

基于云模型的地震区公路震害风险评估

贾兴利, 许金良

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 采用主成分分析与专家调查相结合的方法进行因子辨识, 筛选出对公路沿线区域地震风险有显著影响的峰值加速度、植被覆盖率、地层岩性和地表坡度作为评价因子. 引入云模型理论, 改进传统层次分析法的不足, 提出了基于云模型-层次分析法的地震区公路震害评估赋权方法. 运用地理信息系统技术平台, 研究了各风险因子的标度分值, 建立了地震区公路震害风险评估模型并进行了实例分析. 结果表明: 实例工程震害风险指数在 1.00~6.96 之间, 其中大部分区域震害风险指数处于 5 以下, 路线起点南及东南为高峰值加速度、硬岩、大边坡坡度区域, 震害风险指数接近 7, 风险评估计算结果与实际相符.

关键词: 道路工程; 地震; 风险评估; 云模型; 主成分分析法; 层次分析法

中图分类号: U412.1⁺3

文献标志码: A

Cloud Model-based Seismic Risk Assessment of Road in Earthquake Region

JIA Xingli, XU Jinliang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The risk factors were discriminated according to its influence on seismic risk of highway based on the principal component analysis and expert surveys. Four factors such as the peak acceleration, vegetation coverage, formation lithology, slope, were selected as evaluation factors for their significant effect. Traditional analytic hierarchy process was improved by resorting to the cloud model, and a weight approach was proposed for seismic risk assessment based on cloud model- analytic hierarchy process. The scale scores of each risk factor was studied by using geographic information systems technology platform. The assessment model of seismic risk was set up, and the method was validated. The results indicate that the seismic risk index of the experiment area is 1.00~6.96. Seismic risk value of most regional is less than 5.00, the maximum value in the south and the southeast

of the starting point with high peak acceleration, hard rock and large slope is close to 7. Risk assessment results agree well with the measured data.

Key words: road engineering; earthquake; risk assessment; cloud model; principal component analysis; analytic hierarchy process

地震发生时随着地壳能量的释放会引起地球表面的强烈振动, 尤其是浅源高烈度地震, 其破坏性巨大, 对地质条件较差的高山峡谷区道路、桥梁等基础设施造成了严重损害. 以 2008 年汶川地震为例, 地震区受损公路总里程达到 31 412 km, 直接经济损失 612 亿^[1], 其中位于岷江沿线峡谷地带的 G213, S302, S303 部分路段受损尤为严重, 极大地影响了震后救灾. 通过震后调查发现, 由于缺乏对路域地震风险的准确评估, 导致公路路线方案不能很好地适应地震区环境, 进而加剧了震时的破坏程度. 因此, 如何提高地震区公路震害风险评估水平, 成为地震区公路建设急需解决的技术难题.

国外对于公路地震风险评估的前期研究集中于确定性风险分析, 但因分析结果与实际情况相差较大, 该方法逐渐被不确定性风险分析所取代. 基于不确定性风险分析理论, Wermer 等^[2], Mualchin^[3] 及 Buekle 等^[4] 针对公路路网及构造物的地震风险评估展开了大量研究, Lupoi 等^[5] 用率统计分析法对混凝土简支梁桥和连续梁桥进行了地震风险评估, Crowley 等^[6] 提出了以历史或者模拟地震情景集为基础的空间大跨度系统的地震损失分析方法. 国内对于公路地震风险评估的研究多集中于桥梁震害风险的评价, 采用的基础震害数据是以唐山地震、通海地震等国内典型地震统计资料, 结合模糊评价或经验统计曲线, 建立地震风险预测模型^[7-8]. 总体来说, 已有国内外研究集中于对现有公路路网、公路构造

物的地震风险评估。公路路网的地震风险评估多是以减少路网抢通时间、降低因公路中断造成的费用损失为目标;现有桥梁等构造物地震风险评估方法主要是从结构物本身强度、材料类型、尺寸大小等方面进行风险因子的选取,研究重点集中于微观层面的风险评价。

本文从考虑公路路线方案选择、通过形式等宏观角度出发,借助地理信息系统(geographic information system, GIS)技术平台,引入云模型理论,提出基于云模型-层次分析法的地震区公路震害风险评估赋权方法,建立地震区公路震害风险评估模型,并以甘肃省陇南某高速公路为例进行验证。

1 风险辨识

通过对汶川地震灾区公路震害调查统计发现,地震区公路成灾模式主要分为两类:一类是由地震能量释放冲击公路造成的工程震害,包括路基路面工程震害、桥隧工程震害、支档工程震害;另一类是由地震引发的地质灾害,包括滑坡、崩塌和泥石流。地质灾害还会再次对公路本身造成破坏,且破坏性更强、破坏范围更大,是公路沿线区域地震风险的主要表现形式。

影响地震区公路震害风险的因素多种多样,本文应用分析分解法对震害风险源进行分类,将路域地震风险划分为地震源风险、地形地震风险、地质地震风险、植被地震风险四类。针对地形地震风险,由于其数据可算易得,可采用主成分分析量化方法进行研究。对于地震源风险、地质地震风险、植被地震风险三类风险,考虑到其数据不全或难以量化,采用专家调查并结合历史经验的定性分析方法进行因子识别。

1.1 地形地震风险因子辨识

从地形角度考虑,主要的成灾因子包括地面高程、地表起伏度、地表坡度、地表粗糙度。本文选取汶川地震汶川-理县 G213 公路沿线区域 20 次典型的地质灾害为样本,利用主成分分析法对地形成灾因子进行辨识。

主成分分析法认为在众多有相关性的因子之间必然存在起支配作用的共同因子,因此设法将原来众多具有一定相关性的指标,重新组合成另一组不相关的指标来代替,并对这组新指标按方差依次递减顺序排列,在数学上的处理就是对高维变量的降维处理技术^[9-10]。主成分分析法采用贡献率来反映所

含众多原始因子的信息量,用累计贡献率反映前若干个主成分总的贡献率。一般认定,若前 k 个主成分累计贡献率达大于 85% 时,就表明这 k 个主成分已基本反映原始指标的全部信息。假定有 m 个样本,每个样本有 n 项指标,构成 $m \times n$ 阶矩阵,为排除量纲的影响,将原始矩阵数据标准化,然后计算 m 个自变量的相关系数矩阵,并求该矩阵的特征值、特征向量、方差贡献率及累计方差贡献率,最终确定主成分。

以研究区域数字线划图为基础数据,采用 GIS 技术平台,对地面高程、地表坡度、地表起伏度、地表粗糙度四个成灾因子进行计算和提取,得到 20 处地质灾害发生点地形指标值,为方便后续计算和说明,分别以 X_1, X_2, X_3, X_4 表示地面高程,地表坡度,地表起伏度和地表粗糙度,如表 1 所示。

表 1 地质灾害处地形指标

Tab.1 Topographic indexes of geological disasters

序号	X_1/m	$X_2/(\text{^\circ})$	X_3/m	X_4
1	2 755.00	41.27	5.03	1.33
2	1 459.70	29.20	3.95	1.15
3	2 248.15	42.42	5.28	1.35
4	2 085.58	19.60	2.08	1.06
5	2 505.15	27.86	3.73	1.13
6	2 267.57	33.09	3.79	1.19
7	3 009.28	20.11	2.45	1.06
8	1 474.34	25.79	2.87	1.11
9	1 463.74	37.99	4.73	1.27
10	1 584.60	43.44	6.04	1.38
11	1 555.51	47.60	7.68	1.48
12	1 889.84	37.66	4.49	1.26
13	1 829.27	33.49	3.24	1.2
14	1 521.73	23.08	2.58	1.09
15	1 697.66	36.07	4.78	1.24
16	1 540.00	14.54	1.58	1.03
17	1 582.27	52.61	8.35	1.65
18	1 596.43	23.36	3.00	1.09
19	2 922.73	34.36	4.85	1.21
20	2 045.89	39.26	5.00	1.29

利用表 1 中数据建立 20×4 阶原始矩阵,在样本数据标准化处理后进行相关性分析,求得特征值、方差贡献率及累计方差贡献率。根据计算结果,第一主成分地面高程的特征值大于 1,方差贡献率达到 73.521%。当第一主成分的方差贡献率 < 85% 时,按照方差贡献率的大小,依次将前几个主成分进行线性综合,使得累计方差贡献率的总和超过 85%。依此标准,本文选取前两个主成分(地面高程和地面坡度)进行线性综合,其累计方差贡献率达到 98.165%,可以认为前两个主成分已反映了原变量的主要信息,地面高程和地面坡度两个主成分基本

上解释了所有的系统方差。

主成分荷载贡献计算结果为:第一主成分中地表坡度、地表起伏度、地表粗糙度所占权重均较大,且大小基本相当;第二主成分中地面高程的系数绝对值最大,其次是地表坡度。考虑到第一主成分解释的系统方差比例最大,且在第一、第二主成分中均以地表坡度为主要权重,因此选取地表坡度作为地形公路震害的表征。

1.2 地震源风险因子辨识

地震通常以幅值、频谱和持续时间三个指标反映释放能量的大小。地震动幅值用来表示地震动强度的大小,具体以加速度峰值表示的最多。地震频谱反映了不同自振周期结构在地震动作用下的响应情况。地震动持续时间是地震动加速度等地震动参数首次与最后一次达到或超过给定值的时间间隔,它的确定在一定程度上取决于峰值加速度的变化。

峰值加速度是地震动过程中地表质点运动的加速度最大绝对值,是地震工程最常使用的一个地震动参数。在我国工程结构抗震相关规范中,也是以区域的基本烈度转换成峰值加速度的方式进行抗震设计,它与灾害发生存在一定关系^[11-12],并且是震后可以快速获取的地震指标,所以本文将峰值加速度作为地震源震害风险的表征。

1.3 地质地震风险因子辨识

地质条件包括地层岩性、地质构造、水文地质等。褶皱、断层等地质构造对地震灾害具有控制作用,但其影响更多地与地震源风险因子相关。现有水文地质图多是以含水岩组及其富水程度、地下水矿化度等作为分类标准,不利于震害分析。地层岩性及其结构特征对于滑坡变形失稳影响显著,它决定了边坡岩体强度、应力分布和变形破坏特征,同时也是边坡震害的物质条件^[13-14]。因此,选取地层岩性作为地质震害风险的表征。

1.4 植被地震风险因子辨识

植被对震害的影响通过土壤抗冲性及土体抗剪强度间接体现,植被条件包括植被类型和植被覆盖率。考虑到不同地域的植被类型差异较大,其与震害的分布规律不具有普遍适用性,因此不选择植被类型作为植被风险因子。植被覆盖率是指植被在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,从 20 世纪 60 年代至今,许多学者研究了植被覆盖率与土壤抗冲性、裸地径流量的相互关系^[15]。研究发现径流量与覆盖度率间基本呈负对数关系,增加植被覆盖率可以有效减少径流量,而一般来说径流量越小,侵蚀

作用越小,水土流失情况越轻。因此,本文选取植被覆盖率作为植被震害风险的表征。

上述分析说明,峰值加速度、植被覆盖率、地层岩性和地表坡度能较好地表征路域潜在震害风险,具有主导标志意义。

2 基于云模型的地震区公路震害风险评估方法

2.1 基于云模型-层次分析(cloud model-analytic hierarchy process, CM-AHP)法的地震区公路震害风险评估赋权方法

地震风险因子对公路震害风险的影响各不相同,为了更真实、准确地反映其对震害风险的影响,需要给各个风险因子赋予权重,表征其对总体风险评价的作用和影响程度,即各个因子在诸因子集合中的相对重要程度。

目前比较常用的权重确定方法有灰色理论法、层次分析法、模糊评价法以及群体决策法等。其中,层次分析法因操作简单、系统简洁而被广泛应用。但其无法解决多人决策冲突时的综合评价问题,构建的判断矩阵不够客观全面,不能准确地反映出决策者的主观偏好关系,而云模型理论采用自然语言来描述定性的概念,并与其给出的数值之间建立不确定性的转化模型。利用云模型对判断矩阵中的两两风险要素的比较标度赋值可以体现随机性,并且云模型的集结算法可以将多人决策的赋值全部带入到计算公式中,方便决策。因此,本文提出了基于云模型改进的层次分析法,该方法克服了依靠主观经验确定因子权重的不足,具体步骤如下:

(1) 基于云模型标度的判断矩阵

假设存在论域 $U = \{x\}$, $x = 1, 2, 3, \dots, 9$, 使用期望 E_x 、熵 E_n 以及超熵 H_e 三个数值来表现,简记为 $A = (E_x, E_n, H_e)$ 。利用九朵云模型来建立重要性决策标度: A_0, A_1, \dots, A_8 , 期望 $E_{x_0}, E_{x_1}, \dots, E_{x_8}$ 分别等于 1~9 这九个整数,数值越大表示前者比后者更重要。重要性标度云模型的数字特征表现如表 2 所示。

采用黄金分割法计算九朵云模型 A_0, A_1, \dots, A_8 的熵 $E_{n_0}, E_{n_1}, \dots, E_{n_8}$ 和超熵 $H_{e_0}, H_{e_1}, \dots, H_{e_8}$ 。结果如下:

$$\begin{aligned} E_{n_0} &= E_{n_2} = E_{n_4} = E_{n_6} = E_{n_8} = \\ &0.382\alpha(x_{\max} - x_{\min})/6 = 0.437 \\ E_{n_1} &= E_{n_3} = E_{n_5} = E_{n_7} = E_{n_9}/0.618 = 0.707 \\ H_{e_0} &= H_{e_2} = H_{e_4} = H_{e_6} = H_{e_8} = \end{aligned}$$

$$0.382\alpha(x_{\max} - x_{\min})/36 = 0.073$$

$$H_{e_1} = H_{e_3} = H_{e_5} = H_{e_7} = H_{e_9}/0.618 = 0.118$$

式中: $x_{\max} = 9$; $x_{\min} = 1$; α 为调节系数,一般取为 0.858.

表2 重要性标度

Tab.2 Scale of importance

重要性标度	定义
$A_0 = (E_{x_0}, E_{n_0}, H_{e_0}), E_{x_0} = 1$	u_i 和 u_j 相比同等重要
$A_2 = (E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2}), E_{x_2} = 3$	u_i 和 u_j 相比略重要
$A_4 = (E_{x_4}, E_{n_4}, H_{e_4}), E_{x_4} = 5$	u_i 和 u_j 相比重要
$A_6 = (E_{x_6}, E_{n_6}, H_{e_6}), E_{x_6} = 7$	u_i 和 u_j 相比很重要
$A_8 = (E_{x_8}, E_{n_8}, H_{e_8}), E_{x_8} = 9$	u_i 和 u_j 相比极其重要
$E_{x_1} = 2, E_{x_3} = 4, E_{x_5} = 6, E_{x_7} = 8$	重要程度介于上述中间

注: u_i 和 u_j 是重要性元素.

得到九朵判断云模型 $(1, 0.437, 0.073), (2, 0.707, 0.118), (3, 0.437, 0.073), (4, 0.707, 0.118), (5, 0.437, 0.073), (6, 0.707, 0.118), (7, 0.437, 0.073), (8, 0.707, 0.118), (9, 0.437, 0.073)$ 后,进行两两重要性比较.

利用浮动云的偏好集结进行两两重要性判断,方法如下:设在论域 U 中有两朵相邻的基云 A_1 和 A_2 ,可以生成在它们之间浮动的一朵浮动云 A ,它表达了由两朵基云表示的定性概念中的空白语言值,当浮动云从第一朵云向第二朵云移动时,它受第一朵云的影响在逐渐减少,受第二朵云的影响在逐渐增大.

$$E_x = \beta_1 E_{x_1} + \beta_2 E_{x_2} \quad (1)$$

$$E_n = \frac{E_{n_1}(E_{x_2} - E_x) + E_{n_2}(E_x - E_{x_1})}{E_{x_2} - E_{x_1}} \quad (2)$$

$$H_e = \frac{H_{e_1}(E_{x_2} - E_x) + H_{e_2}(E_x - E_{x_1})}{E_{x_2} - E_{x_1}} \quad (3)$$

式中: β 是可调节的系数,其大小是由专家根据具体情况确定.令 $\beta_1 = k_1/(k_1 + k_2)$, $\beta_2 = k_2/(k_1 + k_2)$,其中 k_i 表示第 i 个云模型集结的次数 ($i = 1, 2$),有 $\beta_1 + \beta_2 = 1$;若专家认为不需要干预集结活动时,令 $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$.

(2) 基于标度判断矩阵的云模型-层次分析法

根据前述决策方法,首先建立某层指标相对于上一层某具体指标的云模型下两两重要性比较的判断矩阵,形式如下:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

上式中对角线上元素的熵及超熵为零,即 $A_{ii} = (1, 0, 0)$. 指标两两相比时,若后者更为重要,则倒数标度的

重要性 $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, 利用式(5)进行计算. 若 $a_{ij} = A_{ij}$, 则

$$a_{ji} = A_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} = \frac{1}{A_{ij}} = \left(\frac{1}{E_x}, \frac{E_n}{(E_x)^2}, \frac{H_e}{(E_x)^2} \right) \quad (5)$$

使用方根法计算要素的期望、模糊性和随机性的相对权重 $W_i^{(0)}(E_{x_i}^{(0)}, E_{n_i}^{(0)}, H_{e_i}^{(0)})$.

为此引入云计算中的乘法运算:若论域中有 n 朵云, A_1, \dots, A_n , 其乘法运算的结果为 $A = (E_x, E_n, H_e)$, 其中

$$E_x = E_{x_1} E_{x_2} \cdots E_{x_n} \quad (6)$$

$$E_n = |E_{x_1} E_{x_2} \cdots E_{x_n}| \cdot$$

$$\sqrt{\left(\frac{E_{n_1}}{E_{x_1}}\right)^2 + \left(\frac{E_{n_2}}{E_{x_2}}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{E_{n_n}}{E_{x_n}}\right)^2} \quad (7)$$

$$H_e = |E_{x_1} E_{x_2} \cdots E_{x_n}| \cdot$$

$$\sqrt{\left(\frac{H_{e_1}}{E_{x_1}}\right)^2 + \left(\frac{H_{e_2}}{E_{x_2}}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{H_{e_n}}{E_{x_n}}\right)^2} \quad (8)$$

于是得到 $W_i^{(0)}(E_{x_i}^{(0)}, E_{n_i}^{(0)}, H_{e_i}^{(0)})$ 中各元素结果如下:

$$E_{x_i}^{(0)} = \frac{E_{x_i}}{\sum E_{x_i}} = \frac{\left(\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (9)$$

$$E_{n_i}^{(0)} = \frac{E_{n_i}}{\sum E_{n_i}} = \frac{\left[\left(\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{E_{n_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left[\left(\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{E_{n_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (10)$$

$$H_{e_i}^{(0)} = \frac{H_{e_i}}{\sum H_{e_i}} = \frac{\left[\left(\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{H_{e_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left[\left(\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{H_{e_{ij}}}{E_{x_{ij}}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (11)$$

利用一致性指标 C 和 R 进行期望的一致性检验. $C = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, 其中 $\lambda_{\max} \approx$

$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sum_{j=1}^n E_{x_{ij}} W_{ij}}{W_{1j}} \right]$, R 是同价随机判断矩阵一致性指标的平均值. 计算一致性比例 I , 要求满足 $I = C/R < 0.1$.

2.2 基于 CM-AHP 法在地震区公路震害风险评估中的应用

按照 CM-AHP 法要求,首先进行专家咨询. 本

文共咨询了五位专家对相关指标进行排序打分,包括防震减灾部门两位(分别从事活断层及地震灾害调查、震后次生灾害危险性评估研究),公路设计部门两位(分别从事公路路线总体、路基边坡与支挡结构设计研究),公路管理部门一位(从事山区高速公路建设管理研究).专家一认为四个风险因子的相对重要度关系为峰值加速度(u_1)>地表坡度(u_3)>地层岩性(u_4)>植被覆盖率(u_2),风险因子比较矩阵

为 P_1 ;专家二认为四个风险因子的相对重要度关系为 $u_1 > u_3 = u_4 > u_2$,风险因子比较矩阵为 P_2 ;专家三认为四个风险因子的相对重要度关系为 $u_1 > u_3 > u_4 > u_2$,风险因子比较矩阵为 P_3 ;专家四认为四个风险因子的相对重要度关系为 $u_1 > u_4 > u_3 > u_2$,风险因子比较矩阵为 P_4 ;专家五认为四个风险因子的相对重要度关系为 $u_1 > u_3 > u_4 > u_2$,风险因子比较矩阵为 P_5 .具体如表3所示.

表3 风险因子比较矩阵

Tab.3 Comparison matrix of risk factors

	P_1				P_2				P_3				P_4				P_5			
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_1	u_2	u_3	u_4	u_1	u_2	u_3	u_4	u_1	u_2	u_3	u_4	u_1	u_2	u_3	u_4
u_1	1	7	3	4	1	5	4	4	1	7	3	5	1	7	4	3	1	6	5	4
u_2	1/7	1	1/5	1/4	1/5	1	1/4	1/4	1/7	1	1/5	1/4	1/7	1	1/4	1/5	1/6	1	1/3	1/4
u_3	1/3	5	1	2	1/4	4	1	1	1/3	5	1	3	1/4	4	1	1/2	1/5	3	1	1/2
u_4	1/4	4	1/2	1	1/4	4	1	1	1/5	4	1/3	1	1/3	5	2	1	1/4	4	2	1

五位专家对两要素 u_1 和 u_2 之间的重要性给出的基于云模型的语言判断标度 A 分别为: $A_1 = (7, 0.707, 0.118)$, $A_2 = (5, 0.707, 0.118)$, $A_3 = (7, 0.707, 0.118)$, $A_4 = (7, 0.707, 0.118)$, $A_5 = (6,$

$0.437, 0.073)$,经过集结以后可以得到 u_1 和 u_2 重要性判断云模型表示为 $(6.4, 0.244, 0.041)$.同理,按照上面类似的方法可以求得其他风险因子重要性判断的云模型,得到的判断矩阵如表4所示.

表4 判断矩阵 A_{ij} Tab.4 Judgment matrix A_{ij}

i	j			
	1	2	3	4
1	(1,0,0)	(6.4,0.244,0.041)	(3.8,0.275,0.046)	(4,0.300,0.050)
2	(1/6.4,0.006,0.001)	(1,0,0)	(1/4.2,0.015,0.002)	(1/4.2,0.018,0.003)
3	(1/3.8,0.019,0.003)	(4.2,0.270,0.045)	(1,0,0)	(1.4,0.238,0.040)
4	(1/4,0.019,0.003)	(4.2,0.321,0.054)	(1/1.4,0.121,0.020)	(1,0,0)

利用式(9)~(11)可计算得

$$E_{x_1} = (1 \times 6.4 \times 3.8 \times 4)^{\frac{1}{4}} = 3.140$$

同理, $E_{x_2} = 0.306$, $E_{x_3} = 1.115$, $E_{x_4} = 0.930$.

$$E_{x_1}^{(0)} = 3.140 / (3.140 +$$

$$0.306 + 1.115 + 0.930) = 0.572$$

同理, $E_{x_2}^{(0)} = 0.056$, $E_{x_3}^{(0)} = 0.203$, $E_{x_4}^{(0)} = 0.169$.

$$E_{n_1} = \{(1 \times 6.4 \times 3.8 \times 4)[(0/1)^2 + (0.244/6.4)^2 + (0.275/3.8)^2 + (0.3/4)^2]^{1/2}\}^{1/4} = 1.183$$

同理, $E_{n_2} = 0.175$, $E_{n_3} = 0.741$, $E_{n_4} = 0.623$.

$$E_{n_1}^{(0)} = 1.183 / (1.183 + 0.175 + 0.741 + 0.623) = 0.541$$

同理, $E_{n_2}^{(0)} = 0.052$, $E_{n_3}^{(0)} = 0.221$, $E_{n_4}^{(0)} = 0.186$.

$$H_{e_1} = \{(1 \times 6.4 \times 3.8 \times 4)[(0/1)^2 + (0.041/6.4)^2 + (0.046/3.8)^2 + (0.05/4)^2]^{1/2}\}^{1/4} = 1.159$$

同理, $H_{e_2} = 0.110$, $H_{e_3} = 0.474$, $H_{e_4} = 0.397$.

$$H_{e_1}^{(0)} = 1.159 / (1.159 + 0.110 +$$

$$0.474 + 0.397) = 0.542$$

同理, $H_{e_2}^{(0)} = 0.051$, $H_{e_3}^{(0)} = 0.221$, $H_{e_4}^{(0)} = 0.186$.最终得到相对权重,如表5所示.

表5 重要度计算

Tab.5 Calculation of importance

W_i	$W_i^{(0)}$
(3.140, 1.183, 1.159)	(0.572, 0.541, 0.542)
(0.306, 0.175, 0.110)	(0.056, 0.052, 0.051)
(1.115, 0.741, 0.474)	(0.203, 0.221, 0.221)
(0.930, 0.623, 0.397)	(0.169, 0.186, 0.186)

$$\begin{bmatrix} 1 & 6.4 & 3.8 & 4 \\ 1/6.4 & 1 & 1/4.2 & 1/4.2 \\ 1/3.8 & 4.2 & 1 & 1.4 \\ 1/4 & 4.2 & 1/1.4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3.140 \\ 0.306 \\ 1.115 \\ 0.930 \end{bmatrix} = [13.055 \quad 1.284 \quad 4.528 \quad 3.797]$$

$$\lambda_{\max} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_{x_{ij}} W_{i1}}{W_{1j}} = (13.055/3.140 +$$

$$1.284/0.306 + 4.528/1.115 + 3.797/0.930)/4 = 4.124$$

$$C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.124 - 4}{4 - 1} = 0.041$$

$$I = \frac{C}{R} = \frac{0.041}{0.89} = 0.046 < 0.1$$

上式中 n 代表计算要素个数,本文中为 4。经一致性检验,判断矩阵满足一致性。因此,峰值加速度、地表坡度、地层岩性、植被覆盖率的权重向量 $\omega = (0.572, 0.056, 0.203, 0.169)^T$ 。

2.3 路域地震风险评估模型的构建

(1) 风险因子标度分值

各风险因子有不同的性质,不同的量纲。若进行综合风险评估,需要对它们进行标度分值,建立统一量纲。通过总结已有相关研究并结合专家咨询,将各风险因子分为高风险、中风险、低风险三个等级,每个等级分别赋值 9, 5, 1, 各因子分级标准如表 6 所示。通过上述处理可以实现风险因子在统一量纲下的计算分析。

表 6 风险因子分级标准表

Tab.6 Scale scores of risk factors

风险因子	风险等级及分级标准		
	低	中	高
峰值加速度/ g	≤ 0.15	$0.15 \sim 0.30$	> 0.30
植被覆盖率/%	> 70	$> 50 \sim 70$	≤ 50
地层岩性	土	软岩	硬岩
地表坡度/($^\circ$)	≤ 20 或 > 60	$> 20 \sim 40$	$> 40 \sim 60$

(2) 综合风险评估模型的建立

在完成对单风险因子的分级量化以及风险因子权重的确定之后,建立综合风险评估模型,如式(12)所示。

$$Q = \sum_{i=1}^n \omega_i S_i = 0.572S_1 + 0.056S_2 + 0.203S_3 + 0.169S_4 \quad (12)$$

式中: Q 为综合地震风险指数, S_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为各风险因子标度值, ω_i 为各因子权重。综合风险指标值越大,相应地震区公路震害风险越高。

3 实例分析

选取甘肃省陇南某高速公路为研究对象,进行公路震害风险评估的实例分析。该高速公路全线采用双向四车道高速公路标准建设,设计时速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,路基宽 24.5 m ,路线全长为 130.4 km 。沿线跨越了不同的地质构造单元和地貌单元,山高谷

深、沟壑纵横,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害分布广泛,是我国四大滑坡、泥石流集中高发区之一。同时处于青藏高原北部地震区的南北地震带内,位于汶川地震的Ⅷ度区,属典型的高烈度地震峡谷区。根据前述风险因子及分级标准,采用 GIS 技术平台,对基础资料进行空间分析和遥感解译,得到该高速公路区域峰值加速度、植被覆盖率、地层岩性和地表坡度分布情况,如图 1 所示。

在完成对单风险因子的量化之后,依据加权图层叠加原理,按照综合风险指标计算模型,计算该高速公路震害综合风险指数 Q 。综合风险指标值越大,相应震害风险越高。综合风险指标空间分布情况如图 2 所示。

计算结果表明:该高速公路沿线震害风险指数在 $1.00 \sim 6.96$ 之间,其中大部分区域风险指数处于 5 以下,路线起点南及东南为高峰值加速度、硬岩、大边坡坡度区域,风险指数接近 7,属于高地震风险区;传统峡谷地区选择的沿溪线区域风险指数较高,相同峰值加速度情况下,因峡谷地区两岸岩性条件较差,震害综合风险指数相对其他区域更高;通过汶川地震震后实地调查验证,该高速公路沿线地震破坏严重程度与风险评估计算结果基本一致,仅部分高风险指数地区因存在工程防护措施未出现严重灾害,其他无工程防护地质灾害发育地区均在高风险指数区域内。

4 结论

(1) 以地震动峰值加速度、植被覆盖率、地层岩性和地表坡度作为震害风险评价因子,提出云模型-层次分析法的公路震害风险评估赋权方法,建立了公路震害风险评估模型,表征了公路沿线区域潜在的地震风险状态。

(2) 引进云模型理论,改进传统层次分析法的不足,利用云模型的集结算法可以将多人决策的赋值全部带入到计算公式中,克服了依靠主观经验确定因子权重的不足,提高了公路震害风险评估的客观性和可靠性。

(3) 运用基于云模型的公路震害风险评估方法,可以准确地评估公路沿线区域的地震风险,实现了地震风险的量化转换,为公路路线方案选择、构造物布置、路线通过形式等建设方案的决策提供了数据支撑。

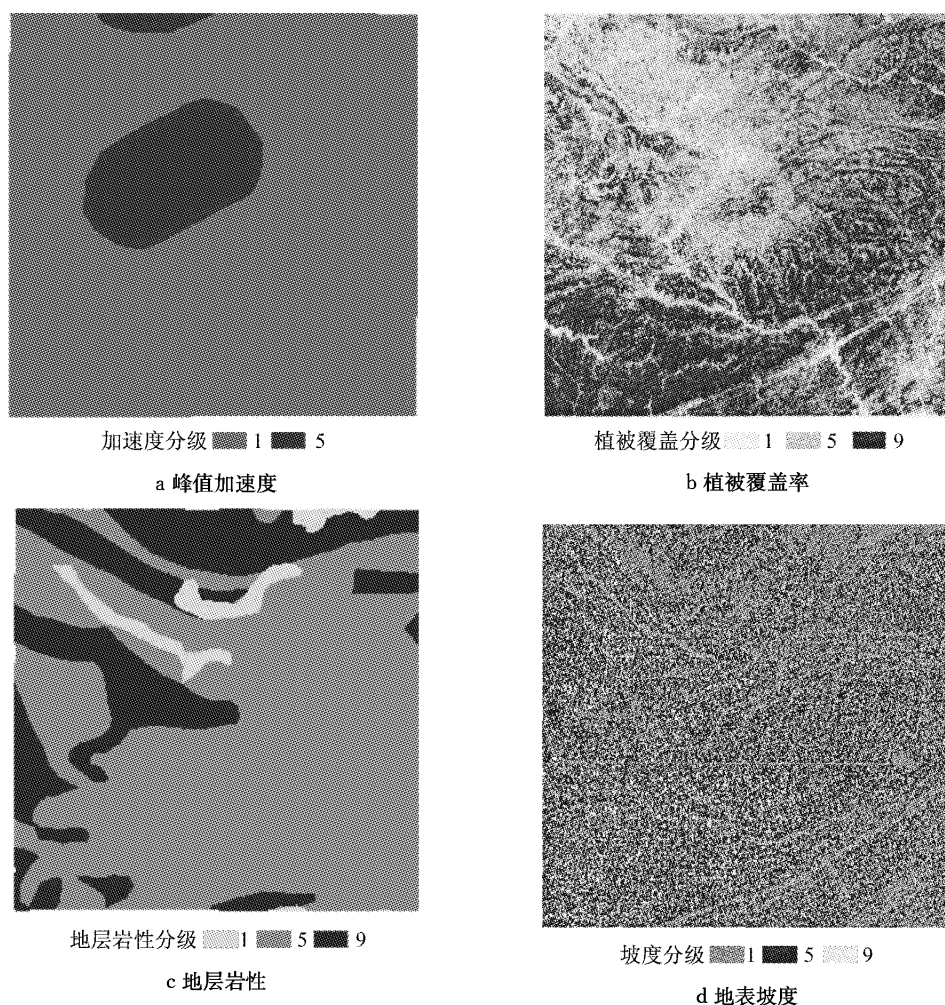


图 1 风险单因子计算

Fig.1 Calculation of risk factors

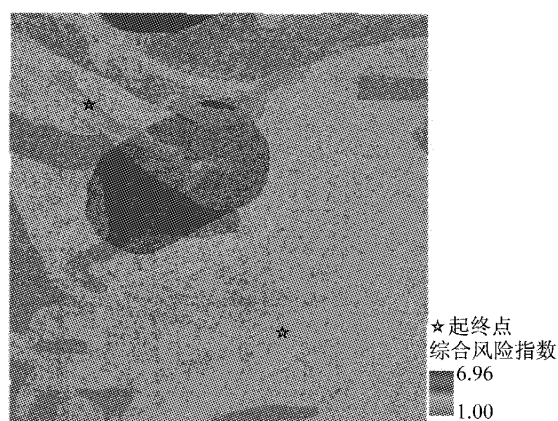


图 2 综合风险指标

Fig.2 Composite risk indicators

参考文献:

- [1] 贾兴利. 高烈度地震峡谷区公路选线理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
JIA Xingli. Study on theory and method of highway alignment selection in high seismic intensity canyon region[D]. Xi'an, Chang'an University, 2013.
- [2] Werner S D, Taylor E C, Cho S B. New developments in seismic risk analysis of highway systems[C]//the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: University of Southern California, 2004: 2189-2194.
- [3] Mualchin L. Seismic hazard analysis for critical infrastructures in California[J]. Engineering Geology, 2005, 79(3): 177.
- [4] Buekle G G I, KIM S H. A vulnerability assessment modal for highway bridges [C]//The 4th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering. New York: ASCE, 1995: 493-500.
- [5] Lupoi A, Franchin P, Schotanus M. Seismic risk evaluation of RC bridge structure [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(8): 1275.
- [6] Crowley H, Bommer J. Modeling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2006(4): 249.
- [7] 冯清海, 袁万城. 基于 IDA-MC 的桥梁地震风险概率评估方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 60.
FENG Qinghai, YUAN Wancheng. Method and application of seismic risk probability analysis for large-long span bridge based on IDA-MC[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 60.

(下转第 1458 页)