赵欢，田伟平，齐洪亮，等. 陕西公路边坡灾害危险性分区研究[J]. 灾害学，2016，31(4)：75－81. [ZHAO Huan，TIAN Weiping，QI Hongliang，et al. Research on the Risk Regionalization of Highway Slope Disasters in Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology，2016，31(4)：75－81. doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2016.04.014.]

陕西公路边坡灾害危险性分区研究*

赵 欢[1]，田伟平[1]，齐洪亮[1]，王福恒[2]

（1. 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；
2. 交通运输部交通专业人员资格评价中心，北京 100101）

摘 要：针对陕西公路边坡灾害频发且存在区域分异的状况，对陕西公路边坡灾害进行了危险性分区研究。结合公路边坡地质与水毁灾害类型特点，分析了致灾因素，选取了危险性评价指标体系；采用云模型－AHP 法和因素叠加法，计算了评价指标权重并构建了危险性评价数值计算模型；基于 ArcGIS10.0 软件计算生成了《陕西公路边坡灾害危险度图》，灾害危险度范围[1.4，8.375]，并以危险度为指标，划分了极高[7，8.375]、高[6，7)、中[4.5，6)、低[3，4.5)、轻微[1.4，3)5 种危险等级 15 个灾害区，其中：极高危险区为大巴山北坡地区，途径国道有 G108、G210、G316，分区结果与公路边坡灾害实际相符。

关键词：陕西；公路边坡；灾害；危险性评价；云模型；ArcGIS10.0；危险性分区

中图分类号：U416.02；X43　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2016)04－0075－07

doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2016.04.014

随着陕西省公路里程数的逐年增加，由于陕西黄土高原、关中平原、秦巴山区 3 种独特的自然环境条件，导致公路灾害频发，尤以公路边坡灾害问题突出，严重影响陕西省国道、省道干线公路的建设和运营，公路边坡灾害防治与管理工作势在必行[1－2]。鉴于陕西自然地貌条件的地带性差异显著，导致公路边坡灾害有一定的区域分异，即灾害类型，发生概率、频次，灾害规模等特征区域差异明显，这将增加公路边坡灾害的防治与管理的难度。

陕西公路边坡灾害危险性分区是研究灾害危险性的空间分异，在致灾危险性评价的基础上，结合公路工程特点，以危险度为指标，将全省划分为不同危险等级的灾害区，为陕西国、省干线公路边坡灾害的防治、管理及路网规划提供宏观层面的参考[3]。

近年来，众多学者对陕西公路边坡灾害进行了一定的研究，于德海等分析了陕南秦巴山区公路斜坡地质灾害的发育分布特点，分析了致灾机理[4]。陈雷通过对陕西公路崩塌、滑坡泥石流灾害的孕灾环境和致灾因素的分析，并基于专家调查法进行了指标赋权，建立了危险性评价模型[5]。孟庆华等针对陕西凤县区域地质灾害，分析了灾害发育规律，利用信息量模型法，对区域灾害易发性进行了评价[6]。何淑军在宝鸡渭滨区地质灾害调查和数据总结整理的基础上，利用定性和信息量法，进行了地质灾害风险性区划[7]。李永红以小流域为单元，借助 GIS 平台，对陕西全省山洪灾害划分了高、中、低 3 个易发等级，共计 18 个区域[8]。王雁林等在对汶川地震陕西勉县、略阳、宁强等震后地质灾害灾区危险性评价和易损性评价基础上，完成了宁、勉、略区域风险区划[9]。通过分析发现，对陕西公路边坡灾害研究较多，但存在以下不足：已有陕西边坡灾害危险性方面的研究多是以自然环境角度，很少从公路工程角度出发进行公路边坡灾害危险性评价研究。已有陕西公路边坡灾害危险性区划方面研究多是对公路边坡地质灾害或公路边坡水毁灾害单方面的区划，很少结合全省边坡灾害类型，考虑进行公路边坡地质和边坡水毁灾害的两方面综合危险性区划。对于危险性评价指标权重的确定，多采用专家调查法、层次分析法、信息模型法、熵权法等主、客观赋权法，这些赋权方法已得到广泛应用，但在一定程度上，不能很好避免主、客观因素的

* 收稿日期：2016－03－08　　修回日期：2016－05－06
基金项目：西部交通建设科技项目(200631800007)；中交股份科技研发项目(2011-ZJKJ-04)；中央高校基本科研业务费资助项目(自然科学类)(310821161014)
第一作者简介：赵欢(1985－)，男，汉族，河南三门峡人，博士研究生，主要从事公路自然灾害防治方面的研究.
E-mail：zh15639851035@126.com

影响，进而导致指标权值不能充分体现评价指标对致灾危险性的作用程度。

本文在调查总结陕西公路边坡灾害特点的基础上，结合边坡地质和水毁等公路边坡灾害类型，分析了致灾因素，选取了危险性评价指标体系。根据因素叠加原理建立了评价模型，基于云模型的 AHP 法，计算了评价指标权重。依托 ArcGIS10.0 平台，计算生成了《陕西公路边坡灾害危险度图》、以危险度为指标，划分了 5 个危险等级，共计 15 个灾害区，为陕西公路边坡灾害的宏观层面防治和管理提供参考。

1 陕西公路边坡灾害特征

1.1 自然环境概况

陕西省位于我国西北地区的东部，地域南北向狭长、东西向窄小，由北向南依次为陕北鄂尔多斯地台、关中渭河地堑、陕南秦岭褶皱带 3 个大地构造单元，即有陕北黄土高原区、关中平原区、陕南秦巴山区 3 个主要区域，总体地势中间低、南北高，气候、水文条件、地层岩性等复杂多样，区域间自然环境差异明显[10]，见表 1。

1.2 公路边坡灾害类型

由于区域间自然环境条件的差异，导致公路边坡灾害的类型有明显的区域分异，结合西部交通建设科技项目“路基灾害防治技术推广及应用示范”的陕西省干线公路实地调查研究，公路边坡灾害类型主要为边坡地质和边坡水毁灾害，具体划分为：

(1)陕北黄土高原区。由于该区沟壑遍布，边坡坡面植被稀少，加之黄土的湿陷、渗透、崩解等水理特性[10]，公路边坡灾害的主要类型有：坡面侵蚀、泥流、崩塌、滑坡、坍塌以及路基沉陷和沿河路基水毁造成的公路下边坡失稳、破坏。

(2)关中平原区。该区地势平坦，农业作物面积广，地表多分布马兰黄土(Q_3)，多发生路基沉陷和洪水淹没造成的路堤边坡破坏。

(3)陕南秦巴山区。该区自然环境复杂，山高谷深，水系发育，边坡陡峻，岩体构造节理、卸荷裂隙较发育，岩石风化程度高、强度低，地下水含量丰富，公路边坡灾害的主要类型有：崩塌、滑坡(塌)、泥石流、路基沉陷和沿河公路水毁造成的边坡失稳破坏[11]。

2 陕西公路边坡灾害危险度分区方法

公路边坡灾害危险性评价是通过对致灾因素的分析，选取评价指标，并赋以致灾影响程度的定量(性)数值，建立评价数值模型，进而计算危险度[12-13]。陕西公路边坡灾害危险度分区是在灾害危险性评价的基础上，以灾害危险性评价结果-危险度为分区指标，反映出发生公路边坡灾害的区域危险程度。为了更直观、有效体现危险度分区，借助 GIS 软件，结合评价计算模型，生成《陕西公路边坡灾害危险度分区图》，见图 1。

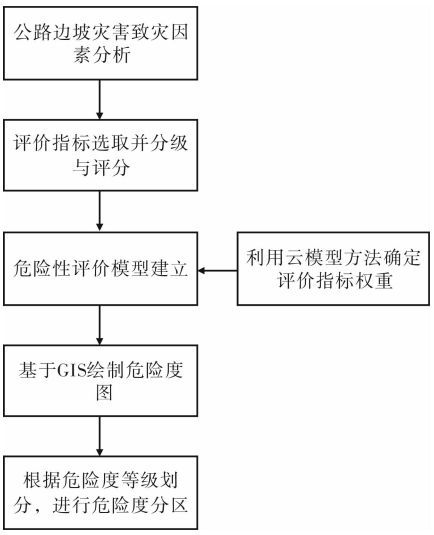


图 1 陕西公路边坡灾害危险度分区流程图

表 1 陕西主要区域自然环境概况[10]

区域	陕北黄土高原区	关中平原区	陕南秦巴山区
地形、地貌	塬、梁、峁、沟谷侵蚀地貌，平均海拔 1000～1500 m	地势平坦，以黄土台塬与河流阶地的地貌为主	相对高差大，地貌以山地为主，间有盆地分布
地质特征	黄土、砂岩、页岩等，风化程度中等	黄土、砂岩、砂砾岩等，强度低，风化严重	千枚岩、板岩、片岩等，地质构造作用显著，风化程度高，岩体节理裂隙发育，地下水丰富
气象水文	年均降雨量在 200～650 mm，集中在 5－9 月	年均降雨量 600～800 mm，夏季多雨	年均降水量 800～1200 mm，集中在 7－9 月
植被条件	植被覆盖度低，地表多裸露	多被农作物覆盖	植被繁茂
河流水文	黄河、洛河、延河等支流水系	渭河等水系	渭河、汉江、嘉陵江、南洛河等水系

3　陕西公路边坡灾害危险性评价

3.1　致灾因素分析

公路边坡灾害是多种相互关联因素综合作用的结果[13]，结合灾害类型特点，选取地形地貌、地质条件、降雨、地震、河网与植被条件、人类不合理的工程活动等因素进行分析。

3.1.1　地形地貌[14]

地形地貌为边坡灾害的发生提供了空间位能条件，陕北地区沟壑纵横、地表破碎严重，陕南山区山高谷深、斜坡陡峻，为公路边坡崩塌、滑坡类、泥石流类灾害提供了岩土体运动方向上的位能，即增加了岩土体在运动方向上的重力分力。同时，在地表破碎严重、相对高差大的情形下，有助于加速地表径流的形成，可造成一定的边坡水毁灾害。

3.1.2　地质条件

地质条件是影响边坡稳定的重要因素，体现在岩体结构、地质构造、岩土类型等，为边坡变形破坏提供了物质、力学基础。地质构造作用一定程度上形成了边坡岩土体的结构，地质构造作用程度高，岩体构造面、节理面等发育，其结构面和组合型式将影响边坡岩土体力学稳定程度，此外，地下水的赋存分布也受到地质构造作用的影响。岩土类型主要与岩土的物理力学工程特性相关，决定了岩土的力学强度，影响边坡的稳定性。

3.1.3　降雨

水是边坡灾害的主要诱发因素，可使边坡岩土体含水量增大、抗剪强度降低，在水压力作用下，可加速岩体节理裂隙的发展贯通[15]；汛期时，降雨量大，可造成河流水位升高、地表径流快速形成，冲刷坡面、坡脚，导致沿河路基边坡水毁、黄土坡面冲刷与路基沉陷等灾害；总而言之，降雨量大的地区，边坡灾害多发，鉴于陕西降雨量空间分布从北至南逐渐增加，陕北地区降雨量≥50 mm 年均暴雨日数较少，公路边坡灾害发生强度高，为此选择降雨量≥25 mm 年均日数，作为表征降雨致灾影响程度的指标。

3.1.4　地震

陕西地震动峰值加速度在 0 ~ 0.2 g 范围之内，地震作用可使边坡岩土体结构受到扰动，应力状态发生改变，加速岩体结构松动、裂隙和软弱结构面的发展贯通等，造成边坡崩塌、滑坡、泥石流等地震次生灾害[15]。

3.1.5　河网与植被条件

河网密度大的地区，多有沿河路基，处于汛期，发生公路边坡水毁灾害的机率相对较大；植被主要有固土、截流等作用，边坡坡面植被覆盖度高，可减少水土流失、坡面径流形成速度、降雨侵蚀程度等，有助于边坡的稳定[16]。

3.1.6　人类不合理工程活动

人类不合理的工程活动主要是指边坡坡顶堆载，弃土侵占排水设施、坡脚开挖、破坏植被等，间接导致边坡的变形破坏。

3.2　危险性评价指标选取与分级

公路边坡灾害危险性评价指标是致灾因素影响程度的体现，鉴于地质构造的隐蔽性和人类不合理工程活动的随机性[17]，为了便于定量评价，选取坡度、降雨量≥25 mm 年均日数、沟谷密度、岩土类型、河网密度、地震动峰值加速度、植被覆盖度 7 个评价指标。由于同一致灾因素的不同强度特征对致灾危险影响程度是不同的，例如：黄土地区公路边坡植被覆盖度达到 80% 以上，基本不发生坡面侵蚀灾害，反之覆盖度在 5% 以下时，坡面侵蚀严重。结合致灾因素和公路工程特点，将指标分为极高、高、中、低、轻微 5 个危险等级。各评价指标的量纲等不同，为统一度量，按等级相应评分为 10、7、5、3、1，见表 2。

表 2　陕西公路边坡灾害评价指标分级表[17-18]

影响因素	评价指标	极高危险	高危险	中危险	低危险	轻微危险
地形地貌	坡度/(°)	>25	[15, 25]	[10, 15)	[3, 10)	<3
	沟谷密度/(km/km^2)	>0.8	[0.55, 0.8]	[0.3, 0.55)	[0.1, 0.3)	<0.1
地质条件	岩土类型	粉性土、黄土类土	粘性、砂类土	极软岩、砾类土	次硬、软质岩	极硬岩
降雨	降雨量≥25 mm 年均日数/d	>9	[7, 9]	[5, 7)	[3, 5)	[1, 3)
地震	动峰值加速度/g	0.2	[0.15, 0.2)	[0.1, 0.15)	(0.05, 0.1)	≤0.05
河网	河网密度/(m/km^2)	≥3500	[2500, 3500)	[1500, 2500)	[500, 1500)	<500
植被条件	植被覆盖度	<0.05	[0.05, 0.2)	[0.2, 0.5)	[0.5, 0.8]	>0.8
评分值		10	7	5	3	1

3.3 危险性评价数值计算模型

由于公路边坡灾害危险性是多评价指标综合共同作用的结果，评价指标评分反映的是同一指标的不同等级对致灾的影响性，评价指标权重反映的是不同指标对灾害发生的作用比重。本文利用致灾因素叠加原理，建立灾害危险性评价数值计算模型：

$$P=\sum_{i=1}^{n}S_iQ_i。\tag{1}$$

式中：P 为公路边坡灾害危险度，S_i 为评价指标评分（表 2），Q_i 为对应指标权重，n 为评价指标个数。

3.4 评价指标赋权计算

目前指标权重的赋权计算方法大体分主观赋权法（专家调查法、层次分析法（AHP）等）、客观赋权法（熵权法、关联函数法等）、综合赋权法等。指标赋权的合理性，将影响评价结果的科学有效性。云模型理论是由李德毅院士提出的，实现了定性问题与其定量表述的不确定性转换，体现了因素的模糊、随机的不确定性和关联性[19]，目前已大量应用于风险评估、信息控制、安全监管等领域。

对于公路边坡灾害危险性评价，其评价指标具有随机性、模糊性等特征，加之多指标综合评价存在人为主观因素的影响，为有效考虑主、客观等因素的影响作用，采用基于云模型的 AHP 法计算危险性评价指标权重值。

3.4.1 基本理论[19-22]

假定论域 $M=\{x\}$，$x=1$、2、3、…，在域 M 上引入云模型 $B_i(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei})$，数字特征包含：期望 E_{xi}，代表定性概念随机分布的加权平均值；熵 E_{ni}，是定性概念的随机性与模糊性的度量；超熵 H_{ei}，是熵不确定的度量。据文献[22]，引入云模型进行评价指标重要性标度，B_1（1，0.437，0.073）、B_2（2，0.707，0.118）、B_3（3，0.437，0.073）、B_4（4，0.707，0.118）、B_5（5，0.437，0.073）、B_6（6，0.707，0.118）、B_7（7，0.437，0.073）、B_8（8，0.707，0.118）、B_9（9，0.437，0.073），见表 3。

表 3 评价指标重要性标度

重要性标度	定义
B_1，$E_{x1}=1$	r_i 与 r_j 同样重要
B_3，$E_{x3}=3$	r_i 比 r_j 稍重要
B_5，$E_{x5}=5$	r_i 比 r_j 重要
B_7，$E_{x7}=7$	r_i 比 r_j 很重要
B_9，$E_{x9}=9$	r_i 比 r_j 极其重要
B_2、B_4、B_6、B_8	重要程度介于上述之间

利用云模型的浮动云偏好集结性，进行评价指标重要性判断，具体如下：设相邻基云 B_i 与 B_j 间存在一朵浮动云 $B(E_x, E_n, H_e)$，它表达了由 B_i 与 B_j 表示的定性概念中的空白语言值，当浮动云 B 向基云 B_j 浮动时，B 受 B_j 的影响逐渐增大，反之受 B_i 的影响增大。浮动云 B 数字特征计算见式（2）~（4）。

$$E_x=\frac{E_{xi}+E_{xj}}{2};\tag{2}$$

$$E_n=\frac{E_{ni}(E_{xj}-E_x)+E_{nj}(E_x-E_{xi})}{E_{xj}-E_{xi}};\tag{3}$$

$$H_e=\frac{H_{ei}(E_{xj}-E_x)+H_{ej}(E_x-E_{xi})}{E_{xj}-E_{xi}}。\tag{4}$$

基于表 3 和浮动云集结性，建立重要性判断矩阵，见式（5）。

$$\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&\cdots&a_{1n}\\a_{21}&a_{22}&\cdots&a_{2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\a_{n1}&a_{n2}&\cdots&a_{nn}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{11}&A_{12}&\cdots&A_{1n}\\A_{21}&A_{22}&\cdots&A_{2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\A_{n1}&A_{n2}&\cdots&A_{nn}\end{bmatrix}。\tag{5}$$

式（5）中主对角线上元素的熵和超熵数值为零，即 $A_{ii}=(1,0,0)$，且满足：

$$a_{ij}=\frac{1}{a_{ji}},\ (a_{ij}>0);\tag{6}$$

$$A_{ij}=\frac{1}{A_{ji}}=\left(\frac{1}{E_{xji}},\ \frac{E_{nji}}{E_{xji}^2},\ \frac{H_{eji}}{E_{xji}^2}\right)。\tag{7}$$

利用方根法计算期望、熵、超熵的加权平均相对权重 $W_i^{(0)}(E_{xi}^{(0)},\ E_{ni}^{(0)},\ H_{ei}^{(0)})$。引入云的乘法运算：设论域 U 中有 n 朵云 A_1、A_2、…、A_n，其相乘结果为 $W_i(E_{xi},\ E_{ni},\ H_{ei})$，其中：

$$E_{xi}=\sqrt[n]{E_{x1},\ E_{x2}\cdots E_{xn}};\tag{8}$$

$$E_{ni}=E_{xi}\sqrt[n]{\left(\frac{E_{n1}}{E_{x1}}\right)^2+\left(\frac{E_{n2}}{E_{x2}}\right)^2+\cdots+\left(\frac{E_{nn}}{E_{xn}}\right)^2};\tag{9}$$

$$H_{ei}=E_{xi}\sqrt[n]{\left(\frac{H_{e1}}{E_{x1}}\right)^2+\left(\frac{H_{e2}}{E_{x2}}\right)^2+\cdots+\left(\frac{H_{en}}{E_{xn}}\right)^2};\tag{10}$$

$$E_{xi}^{(0)}=\frac{E_{xi}}{\sum E_{xi}}=\frac{(\prod_{j=1}^{n}E_{xij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^{n}(\prod_{j=1}^{n}E_{xij})^{\frac{1}{n}}};\tag{11}$$

$$E_{ni}^{(0)}=\frac{E_{ni}}{\sum E_{ni}}=\frac{\left[\left(\prod_{j=1}^{n}E_{xij}\right)\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{E_{nij}}{E_{xij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\prod_{j=1}^{n}E_{xij}\right)\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{E_{nij}}{E_{xij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}};\tag{12}$$

$$H_{ei}^{(0)}=\frac{H_{ei}}{\sum H_{ei}}=\frac{\left[\left(\prod_{j=1}^{n}E_{xij}\right)\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{H_{eij}}{E_{xij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\prod_{j=1}^{n}E_{xij}\right)\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{H_{eij}}{E_{xij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}。\tag{13}$$

对于重要性判断矩阵的一致性检验，采用随机一致率 K 进行，见式(14)，$K<0.1$ 满足要求。其中 n 为矩阵阶数；R 为平均随机一致性指数。

$$K=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n}E_{xij}w_{i1}/w_{1j}\right)-n^2}{n(n-1)R}。\tag{14}$$

3.4.2　赋权计算

根据云模型 *AHP* 法基本理论，首先进行评价指标重要性排序，构建重要性标度矩阵。选取 4 位相关领域专家(公路工程设计、施工、管理方面各 1 位，防灾减灾工程领域 1 位)进行重要度排序，建立重要性标度矩阵，见表 4、表 5 所示。

表 4　专家咨询结果

专家	调查结果
专家 1(公路工程设计)	$r_3=r_4>r_5>r_2>r_1>r_6=r_7$
专家 2(公路工程施工)	$r_4>r_3>r_1=r_2>r_5>r_6>r_7$
专家 3(公路工程管理)	$r_5=r_4>r_3>r_2>r_1>r_6=r_7$
专家 4(防灾减灾工程)	$r_3>r_4>r_5>r_1=r_2>r_6>r_7$

注：r_i、r_j为评价指标，其中，坡度为 r_1，沟谷密度为 r_2，岩土类型为 r_3，降水量≥25 mm 年均日数为 r_4，动峰值加速度为 r_5，河网密度为 r_6，植被覆盖度为 r_7。

表 5　评价指标重要性对比矩阵

	专家 1							专家 2							专家 3							专家 4						
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
r_1	1	1/3	1/7	1/7	1/5	3	3	1	1	1/3	1/5	3	5	7	1	1/3	1/5	1/7	1/7	3	3	1	1	1/7	1/5	1/3	3	5
r_2	3	1	1/3	1/5	1/3	5	5	1	1	1/3	1/5	3	5	7	3	1	1/3	1/5	1/5	5	5	1	1	1/7	1/5	1/3	3	5
r_3	7	3	1	1	3	9	9	3	3	1	1/3	5	7	9	5	3	1	1/3	1/3	7	7	7	7	1	3	5	7	9
r_4	7	5	1	1	3	9	9	5	5	3	1	7	9	9	7	5	3	1	1	9	9	5	5	1/3	1	3	7	9
r_5	5	3	1/3	1/3	1	7	7	1/3	1/3	1/5	1/7	1	3	5	7	5	3	1	1	9	9	3	3	1/5	1/3	1	5	7
r_6	1/3	1/5	1/9	1/9	1/7	1	1	1/5	1/6	1/7	1/9	1/3	1	3	1/3	1/5	1/7	1/9	1/9	1	1	1/3	1/3	1/7	1/7	1/5	1	3
r_7	1/3	1/5	1/9	1/9	1/7	1	1	1/7	1/7	1/9	1/9	1/5	1/3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	1/9	1	1	1/5	1/5	1/9	1/9	1/7	1/3	1

表 6　评价指标重要性判断矩阵 A_{ij}

i	j						
	1	2	3	4	5	6	7
1	(1, 0, 0)	(1/2, 0.109, 0.018)	(1/4.25, 0.024, 0.004)	(1/6, 0.012, 0.002)	(1/4.08, 0.02, 0.003)	(3.75, 0.437, 0.073)	(4.75, 0.437, 0.073)
2	(2, 0.437, 0.073)	(1, 0, 0)	(1/3.5, 0.028, 0.005)	(1/5, 0.014, 0.002)	(1/3.08, 0.036, 0.006)	(4.75, 0.437, 0.073)	(5.5, 0.437, 0.073)
3	(4.25, 0.437, 0.073)	(3.5, 0.437, 0.073)	(1, 0, 0)	(1/2.08, 0.079, 0.013)	(4, 0.572, 0.096)	(7.25, 0.437, 0.073)	(8.25, 0.437, 0.073)
4	(6, 0.437, 0.073)	(5, 0.437, 0.073)	(2.08, 0.34, 0.057)	(1, 0, 0)	(3.75, 0.437, 0.073)	(8.25, 0.437, 0.073)	(9, 0.437, 0.073)
5	(4.08, 0.34, 0.057)	(3.08, 0.34, 0.057)	(1/4, 0.036, 0.006)	(1/3.75, 0.031, 0.005)	(1, 0, 0)	(6, 0.437, 0.073)	(7, 0.437, 0.073)
6	(1/3.75, 0.031, 0.005)	(1/4.75, 0.019, 0.003)	(1/7.25, 0.008, 0.001)	(1/8.25, 0.006, 0.001)	(1/6, 0.012, 0.002)	(1, 0, 0)	(2, 0.437, 0.073)
7	(1/4.75, 0.019, 0.003)	(1/5.5, 0.014, 0.002)	(1/8.25, 0.006, 0.001)	(1/9, 0.005, 0.001)	(1/7, 0.009, 0.001)	(1/2, 0.109, 0.018)	(1, 0, 0)

4 位专家对评价指标重要性标度按表 3 可转换为云模型标度，然后经浮动云集结后可计算求得其他评价指标两两重要性判断云，按式(5)建立重要性判断矩阵，见表 6。

利用方根法，根据式(8)～(14)，计算可得 W_i与相对权重 $W_i^{(0)}$，结果见表 7。经一致性检验 $K=0.066<0.1$ 满足要求，故对应评价指标权重 $Q_i=(0.065, 0.092, 0.267, 0.372, 0.153, 0.029, 0.022)^T$。

表 7　相对权重 $W_i^{(0)}$

W_i	$W_i^{(0)}$
(0.704, 0.500, 0.299)	(0.065, 0.068, 0.067)
(0.996, 0.705, 0.423)	(0.092, 0.095, 0.096)
(2.897, 2.019, 1.209)	(0.267, 0.272, 0.273)
(4.034, 2.688, 1.613)	(0.372, 0.363, 0.362)
(1.663, 1.119, 0.669)	(0.153, 0.152, 0.151)
(0.315, 0.220, 0.131)	(0.029, 0.029, 0.030)
(0.233, 0.159, 0.094)	(0.022, 0.021, 0.021)

4　陕西公路边坡灾害危险度区划

4.1　公路边坡灾害危险度成图

根据评价模型的理论原理—叠加因素法，利用 ArcGIS10.0 软件，首先根据指标分级评分体系(表 2)，分别计算生成各评价指标危险性分级图，然后按式(1)，将评价指标危险性分级图配对应指标权值后叠加，得到《陕西公路边坡灾害危险度图》，见图 2。

计算表明：陕西公路边坡灾害危险度范围区间为[1.4，8.375]，由图 2 可知，危险度指数高的地区包括陕南秦巴山区、安康北部山区、太白－蓝田－潼关以南，宁强－佛坪－洛南以北、壶口－宜川－禹门口以东等地区；危险度指数低的地区包括榆林中北部等地区。

4.2　公路边坡灾害危险度区划方案

本区划以公路边坡灾害危险度为分区指标，

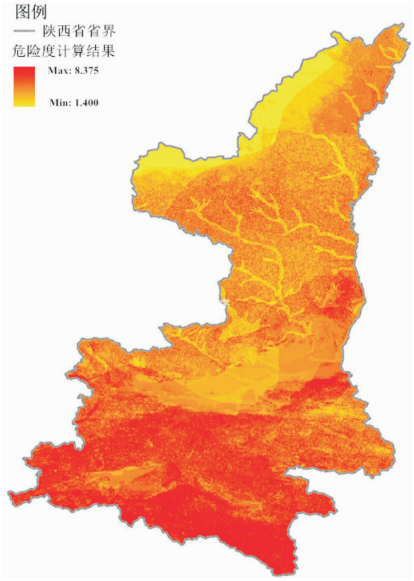


图 2 陕西公路边坡灾害危险度图

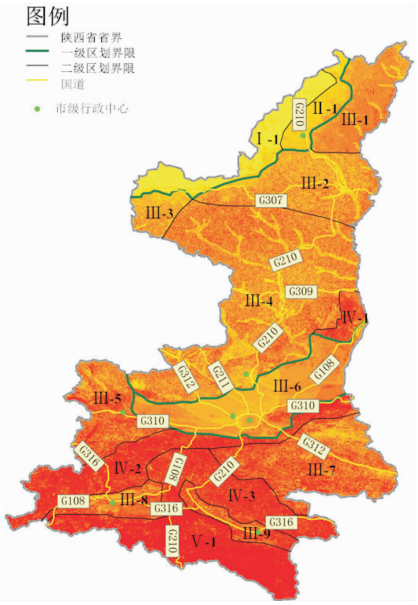


图 3 陕西公路边坡灾害危险度区划图

结合边坡灾害对公路的影响程度和公路网工程布设情况，将陕西省区域分为极高危险[7，8.375]、高危险[6，7)、中危险[4.5，6)、低危险[3，4.5)、轻微危险[1.4，3)5 种等级 15 个区，分区名称采用“地理位置 + 危险等级”，区划方案见表 8。

利用 GIS 软件将陕西省国道路网图件矢量匹配，并与图 2 叠加，结合危险等级划分标准，生成《陕西公路边坡灾害危险度分区图》，见图 3，结合陕西干线公路实地调查和公路管理部门经验，陕西实际公路边坡灾害危险性分异情况与本区划方案基本一致。

5 结论

(1)结合陕西自然环境与公路边坡灾害类型区域分异特点，分析了致灾因素，选取了坡度、沟谷密度、岩土类型、动峰值加速度、河网密度等指标，建立了公路边坡灾害危险性评价指标体系。

(2)基于因素叠加法建立了公路边坡灾害危险性评价数值计算模型，采用基于云模型 - AHP 法计算了评价指标的权重值。根据评价模型、评价指标分级体系与指标权重值，利用 ArcGIS10.0 软件，计算生成了计算生成了《陕西公路边坡灾害危险度图》，其灾害危险度范围为[1.4，8.375]。

表 8 陕西公路边坡灾害危险度区划方案

危险等级	区名称	途径国道
Ⅰ 轻微危险区	Ⅰ$_1$明长城以北 - 陕蒙界毛乌素沙漠轻微危险区	G210、G307
Ⅱ 低危险区	Ⅱ$_1$榆林中 - 北部低危险区	G210
Ⅲ 中危险区	Ⅲ$_1$榆林东 - 北部中危险区	
	Ⅲ$_2$榆林南部 - 明长城以东中危险区	G210、G307
	Ⅲ$_3$明长城以南 - 志丹以西中危险区	
	Ⅲ$_4$铜川 - 北山以北中危险区	G210、G211、G309、G312
	Ⅲ$_5$宝鸡西中部中危险区	G310、G316
	Ⅲ$_6$关中平原中危险区	G312、G310、G211、G210、G108
	Ⅲ$_7$佛坪以东、商洛以南中危险区	G312、G210
	Ⅲ$_8$汉中盆地中危险区	G316、G210、G108
	Ⅲ$_9$安康盆地中危险区	G210、G316
Ⅳ 高危险区	Ⅳ1 壶口 - 洛川 - 禹门口以东高危险区	G108
	Ⅳ$_2$秦岭北坡以南高危险区	G108、G210、G310、G316
	Ⅳ$_3$安康北部山区高危险区	G108、G210、G316
Ⅴ 极高危险区	Ⅴ1 大巴山北坡极高危险区	G108、G210、G316

(3)结合陕西公路工程特点，以危险度为分区指标，将陕西划分为极高[7，8.375]、高[6，7)、中[4.5，6)、低[3，4.5)、轻微[1.4，3)5 种危险等级，共计 15 个危险区。其中，极高危险区为大巴山北坡地区，途径国道有 G108、G210、G316 等。

参考文献：

[1] 舒森，李家春，朱钰，等. 陕西省公路灾害防治技术指南[M]. 北京：人民交通出版社，2009.

[2] 刘丕兴，田建文，马保成，等. 陕北黄土地区公路边坡灾害分区与预测预警[M]. 北京：人民交通出版社，2013.

[3] 赵欢，田伟平，李家春，等. 公路泥石流灾害危险性分区研究[J]. 灾害学，2016，31(2)：24－29.

[4] 于德海，彭建兵. 陕西秦巴山区公路斜坡灾害发育规律的研究[J]. 公路，2008(8)：136－140.

[5] 陈雷. 陕西公路主要地质灾害分区与评价[D]. 西安：长安大学，2009.

[6] 孟庆华，孙炜锋，王涛. 陕西凤县地质灾害易发性评价研究[J]. 工程地质学报，2011，19(3)：388－395.

[7] 何淑军. 陕西宝鸡市渭滨区地质灾害风险评估研究[D]. 北京：中国地质科学院，2009.

[8] 李永红. 基于 ArcGIS 的陕西山洪灾害易发程度区划[J]. 灾害学，2008，23(1)：37－42.

[9] 王雁林，郝俊卿，赵法锁，等. 汶川地震陕西重灾区地质灾害风险区划探讨[J]. 灾害学，2011，26(4)：35－39.

[10] 王福恒. 基于 GIS 的区域公路边坡灾害评价与预测研究[D]. 西安：长安大学，2011.

[11] 赵欢. 强风化地区公路路堑边坡变形破坏机理与施工信息化管理研究[D]. 西安：长安大学，2011.

[12] 马保成. 公路水毁灾害识别技术研究[D]. 西安：长安大学，2011.

[13] 齐洪亮，田伟平，王栋，等. 公路洪水灾害危险性评价指标[J]. 灾害学，2014，29(3)：44－47.

[14] 万金红，张葆蔚，刘建刚，等. 1950－2013 年我国洪涝灾情时空特征分析[D]. 灾害学，2016，31(2)：63－68.

[15] 齐洪亮，尹超，田伟平，等. 基于 ArcGIS 的中国公路地质灾害危险性区划[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2015，35(5)：22－27.

[16] 李政国，薛强，张茂省，等. 陕西省延安市地质灾害气象预警信息系统研究－以“7·3”暴雨为例[J]. 灾害学，2016，31(2)：69－73.

[17] 长安大学，重庆交通大学，广东华美加工程顾问有限公司. 中国公路综合自然区划体系框架研究总报告[R]. 西安：长安大学，2008.

[18] 王福恒，李家春，马保成，等. 公路岩土区划方法与区划指标的研究[J]. 公路交通科技，2010，27(12)：47－52.

[19] 陈贵林. 一种定性定量信息转换的不确定性模型－云模型[J]. 计算机应用研究，2010，27(6)：2006－2010.

[20] 沈进昌，杜树新，罗祎. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学，2012，26(6)：115－123.

[21] 张军，陈征宙，刘登峰. 基于云模型的岩质边坡稳定性评估研究[J]. 水文地质工程地质，2014，41(6)：44－50.

[22] 贾兴利，许金良. 基于云模型的地震区公路震害风险评估[J]. 同济大学学报：自然科学版，2014，42(9)：1352－1358.

Research on the Risk Regionalization of Highway Slope Disasters in Shaanxi Province

ZHAO Huan, TIAN Weiping , QI Hongliang and WANG Fuheng

(1. *Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *China*; 2. *Transportation Professional Qualification Evaluation Center*, *Ministry of Transport*, *Beijing* 100101, *China*)

Abstract: The risk regionalization of highway slope disasters was studied according to the status of frequent occurrence and regional differentiation of highway slope disasters in Shaanxi Province. Combined with the characteristics of geo-hazards and water damages of highway slope, risk assessment indicator system was selected through analyzing the causing disaster factors. Based on the method of cloud model-AHP and factors superposition, the weight of risk assessment indicators was calculated, and risk assessment model was also established. "Risk figure of highway slope disasters in Shaanxi province" was plotted by GIS, and risk degree was in the range of 1.2 ~ 8.725. In view of risk degree, the highway slope disasters in Shaanxi Province was rated into five risk levels including fifteen risk zones, namely extremely high risk area, high risk area, medium risk area, low risk area and slight risk area. The extremely high risk area was the north slope of Daba Mountain, and some national highway which included G108, G210 and G316 passed through this region. The result of risk regionalization was in accord with the actual situation of highway slope disasters in Shaanxi province.

Key words: Shaanxi province; highway slope; disaster; risk assessment; cloud model; GIS; risk regionalization