识呈现碎片化特征;另一方面,应急决策多依赖专家经验规则库,未能建立基于历史案例情景匹配的动态推理机制,在面对新型复合灾害时易产生处置方案僵化、资源适配偏差等问题。

由于自然灾害对公路交通的影响剧烈,破坏力不容小觑^[15]。在自然灾害发生时,公路作为连接受灾地区与外界的生命线,其安全畅通对受灾地区的营救和保障极为重要。目前对应急处置案例的研究主要集中于对某种灾害的应急案例处置^[6-8]及依照传统历史案例进行应急响应预测^[9-10]鉴于此,本研究提出融合案例推理(CBR)的公路灾害应急决策框架,通过构建时空特征编码的灾害案例模型,实现历史处置经验的参数化沉淀;设计多级相似度驱动的案例检索机制,结合灾害情景特征动态推荐最优历史处置模式;开发案例修正反馈引擎,最终形成具有自修正能力的公路灾害应急保通决策系统。

案例推理(Case-Based Reasoning, CBR)作为一种基于历史经验类比的问题求解方法论,为突破传统灾害评估范式提供了创新性的认知框架^[7]。其核心机理在于构建结构化案例知识库,通过语义解析与特征提取技术,将历史灾情事件转化为可复用的决策单元。当新灾害场景触发时,系统执行多模态案例检索策略,在多维特征空间中进行相似度匹配,实现解决方案的智能迁移。该过程本质上是将领域

专家的隐性经验转化为显性的决策逻辑,通过"案例特征-解决方案"的映射机制完成知识传承。并且,在解决方案实施后,通过效果反馈机制对预案执行绩效进行量化评估。若新解决方案通过验证,则通过案例保留策略将其纳入知识库,形成“实践-认知-再实践”的螺旋式进化路径。实现了“检索(Retrieve)-重用(Reuse)-修正(Revise)-保留(Retain)”的四阶循环。案例推理流程见图 1。

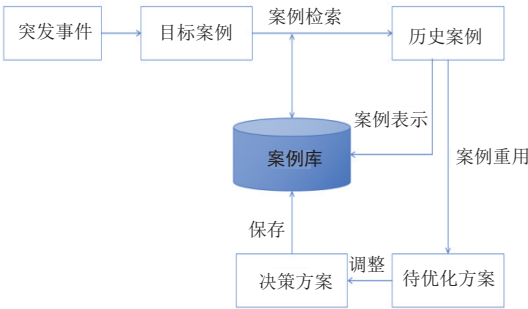


图 1 案例推理流程图

1 案例相关数据来源与指标分析

1.1 公路自然灾害特征收集

在自然灾害应急案例库的进行构建之前,需要对自然灾害的特征属性进行提取。在本次研究中,案例相关数据主要来源于两大方面。一是各大学术期刊中的具体案例,这些期刊涵盖公路工程、交通管理及自然灾害防治等多个领域,所收录的案例经过严格检验,具有较高科学性和可信度。通过查阅筛选,能获取到关于自然灾害对公路交通影响的详细案例描述,包括灾害发生情况、公路设施受损部位与程度、应急处置措施实施过程及效果等信息,为案例相关指标数据提取提供了基础。二是新闻报道,其作为信息传播的重要媒介,为案例数据收集提供了有力补充。虽然新闻报道对灾害的描述在精确性上稍逊于学术期刊,但自然灾害发生后,各大新闻媒体及时报道事件进展,包含一手灾害现场情况、公路通行状况等实时信息,还附有相关图片、视频等直观资料,有助于更全面、深入地了解案例实际背景和具体情况。通过收集整理新闻报道,能获取大量及时、鲜活的案例素材,进一步丰富了案例相关指标数据的来源。

1.2 公路自然灾害指标分析

在案例收集后,需对案例深入分析,提取具有代表性的指标,以精准定位案例中的关键因素^[14]。在应急灾害处置案例中,重点关注的指标主要分为两

个方面:一是自然灾害指标,该指标详尽阐述了公路遭受的自然灾害类别、灾害强度等关键信息;二是应急处置机制,其涉及应急响应措施、工程技术应用等内容。

在构建公路自然灾害应急处理案例库时,针对上述两种情况,需提取一系列关键指标以确保案例的完整性和可用性。自然灾害相关指标包括灾害类型、发生时间、地点、强度及影响范围,用以准确描述灾害特征;公路受损相关指标涵盖公路设施受损类型、受损部位和受损程度,旨在精确评估公路的受损状况;应急处理相关指标则涉及应急响应时间、处置措施、资源投入、处理效果以及后续恢复措施,用于全面分析应急处理过程的效率和效果。这些指标的选取和记录,将为案例库的构建提供系统的数据支持,为后续的应急决策和灾害防治研究奠定坚实基础。表1展示了部分案例指标选取的示例。

表 1 案例指标选取

指标分类	具体指标	选取原因
灾害受损指标	事件类型	在公路自然灾害应急处理中,提取灾害受损指标能帮助精确定位到历史案例,利于快速比对以往案例,选取有效措施。
	影响范围	
	受损特征	
	灾害成因	
应急管理指标	具体位置	在公路自然灾害应急处理中,提取应急管理指标能为应急决策提供案例依据,确定资源投入与调配,优化应急处置方案完善灾害防治体系。
	应急措施	
	工程技术	
	资源利用	
	后续措施	

1.3 案例表征

在收集了公路灾害应急案例后,下一步便是对这些案例进行知识表征^[13]。不同案例所包含的具体信息丰富多样,涵盖了从灾害发生的基本情况到公路设施受损的细节,以及应急处置的措施与效果等众多方面。然而,并非所有信息在后续的案例检索与匹配过程中都具有同等价值。因此,应当精心挑选出其中具有代表性的信息进行存储。这些代表性信息不仅能够准确反映案例的核心特征,还能为后续快速、精准地检索与匹配相似案例提供关键支持。基于这一原则,可以从相关案例中选取了以下案例匹配信息作为案例表征数据,见表2、表3。

通过对应急管理措施相关信息的梳理与统计,可为案例推理提供案例依据,同时为案例推理的决策支持系统构建奠定数据基础。

2 案例库模型构建方法

在构建模型时应先对案例进行知识化表示,从

表 2 灾害案例指标存储

字符代号	具体信息	存储类型	具体说明
fssj	发生时间	数字	以年月日的方式进行存储,例:2000.01.01
fsdd	发生地点	字符	将灾害发生地点依据字符的形式进行存储,如:G32.K1+000-K1+200
sjlb	事件类别	字符	如滑坡,泥石流,崩塌等
gldj	公路等级	数字	用于存储受灾公路的等级
zhdj	灾害等级	数字	按普通公路交通突发事件对自然灾害进行分级
yxfw	影响范围	字符	按灾害所影响的地区范围进行存储
yxcd	影响车道	数字	针对灾害发生后可通行的车道数进行判断
zhey	灾害成因	字符	通过对已发送灾害进行判断,按字符方式存储
lmfcd	路面裂缝长度	数字	按数字进行存储
ldhptj	路堤滑坡体积	字符	计算滑坡整体的体积,当灾害不属于滑坡时取“none”
ljshqk	路肩损坏情况	字符	轻微、中度、重度
lmcgld	路面沉降高度	字符	轻微、中度、重度
bpwdqk	边坡稳定情况	字符	轻微、中度、重度
lmfgcd	路面影响程度	数字	统计路面被水,岩石影响的程度,按影响面积进行统计
jtyxcd	交通影响程度	字符	轻微、中度、重度
lcbttj	路侧崩塌体积	数字	统计路侧崩塌岩土的总体积
ljhyed	路基滑移长度	数字	按据原路基滑移距离进行存储,当路基未发生滑移时时取“none”

表 3 应急处置指标存储

字符代号	具体信息	存储类型	具体说明
jtgz	实行交通管制	字符	统计交通管制策略并记录
lsbd	抢修临时便道	数字	统计临时便道数量
fbsg	全封闭施工	数字	统计全封闭施工时间
gcjs	主要工程技术	字符	统计存储各工程的主要技术手段
shbe	设备	字符	统计各应急处置工程所用的工程机械种类与数量
reyu	人员	数字	无
hash	耗时	数字	无
hscs	后续措施	字符	统计灾害处置后的安全防护措施

而使其形成合理的数据结构。在上节中已经将相关案例指标进行了统计,因此应将每一个案例用前节的数据结构进行二次调整,从而确保案例能够精确应用。针对上一节已构建的案例库,可以设计出面向公路应急保通的动态知识推理模型,旨在实现“案

例匹配-方案生成-效果验证”的闭环决策支持。首先,通过检索与匹配,从案例库中定位与当前灾害最相似的案例,为应急决策提供经验支撑。然后,融合专家知识与历史成功经验,借助模型推理生成涵盖资源调配、抢险步骤、交通管控等多方面的应急保通方案。最后,通过模拟与现场评估相结合的方式,对方案的科学性、有效性及可操作性进行全方位检验,及时调整优化,确保方案实施后能达到预期效果。这一闭环决策支持体系将极大地推动公路应急保通决策向智能化、规范化、科学化方向发展,为自然灾害后公路的快速恢复通行提供有力保障。

由于各特征属性对应急决策的影响程度存在显著差异,这种差异可能源于不同地区、地形不同,公路等级不同等多方面因素,因此在相似案例检索过程中,需根据各属性的实际贡献度进行权重分配,以确保检索结果的精准性和实用性。

熵权法作为一种客观赋权方法,其核心原理源于信息论中的熵概念,用于度量数据的不确定性。在权重计算过程中,熵权法通过分析各评价指标的数据离散程度,即数据间的差异大小,来确定权重。具体而言,指标的离散程度越大,表明该指标在评价过程中提供的信息量越多,其对应的权重也应越大;反之,离散程度小的指标,权重则相应较小。这种方法完全基于数据本身的特性,避免了人为的主观判断和偏好对权重分配的影响,确保了权重的客观性和公正性^[12]。而专家打分法,作为一种经典的主观赋权方法,其原理在于通过专家对同一层次内各因素的相对重要性进行比较打分,构建判断矩阵,进而计算各因素的权重^[11]。这种方法能够充分融入决策者的经验和专业知识,使权重分配更加符合实际问题的特点和需求。然而,由于专家打分过程易受个人主观因素的影响,可能导致权重分配存在一定的主观偏差。

因此,在公路应急决策案例分析中,为了更全面地考虑各影响因素的作用,同时兼顾数据的客观性和专家的主观经验,本文采用熵权法与专家打分法相结合的综合赋权方法。这种方法既能够利用熵权法客观反映数据本身的离散程度,确保权重的客观性和准确性;又能够引入专家的主观经验和知识,使权重分配更加符合实际问题的复杂性和特殊性。通过两者的优势互补。

因此,首先在建立好相关案例库后,应当对这些案例进行统一的权重计算,然后对案例进行数据标

准化,以确保各项指标在一个度量范围内。假设案例库中有 n 个案例, m 个特征(如灾害类型、等级、体积、处置措施数等),构建数据矩阵 $X = [x_{ij}]_{n \times m}$ 。在进行标准化时,需要分别对正向和逆向指标进行处理。其中,指标归一化公式为:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \times (U - L) + L \quad (1)$$

式中: x_{ij}^* 为 i 案例中的 j 指标; x_j 为所有案例中的某一案例的 j 指标; U 为映射区间的上限值,这里取 0.9; L 为映射区间的下限值,这里取 0.1。

标准化后,须运用熵权法计算各指标的客观权重,其中,熵权法计算客观权重公式为:

$$\omega_j^{\text{熵}} = \frac{1 - e_j}{\sum (1 - e_j)} \quad (2)$$

其中,

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum x_{ij}^*} \quad (4)$$

式中: n 为案例中指标的总个数。

在对各组数据进行客观权重计算后,便需要对各不同类型数据进行统计,并在之后案例重用中进行应用。为了更全面地提升公路应急决策的科学性和实用性,研究者们提出了将主观赋权与客观赋权相结合的综合赋权方法,即组合赋权。这种方法旨在通过加权融合主客观权重,充分利用两者的优势,弥补单一赋权方法的不足,从而得到更为合理、准确的权重分配结果。

组合赋权的核心思想在于,根据决策问题的特点和需求,为主观权重和客观权重分别赋予一定的加权系数,然后将两者进行线性组合,得到最终的综合权重。公式如下:

$$\omega_j = \lambda \omega_j^{\text{熵}} + (1 - \lambda) \omega_j^{\text{专}} \quad (5)$$

式中: ω_j 为第 j 个特征的最终组合权重; $\omega_j^{\text{熵}}$ 为通过熵权法计算的客观权重; $\omega_j^{\text{专}}$ 为通过专家打分法计算的主观权重; λ 为平衡系数,控制主客观权重的混合比例。

在出现新案例时,需要与已生成的案例库中的案例进行对比应用。在这里采用加权的欧式距离法进行对比。传统的欧式距离法可以衡量多维空间中两个点之间的直线距离,因此可以应用于案例推理中选取相似案例。但由于传统欧氏距离法要求所有属性权重相等,这肯定会因为一些次要元素影响到

最终选取结果。因此在这里采用了加权的欧式距离法,可以通过权重放大关键属性的影响,减少次要属性干扰。

$$D = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j \times (x_{ij} - x_{kj})^2}$$

(6)

式中: D 为两个案例之间的欧氏距离; ω_j 为 j 特征的最终综合权重; x_{ij} :案例库中第 i 个案例 j 特征的的标准化值; x_{kj} :查询案例 k 的 j 特征的标准化值; m :案例库中的案例数量。

在应用加权的欧氏距离对不同的案例进行计算后,可得出二者之间的距离。由于二者的距离之间是越小越好,而为了计算出不同案例之间的相似度,还需要将相关距离进行指数映射,从而体现出二者相似度的关系,在之后的案例分析中也能更直观的看出相似度最高的案例。具体公式如下:

$$y = 1 - 0.002e^{-k(D_{\max} - D)}$$

(7)

式中: Y 为两个案例之间的相似度; k 为调整参数,用于控制映射的陡峭程度,这里 k 取2。

3 实例应用

3.1 案例库与案例特征计算

本章构建了基于灾害指标数字化模型的案例推理(Case-Based Reasoning, CBR)决策框架,针对我国2013-2022年间多省份公路场景的15个典型滑坡灾害案例展开实证研究。案例库采用结构化存储体系,系统记录了各案例的灾害特征参数、工程处置措施及修复效能等多维属性数据(见表4)。为确保数据可比性,本研究采用两阶段权重处理流程:首先对原始指标进行标准化处理,消除量纲差异;其次采用组合赋权法(客观权重:主观权重=3:7)进行权重优化,其中主观权重依据领域专家评分(见表5)确定,最终形成适用于多准则决策的指标权重体系(见表6)。

表4 灾害指标标准化

案例	区域联系 受阻情况	灾害等级	影响车道	灾害成因	滑坡体积	路肩损坏 情况	边坡稳定 情况	路面影响 程度	交通影响 程度	路基滑移 长度	实行交通 管制
案例 X1	0.900	0.900	0.633	0.367	0.167	0.633	0.633	0.633	0.633	0.633	0.633
案例 X2	0.100	0.367	0.100	0.633	0.748	0.367	0.367	0.100	0.100	0.100	0.100
案例 X3	0.100	1.167	1.167	0.367	1.780	0.633	0.633	0.633	0.633	0.633	0.633
案例 X4	0.367	0.900	1.167	0.633	0.327	0.633	0.633	0.367	0.633	0.367	0.633
案例 X5	0.367	1.167	1.167	0.633	0.175	0.367	0.633	0.633	0.633	0.633	0.633
案例 X6	0.100	1.167	0.633	0.367	0.281	0.633	0.633	0.633	0.633	0.633	0.633
案例 X7	0.100	0.900	0.633	0.367	0.439	0.633	0.633	0.633	0.367	0.633	0.367
案例 X8	0.100	0.367	0.100	0.367	0.593	0.367	0.367	0.100	0.100	0.367	0.100
案例 X9	0.100	0.900	0.633	0.367	0.152	0.633	0.633	0.367	0.367	0.633	0.367
案例 X10	0.633	1.167	0.633	0.367	0.180	0.633	0.367	0.633	0.367	0.633	0.633
案例 X11	0.633	0.633	0.367	0.367	0.169	0.367	0.367	0.100	0.367	0.367	0.367
案例 X12	0.367	0.900	0.633	0.367	0.687	0.367	0.633	0.367	0.367	0.633	0.633
案例 X13	0.367	0.633	0.100	0.367	0.847	0.633	0.633	0.100	0.367	0.633	0.100
案例 X14	0.367	0.633	0.100	0.367	0.151	0.367	0.367	0.367	0.100	0.367	0.100
案例 X15	0.367	0.633	0.367	0.367	0.164	0.367	0.633	0.367	0.100	0.367	0.100

表5 特征权重打分表

专家打分	公路 等级	灾害 等级	影响 车道	灾害 成因	滑坡 体积	路肩损坏情况	边坡稳定情况	路面影 响程度	交通影 响程度	路基滑移长度	实行交 通管制
专家 1	9	9	9	9	8	7	8.5	8.5	8	7	6
专家 2	9.5	8	8	8	7	7.5	7.5	8.5	7	7.5	7
专家 3	9	9.5	8	9	6	7.5	7	8	7.5	7.5	7.5
专家 4	8.5	8	7	8	8	7	7	7	7	7	7.5
绝对权重	9	8.625	8	8.5	7.25	7.25	7.5	8	7.375	7.25	7
相对权重	0.105	0.101	0.093	0.099	0.084	0.084	0.087	0.093	0.086	0.085	0.082

表6 各指标最终权重

灾害指标	计算权重
区域联系受阻情况	0.099 654 464
灾害等级	0.098 894 905
影响车道	0.091 356 234
灾害成因	0.097 772 539
滑坡体积	0.084 011 962
路肩损坏情况	0.087 209 136
边坡稳定情况	0.089 377 764
路面影响程度	0.092 121 705
交通影响程度	0.087 252 364
路基滑移长度	0.087 608 096
实行交通管制	0.084 040 832

3.2 相似度计算与案例选取

本研究选取 2019 年某公路滑坡灾害及其应急处置记录作为目标案例,与案例库中 15 个历史案例进行实证对比分析。基于第二章构建的加权欧式距离算法,对各候选案例与目标案例进行多维特征相似度计算,最终得到如表 7 所示的对比结果。分析表明,案例 11(相似度值 0.999)在各个灾害指标维度上与目标案例具有最高匹配度。

同时,经方案对比同样可以得出,如表 7 所示,目标案例在应对公路滑坡灾害时与案例 11 的应急措施基本相似。因此可以得出本研究的结果具有较高的可信度。

4 结 语

本研究构建了基于历史案例的自然灾害灾情评估模型,提出了完整的实施方案,重点基于案例推理

设计了案例相似度评估模型,并以 2013—2022 年各地公路滑坡灾害应急处置决策为历史数据,以公路受滑坡影响下的各灾害指标为评估目标,选取加权的欧氏距离法进行验证。结果显示,经案例推理得出的公路滑坡灾害应急方法包括了设置钢筋混凝土预应力锚索地梁与轻型支挡结构物,排水设施设置包括了仰斜式排水孔以及放射状立体式疏排集水井。与选取的对比案例极其相似,表明了本方法具有较高的可信度,也验证了方法的可行性与可靠性。

与现有方法相比,基于案例推理的公路自然灾害应急方法对于传统方法而言更加简单实用,案例知识化表示和动态推理模型能够快速完成案例匹配与方案生成并且可直接应用于实际灾害场景。特征属性的组合赋权方法可以有效的避免专家打分法带来的特征属性组合赋权方法带来的不确定性问题。通过耦合专家打分法与客观熵权法的组合赋权策略,本研究实现了对灾害指标权重的双重校验机制:既保留了领域专家对致灾因子作用机理的先验认知,又通过信息熵理论客观量化指标离散程度,使权重分配兼具科学性与实践指导性。但是基于案例推理的灾情评估也存在难点或缺点:(1)首先是该方法存在"历史经验依赖陷阱",当遭遇超规格灾害(如 100 a 一遇的极端气候诱发的滑坡)或新型灾害链(如地震-降雨耦合型滑坡)时,案例库中缺乏相似模板会导致推理失效,模型置信度会呈现指数级下降,需启动人工干预机制。(2)当遇到多维不确定性耦合难题时,灾害链的演化路径呈现非线性特征。传统

表7 相似度计算结果

案例	区域联系受阻情况	灾害等级	影响车道	灾害成因	滑坡体积	路肩损坏情况	边坡稳定情况	路面影响程度	交通影响程度	路基滑移长度	实行交通管制	相对距离	总体相似度
案例 X1	0.316	0.629	0.000	0.000	0.594	0.295	0.000	0.607	0.295	0.592	0.290	3.618	0.993
案例 X2	0.631	0.000	0.605	0.313	0.038	0.000	0.299	0.000	0.295	0.000	0.290	2.470	0.998
案例 X3	0.631	0.943	0.605	0.000	1.159	0.295	0.000	0.607	0.295	0.592	0.290	5.418	0.962
案例 X4	0.316	0.629	0.605	0.313	0.420	0.295	0.000	0.304	0.295	0.296	0.290	3.762	0.992
案例 X5	0.316	0.943	0.605	0.313	0.585	0.000	0.000	0.607	0.295	0.592	0.290	4.546	0.984
案例 X6	0.631	0.943	0.000	0.000	0.470	0.295	0.000	0.607	0.295	0.592	0.290	4.124	0.989
案例 X7	0.631	0.629	0.000	0.000	0.299	0.295	0.000	0.607	0.000	0.592	0.000	3.053	0.996
案例 X8	0.631	0.000	0.605	0.000	0.130	0.000	0.299	0.000	0.295	0.296	0.290	2.547	0.997
案例 X9	0.631	0.629	0.000	0.000	0.610	0.295	0.000	0.304	0.000	0.592	0.000	3.061	0.960
案例 X10	0.000	0.943	0.000	0.000	0.580	0.295	0.299	0.607	0.000	0.592	0.290	3.606	0.993
案例 X11	0.000	0.314	0.302	0.000	0.591	0.000	0.299	0.000	0.000	0.296	0.000	1.803	0.999
案例 X12	0.316	0.629	0.000	0.000	0.029	0.000	0.000	0.304	0.000	0.592	0.290	2.159	0.998
案例 X13	0.316	0.314	0.605	0.000	0.145	0.295	0.000	0.000	0.000	0.592	0.290	2.557	0.997
案例 X14	0.316	0.314	0.605	0.000	0.612	0.000	0.299	0.304	0.295	0.296	0.290	3.330	0.995
案例 X15	0.316	0.314	0.302	0.000	0.597	0.000	0.000	0.304	0.295	0.296	0.290	2.714	0.997

案例推理采用确定性匹配算法,难以处理模糊边界条件下的决策问题。需引入贝叶斯网络或云模型,构建概率性推理框架。(3)由于公路灾害具有显著的地理分异性特征,我国西南山区与东南丘陵地区的滑坡机理存在差异。案例推理模型在跨区域应用时,因未充分考虑岩土类型、植被覆盖等区域特异性参数,导致方案适配度下降。需构建区域修正系数库进行补偿修正。

参考文献:

- [1] 岳中琦. 梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 1-12.
- [2] 赵忠海, 李敏. 北京房山军红路边坡地质灾害特征及成因分析[J]. 城市地质, 2018, 13(4): 32-36.
- [3] 李洁, 张欣宇, 朱全军, 等. 滑坡灾害影响下高速公路网络鲁棒性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 176-186.
- [4] 沈昊文, 何瑜, 杨志全, 等. 金沙江中游沿江高速公路地质灾害差异性分布特征与成因机制[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5313-5323.
- [5] 朱明, 李杰, 赵飞, 等. 2022年Ms6.8级泸定地震公路震害特征分析[J]. 世界地震工程, 2024, 40(2): 197-207.
- [6] 姚鑫, 郭海湘, 顾明赞, 等. 基于案例推理的滑坡灾害应急相似案例智能生成研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(6): 1570-1584.
- [7] 汪季玉, 王金桃. 基于案例推理的应急决策支持系统研究[J]. 管理科学, 2003(6): 46-51.
- [8] 李俊达, 李远富, 王广开. 基于CBR的公路工程造价估算模型[J]. 公路交通科技, 2020, 37(6): 44-49; 67.
- [9] 姚鑫, 郭海湘, 顾明赞, 等. 基于案例推理的滑坡灾害应急相似案例智能生成研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(6): 1570-1584.
- [10] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于历史案例的自然灾害灾情评估方法研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 219-225.
- [11] 王晓彤. 基于AHP及专家打分法的大跨度隧道风险评估[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 233-240.
- [12] 胡田飞, 朱本珍. 基于熵权法和层次分析法的复杂边坡稳定性模糊综合评价方法[J]. 铁道建筑, 2013(12): 69-73.
- [13] 程倩芳. 基于知识推理的公路地质选线方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [14] 齐洪亮, 田伟平, 李家春. 公路崩塌灾害承灾体易损性评价[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(4): 160-166.
- [15] 李家春, 黄丽珍, 田伟平, 等. 公路自然灾害类型划分[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(2): 33-37.
- [10] 姬利娜, 晏永廷, 晏子. 城市道路平面交叉口交通组织优化设计[J]. 交通工程, 2022, 22(1): 60-66.
- [11] 乔俊, 吴君豪. 信号配时结合渠化设计的交叉口组织方案优化[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(10): 108-110.
- [12] 丁振, 闵世杰. 城市道路典型T型交叉口渠化设计研究[J]. 中国高
新科技, 2023(19): 124-126.
- [13] 徐玮迪, 王富, 张晓娜, 等. 基于TPB的实习期驾驶人不安全行为评估研究[J]. 交通工程, 2024, 24(9): 57-62.
- [14] 毛喆, 胡宸, 黄衍. 信控交叉口电动汽车驾驶行为特征分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(6): 173-180.

(上接第19页)