

基于 GIS 的滇藏铁路丽江—香格里拉段工程地质条件分区研究

郭长宝^{1,2}, 张永双¹, 蒋良文³, 石菊松¹, 王 科³, 孙元帝²

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 建设综合勘察研究设计院, 北京 100007;
3. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 结合滇藏铁路丽江—香格里拉段的线路比选问题, 在综合分析区域地质背景、地形地貌、工程地质岩组、斜坡结构、地质灾害发育现状、地壳稳定性、人类工程活动、降水量、距沟谷的距离等指标因素的基础上, 通过专家打分建立了层次分析结构模型和数学模型以及计算工程地质条件指数的公式, 并计算了各影响因子的权值, 同时基于 ArcGIS 9.2 平台进行了工程地质条件分区。计算结果显示研究区工程地质条件以中等和较差为主, 基于工程地质分区结果和实际资料分析, 对丽江至香格里拉段线路的丽江南部段进行了优化。研究结果对指导研究区进行重大工程建设和规划具有指导意义。

关键词: 层次分析法; 地理信息系统; 工程地质条件评价; 铁路选线; 滇藏铁路

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2009)03-0545-08

Research on Geo-engineering Conditions of the Lijiang-Shangri-La Railway Section of the Yunnan-Tibet Railway Based on the GIS Method

GUO Chang-bao^{1,2}, ZHANG Yong-shuang¹, JIANG Liang-wen³, SHI Jü-song¹, WANG Ke³, SUN Yuan-di²

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Beijing 100007, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: According to the geo-engineering problems in the alternative lines of the Lijiang-Shangri-La railway section of the Yunnan-Tibet railway, the paper comprehensively analyzed the factors of the regional geological setting and topography, the rock group of engineering geology, the slope structure, geo-hazards developing status, the earth's crust stability, the human engineering activities, the precipitation and the distance to the valley, and established the analytic hierarchy process (AHP) and mathematical models according to the expert scoring. The paper established the computational formula of engineering geological condition index and calculated the impact factor weights, and made the engineering geological condition zoning based on the ArcGIS 9.2 platform. The calculation results show that the engineering geological conditions are mainly poor and medium in the study area. Based on the results of the engineering geological zoning and real data analysis, the paper made optimization of the southern segment of Lijiang-Shangri-La railway line. The research methods and conclusions in the paper are of good guiding and reference to the construction and planning of the project in the study area.

Key words: analytic hierarchy process (AHP); geographic information system (GIS); engineering geological evaluation; railway route selection; Yunnan-Tibet railway

收稿日期: 2009-02-23; 改回日期: 2009-04-30; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010541404); 铁道部科技研究开发计划项目(2008G027-D)。

作者简介: 郭长宝, 男, 博士研究生, 1980年出生, 地质工程专业, 主要从事工程地质和灾害地质的研究工作。

Email: guochangbao@163.com。

0 引言

滇藏铁路是我国正在规划建设的大型铁路工程之一,丽江—香格里拉段是继大理—丽江段后进行的第二段规划建设段,该段地形地貌和地质条件非常复杂,虽然经过多轮论证,线路仍难最后确定。按照初期规划(图1),滇藏铁路丽江—香格里拉段共有3个走向方案可以比选:(1)丽江—长松坪—虎跳峡上峡口—香格里拉方案(西线方案);(2)丽江—大具—白水台—小中甸—香格里拉方案(组合方案);(3)丽江—大具—白水台—天生桥—香格里拉方案(东线方案)。初步分析认为,西线方案工程地质条件相对较好,可以作为推荐方案,但该方案的工程地质条件仍很复杂且存在许多重大工程地质问题,工程建设难度大。

西南山区是我国西部开发工程建设的重点地区之一,也是工程地质条件最复杂的地区之一,随着工程建设的深入,工程地质条件的复杂程度已经成为制约工程建设的重要因素。工程地质条件一直是工程地质界研究的热点,丁继新等^[1-3]对工程地质条件的概念和应用进行了相关的研究,但基于正在规划建设的大型工程的工程地质条件分区评价方面的研究则较少。本文以滇藏铁路丽江—香格里拉段为例,阐述工程地质条件分区评价在线路比选和优化方面的应用;在区域地壳稳定性评价的基础上,将基于GIS技术的层次分析法引入到丽江—香格里拉段铁路规划区的工程地质条件评价中;充分利用GIS技术处理海量数据信息的优势,采用层次分析法模型,进行丽江—香格里拉段铁路规划区的工程地质分区评价,评价结果对铁路选线具有一定指导意义。

1 区域工程地质概况

研究区在地貌上属构造剥蚀高中山与深切河谷区,地势总体西北高、东南低。地面高程多在2 500~5 000 m,最高峰为丽江北西面的玉龙雪山,主峰扇子陡高程5 596 m,最低处为丽江以北白马厂一带金沙江河谷,高程约1 570m,河流切割深度最大可达2 000 m以上。

研究区位于中国两大地貌阶梯青藏高原东南缘向云贵高原的过渡部位,为扬子地台、松潘—甘孜块体和三江块体的结合部位,构造背景甚为复杂。在印度板块向北推挤和青藏高原南东向挤出叠加作用下,新构造运动十分强烈,表现为

强烈的垂直差异运动和块体侧向滑移,以及NW向断裂右旋位移、近SN向和NNE向断裂左旋位移的断裂活动特征^[4-5],主要断裂有鹤庆—洱源断裂带、丽江—小金河断裂带、金沙江断裂带、塔城—红岩断裂、中甸断裂带、玉龙—哈巴雪山东麓断裂、中甸—海罗断裂、龙蟠—乔后断裂带、小中甸—大具断裂带等(图1)。研究区新构造运动强烈,地震频发,上新世以来发生多次构造活动。研究区自前古生代至新生代的地质均有出露。

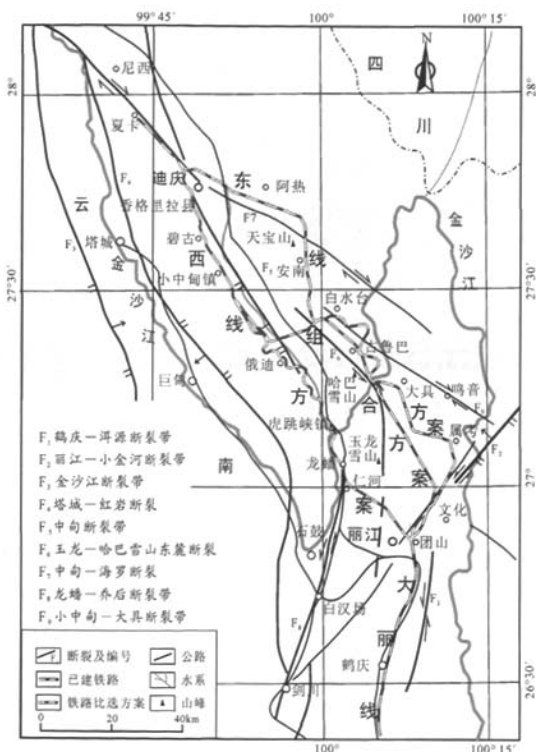


图1 滇藏铁路丽江—香格里拉段线路方案示意图

Fig. 1 The sketch map showing the plans of the Lijiang-Shangri-La section of the Yunnan-Tibet railway

2 评价方法简介

工程地质条件分区评价的核心是确定各种影响因素对工程地质条件影响的大小、分布与发育强度,计算出不同地区的工程地质条件指数作为量化指标。结合研究区的工程地质条件和实际工程规划现状,采用基于GIS的层次分析法作为工程地质分区评价的研究方法。层次分析法适用于多准则、多目标复杂问题的决策分析,可以将决策者对复杂系统的决策思维过程实行数量化,为

选出最优决策提供依据^[6]。经过多年的研究和应用实践,不少研究者开始将 GIS 技术与 AHP 方法相结合,大大提高了传统的 AHP 方法在地质研究中的应用效果^[7-9]。

本文采用基于 GIS 的工程地质条件分区评价方法,在确定研究区、研究对象和研究目标后,对各种资料进行数据处理并建立相应的空间数据库;根据研究目标的特征,分析影响目标的因素,建立目标的层次指标模型和层次结构,构造判断矩阵;在专家对影响因素进行综合评分的基础上,进行层次单排序、求解权向量和一致性检验,从而获得各指标因素值,并运用 GIS 空间分析功能提取分析因子。数据处理计算采用大型地理信息系统 ArcGIS 9.2 软件,对研究区域进行栅格化,每一个栅格作为模型评价的一个运算单元,并将数据库中的数据按照规则进行栅格化处理。再采用图形叠加的模型评价方式,将参与评价的各个因素权值分配到不同的栅格上。将各个因素进行图形叠加,对属性值进行代数运算,再将叠加后的栅格数据化生成新的图形,并形成最终评价结果。评价流程见图 2。

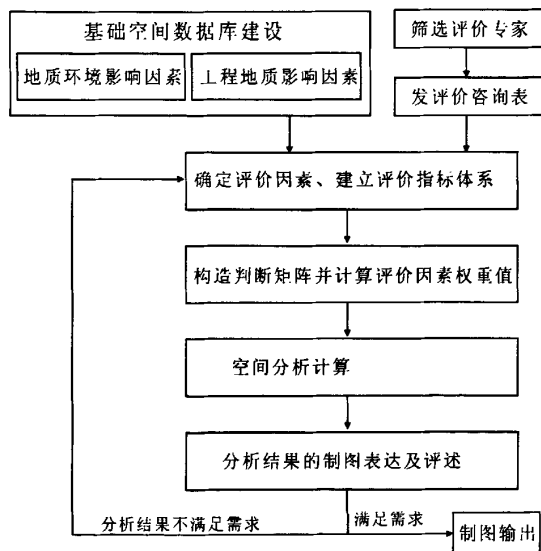


图2 基于 GIS 的层次分析法技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap of the AHP based on the GIS method

在形成工程地质评价结果的同时,利用 ArcGIS 空间计算功能,计算工程地质条件指数。工程地质条件指数的数学模型如式(1):

$$B = \sum_{j=1}^n a_j N_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: B , 工程地质条件指数; a_j , 权重; N_j , 指数。

本文将根据计算获得的工程地质条件指数值的分布范围,结合野外实际调查情况进行验证和分析,对各工程地质区域的工程地质条件进行分区评价,对铁路工程建设的影响及适宜性进行讨论和说明。

3 评价指标的确定和评价模型

3.1 评价指标的确定

研究区位于我国的西南山区,工程地质条件复杂,影响工程地质条件的因素较多,在充分考虑各种因素的基础上,选取地形地貌、工程地质岩组、斜坡结构、地质灾害发育现状、潜在震源区、活动断裂、微地貌类型(地形与铁路设计高程间的高差)、人类工程活动、降水量(主要考虑垂直降水量的差别)、与沟谷间的距离等 10 个因素作为一级评价指标。

3.2 层次结构模型

根据评价指标体系组建和操作的基本原则,采用分层递阶方法,将研究区工程地质条件评价指标体系分为总体目标层、约束层(一级指标层)、评价指标层(二级指标层)和对象层(评价对象层) 4 个层次(图 3)。

目标层是系统分析的最高层,用以表达铁路工程建设的适宜性。在本次分析中,确定工程地质条件分区是总目标。按照影响铁路工程建设的逻辑关系,分列地形坡度、工程地质岩组、斜坡结构、地质灾害发育程度、潜在震源区、活动断裂发育状况、微地貌类型、人类工程活动、降水量等方面的因素,分别考虑其对总目标的影响,这些影响因素构成约束层。在约束层的基础上,对其中各种因素具体细分,一共有 32 个指标层,这些指标层的权值在上述约束层权重计算的基础上进行划分。对象层是系统分析的最底层,在本次研究中,把工程地质条件分区作为对象层。

4 评价过程及评价结果

4.1 评价指标的量化途径

在上述评价指标确定后,充分利用 GIS 技术强大的基础数据处理和空间分析功能,在 ArcGIS 9.2 平台上形成地形坡度、工程地质岩组、斜坡结构类型区、地质灾害发育程度、潜在震源区、活动断裂、微地貌类型、人类工程活动、降水量栅

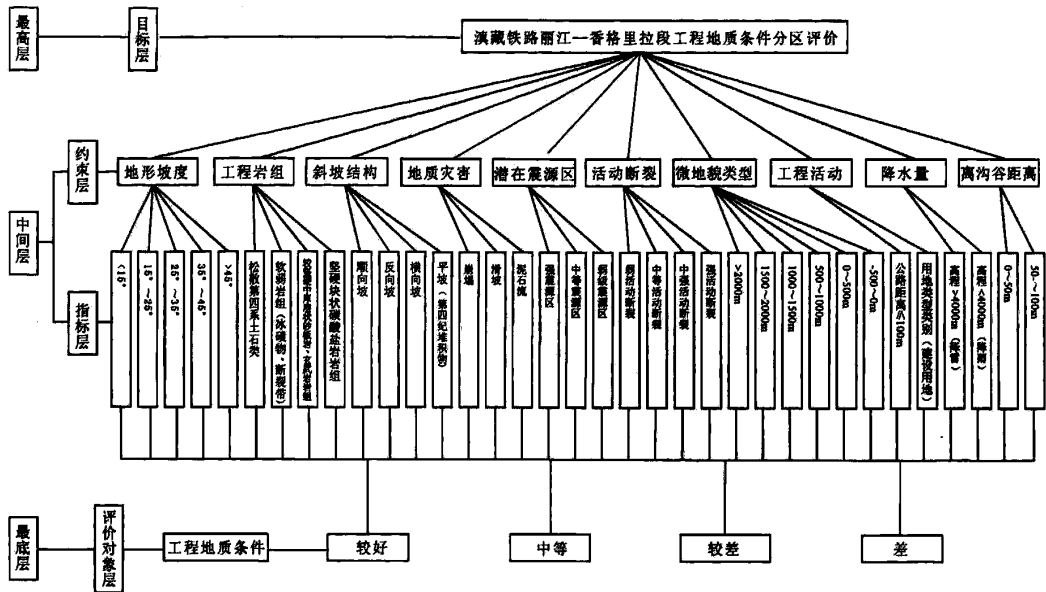


图3 研究区工程地质条件分区评价层次分析模型图

Fig. 3 The AHP model map of the engineering geological condition zoning of the study area

格、水系距离分析等相关的栅格文件格式的专题图(图4(a)~(d))。基于上述专题图层,对于能够直接量化的指标,可以在矢量化的专题图层提取相应的数据信息,然后对指标进行等级划分并赋值;对于不能直接量化的指标,采用评分比较的方法进行分区划分等级并赋值。以上可获得各评价指标的单因素等级量化结果。根据研究区范围和工程地质条件特征,将栅格大小定为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$,将 $6\,621.5\text{ km}^2$ 的研究区划分为 $2\,648\,600$ 个栅格单元。

4.2 影响因素和指标权重的确定

影响因素和评价指标的权重计算采用在专家打分法确定各影响因素影响因子大小的基础上,构造相关判断矩阵,求解得到影响因素和指标的权重,表1为在汇总分析专家打分的基础上建立的因素判断比较矩阵。经过计算, $\lambda_{\max} = 10.369$, $CI = 0.041\,0$, $RI = 1.49$, $CR = 0.027\,5 < 0.1$,符合一致性判据,各影响因素权重分配见表2。

从权重分配表中可以看出,地质灾害发育程度和活动断裂的权重在各因素中位于前列,其次是工程地质岩组,这3个因素是进行工程地质条件评价的基础,是影响铁路工程选线和建设的先决条件;地形坡度和斜坡结构是影响区域崩塌、滑坡和泥石流的重要条件,所以权重也较高;微地貌类型、人类工程活动和降水量的权值差异不大。

以上分析表明,通过专家打分法和层次分析法相结合确定的影响因素权重是符合客观实际的。

在各影响因素权值确定的基础上,对各评价指标层进行权重划分和赋值(表3),其中,活动断裂指标又按照与活动断裂间的远近程度进行了距离分析,不同距离范围的权值见表4。数值的大小表示其对铁路工程地质条件的影响程度,数值越大,表示该因素越不利于铁路工程建设。

4.3 评价计算和结果分析

4.3.1 计算过程

利用ArcGIS软件空间分析的空间信息再分类功能,按照评价指标权重对各个栅格文件的不同属性类别进行赋值。采用ArcGIS软件的栅格计算功能,对经过空间信息再分类处理的10个影响因素的栅格文件进行各栅格权重值的求和运算,根据式(1)计算每个栅格的工程地质条件指数值。计算结果表明研究区内各栅格的工程地质条件指数值分布在 $0.054 \sim 0.303$ 之间,集中分布在 $0.080 \sim 0.230$ 之间,平均值为 0.150 ,标准差为 0.034 ,变异系数为 0.227 。工程地质条件指数值分布的平稳性较好,反映了工程地质条件在区域上的变化具有一定的递变性,与实际工程地质情况相符。

综合考虑计算结果、野外地质调查和工程地质勘察资料,确定了用于进行工程地质条件分区的指数阈值,将研究区工程地质条件分为较好(B

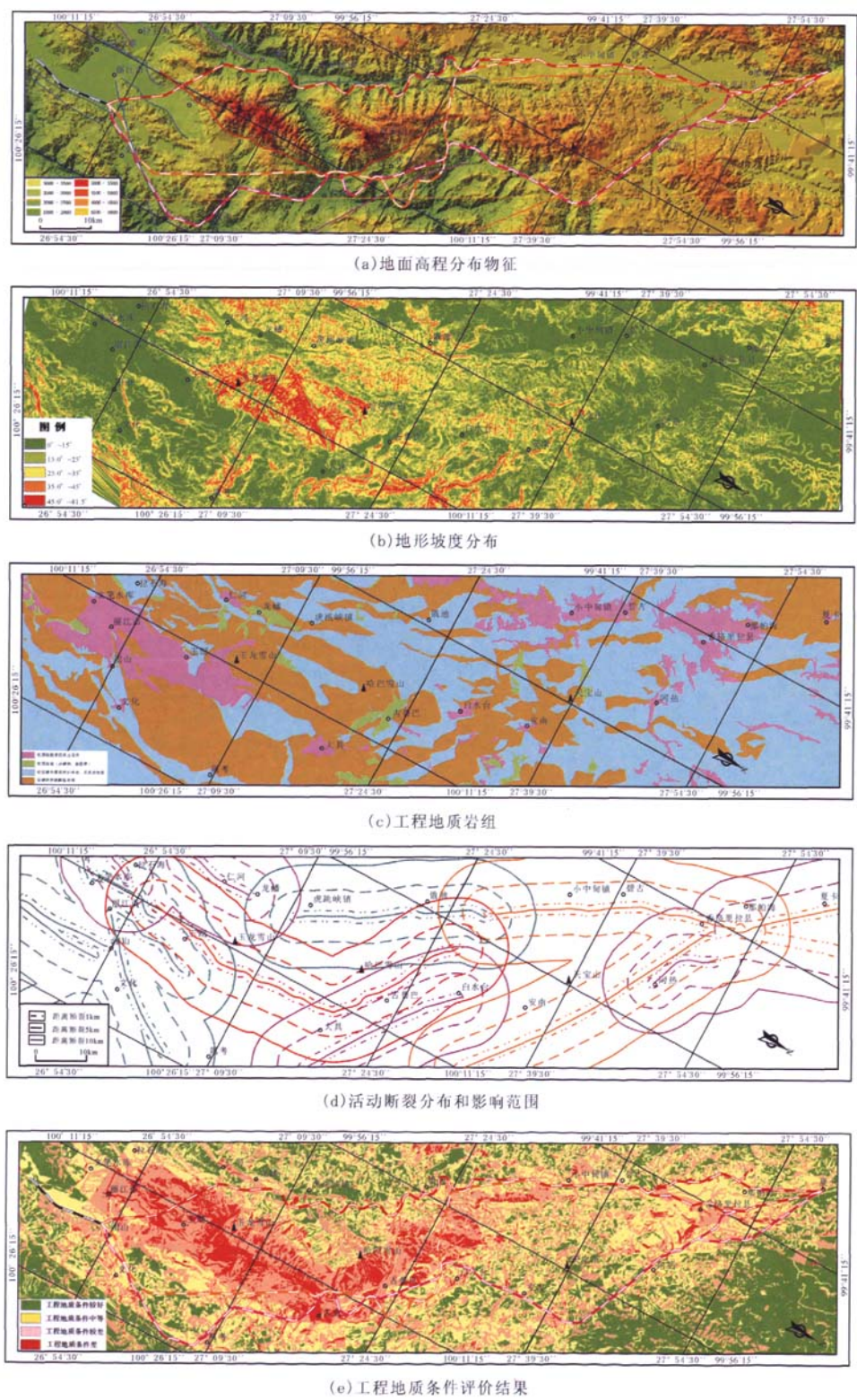


图 4 研究区工程地质分区专题图及评价结果图

Fig. 4 Thematic maps of geo-engineering condition zoning and evaluation results

表 1 研究区工程地质条件影响因素比较矩阵
Table 1 The comparison matrix of the engineering geological influencing factors of the study area

因素	地形坡度	工程岩组	斜坡结构	地质灾害	潜在震源区	活动断裂	微地貌类型	工程活动	降水量	离沟谷距离
地形坡度	1	1/2	1/2	1/2	1/3	1/5	3	2	5	3
工程岩组	2	1	2	1	3	1/2	7	6	8	7
斜坡结构	2	1/2	1	1/2	2	1/4	4	4	6	6
地质灾害	2	1	2	1	2	1/3	5	5	7	6
潜在震源区	3	1/3	1/2	1/2	1	1/4	2	2	6	5
活动断裂	5	2	4	3	4	1	8	8	9	9
微地貌类型	1/3	1/7	1/4	1/5	1/2	1/8	1	1	3	2
工程活动	1/2	1/6	1/4	1/5	1/2	1/8	1	1	2	2
降水量	1/5	1/8	1/6	1/7	1/6	1/9	1/3	1/2	1	1
离沟谷距离	1/3	1/7	1/6	1/6	1/5	1/9	1/2	1/2	1	1

表 2 研究区工程地质条件影响因素权重分配表
Table 2 The distribution sheet of the engineering geological condition weighting factors of the study area

因素	地形坡度	工程岩组	斜坡结构	地质灾害	潜在震源区	活动断裂	微地貌类型	工程活动	降水量	离沟谷距离
权重	0.07	0.17	0.12	0.20	0.12	0.18	0.04	0.05	0.02	0.03

≤0.130)、中等(0.130 < B ≤0.155)、较差(0.1550 < B ≤0.200)和差(0.200 < B ≤0.310)4 级,并在 ArcGIS 软件平台自动生成工程地质条件区划栅格图,经过局部平滑和噪音处理,获得研究区铁路规划区的工程地质条件计算成果图(图 4(e))。

4.3.2 结果分析

根据研究区工程地质条件评价结果图(图 4(e))和相关工程地质资料,将各分区中的主要工程地质问题分析如下。

(1)工程地质条件差。该类分区主要分布于玉龙雪山东麓文笔水库—丽江市西侧—玉湖—玉龙雪山—大具—哈巴雪山(古鲁巴)—俄迪条带状区域内,在香格里拉县城附近及仁河—龙蟠一带也有小面积分布。影响本类工程地质分区的最主要因素是活动断裂,突出表现为与强活动断裂距离较近,特别是在强活动断裂 1 km 范围内,如玉龙雪山东麓和哈巴雪山中部地区;在多条断裂相交或近于相交的地区工程地质条件亦较差,如丽江市县城至文笔水库一带处于多条中等—强活动断裂的交汇部位,在该区域内工程地质条件差;地质灾害发育地带、软弱松散第四系土石类、顺向坡及斜坡坡度大于 45°的地带一般也位于工程地质条件差的区域。该类分区约占研究区总面积的 6.52%。

(2)工程地质条件较差。该类分区主要分布在工程地质条件差区域的外围,其一方面受活动断裂的影响,多位于距活动断裂 1~5 km 的范围内;另一方面,虽然部分区域与强活动断裂之间的距

离小于 1 km,如玉湖和古鲁巴附近,但由于地形较平坦或斜坡平缓,工程地质岩组和斜坡结构好,远离沟谷影响,因而工程地质条件属较差级。此外,在仁和以西的虎跳峡镇至哈巴雪山之间的顺向坡发育地带工程地质条件较差,这些地区斜坡结构因素起主导作用。该类分区约占研究区总面积的 32.24%。

(3)工程地质条件中等。该类分区多呈点状和块状分布,在丽江市团山地区、拉市海一带、月亮坪—俄迪一带、小中甸镇—碧古—阿热一带以及那帕海地区分布较多。该类工程地质条件分区多位于中等活动断裂和弱活动断裂的影响范围内,距离沟谷水系近,地质灾害较发育,地形坡度小、斜坡结构一般。该类分区约占评估区总面积的 32.41%。

(4)工程地质条件较好。该类分区主要分布在 4 个地带,即虎跳峡镇一带、团山—文化村一带、安南地区和阿热北部区域,在研究区其他区域仅零星分布。该类地区远离活动断裂带,地质灾害不发育,工程地质岩组以较坚硬中厚层状砂板岩、玄武岩岩组和坚硬块状碳酸盐岩岩组为主,地形坡度一般小于 15°,斜坡结构好,以横向坡、反向坡和平坡为主。该类分区约占研究区总面积的 28.83%。

5 线路方案工程地质条件评价和优化

从工程地质分区图(图 4(e))可以看出,研究

表3 研究区工程地质条件评价指标的权重计算结果表
Table 3 The calculated results of the evaluation index weight of engineering geological conditions of the study area

总目标层	因素类别	约束层		指标层		
		影响因素	权值	评价指标	权重/%	权值
滇藏铁路丽江—香格里拉段工程地质条件分区	地质环境因素	地形坡度	0.07	<15°	7	0.005
				15°~25°	12	0.008
				25°~35°	17	0.012
				35°~45°	27	0.019
				>45°	37	0.026
		工程岩组	0.17	软弱松散第四系土石类	41	0.070
				软弱岩组(冰碛物、断裂带)	29	0.050
				较坚硬中厚层状砂板岩、玄武岩岩组	18	0.030
				坚硬块状碳酸盐岩岩组	12	0.020
		斜坡结构	0.12	顺向坡	58	0.070
				反向坡	9	0.010
				横向坡	25	0.030
				平坡(第四纪堆积物)	8	0.010
		地质灾害发育程度	0.20	崩塌	40	0.080
				滑坡	35	0.070
				泥石流	25	0.050
		潜在震源区	0.12	强震源区	50	0.060
				中等震源区	33	0.040
				弱震源区	17	0.020
		活动断裂	0.18	强活动断裂	44	0.080
				中强活动断裂	28	0.050
				中等活动断裂	17	0.030
				弱活动断裂	11	0.020
		微地貌类型 (地形与铁路设计 高程高差)	0.04	>2 000 m	35	0.014
				1 500~2 000 m	30	0.012
				1 000~1 500 m	10	0.004
				500~1 000 m	8	0.003
				0~500 m	5	0.002
				-500~0 m	12	0.005
	外部因素	人类工程活动	0.05	公路距离≤100 m	60	0.030
				用地类型类别(建设用地)	40	0.020
		降水量 (垂向差异)	0.02	高程>4 000 m	45	0.009
				高程≤4 000 m	55	0.011
		与沟谷间的距离	0.03	0~50 m	60	0.018
				50~100 m	40	0.012
权值总计		1.00			1.000	

注：活动断裂权值在按活动性分级的基础上再按照表4进行距离因素的权重赋值。

表4 研究区活动断裂与铁路距离因素的权重赋值
Table 4 The weight assignment according to the factors of the distances from the active faults to the railway

与断裂距离/km	权重								
	丽江—剑川断裂带	龙蟠—乔后断裂带	哈巴—玉龙雪山东麓断裂带	丽江盆地东缘断裂	中甸断裂带		小中甸—大具断裂带	中甸—海罗断裂带	金沙江断裂带
					北段和中段	南东段			
<1	0.010	0.020	0.040	0.010	0.035	0.010	0.015	0.027	0.015
1~5	0.006	0.012	0.030	0.006	0.015	0.006	0.009	0.015	0.009
5~10	0.004	0.008	0.010	0.004	0.010	0.004	0.006	0.008	0.006
>10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

区内工程地质条件差的区域集中分布在丽江县城至古鲁巴条带状区域内,丽江—香格里拉段铁路东线方案、西线方案和组合方案都不可避免地通过这些区域。其中,东线方案工程地质条件较好段约占10%,工程地质条件中等段约占40%,工程地质条件较差段约占30%,工程地质条件差段约占20%;主要工程地质问题是大具盆地段位于哈巴—玉龙雪山东麓断裂5 km影响范围内,斜坡结构以顺向坡为主,滑石板滑坡和金沙江深切河谷的地貌特征增加了工程地质条件的复杂程度,阿热到香格里拉段位于中甸断裂的影响范围内。西线方案工程地质条件较好段约占10%,工程地质条件中等段约占20%,工程地质条件较差段约占30%,工程地质条件差段约占40%;主要工程地质问题是线路在丽江盆地内与玉龙雪山东麓断裂斜交,尤以小玉龙附近影响最大,从小玉龙附近开始,铁路设计高程和玉龙雪山山体之间的高差大,铁路呈NW向以隧道(玉峰寺隧道)形式通过玉龙雪山,隧道最大埋深达1 000 m以上,受这两种因素的控制,该段工程地质条件差。组合方案工程地质条件较好段约占15%,工程地质条件中等段约占25%,工程地质条件较差段约占30%,工程地质条件差段约占30%,该方案与哈巴—玉龙雪山东麓断裂近立交,延伸至俄迪一带,影响本方案的突出地质问题是活动断裂。

在上述工程地质条件分区和线路规划方案分析的基础上,认为西线方案可以作为丽江—香格里拉段铁路推荐线路方案,但该方案南段存在较大工程地质问题——玉龙雪山活动断裂影响和玉峰寺深埋隧道,需要进一步优化。根据工程地质分区评价结果,建议西线方案由原来的从团山附近接入大丽线(大理—丽江铁路)改为从丽江市南端太平村附近接入,线路总体走向为太平村—中吉村—文笔水库—下长水—三家村—仁河—中义—龙蟠,在龙蟠处接原西线方案,这样,可以减弱玉龙雪山东麓断裂对铁路的影响以及避免玉峰寺深埋隧道引起的相应的重大工程地质问题。

6 结 语

基于 ArcGIS 平台和层次分析法对滇藏铁路丽江—香格里拉段的工程地质条件进行了分区与评价研究,得到如下认识:

(1)滇藏铁路丽江—香格里拉段地形地貌和地

质条件非常复杂,新构造运动强烈,影响铁路工程地质条件的因素较多,主要有地形坡度、工程岩组、斜坡结构类型、地质灾害发育程度、潜在震源区、活动断裂、微地貌类型、人类工程活动、降水量、水系距离等10个因素。

(2)经过专家打分法和层次分析法计算认为地质灾害发育程度和活动断裂的权重在各评价因素中位于前列,其次是工程地质岩组,这3个因素是进行工程地质条件评价的基础,是影响铁路工程选线和建设的先决条件。

(3)根据计算所得的工程地质条件指数值分布范围和野外实际调查结果,将研究区工程地质条件分为差、较差、中等和较好等4类。工程地质条件差的地区约占总面积的6.52%,该类地区集中在玉龙雪山东麓和哈巴雪山地区;工程地质条件较差的地区约占研究区总面积的32.24%,在研究区内分布面积较大;工程地质条件中等的地区约占研究区总面积的32.41%;工程地质条件较好的地区约占研究区总面积的28.83%。

(4)综合分析表明西线方案的工程地质条件总体优于其他比选方案,基于评价结果对西线线路方案进行了优化,优化后的方案减弱了玉龙雪山东麓断裂对铁路的影响,可避免玉峰寺深埋隧道引起的工程地质问题。

参考文献:

- [1] 丁继新,周圣华,杨志法,等.川藏公路南线然乌—鲁朗段工程地质分区[J].自然灾害学报,2005,14(5):154-161.
- [2] 陈俊仁,黄志玮.南海珠江口盆地工程地质分区与评价[J].工程地质学报,1994,2(2):18-28.
- [3] 方鸿琪,杨国中.工程场地的特征与工程地质分区[J].工程地质学报,2002,10(3):244-247.
- [4] 张永双,胡道功,吴中海,等.滇藏铁路沿线地壳稳定性调查评价[R].北京:中国地质科学院地质力学研究所,2008.
- [5] 郭长宝.滇藏铁路金沙江河谷段工程地质条件研究[D].北京:中国地质科学院地质力学研究所,2007.
- [6] Harris J R, Wilkinson L, Grunsky E C. Effective use and interpretation of lithogeochemical data in regional exploration programs[J]. Ore Geology Reviews, 2000, 16: 107-143.
- [7] 刘振军.层次分析法在青藏高原中西部航磁异常分类及找矿预测中的应用[J].物探与化探,2001,25(3):161-167.
- [8] 石菊松,张永双,董诚,等.基于GIS技术的巴东新城区滑坡灾害危险性区划[J].地球学报,2005,26(3):275-282.
- [9] 彭省临,刘亮明,赖健清,等.层次分析法在矿床大比例尺定位预测中的应用——以铜陵凤凰山铜矿为例[J].大地构造与成矿学,2005,29(1):71-77.