

文章编号:1671-8879(2015)04-0013-07

# 高烈度地震区公路路线方案评价

贾兴利<sup>1</sup>,陈文强<sup>2</sup>,陈春<sup>3</sup>,许金良<sup>1</sup>,孙宇<sup>4</sup>

(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. 贵州省安顺市交通建设工程质量监督站,贵州 安顺 561000; 3. 中国交通建设股份有限公司 投资事业部,北京 100088; 4. 山东省胶州市城乡建设局,山东 青岛 266300)

**摘要:**为了提高震区公路的抗震防灾能力,提出了考虑地震风险的高烈度地震区公路路线方案评价方法。从路线方案评价关键影响因素分析出发,建立了包含地震风险、经济、环境、安全的两层次路线方案评价指标体系;采用标度分值和专家打分相结合的方法,构建了评价因子的量化模型;确定了以多准则评价为基础的高烈度地震区路线方案评价方法,建立了基于方案达成度和综合度的交互式路线评价模型;最后以甘肃陇南某震区公路为实例,对评价方法进行了实例分析验证。研究表明:实例分析的路线 A 方案综合风险值为 11.91,B 方案为 7.87;A 方案安全指标为 14.5,B 方案为 16;B 方案经济指标和环境指标大于 A 方案;A 方案的达成度为 0.660,B 方案的达成度为 1.852,最优方案为 B 方案;给出的评价方法能有效量化地震风险对路线方案的影响,计算结果准确可行。

**关键词:**道路工程;路线方案评价;多属性决策;地震;地理信息系统

**中图分类号:**U416 **文献标志码:**A

## Evaluation of highway alignment in high seismic intensity region

JIA Xing-li<sup>1</sup>, CHEN Wen-qiang<sup>2</sup>, CHEN Chun<sup>3</sup>, XU Jin-liang<sup>1</sup>, SUN Yu<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Anshun Traffic Engineering Construction Quality Supervision Station, Anshun 561000, Guizhou, China; 3. Department of Investment Business, China Communications Construction Company Limited, Beijing 100088, China; 4. Shandong Jiaozhou Urban Construction Bureau, Qingdao 266300, Shandong, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic disaster prevention capability of road, the evaluation method of highway scheme in high seismic intensity region was proposed. With the analysis on key factors influencing the alignment selection, a two-level assessment system with seismic risk, economy, environment and safety as index was established. Using the method of scale scores and expert scores, the quantitative model of evaluation factors was established. Considering the environmental features in high seismic intensity region, evaluation method of highway scheme in high seismic intensity region based on multiple criteria evaluation was defined, and the interactive evaluation model of highway alignment based on alternative achievement and complexity degree was set up, and the method was verified by taking certain seismic road of Southern Gansu as instance. The results show that the comprehensive risk of route A is 11.91, and that of route B is 7.87. The security index of route A is 14.5, and that of route

收稿日期:2015-03-18

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2009 318 000 102);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821151007)

作者简介:贾兴利(1986-),男,山东济宁人,讲师,工学博士,E-mail:jxl0126@sina.com。

B is 16. The economic index and environmental index of route B are greater than those of route A, and the achievement degree of route A and route B are 0.660, 1.852 respectively, and the optimal solution is route B. The assessment methods effectively reflects seismic risk of highway scheme, and the assessment model is feasible. 4 tabs, 4 figs, 17 refs.

**Key words:** road engineering; alignment evaluation; multiple attribute decision making; earthquake; geographic information system

## 0 引言

地震带来的能量释放会引起地球表面的强烈振动,对区域内道路、桥梁等基础设施造成了严重损害<sup>[1-3]</sup>。通过近几年发生的汶川、玉树、雅安地震震后调查发现,由于现有路线评价方法缺乏对地震风险的考虑,导致公路路线方案不能很好地适应震区环境特点,进一步加剧了震时的破坏程度。

公路路线方案评价一直是国内外学者研究的热点,国外的研究起步于道路交通安全审计,Leisch方法是美国最早建立并用来评价道路平纵面几何线形一致性的方法。20世纪末,国外学者开始研究构建完整的路线综合评价体系,并将地理信息系统引入到评价计算中,逐步提高了评价的全面性和准确性<sup>[4-6]</sup>。中国对于路线方案评价经历了评价指标由经济指标单目标到经济指标、环境指标、安全指标等多目标的转变,研究方法也从早期的专家评议发展到现在的综合量化研究<sup>[7-10]</sup>。但是,已有研究大多是从普通区域的路线比选角度出发,缺乏对高烈度强震区域路线地震风险的考虑,同时现有研究多采用层次分析法或模糊评价法,各方案指标权重的确定方面主观性较大,导致最终方案评价缺乏全面性和系统性。

为此,本文从考虑公路路线地震风险角度出发,借助 ArcGIS 技术平台,引入多属性决策理论,提出基于方案综合度和达成度的高烈度地震区公路路线方案评价方法,并以甘肃陇南某震区公路为例,进行研究成果的相关验证。

## 1 评价指标体系

路线方案评价是一项具有动态特征的系统工程,决策者需要综合分析经济、安全、环境等指标对路线方案的影响。相对于一般地区,高烈度地震区地形、地质等环境条件更加复杂,各因素对路线的影响程度也有别于普通地区。汶川地震显示,地震不但严重影响了道路功能、行车安全、道路结构物安全,同时地震引发的地质灾害对区域内生态环境造成了极大破坏,地震风险成为高烈度地震区路线方

案选择时必须考虑的影响因素。因此高烈度地震区路线方案必须综合协调地震风险指标、经济指标、环境指标、安全指标四者之间的关系,实现公路路线方案的优选。

### 1.1 地震风险指标

地震对于公路的破坏包括2个方面:一是地震对于公路本身构造物的破坏;二是地震对于公路走廊带稳定性的破坏,进而引发次生地质灾害对公路造成破坏。地震对于公路构造物本身的破坏主要包括路基震害、桥梁震害和隧道震害3类,而且不同构造物形式的抗震性能差异较大。地震对于公路走廊带的破坏,也就是路线周边环境的破坏,主要是引发的各种次生地质灾害,包括崩塌、滑坡、泥石流等。高烈度地震峡谷区路线方案地震风险可以概括为公路构造物风险和公路走廊带风险。

#### 1.1.1 公路构造物风险

针对构造物风险分级进行专家打分。邀请25位专家,包括防震减灾部门10位,公路设计部门10位,公路管理部门5位。经专家咨询,将各构造物的风险等级进行划分,分为高风险、中风险、低风险3个等级,并分别赋值9、5、1,具体处理结果如表1所示。

表1 路线构造物风险分级

Tab. 1 Risk classification of route structures

分类	路线构造物形式	风险等级		
		高(9)	中(5)	低(1)
路基形式	高填方路基	√		
	深挖方路基	√		
	半填半挖路基	√		
	一般路基		√	
桥梁形式	简支梁桥			√
	连续梁桥	√		
	拱桥			√
	隧道			√

基于路线构造物风险分级,量化公路构造物风险属性值 $R_g$ ,其计算公式为

$$R_g = \sum_{i=1}^8 R_{gi} = \sum_{i=1}^8 \frac{L_i}{L} N_{gi} \quad (1)$$

式中: $R_{gi}$ 为第*i*种路线构造物风险属性值; $L_i$ 为第*i*种路线构造物对应的路线长度; $L$ 为路线的总长度;

$N_{ki}$  为第  $i$  种路线构造物对应的分级值。

### 1.1.2 公路走廊带风险

结合公路震害风险特点,将公路走廊带风险划分为地震源风险、地形震害风险、地质震害风险、植被震害风险 4 类。考虑到峰值加速度、坡度、地层岩性和植被覆盖率能较好地体现地震对震区公路工程的影响,用其表征公路走廊带风险作为震害风险评价因子。通过分析各因子对地震风险的作用和影响程度,赋予不同权重<sup>[11]</sup>。基于 ArcGIS 平台,在对路线走廊带风险因子分级的基础上,对公路走廊带风险进行量化处理,计算公式为

$$R_z = 0.572R_{z1} + 0.056R_{z2} + 0.203R_{z3} + 0.169R_{z4} \quad (2)$$

$$R_{zi} = \sum_{j=1}^3 \frac{D_{ij}}{D_i} N_{ij} \quad (3)$$

式中: $R_z$  为公路走廊带风险属性值; $R_{zi}$  为第  $i$  种因子影响下的风险值; $D_{ij}$  为第  $i$  种因子第  $j$  级栅格数; $D_i$  为第  $i$  种因子栅格总数; $N_{ij}$  为第  $i$  种因子第  $j$  级对应的分级值。

### 1.1.3 地震综合风险

在分指标量化的基础上,路线地震综合风险计算公式为

$$R = R_g R_z \quad (4)$$

式中: $R$  为公路路线风险指标值。

## 1.2 经济指标

路线方案经济指标包括建设期费用和运营期费用 2 个方面。公路的建设期费用主要包括路基土石方费用和桥梁、隧道、涵洞等构造物费用等。运营期费用主要为车辆运营消耗和时间费用。费用分类如表 2 所示。

表 2 费用分类

Tab. 2 Classification of expense

时期	分类
建设期	土石方费用、构造物费用
运营期	油耗费用、时间费用

经济指标的属性值计算公式为

$$C = C_j + C_u \quad (5)$$

式中: $C$  为经济指标值(万元); $C_j$  为建设期费用(万元); $C_u$  为运营期费用(万元)。

## 1.3 环境指标

公路对环境的影响可以分为自然环境影响和社会环境影响。自然环境影响主要包括对土壤环境、大气环境、声环境、水环境和水土流失等的影响,尤其是地震引发水土流失导致的环境破坏;社会环境主要包括土地占用、城镇化效应、促进区域经济、投

资增长生活水平改善以及社会治安和安全等方面。分析公路建设带来的主要环境问题,同时考虑到指标的量化和获取,选择占用土地类型和土壤流失程度作为环境指标。环境指标计算公式为

$$E = E_m + E_s \quad (6)$$

式中: $E$  为环境指标值( $m^2$ ); $E_m$  为不同类型土地占用面积( $m^2$ ); $E_s$  为各别土壤预测流失面积( $m^2$ )。

基于标度分值法对公路占地类型和土壤流失程度进行分级处理,土壤流失分级标准同水土保持方案技术规范,等级分值为 7、5、3,结果如表 3 所示。

表 3 环境指标分级

Tab. 3 Classification of environment

环境指标	环境影响等级		
	高(7)	中(5)	低(3)
土地类型	农用地	建筑用地	未利用地
土壤流失程度	重度流失	中度流失	轻度流失

根据土地类型的环境影响分级,土地占用属性量化为

$$E_m = \sum_{i=1}^3 E_{mi} = \sum_{i=1}^3 N_{mi} S_{mi} \quad (7)$$

式中: $E_{mi}$  为第  $i$  种类型土地占用赋权面积; $N_{mi}$  为第  $i$  种类型土地对应的分级值; $S_{mi}$  为第  $i$  种类型土地占用实际面积。

根据土壤流失程度的环境影响分级,土壤流失属性量化为

$$E_s = \sum_{i=1}^3 E_{si} = \sum_{i=1}^3 N_{si} S_{si} \quad (8)$$

式中: $E_{si}$  为第  $i$  种土壤流失级别土地赋权面积; $N_{si}$  为第  $i$  种土壤流失级别土地对应的分级值; $S_{si}$  为第  $i$  种土壤流失级别土地实际面积。

## 1.4 安全指标

参照公路建设项目安全评价指南,从运行速度的协调性、运行速度与设计速度的协调性、运动动力学连续性 3 个方面进行安全评价。利用标度法进行量化处理,结果如表 4 所示。

表 4 安全指标分级

Tab. 4 Classification of safety

安全评价标准	安全等级		
	高(7)	中(5)	低(1)
运行速度的协调性	协调性好	协调性中	协调性差
运行速度与设计速度的协调性	协调性好	协调性中	协调性差
运动动力学连续性	协调性好	协调性中	协调性差

计算安全指标属性值为

$$S = S_v + S_{vd} + S_f = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{P_{ij}}{P_i} N_j \quad (9)$$

式中: $S$  为道路安全评价标准; $S_v$  为运行速度的协

调性;  $S_{vd}$  为运行速度与设计速度的协调性;  $S_f$  为运动动力学连续性;  $P_{ij}$  为第  $i$  种指标第  $j$  等级路段数;  $P_i$  为第  $i$  种指标的总路段数;  $N_j$  为第  $j$  协调性等级对应的分级值。

经过上述分析,建立高烈度地震区路线方案评价指标体系,如图 1 所示。

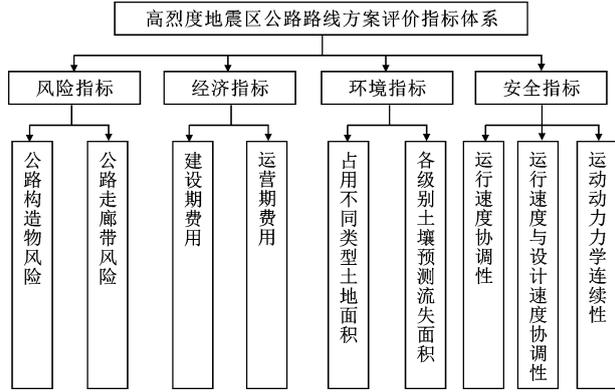


图 1 高烈度地震区路线方案评价指标体系  
Fig.1 Evaluation index system of highway scheme in high seismic intensity region

## 2 评价模型

本文提出基于方案综合度和达成度的交互式多属性评价方法,该方法在充分利用已知客观信息的基础上,最大限度考虑决策者的交互要求,发挥决策者的主观能动性。通过对方案达成度和综合度的给定和修正来实现交互决策,使方案既在总体上达到决策者要求,又能尽可能地达到自己的良好状态,从而选择出符合决策者需要的最优方案。

### 2.1 评价模型的构建

方案达成度是从各单目标角度出发,表征方案价值的综合达成情况。综合度则从各目标的综合角度反映价值的大小。将这两方面相结合,就可以在交互决策过程中实现对总价值的调整以及对各目标实现值的调整,在这两方面均能使决策者较为满意的解就是问题的最优解<sup>[12-13]</sup>。

#### 2.1.1 方案权重信息的预处理

邀请相应的专家对路线方案各个指标的权重进行打分。本文选择方案评价所涉及领域的 30 位专家,其中防震减灾领域 15 人,公路交通设计 8 人,公路管理 7 人。回收有效问卷 27 份,对问卷整理统计,确定出各指标的权重范围,组成权重集合  $\Phi$

$$\Phi = \left\{ \begin{array}{l} \omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)^T \\ \left. \begin{array}{l} 0.4 \leq \omega_1 \leq 0.6, 0.05 \leq \omega_2 \leq 0.2, \\ 0.05 \leq \omega_3 \leq 0.15, 0.25 \leq \omega_4 \leq 0.4, \\ \sum_{j=1}^4 \omega_j = 1, j = 1, 2, 3, 4 \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

式中:  $\omega_1$  为风险权重;  $\omega_2$  为经济权重;  $\omega_3$  为环境权重;  $\omega_4$  为安全权重。

#### 2.1.2 方案属性值规范化处理

从风险、经济、环境和安全 4 个角度建立路线方案属性矩阵  $A$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} \end{bmatrix}$$

式中:  $n$  为方案个数。

因各指标物理量纲不同会影响到评价结果,所以对决策矩阵  $A$  进行规范化处理。其中风险、经济和环境指标属于成本型属性,其计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\min_i(a_{ij})}{a_{ij}}, i \in n, j = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_i(a_{ij}) - \min_i(a_{ij})}, i \in n, j = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

安全指标属于效益型属性,其计算公式为

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\max_i(a_{ij})}, i \in n, j = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_i(a_{ij})}{\max_i(a_{ij}) - \min_i(a_{ij})}, i \in n, j = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

$A$  经过规范化处理后,得到规范化矩阵  $R$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ \vdots & & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix}$$

#### 2.1.3 方案综合度和达成度的求解

首先,设  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$  为属性的权重向量。其中,  $\omega_i \geq 0, \sum \omega_i = 1; \omega \in \Phi, \Phi$  为已知的部分权重信息集合。构造决策矩阵  $A$  经规范化处理,得规范化矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times m}$ , 方案  $x_i$  的综合属性值计算为

$$z_i(\omega) = \sum_{j=1}^4 r_{ij} \omega_j, i \in n \quad (14)$$

若  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$  是下列单目标优化模型的最优解,则建立模型 Model 1 和 Model 2

$$\text{Model 1} \begin{cases} \min z_i(\omega) = \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_j, i \in n \\ \text{s. t. } \omega \in \Phi \end{cases}$$

$$\text{Model 2} \begin{cases} \max z_i(\omega) = \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_j, i \in n \\ \text{s. t. } \omega \in \Phi \end{cases}$$

其中,  $z_i^{\min} = \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_j$ 、 $z_i^{\max} = \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_j$  分别为 Model 1 和 Model 2 的最优解,称为方案  $x_i (i \in n)$  的综合属性负理想值和正理想值,而负理想值就是方案的综合属性最小值。进而求得方案的期望水平值  $\bar{z}_i = (z_i^{\max} + z_i^{\min})/2$ 。

利用已求得的方案综合属性最小值和期望水平值,计算方案达成度和综合度为

方案  $x_i$  的达成度

$$\varphi(z_i(\omega)) = \frac{z_i(\omega) - z_i^{\min}}{z_i - z_i^{\min}}, i \in n \quad (15)$$

方案  $x_i$  的综合度

$$c(\omega) = \sum_{i=1}^n (z_i(\omega) - z_i^{\min}) \quad (16)$$

因为  $\omega_i (i \in n)$  并未给出具体值,而是给出了权重的范围,所以不能直接确定综合属性值。对于给定的  $\omega \in \Phi$ ,方案综合属性值  $z_i(\omega)$  越大越好。建立模型 Model 3

$$\text{Model 3} \begin{cases} \max z(\omega) = (z_1(\omega), z_2(\omega), \dots, z_n(\omega)) \\ \text{s. t. } \omega \in \Phi \end{cases}$$

如果不存在  $\omega \in \Phi$  使  $z_i(\omega) \geq z_{i0}(\omega), i \in n, \omega_0 \in \Phi$ ,则称  $\omega_0$  为 Model 3 的有效解。进而求解  $\omega_0$ 。首先构建单目标优化模型 Model 4

$$\text{Model 4} \begin{cases} \max c(\omega) \\ \text{s. t. } \omega \in \Phi \end{cases}$$

根据模型计算,求得  $\omega, z_i(\omega)$  和  $c(\omega)$ ,最终得到各方案的达成度  $\varphi(z_i(\omega)) (i \in n)$ 。

决策者可以依据 Model 4 求出的方案综合度  $c(\omega)$ ,利用去尾法原理得到方案综合度的低限值  $c_0$ ,然后由决策者依据 Model 4 求出的各方案达成度  $\varphi(z_i(\omega))$ ,在  $c_0$  范围内提出各方案初始达成度,并利用去尾法处理后得到符合决策者要求的初始方案达成度  $\varphi_i^0 (i \in n)$ 。

若仅考虑方案综合度会引起某些方案达成度偏低,方案状态远离了良好。若仅考虑方案达成度,则不能有效地平衡各种方案。为了保证各个方案公平竞争,综合各因素,建立模型 Model 5

$$\text{Model 5} \begin{cases} \max J = \sum_{i=1}^n \varphi_i \\ \text{s. t. } c(\omega) \geq c_0 \\ \varphi(z_i(\omega)) \geq \varphi_i \geq \varphi_i^0, i \in n \\ \omega \in \Phi \end{cases}$$

若模型有最优解,则模型 Model 5 最优解是模型 Model 3 最优解。然后根据 Model 5 求出的最优

解求出各方案的综合属性值,并依据各方案综合属性值的大小对方案进行排序处理,得到最优方案<sup>[14-17]</sup>。

## 2.2 基于方案综合度和达成度的交互式评价步骤

本文提出基于方案综合度和达成度的交互式决策方法,具体步骤及流程如下。

(1)根据各路线方案的相关属性值构造决策矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times m}$ ,经过规范化处理后,得到规范化矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

(2)利用模型 Model 1 和 Model 2 求出路线方案  $x_i$  的综合属性负理想值  $z_i^{\min}$  和各方案的期望水平值  $\bar{z}_i (i \in n)$ 。

(3)求解模型 Model 4,得到最优解  $\omega_0$ 、各路线方案的综合属性值  $z_{i0}(\omega)$  以及路线方案综合度  $c_0(\omega)$ ,并求出各路线方案的达成度  $\varphi^0(z_i(\omega)), i \in n$ 。决策者依据 Model 4 求出的  $c_0(\omega)$  和  $\varphi^0(z_i(\omega)), i \in n$ ,提出方案综合度的低限值  $c_0$  和初始的各方案达成度  $\varphi_i^0 (i \in n)$ 。

(4)求解模型 Model 5,得到最优解  $\omega_k$ ,路线方案综合度  $c_k(\omega)$  和路线方案达成度向量  $\varphi^k(z_i(\omega)), i \in n$ ,并依据  $\omega_k$  计算相应的路线方案综合属性值向量  $z_k(\omega)$ 。

(5)如果决策者对上述路线方案的综合属性值结果满意,则可不提出新的要求,并转到(6);反之,决策者需要适当调整某些方案的最低达成度,必要时也可调整方案综合度的低限值,再转到(3)。

(6)将最优解代入模型 Model 3,并对各路线方案的综合属性值的大小进行排序,获得满意方案。评价流程如图 2 所示。

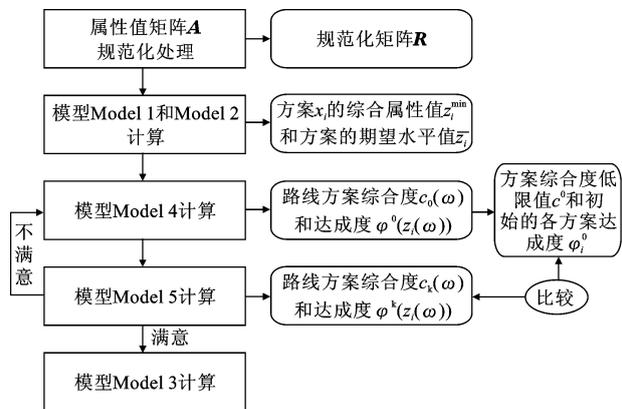


图 2 评价流程

Fig. 2 Evaluation process

## 3 实例分析

选取甘肃陇南地区武罐高速公路两水镇比选路

段为研究对象,进行路线方案评价的实例分析。沿线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,属于典型的高烈度地震峡谷区。该段提出了绕城镇南侧、沿江布设的 A 线方案和绕城镇北侧以两隧道形式通过的 B 线方案。

### 3.1 评价指标属性计算

#### 3.1.1 风险指标值

首先计算 A 方案和 B 方案的构造物风险值:

$$R_{gA}=6.17, R_{gB}=5.11。$$

利用 ArcGIS 求得 A 方案和 B 方案的走廊带风险值: $R_{zA}=1.93, R_{zB}=1.54。$

最后得到 A、B 方案的综合风险值: $R_A=11.91, R_B=7.87。$

#### 3.1.2 经济指标值

根据当地定额,计算 A 方案和 B 方案的建设期费用为: $C_{JA}=43\,920.3$  万元, $C_{JB}=71\,416.1$  万元。

A、B 方案运营期费用为

$$C_{UA}=1\,533.1 \text{ 万元}$$

$$C_{UB}=1\,437.3 \text{ 万元}$$

最终,得出 A、B 方案总费用为

$$C_A=C_{JA}+C_{UA}=45\,453.4 \text{ 万元}$$

$$C_B=C_{JB}+C_{UB}=72\,853.4 \text{ 万元}$$

#### 3.1.3 环境指标值

利用 ENVI 对遥感图进行解译和土地类型分类,利用 ArcGIS 生成土地类型图,如图 3 所示。

计算得出 A、B 方案的占用土地面积为

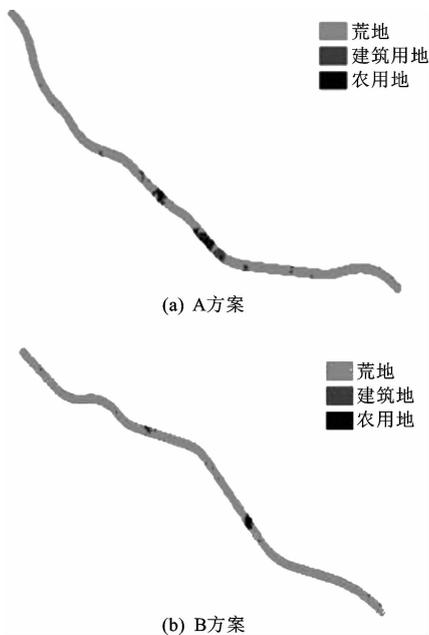


图 3 土地类型  
Fig. 3 Land types

$$E_{mA}=265\,605.8 \times 1 + 25\,992 \times 5 + 20\,306.25 \times 9 = 578\,321.25 \text{ m}^2$$

$$E_{mB}=278\,601.8 \times 1 + 20\,306.25 \times 5 + 17\,869.5 \times 9 = 540\,958.55 \text{ m}^2$$

利用 ArcGIS 计算得到走廊带降雨侵蚀力、土壤类型、坡长、坡度、植被覆盖率等基础数据,并叠加计算,得到土壤流失量  $E_s$  分布,如图 4 所示。

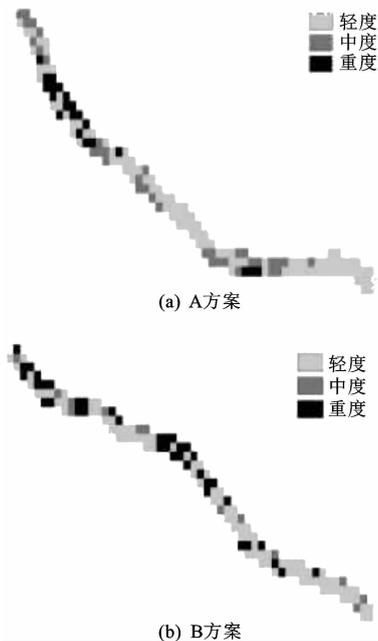


图 4 土壤流失分布

Fig. 4 Distribution of soil erosion

计算 A、B 方案的土壤流失面积

$$E_{sA}=2\,832\,200 \times 1 + 1\,011\,500 \times 5 + 606\,900 \times 9 = 13\,351\,800 \text{ m}^2$$

$$E_{sB}=2\,514\,300 \times 1 + 751\,400 \times 5 + 1\,098\,200 \times 9 = 16\,155\,100 \text{ m}^2$$

最后计算出 A、B 方案的环境值

$$E_A=E_{mA}+E_{sA}=578\,321.25+13\,351\,800=13\,930\,121.25 \text{ m}^2,$$

$$E_B=E_{mB}+E_{sB}=540\,958.55+16\,155\,100=16\,696\,058.55 \text{ m}^2。$$

#### 3.1.4 安全指标值

将比选方案分段,分别计算 A 方案和 B 方案各路段的运行速度。

$$\begin{aligned} \text{A 方案: } v_{851} &= 105.7 \text{ km/h}; v_{852} = 103.35 \text{ km/h}; \\ v_{853} &= 82.86 \text{ km/h}; v_{854} = 93.72 \text{ km/h}; \\ v_{855} &= 109.26 \text{ km/h}。 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{B 方案: } v_{851} &= 106.5 \text{ km/h}; v_{852} = 104.22 \text{ km/h}; \\ v_{853} &= 89.67 \text{ km/h}; v_{854} = 96.97 \text{ km/h}; \\ v_{855} &= 111.10 \text{ km/h}。 \end{aligned}$$

其中,  $v_{851}, v_{852}, \dots, v_{855}$  为路段运行速度编号。

最后得到 A 方案和 B 方案道路安全属性值  $S_A = 14.5, S_B = 16$ 。

### 3.2 方案评价

根据前述给出的评价指标的权重范围,对 A、B 方案的指标矩阵进行规范化处理

$$A = \begin{bmatrix} 11.91 & 45 & 453.4 & 13 & 930 & 121.25 & 14.5 \\ 7.87 & 72 & 853.4 & 16 & 696 & 058.55 & 16.0 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.661 & 1 & 1 & 0.906 \\ 1 & 0.624 & 0.834 & 1 \end{bmatrix}$$

利用模型 Model 1 和 Model 2 求出方案 A、B 的综合属性负理想值:  $z_A^{\min} = 0.768, z_B^{\min} = 0.900$ 。A、B 方案期望水平:  $\bar{z}_A = 0.805, \bar{z}_B = 0.936$

求解单目标优化模型 Model 4, 得到最优解  $\omega_0 = (0.50, 0.05, 0.05, 0.40)$ 。

进而得到 A 方案和 B 方案的综合属性值  $z_{A0}(\omega) = 0.793, z_{B0}(\omega) = 0.973$ 。

求出方案综合度  $c_0(\omega) = 0.0975$ , A 方案和 B 方案的达成度  $\varphi^0(z_A(\omega)) = 0.676, \varphi^0(z_B(\omega)) = 2.000$ 。

根据计算结果, 初始方案达成度  $\varphi_A^0 = 0.50, \varphi_B^0 = 1.00$ , 确定方案综合度的低限值  $c_0 = 0.09$ 。

求解单目标决策模型 Model 5, 得到最优解  $\omega' = (0.51, 0.06, 0.06, 0.37)$ 。

A 方案和 B 方案的综合属性分别为:  $z'_A(\omega) = 0.792, z'_B(\omega) = 0.968$ 。

方案综合度  $c'(\omega) = 0.0915$ , 并求出 A 方案和 B 方案的达成度  $\varphi'(z_A(\omega)) = 0.660, \varphi'(z_B(\omega)) = 1.852$ 。因为  $\varphi(z_{A0}(\omega)) \gg \varphi'(z_A(\omega)) \gg \varphi_A^0, \varphi(z_{B0}(\omega)) \gg \varphi'(z_B(\omega)) \gg \varphi_B^0, c'(\omega) > c_0(\omega)$ , 所以决策者对此满意, 按 Model 3 对方案进行排序, 得到 B 方案大于 A 方案, 故最优方案为 B 方案。

## 4 结 语

(1) 以路线地震风险、经济、环境、安全作为评价因子, 建立了高烈度地震区公路路线方案评价指标体系, 采用标度分值和专家打分相结合的方法, 实现了评价因子的量化转换。

(2) 引进多属性决策理论, 考虑决策者交互要求, 建立了基于方案达成度和综合度的交互式路线评价模型, 提出了高烈度地震区公路路线方案评价方法, 避免了传统路线评价方法因忽略地震风险导致的方案不合理。

(3) 以甘肃陇南某震区公路为依托, 针对两比选

方案进行了实例分析。结果表明, 路线 B 方案风险指标和安全指标分别为 7.87 和 16, 均优于 A 方案, A 方案经济和环境值略优于 B 方案, 而 A 方案达成度为 0.66, B 方案达成度为 1.852, 最优方案为 B 方案。提出的方法结果准确, 工程应用价值明显。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 袁炳祥, 谌文武, 梁收运, 等. 青藏铁路沿线活动断裂带对地质选线的影响[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 121-125.  
YUAN Bing-xiang, CHEN Wen-wu, LIANG Shou-yun, et al. The influence of active fault belts along Qinghai-Tibet railway on geologic route selection[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(2): 121-125. (in Chinese)
- [2] 韩 康. 艰险山区地震区铁路选线初步研究[J]. 铁道工程学报, 2009(2): 6-9.  
HAN Kang. Preliminary research on the railway route selection in seismic region of mountain area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(2): 6-9. (in Chinese)
- [3] 谢和平, 邓建辉, 李碧雄. 四川芦山地震灾害调查与灾后重建的相关问题分析[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 1-7.  
XIE He-ping, DENG Jian-hui, LI Bi-xiong. Investigation of lushan earthquake disasters and analysis of related problems during post-quake reconstruction in sichuan [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(2): 1-7. (in Chinese)
- [4] Massam B H, Skelton I. Application of three plan evaluation procedures to a highway alignment problem [J]. Transportation Research Record, 1986(1076): 54-58.
- [5] Kalamaras G S, Brino L, Carrieri G, et al. Application of multicriteria analysis to select the best highway alignment [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 415-420.
- [6] Jha M K. Using a geographic information system for automated decision making in highway cost analysis [J]. Transportation Research Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research, 2001(1768): 260-267.
- [7] Kim E, Jha M K, Lovell D J, et al. Intersection modeling for highway alignment optimization [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(2): 119-129.