

文章编号: 1108-2786-(2017)1-57-11  
DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000196

# 川藏公路冷曲河段工程地质评价与分区

杨伟<sup>1</sup>, 崔鹏<sup>2,\*</sup>, 邹强<sup>2,3</sup>

(1. 中国电建集团 昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;  
2. 中国科学院水利部 成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;  
3. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 川藏公路冷曲河段工程地质条件差, 地质灾害频发, 严重影响行车安全和公路改扩建工程。深入系统地认识冷曲河廊道工程地质条件是保障工程建设和交通安全的科学基础。本文在工程地质条件分析的基础上, 依据工程地质条件的差异进行了定性的工程地质分区与评价; 选取坡度、地形起伏度、岩土体内摩擦角与粘聚力、断裂密度与活动性、外动力作用、水文地质条件等作为评价指标, 利用层次分析法确定指标的权重值; 采用工程地质指数与集对分析模型分别对工程地质区及亚区进行定量评价; 将定量评价结果与定性评价结果进行对比并用公路灾害线密度进行验证, 得出了较为合理的工程地质分区与评价结果; 将研究区工程地质条件分为 3 个区和 6 个亚区, 并编制了廊道工程地质分区图, 结果可为川藏公路工程整治及防灾减灾提供参考。

**关键词:** 川藏公路; 工程地质分区; 工程地质指数; 集对分析; 滑坡; 泥石流  
**中图分类号:** P694 **文献标志码:** A

川藏公路(南线)是国道 318 线的一部分, 东起成都, 西至拉萨, 全长 2 155 km, 是连接西藏与四川的重要交通命脉, 对促进川藏两地的物资、经济、文化交流起着纽带作用, 对西藏发展与国防安全具有重要的意义。由于川藏公路修建较早, 等级较低, 抗灾能力薄弱, 灾害发育路段经常断道, 不能正常运行, 造成严重经济损失<sup>[1]</sup>。川藏公路冷曲河段位于藏东横断山区, 为高山峡谷地貌, 具备了地质灾害发生所需要的地质地貌条件, 崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发, 是川藏公路灾害较为严重的路段。进行公路廊道工程地质分区与评价研究, 可以为公路改扩建工程和公路灾害防治提供基础数据和科学依据。

工程地质分区可以为工程设计以及灾害防治提供基础支撑, 是工程建设的重要环节和工程地质界

关注的问题<sup>[2,3,4,5,6,7,8]</sup>。例如, 杨志法<sup>[9]</sup>等以川藏公路八宿至林芝段为例, 运用关系矩阵法进行了工程地质分区, 为该路段地质灾害危险性区划提供了依据。很多学者的工作, 不断推进工程地质分区研究的发展, 使得我国工程地质分区不断完善。然而, 以往的研究大多数针对区域的工程地质进行分区与评价, 针对公路廊道的工程地质分区并不多见。本文以川藏公路冷曲河段为例, 在工程地质条件差异的原则上进行初步的工程地质分区与评价, 然后基于工程地质指数和联系度分别对区及亚区进行定量工程地质评价, 最后利用灾害的分布现状进行验证, 得出合理的分区与评价结果。

## 1 研究区工程地质概况

收稿日期(Received): 2015-10-27; 改回日期(Accepted): 2016-06-02。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金国际合作重点项目(41520104002); 国家科技支撑计划(2014BAL05B01) [NSFC (41520104002); Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program (2014BAL05B01)]

作者简介(Biography): 杨伟(1986-), 男(汉族), 江西省吉安人, 硕士, 工程师, 研究方向为地质灾害与工程地质 [Yang Wei(1986-), male, born in Jiangxi Province, M. Sc., engineer, major in geological hazards and engineering geology] E-mail: wendyyangwei@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 崔鹏(1957-), 博士, 研究员, 研究方向: 自然地理、山地灾害和水土保持 [Cui Peng(1957-), Ph. D., professor, specialized in physical geography, mountain hazards, water and soil conservation] Email: pengcui@imde.ac.cn

### 1.1 地貌特征

冷曲河流域位于藏东横断山区,为怒江一级支流,全长 110 km,流域面积 3 230 km<sup>2</sup>。冷曲在怒江的入汇口海拔 2 646 m,分水岭海拔 5 899 m,相对高差 3 253 m。区域海拔高差较大,河流下切作用强烈,形成独特的高山峡谷地貌,吉达至 69 道班地段,河流切深,地形坡度大,尤其是与怒江交汇处至 69 道班之间表现得更显著;吉达以南,河流切割幅度变小,地形坡度变缓。I 级河流阶地在冷曲两岸断续分布,阶地海拔 4 000 m 左右,总体呈现出上游高、下游低的特点,阶地主要由全新世河流冲积物构成,多为内叠阶地,堆积厚 10~60 m 不等。

### 1.2 地质构造

冷曲河流域大部分位于班公湖-怒江缝合带与狮泉河-嘉黎构造带之间的岗底斯念青唐古拉陆块,少量位于班公湖-怒江缝合带与双湖-澜沧江缝合带之间的南羌塘-左贡陆块。受印度板块俯冲欧亚板块的影响,该区构造变形较复杂,褶皱和断裂均很发育,构造线方向与班公湖-怒江缝合带方向基本一致。冷曲流域处于喜马拉雅山脉、横断山脉和念青唐古拉山脉三大山脉的交汇处,经受多期次构造变形作用,岩体挤压强烈,断层节理发育。据 1:25 万区域地质调查报告八宿幅,区内主要发育有

三大逆冲断层:拉不学断层、洛隆-八宿断裂、向巴断裂,其他断裂也比较发育,对区域稳定性有一定的影响<sup>[10]</sup>。根据 1:25 万区域地质调查报告(八宿幅)电子版资料中断层的分布情况,利用 ArcGIS 软件绘制了冷曲河流域的断层分布图(图 1)。

### 1.3 岩土体类型

川藏公路冷曲河段沿线出露的岩石主要有三大类:以砂岩为主的沉积岩、以花岗闪长岩和二长花岗岩为主的火成岩、以板岩为主的变质岩,以及多种成因的第四纪松散堆积物。其中,砂岩主要分布于 69-73 道班之间,岩体多呈层状,坡面风化强烈,在降雨的冲刷下坡面侵蚀较严重;花岗闪长岩和二长花岗岩主要出露于 73-75 道班之间,融冻风化作用明显,岩石中节理裂隙发育,岩体主要呈块状;板岩主要发育于冷曲河出口-69 道班和 77-79 道班之间,呈层状分布,易风化。冷曲河流域自第四纪以来发生过冰川作用,流域第四纪松散堆积物较发育,为地质灾害的形成提供了大量松散物源。

### 1.4 新构造运动

上白垩统与下第三系朱村组岩性主要为中酸性火山岩和火山碎屑岩,与下白垩统地层呈不整合接触,可以推断晚白垩纪~早第三纪之间,雅鲁藏布江板块向北俯冲、碰撞,并伴有火山活动,该次碰撞造

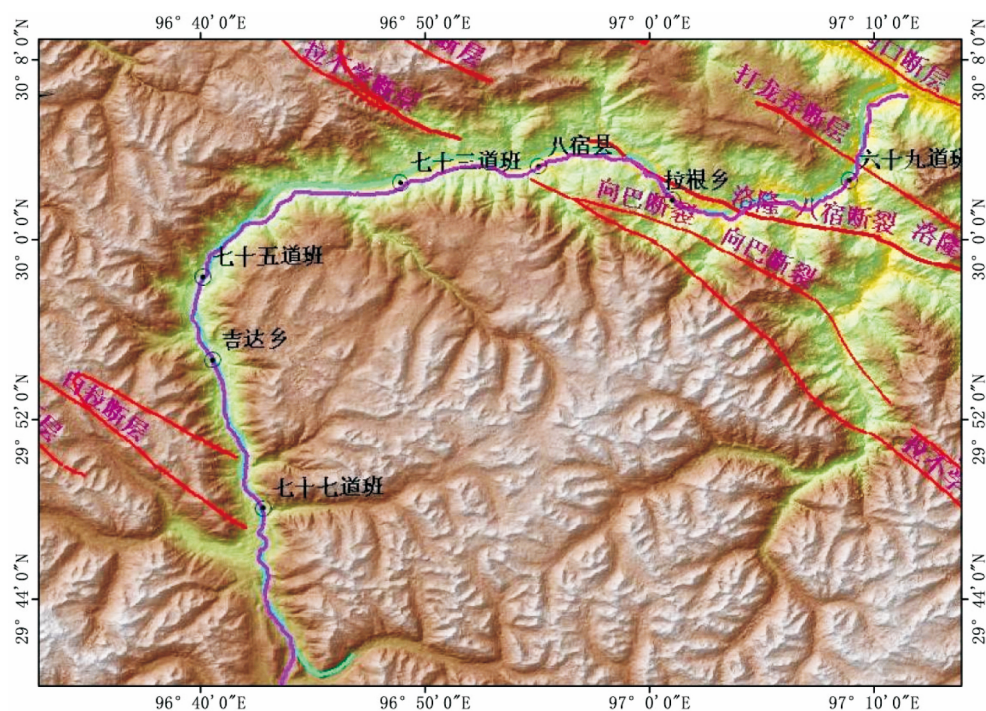


图 1 冷曲河流域断层分布图

Fig. 1 Faults in the Lengqu River basin

山作用形成了一系列北西向展布的拗陷带<sup>[10-11]</sup>。

区内的新构造运动是在早第三纪老构造运动上继承和发展的。随着雅鲁藏布江板块向北碰撞与挤压,地层发生了强烈的褶皱与变形,在拗陷带沉积了上第三系拉屋拉组,并伴随有喜山期酸性岩浆侵入活动,较老地层超覆在拉屋拉组地层上,说明了区域内新构造运动以挤压碰撞为主<sup>[11]</sup>。

### 1.5 地震

研究区内新断层较少,主要是以老断裂的继承性活动为主。受通麦-林芝地震带影响,地震作用频繁,场地基本地震烈度为Ⅶ度。据《喜马拉雅-冈底斯造山带新构造图》<sup>[12]</sup>(成都地质矿产研究所2005),本区及周边历史上曾发生6.0~6.9级地震4次,5.0~5.9级地震17次,4.0~4.9级地震36次,属地震频发区。

### 1.6 外动力地质作用

该流域冬春季气候干燥寒冷,昼夜温差较大,风化作用及冻融侵蚀强烈;夏秋季温暖且降雨集中,坡面冲刷、河流侵蚀较严重,尤其是坡度较大的峡谷路段,外动力作用表现更加强烈。

### 1.7 水文地质条件

冷曲河流域处于半干旱季风气候区,降水量少,蒸发量大。冷曲河流域地表水比较匮乏;上游高海拔地区有少量冰雪覆盖,能够提供冰雪融水。流域内地下水按岩土体介质、储藏条件及水力性质,主要可分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类。孔隙水主要分布于冲积、冲洪积、冰碛、残坡积等松散堆积层,主要由降雨、冰雪融水和地表水补给;基岩裂隙水主要分布于节理、裂隙较多的板岩、千枚岩、二长花岗岩等基岩中。在寒冻气候下易于产生冻胀,加速节理与裂隙的扩张,风化作用也因而加强,降低岩土体的稳定性。

## 2 工程地质评价方法与模型

### 2.1 工程地质区的评价方法

工程地质评价的关键在于确定各工程地质条件的差异及其对工程的影响权重。可采用工程地质指数(EGCI)来衡量工程地质条件的综合情况<sup>[3]</sup>。首先采用层次分析法确定各工程地质条件的权重,然后针对实际工程地质条件进行赋值,最后计算出工程地质指数,其计算公式如下:

$$EGCI_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i A_{ij} \quad (1)$$

式中  $EGCI_j$  为第  $j$  区的工程地质指数;  $i$  为主要影响因素;  $i=1 \sim n$ ,  $\alpha_i$  为  $i$  因素权重值;  $A_{ij}$  为第  $j$  区  $i$  因素的值。

### 2.2 工程地质亚区的评价方法

采用集对分析法(SPA)进行工程地质亚区的评价<sup>[13]</sup>。集对分析法源于哲学中的对立统一观点,将其用于评价的基本思想是把具有关联的集合评价指标  $\{A_j, j=1, 2, 3, \dots, m\}$  与评价标准  $\{B_k, k=1, 2, 3, \dots, n\}$  构造成一个集对,进行同一性、差异性、对立性的定量分析,集对之间的关系主要用联系度来表示,计算公式如下:

$$u_{A \sim B} = a + b_i + c_j \quad (2)$$

式中:  $a$ 、 $b$  和  $c$  分别为同一度、差异度和对立度,都为非负值且  $a + b + c = 1$ 。  $i$  为差异度系数,根据实际情况在  $(-1, 1)$  取值;  $j$  为对立系数,且  $j = -1$ 。可将公式(2)拓展为:

$$u_{A_j \sim B_k} = a_j + b_{j,1}i_1 + b_{j,2}i_2 + b_{j,3}i_3 + \dots + b_{j,k-2}i_{k-2} + c_jj \quad (3)$$

式中  $a_j$ 、 $b_{j,1}$ 、 $b_{j,2}$ 、 $\dots$ 、 $b_{j,k-2}$ 、 $c_j$  等参数的意义可以分别理解为指标值  $x_j$  隶属于  $1, 2, 3, \dots, k-1, k$  级标准的可能程度。由于  $u_{A_j \sim B_1}$  信息量最全,只需要计算  $u_{A_j \sim B_1}$  即可。集对的  $K$  元联系度可表示如下<sup>[14]</sup>:

$$u_{A_j \sim B_k} = \sum_{j=1}^m w_j u_{A_j \sim B_1} = \sum_{j=1}^m w_j a_j + \sum_{j=1}^m w_j b_{j,1}i_1 + \sum_{j=1}^m w_j b_{j,2}i_2 + \dots + \sum_{j=1}^m w_j b_{j,k-2}i_{k-2} + \sum_{j=1}^m w_j c_jj = \sum_{j=1}^m f_1i_1 + \sum_{j=1}^m f_2i_2 + \sum_{j=1}^m f_3i_3 + \dots + \sum_{j=1}^m f_{k-1}i_{k-2} + \sum_{j=1}^m f_kj \quad (4)$$

式中:  $w_j$  为评价指标  $A_j$  的权重;  $f_1 = \sum_{j=1}^m w_j a_j$ ,  $f_2 = \sum_{j=1}^m w_j b_{j,1}$ ,  $f_3 = \sum_{j=1}^m w_j b_{j,2}$ ,  $\dots$ ,  $f_{k-1} = \sum_{j=1}^m w_j b_{j,k-2}$ ,  $f_k = \sum_{j=1}^m w_j c_j$ 。判断评价样本的好差等级主要采用置信度准则<sup>[15]</sup>:

$$h_k = (f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_k) \geq \lambda, k=1, 2, 3, \dots, k \quad (5)$$

式中  $\lambda$  为置信度,取值范围通常为  $0.5 < \lambda < 1$ ,一般在  $[0.5, 0.7]$  间取值<sup>[15]</sup>。将  $k$  级好差评价等级标准的临界值设为  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_{k-1}$ ,则评价等级标准如表1所示。

将工程地质好差分为5级,即1-好、2-较好、3-中等、4-较差、5-差。

根据评价指标与评价等级的关系而采用不同的计算公式,对于大则优的指标而言,则  $u_{jk}$  计算公式如下<sup>[16]</sup>:

表 1 评价指标等级标准

Tab. 1 Grades of evaluation index

| 分级标准  | 1       | 2              | 3              | …… | $k-1$                  | $k$         |
|-------|---------|----------------|----------------|----|------------------------|-------------|
| 等级标准值 | $< d_1$ | $d_1 \sim d_2$ | $d_2 \sim d_3$ | …… | $d_{k-2} \sim d_{k-1}$ | $> d_{k-1}$ |

$$u_{A_1 \sim A_1} = \begin{cases} 1 & x_j \geq d_1 \\ \frac{2x_j - d_1 - d_2}{d_1 - d_2} + \frac{2d_1 - 2x_j}{d_1 - d_2} i_1, & \frac{d_1 + d_2}{2} \leq x_j < d_1 \\ \frac{2x_j - d_2 - d_3}{d_1 - d_3} i_1 + \frac{d_1 + d_2 - 2x_j}{d_1 - d_3} i_2, & \frac{d_2 + d_3}{2} \leq x_j < \frac{d_1 + d_2}{2} \\ \frac{2x_j - d_3 - d_4}{d_2 - d_4} i_2 + \frac{d_2 + d_3 - 2x_j}{d_2 - d_4} i_3, & \frac{d_3 + d_4}{2} \leq x_j < \frac{d_2 + d_3}{2} \\ \frac{2x_j - 2d_4}{d_3 - d_4} i_3 + \frac{d_3 + d_4 - 2x_j}{d_3 - d_4} j, & d_4 \leq x_j < \frac{d_3 + d_4}{2} \\ 1_j & x_j < d_4 \end{cases}$$

式中:  $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_4$  (6)

对于小则优的指标, 则  $u_{j_k}$  计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$u_{A_1 \sim A_1} = \begin{cases} 1 & x_j \leq d_1 \\ \frac{d_1 + d_2 - 2x_j}{d_2 - d_1} + \frac{2x_j - 2d_1}{d_2 - d_1} i_1, & d_1 < x_j < \frac{d_1 + d_2}{2} \\ \frac{d_2 + d_3 - 2x_j}{d_3 - d_1} i_1 + \frac{2x_j - d_1 - d_2}{d_3 - d_1} i_2, & \frac{d_1 + d_2}{2} < x_j \leq \frac{d_2 + d_3}{2} \\ \frac{d_3 + d_4 - 2x_j}{d_4 - d_2} i_2 + \frac{2x_j - d_2 - d_3}{d_4 - d_2} i_3, & \frac{d_2 + d_3}{2} < x_j \leq \frac{d_3 + d_4}{2} \\ \frac{2d_4 - 2x_j}{d_4 - d_3} i_3 + \frac{2x_j - d_3 - d_4}{d_4 - d_3} j, & \frac{d_3 + d_4}{2} < x_j \leq d_4 \\ 1_j & x_j > d_4 \end{cases}$$

式中:  $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_4$  (7)

3 工程地质分区与评价

3.1 工程地质定性分区

根据野外调查及资料<sup>[9-11]</sup>, 研究区的基本工程地质条件, 如表 2 所示。根据地质构造活跃程度及河谷宽阔程度, 初步将川藏公路冷曲河段划分为三个大区。根据地层岩性及公路两岸斜坡的坡度, 将其共划分为 6 个亚区。根据各区、亚区的实际工程地质情况(表 2), 进行工程地质评价。结果见表 3。

3.2 工程地质定量分区评价

3.2.1 指标选择

川藏公路冷曲河段位为同一河谷区, 线路距离较短, 地形地貌条件、地层岩性、地质构造、地震、外动力作用及水文地质条件是影响工程地质条件的主要因素。

该路段在大的地貌单元上为青藏高原的高山峡谷地貌, 但局部地貌仍具有较大的差别。河谷的宽阔程度影响着局部公路工程的布设, 峡谷两岸山坡坡度与起伏度影响着斜坡的稳定性, 坡度与起伏度较大利于崩塌、滑坡灾害的发育, 进而影响到工程的

表 2 各分区工程地质条件概况

Tab. 2 Engineering geological conditions of each evaluated zone

| 工程地质条件区号 | 地形地貌                                    | 工程地质岩组         | 地质构造                | 水文地质条件                  | 外动力作用        |
|----------|---|----------------|---------------------|-------------------------|--------------|
| I        | I <sub>1</sub> 峡谷地貌, 坡度很陡               | 千枚岩岩组          | NWW 向断裂发育且密度大, 活动性强 | 基岩裂隙水                   | 河流侵蚀         |
|          | I <sub>2</sub> 峡谷地貌, 坡度较陡               | 砂岩、砾岩组         | NWW 向断裂发育           | 孔隙水                     | 河流侵蚀<br>物理风化 |
| II       | II 中等宽度河谷地貌                             | 砂岩、砾岩岩组、冲洪积物岩组 | 红色盆地                | 冲洪积物含孔隙水                | 河流侧蚀         |
| III      | III <sub>1</sub> 冷曲上游, 中等宽度河谷地貌, 近高原夷平面 | 花岗闪长岩岩组        | 康玉 - 扎西则陆源火山 - 岩浆弧  | 以冰雪融水为主                 | 物理风化为主       |
|          | III <sub>2</sub> 较开阔河谷地貌, 近高原夷平面        | 板岩岩组           | NW 向白拉断层            | 地下水埋深大, 以冰雪融水为主, 孔隙水较丰富 | 物理风化为主       |
|          | III <sub>3</sub> 开阔河谷、高原夷平面             | 板岩岩组大理岩岩组      | 松宗 - 巴弧背断隆北翼        | 冰雪丰富、基岩裂隙水              | 冻融风化         |

表 3 川藏公路冷曲河段初步工程地质分区与评价

Tab. 3 Qualitative engineering geological evaluation for the Lengqu river section in Sichuan – Tibet highway

| 区号     | I              |                | II          |                  | III              |                           |
|--------|----------------|----------------|-------------|------------------|------------------|---------------------------|
| 亚区号    | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | II          | III <sub>1</sub> | III <sub>2</sub> | III <sub>3</sub>          |
| 范围     | 怒江 – 69 道班     |                | 69 道班 – 八宿县 | 八宿县 – 73 道班      | 73 道班 – 75 道班    | 75 道班 – 77 道班 77 道班 – 安久拉 |
| 工程地质评价 | 差              |                | 较差          | 较差               | 较差               | 中等                        |
|        | 差              |                | 较差          |                  | 中等               |                           |

安全,地貌因子应综合考虑坡度及起伏度对道路工程的影响。内摩擦角与粘聚力反映了岩土体的抗剪强度,对路基的稳定性有重要影响。松散岩土体上的路基易发生不均匀沉降。断层的密度与活动性影响着公路的局部走向,反映了对斜坡稳定性的重要影响。外动力作用综合考虑了坡面侵蚀、河流侵蚀及冻融侵蚀等不同程度地对公路路基的影响,且为灾害的发生提供了松散固体物质条件。水文地质条件反映了水文特征,影响着岩土体的稳定性。

因此,根据差异性原则,本文主要选取地貌、岩性、地质构造、外动力作用及水文地质条件为工程地质评价指标,并详细划分一级指标及二级指标,评价工程地质区及亚区,评价指标详见图 2。

3.2.2 指标权重与分级

由于各工程地质区中起主导作用的因素不同,各个工程地质条件因素对工程地质的贡献不同。在高山峡谷区,地形条件直接影响灾害发育的松散碎屑物的分布和聚集,地层岩性和地质构造决定着岩体的力学性质和抗风化能力,是崩塌、滑坡、泥石流等灾害发生的主要影响因素,水文地质条件是诱发地质灾害发生的因素之一,因而影响相对较小,外动力地质作用是一项长期的地质作用过程,因而影

响最小。

采用层次分析法通过两两对工程地质条件影响的重要性进行比较,然后按 9 分位比率排定各评价指标的相对优劣顺序,依次构造出评价指标的判断矩阵 A。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

(8)

其中 A 为判别矩阵,  $a_{ij}$  为要素 i 与要素 j 重要性比较结果,并且有如下关系:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

(9)

$a_{ij}$  有 9 种取值,分别为 1/9, 1/7, 1/5, 1/3, 1/1, 3/1, 5/1, 7/1, 9/1, 分别表示 i 要素对于 j 要素的重要程度由轻到重。

按照以上公式(8)~(9)计算矩阵的权重向量,最后进行一致性检验,获得工程地质条件相关要素的权重值分别为地质构造 0.239、地形地貌 0.297、工程地质岩组 0.255、外动力作用 0.084、水文地质条件 0.126,具体见表 4。

而对于各分区中工程地质条件的实际情况,则

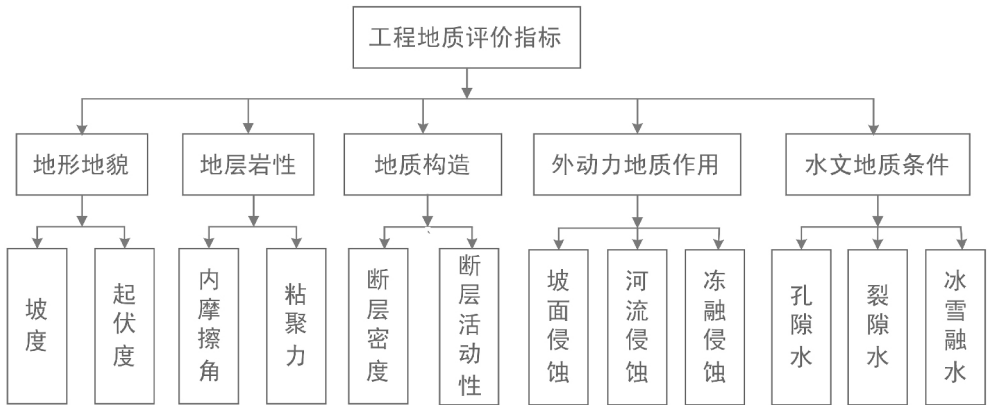


图 2 工程地质评价指标体系

Fig. 2 Indicators of engineering geological evaluation

采用对各区影响因素进行赋值,由于河谷越狭窄,越不利于公路工程,灾害发生时对公路影响也更严重;岩性越软弱,公路路基的稳定性越差;地质构造越复杂与活跃、外动力作用越强,岩土体越破碎;水文地质条件越差,岩土体的稳定性越差。因而,根据河谷的宽阔程度、岩性的坚硬程度、地质构造的复杂与活跃程度、外动力作用的强弱程度及岩层的含水类型,分别对各因素进行赋值。如表 5 所示,其中 0 代表该因素在该区不存在或影响很小,1 代表有一定影响,2 代表有强烈影响,值越大表明工程地质条件越差。

对于工程地质亚区而言,采用坡度、起伏度、断裂密度的平均值来表示各亚区的工程地质实际情况;岩块的粘聚力和内摩擦角则主要通过查阅 1:25 万区域地质调查报告(八宿幅)中岩性资料,并类比其余岩性类似的工程资料,根据岩块的实际抗剪强度值和实际风化程度来进行取值。同时,研究区高

差巨大,外动力作用差异显著,且在同一亚区可能同时有多种应力作用,因而综合考虑外动力作用的强弱;水文地质条件以占优势的水分作用形式区分;断裂的活动性依据其强弱进行取值。取值时,首先分析这 3 个工程地质指标的性质,根据其在研究区的现状,依据指标对工程的影响程度,以 0.2 的间距将其分为从强到弱的 4 级,影响最弱定为 0.4,由于断层无活动对工程影响很小,可赋值为 0,具体赋值见下表(表 6)。

3.2.3 指标量化

为了较好地体现公路廊带内工程地质条件对公路工程的影响,以公路两侧各 5 km 为缓冲区进行数据的量化,量化结果见表 7。

指标的分级标准采用距平百分率  $d$  来表示, $d$  的计算公式如下:

$$d = \frac{\text{指标值} - \text{平均值}}{\text{平均值}} \times 100\% \quad (10)$$

表 4 层次分析法判断矩阵及权重计算值

Tab. 4 Comparison matrix and weighting values

| 工程地质条件 | 地质构造 | 地形地貌 | 工程地质岩组 | 外动力作用 | 水文地质条件 | 权重    |
|--------|------|------|--------|-------|--------|-------|
| 地质构造   | 1    | 1    | 1      | 2     | 2      | 0.239 |
| 地形地貌   | 1    | 1    | 1      | 4     | 3      | 0.297 |
| 工程地质岩组 | 1    | 1    | 1      | 3     | 2      | 0.255 |
| 外动力作用  | 0.5  | 0.25 | 0.33   | 1     | 0.5    | 0.084 |
| 水文地质条件 | 0.5  | 0.33 | 0.5    | 2     | 1      | 0.126 |

注:工程地质条件一致性比例:  $0.016 < 0.1$ , 满足一致性检验;对“工程地质条件”的权重: 1.00; 最大特征值  $\lambda_{\max}$ : 5.07。

表 5 工程地质评价指标及其赋值

Tab. 5 Values of each engineering geological evaluation index

| 地形地貌      | 工程地质岩组 | 地质构造    | 外动力作用 | 水文地质条件 | 赋值 |
|-----------|--------|---------|-------|--------|----|
| 宽谷地貌、坡度平缓 | 花岗闪长岩  | 简单/不活跃  | 弱     | 孔隙水    | 0  |
| 中等宽谷、坡度中等 | 砂岩、砾岩  | 中等/中等活跃 | 中等    | 冰雪融水   | 1  |
| 峡谷地貌、坡度较大 | 板岩、千枚岩 | 复杂/活跃   | 强烈    | 基岩裂隙水  | 2  |

表 6 工程地质条件赋值

Tab. 6 Values of engineering geological condition

| 外动力作用 | 赋值  | 断层活动性 | 赋值  | 岩层含水条件     | 赋值  |
|-------|-----|-------|-----|------------|-----|
| 强     | 1   | 强     | 0.8 | 基岩裂隙水      | 1   |
| 较强    | 0.8 | 中     | 0.6 | 基岩裂隙水、冰雪融水 | 0.8 |
| 中     | 0.6 | 弱     | 0.4 | 冰雪融水       | 0.6 |
| 弱     | 0.4 | 无     | 0   | 孔隙水        | 0.4 |

表 7 各亚区工程地质条件指标值  
Tab. 7 Values of engineering geological condition in sub-region

| 亚区号              | 路段           | 平均坡度(°) | 平均起伏度   | 断裂密度<br>( km/km <sup>2</sup> ) | 断层活<br>动性 | 内摩擦角<br>( ° ) | 粘聚力<br>( MPa ) | 水文地质<br>条件 | 外动力作用 |
|------------------|--------------|---------|---------|--------------------------------|-----------|---------------|----------------|------------|-------|
| I <sub>1</sub>   | 怒江至 69 道班    | 31.621  | 212.532 | 0.121                          | 0.6       | 45.0          | 10.0           | 1.0        | 1.0   |
| I <sub>2</sub>   | 69 道班至八宿县城   | 26.158  | 164.475 | 0.205                          | 0.8       | 48.5          | 10.5           | 0.4        | 0.8   |
| II               | 八宿县城至 73 道班  | 24.616  | 153.741 | 0.044                          | 0.8       | 33.6          | 19.2           | 0.4        | 0.8   |
| III <sub>1</sub> | 73 道班至 75 道班 | 24.999  | 156.057 | 0.000                          | 0         | 52.0          | 32.0           | 0.6        | 0.6   |
| III <sub>2</sub> | 75 道班至 77 道班 | 24.945  | 156.051 | 0.052                          | 0.4       | 47.0          | 17.5           | 0.6        | 0.6   |
| III <sub>3</sub> | 77 道班至安久拉    | 21.149  | 128.986 | 0.013                          | 0.4       | 41.6          | 8.8            | 0.8        | 0.4   |

坡度、起伏度、断裂密度及活动性等指标值越大,工程地质条件越差,但岩块的摩擦角与粘聚力却相反,计算时为了统一评价趋势为指标值越大、工程地质条件越差,在内摩擦角与粘聚力计算时将分子改为平均值减去指标值来代替。进而,将各指标的好差分为 5 个等级, $d < -20\%$  时工程地质条件为好, $-20\% \leq d < -10\%$  时工程地质条件为较好, $-10\% \leq d < 10\%$  时工程地质条件为中等, $10\% \leq d < 20\%$  时工程地质条件为较差, $d \geq 20\%$  时工程地质条件为差,通过公式(10)计算得到各指标分级标准(表 8)。

3.2.4 工程地质评价

(1) 工程地质指数的计算

工程地质指数的计算主要包括两个方面,工程

地质条件的权重及实际值。运用层次分析法计算各影响因素的权重值;结合主要因素指标赋值,运用工程地质指数公式(式 1)计算出各工程地质区的工程地质指数值,并以此进行工程地质评价。根据上述研究区工程地质条件量化结果及权重可知, $0 \leq \alpha_i \leq 1, 0 \leq A_{ij} \leq 2$ ,因此  $0 \leq EGCI_j \leq 2$ ,且  $A_{ij}$  均取值为 1 时  $EGCI_j = 1$ ,此时工程地质条件评价为中等,由于评价结果分为 5 级,因此以均值 0.4 为间隔进行分级表示工程地质评价结果的好差,具体分级结果如下:当  $EGCI_j \geq 1.6$  时,工程地质条件为差; $1.2 \leq EGCI_j < 1.6$  时,工程地质条件为较差; $0.8 \leq EGCI_j < 1.2$  时,工程地质条件为中等; $0.4 \leq EGCI_j < 0.8$  时,工程地质条件为较好; $0 < EGCI_j < 0.4$  时,工程地质条件为好。评价结果见表 9。

表 8 评价结果分级标准  
Tab. 8 Classifications of engineering geological evaluation

| 类别  | 平均值     | 好        | 较好                | 中等                | 较差                | 差        |
|---|---------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| X <sub>1</sub> - 平均坡度(°)                    | 25.581  | <20.465  | 20.465 ~ 23.023   | 23.023 ~ 28.139   | 28.139 ~ 30.697   | >30.697  |
| X <sub>2</sub> - 平均起伏度                      | 161.974 | <129.579 | 129.579 ~ 145.776 | 145.776 ~ 178.171 | 178.171 ~ 194.369 | >194.369 |
| X <sub>3</sub> - 断裂密度( km/km <sup>2</sup> ) | 0.072   | <0.058   | 0.058 ~ 0.065     | 0.065 ~ 0.080     | 0.080 ~ 0.087     | >0.087   |
| X <sub>4</sub> - 断层活动性                      | 0.500   | <0.400   | 0.400 ~ 0.450     | 0.450 ~ 0.550     | 0.550 ~ 0.600     | >0.600   |
| X <sub>5</sub> - 内摩擦角(°)                    | 32.083  | >53.540  | 53.540 ~ 49.078   | 49.078 ~ 40.155   | 40.155 ~ 35.693   | <35.693  |
| X <sub>6</sub> - 粘聚力( MPa )                 | 11.667  | >19.600  | 19.600 ~ 17.967   | 17.967 ~ 14.700   | 14.700 ~ 13.067   | <13.067  |
| X <sub>7</sub> - 水文地质条件                     | 0.683   | <0.507   | 0.507 ~ 0.570     | 0.570 ~ 0.697     | 0.697 ~ 0.760     | >0.760   |
| X <sub>8</sub> - 外动力作用                      | 0.633   | <0.560   | 0.560 ~ 0.630     | 0.630 ~ 0.770     | 0.770 ~ 0.840     | >0.840   |

表 9 工程地质区工程地质评价  
Tab. 9 Results of engineering geological evaluation

| 工程地质条件 | 地形地貌  | 地质构造  | 工程地质岩组 | 外动力地质作用 | 水文地质条件 | EGCI | 评价结果 |
|--------|-------|-------|--------|---------|--------|------|------|
| 权重值    | 0.297 | 0.239 | 0.255  | 0.084   | 0.126  |      |      |
| I      | 2     | 2     | 2      | 2       | 1      | 1.88 | 差    |
| II     | 2     | 2     | 1      | 2       | 0      | 1.50 | 较差   |
| III    | 1     | 1     | 1      | 2       | 2      | 1.21 | 较差   |



(2) 联系度的计算

通过层次分析法确定出各亚区指标权重，

$W_{X1 - \text{平均坡度}} = 0.177$  ,  $W_{X2 - \text{平均起伏度}} = 0.119$  ,  
 $W_{X3 - \text{断裂密度}} = 0.101$  ,  $W_{X4 - \text{断层活动性}} = 0.151$  ,

$W_{X5 - \text{内摩擦角}} = 0.128$  ,  $W_{X6 - \text{粘聚力}} = 0.105$  ,  
 $W_{X7 - \text{水文地质条件}} = 0.097$  ,  $W_{X8 - \text{外动力作用}} = 0.123$  。依  
据集对分析法 根据公式(6) 与(7) 计算指标之间的  
联系度 ,计算结果见表 10 与表 11。

表 10 联系度  $\mu_{A1 \sim B1}$  计算  
Tab. 10 Connection degree of  $\mu_{A1 \sim B1}$

| 联系度                | I <sub>1</sub> |          |          |          |       | I <sub>2</sub> |          |          |          |       | II    |          |          |          |       |
|--------------------|----------------|----------|----------|----------|-------|----------------|----------|----------|----------|-------|-------|----------|----------|----------|-------|
|                    | $a_j$          | $b_{j1}$ | $b_{j2}$ | $b_{j3}$ | $c_j$ | $a_j$          | $b_{j1}$ | $b_{j2}$ | $b_{j3}$ | $c_j$ | $a_j$ | $b_{j1}$ | $b_{j2}$ | $b_{j3}$ | $c_j$ |
| $\mu_{A1 \sim B1}$ | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0              | 0        | 0.85     | 0.15     | 0     | 0     | 0        | 0.748    | 0.252    | 0     |
| $\mu_{A2 \sim B1}$ | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0              | 0        | 0.897    | 0.103    | 0     | 0     | 0.252    | 0.748    | 0        | 0     |
| $\mu_{A3 \sim B1}$ | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 1     | 0        | 0        | 0        | 0     |
| $\mu_{A4 \sim B1}$ | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0     | 0        | 0        | 0        | 1     |
| $\mu_{A5 \sim B1}$ | 0              | 0.057    | 0.943    | 0        | 0     | 0              | 0.58     | 0.42     | 0        | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        | 1     |
| $\mu_{A6 \sim B1}$ | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0.51  | 0.49     | 0        | 0        | 0     |
| $\mu_{A7 \sim B1}$ | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 1              | 0        | 0        | 0        | 0     | 1     | 0        | 0        | 0        | 0     |
| $\mu_{A8 \sim B1}$ | 0              | 0        | 0        | 0        | 1     | 0              | 0        | 0.048    | 0.952    | 0     | 0     | 0        | 0.048    | 0.952    | 0     |

| 联系度                | III <sub>1</sub> |          |          |          |       | III <sub>2</sub> |          |          |          |       | III <sub>3</sub> |          |          |          |       |
|--------------------|------------------|----------|----------|----------|-------|------------------|----------|----------|----------|-------|------------------|----------|----------|----------|-------|
|                    | $a_j$            | $b_{j1}$ | $b_{j2}$ | $b_{j3}$ | $c_j$ | $a_j$            | $b_{j1}$ | $b_{j2}$ | $b_{j3}$ | $c_j$ | $a_j$            | $b_{j1}$ | $b_{j2}$ | $b_{j3}$ | $c_j$ |
| $\mu_{A1 \sim B1}$ | 0                | 0.152    | 0.848    | 0        | 0     | 0                | 0.166    | 0.649    | 0        | 0     | 0.465            | 0.535    | 0        | 0        | 0     |
| $\mu_{A2 \sim B1}$ | 0                | 0.244    | 0.756    | 0        | 0     | 0                | 0.244    | 0.756    | 0        | 0     | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     |
| $\mu_{A3 \sim B1}$ | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     |
| $\mu_{A4 \sim B1}$ | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     |
| $\mu_{A5 \sim B1}$ | 0.31             | 0.69     | 0        | 0        | 0     | 0                | 0.356    | 0.644    | 0        | 0     | 0                | 0        | 0.549    | 0.451    | 0     |
| $\mu_{A6 \sim B1}$ | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     | 0                | 0.476    | 0.524    | 0        | 0     | 0                | 0        | 0        | 0        | 1     |
| $\mu_{A7 \sim B1}$ | 0                | 0.351    | 0.649    | 0        | 0     | 0                | 0.351    | 0.649    | 0        | 0     | 0                | 0        | 0        | 0        | 1     |
| $\mu_{A8 \sim B1}$ | 0                | 0.952    | 0.048    | 0        | 0     | 0                | 0.952    | 0.048    | 0        | 0     | 1                | 0        | 0        | 0        | 0     |

表 11 联系度  $\mu_{A \sim B}$  计算结果  
Tab. 11 Connection degree of  $\mu_{A \sim B}$

| 类别    | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | II    | III <sub>1</sub> | III <sub>2</sub> | III <sub>3</sub> |
|-------|----------------|----------------|-------|------------------|------------------|------------------|
| $f_1$ | 0              | 0.097          | 0.251 | 0.397            | 0.252            | 0.494            |
| $f_2$ | 0.0073         | 0.074          | 0.081 | 0.295            | 0.305            | 0.095            |
| $f_3$ | 0.1207         | 0.317          | 0.227 | 0.309            | 0.411            | 0.07             |
| $f_4$ | 0              | 0.156          | 0.161 | 0                | 0                | 0.058            |
| $f_5$ | 0.8719         | 0.357          | 0.279 | 0                | 0                | 0.201            |

根据联系度计算结果及置信度(  $\lambda = 0.6$  ) ,可  
判别出工程地质的好差。如 I<sub>1</sub> 中  $h_4 = f_1 + f_2 + f_3 +$   
 $f_4 = 0.128 < 0.6$  ,而  $h_5 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = 0.128$   
 $+ 0.8719 > 0.6$  ,则 I<sub>1</sub> 区工程地质可评价为差 ,同  
理获得其余工程地质亚区评价结果。

4 评价结果对比与验证

为了得出准确的工程地质评价结果 ,将定量工  
程地质评价结果与定性评价结果进行了对比。通过  
对比发现 ,二者绝大多数相吻合 ,极少量有些差别 ,  
如大区 III、亚区 III<sub>1</sub> 及 III<sub>2</sub>( 表 12 和表 13) ,在 II 区由  
于工程地质条件差别不大 ,没有进行细分 ,即为大区  
也为亚区。

表 12 工程地质区的定性评价与定量评价结果对比  
Tab. 12 Comparison results of qualitative evaluation and  
quantitative assessment in engineering geological zones

| 区号  | 定性工程地质<br>评价 | 定量工程地质<br>评价 | 滑坡、泥石流密度<br>( 处/km) | 最终评价<br>结果 |
|-----|--------------|--------------|---------------------|------------|
| I   | 差            | 差            | 1.35                | 差          |
| II  | 较差           | 较差           | 1.1                 | 较差         |
| III | 中等           | 较差           | 0.68                | 中等         |



表 13 工程地质亚区的定性评价与定量评价结果对比  
Tab. 13 Comparison results of qualitative evaluation and quantitative assessment in engineering geological subzones

| 亚区号              | 定性工程地质评价 | 定量工程地质评价 | 滑坡、泥石流密度<br>(处/km) | 最终评价结果 |
|------------------|----------|----------|--------------------|--------|
| I <sub>1</sub>   | 差        | 差        | 0.4                | 差      |
| I <sub>2</sub>   | 差        | 差        | 1.67               | 差      |
| II               | 较差       | 较差       | 1.1                | 较差     |
| III <sub>1</sub> | 较差       | 较好       | 0.9                | 较差     |
| III <sub>2</sub> | 较差       | 中等       | 0.8                | 较差     |
| III <sub>3</sub> | 中等       | 中等       | 0.35               | 中等     |

为了进一步验证定性定量工程地质评价的结果,本文统计了冷曲河段各工程地质区及亚区的滑坡、泥石流的灾害线密度,进一步分析工程地质评价结果的合理性(表 12 和表 13)。结果显示,工程地质评价结果与滑坡、泥石流的灾害线密度基本相一致,即工程地质差,灾害密度大;只是在 III<sub>1</sub> 及 III<sub>2</sub> 处,滑坡、泥石流密度较大,工程地质较差,最终评价结果应修正为较差。通过以上研究,最终确定了工

程地质分区结果,即 I<sub>1</sub> 为差, I<sub>2</sub> 为差, II 为较差, III<sub>1</sub> 为较差, III<sub>2</sub> 为较差, III<sub>3</sub> 为中等(表 13),并依据最终评价结果编制出工程地质分区图(图 3)。

5 结论

以工程地质条件分析为基础,根据工程地质条件的差异对川藏公路冷曲河段进行了定性的工程地质评价,然后针对工程地质区及亚区分别选取了一级指标和二级指标,采用工程地质指数模型及集对分析模型进行了工程地质定量评价。将定性定量评价结果进行对比分析,发现二者评价结果大多数相吻合,说明了工程地质指数与集对分析方法可用于工程地质评价中,是具有一定的合理性与实用性的一种定量方法。最后用滑坡泥石流灾害的线密度进行验证,得到了较好的工程地质评价结果。将川藏公路冷曲河段分为 3 个区及 6 个亚区,并作出了工程地质分区图。

本文的冷曲河段公路廊带的工程地质评价,能够较好地体现廊带内工程地质条件对公路的影响,可

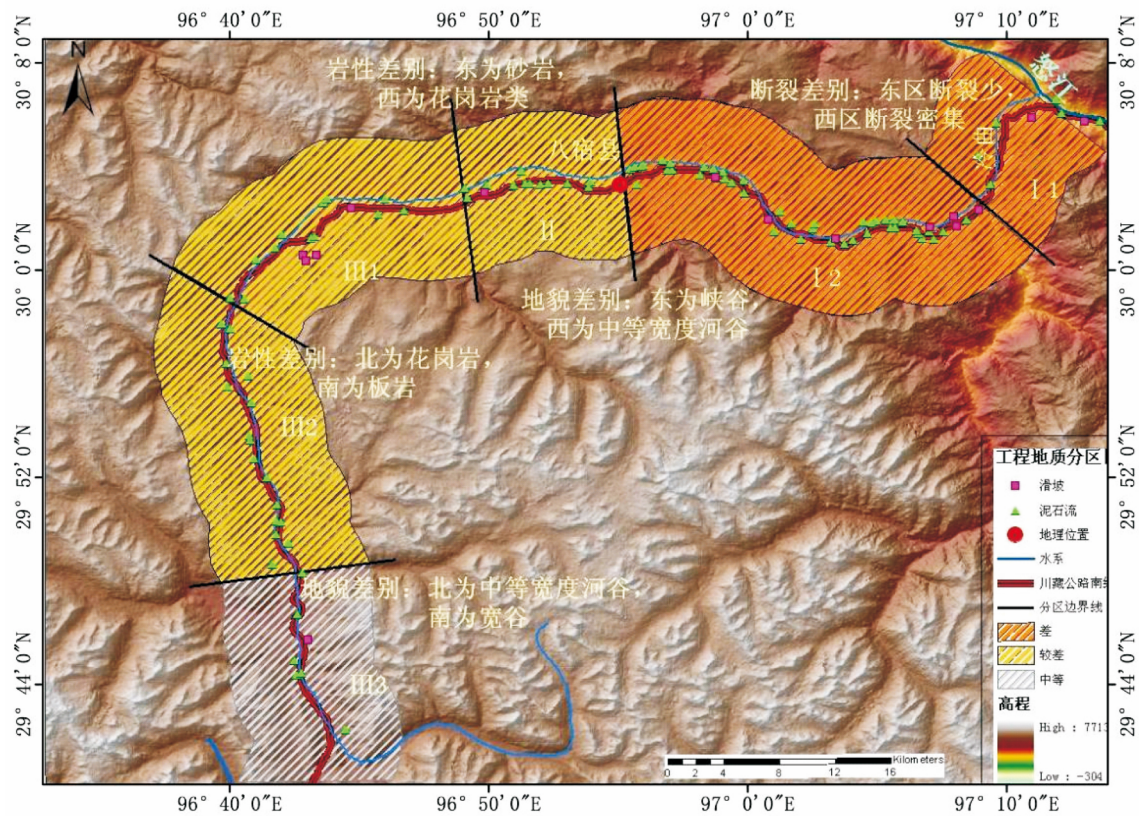


图 3 工程地质评价与分区结果

Fig. 3 Engineering geological zoning at the Lengqu River section in Sichuan - Tibet highway

作为川藏公路灾害整治及公路改扩建工程局部定线提供参考。而廊带以外的情况复杂且变化较大,文中未做反映。由于川藏公路冷曲河段工程地质条件差,且相关研究较少,资料有限,本文的工程地质分区与评价研究仍较粗浅,有待今后的进一步深化。例如,由于资料的局限,只选取了断裂密度与活动性来反映地质构造对工程地质的影响,尚未考虑褶皱与节理的发育情况。在资料充裕的条件下,可进一步考虑褶皱与节理进行更为详细的研究。另外,在结果验证方面,只用了灾害线密度,如果资料更丰富的话,还应该考虑灾害的活跃程度。

### 参考文献(References)

- [1] 邹强, 崔鹏, 杨伟. G318 川藏公路段泥石流危险性评价 [J]. 山地学报, 2013, 3(31): 342–348 [ZOU Qiang, CUI Peng, YANG Wei. Hazard assessment of debris flows along G318 Sichuan–Tibet Highway [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 3(31): 342–348]
- [2] 许兵, 李毓瑞, 张汝源. 金川露天矿边坡稳定性的岩体工程地质力学研究 [A]. 中国科学院地质研究所. 岩体工程地质力学问题 (六) [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 20–57 [XU Bing, LI Yurui, ZHANG Ruyuan. Rock mass engineering geological mechanics research of open–pit mine slope's stability in Jinchuan [A]. Institute of geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. Rock engineering geological mechanics problems (six) [M]. Beijing: Science press, 1985: 20–57]
- [3] 郭长宝, 张永双, 蒋良文等. 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 [J]. 现代地质, 2009, 23(3): 545–552 [GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, JIANG Liangwen, et al. Research on geo–engineering conditions of the Li Jiang–Shangri–La Railway Section of the Yunnan–Tibet railway based on the GIS method [J]. Geoscience, 2009, 23(3): 545–552]
- [4] 成昆铁路技术总结委员会著. 《成昆铁路》(第一册 综合总结). 北京: 人民铁道出版社. 1980: 52–95 [Committee of ChengKun Railway Technical Summary writes. ChengKun railway (Version 1, Comprehensive summary). Beijing: People's railway press. 1980: 52–95]
- [5] 张俦元. 工程地质条件的形成 [A]. 中国工程地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 14–33 [ZHANG Zhuoyuan. Formation of the engineering geological conditions [A]. China Engineering Geology [M]. Beijing: Science press, 2000: 14–33]
- [6] 王思敬, 黄鼎成. 攀西地区环境工程地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 11–13, 85–94 [WANG Sijing, HUANG Dingcheng. Environment Engineering Geology of Panxi [M]. Beijing: Ocean press, 1990: 11–13, 85–94]
- [7] SHANG Y J, WANG S J, LI G C, et al. Retrospective case example using a comprehensive suitability index (CSI) for siting the Shisan–Ling powerstation, China [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37: 839–853
- [8] 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 [DING Jixin, ZHOU Shenghua, YANG Zhifa, et al. Engineering geological zonation for south section of Sichuan–Tibet highway [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(5): 154–161]
- [9] 杨志法, 尚彦军, 张路青, 等. 川藏公路地质灾害及其防治对策研究——以八宿至林芝路段为例 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 90–101 [YANG Zhifa, SHANG Yanjun, ZHANG Luqing, et al. Research on geological disasters and prevention countermeasures of Sichuan–Tibet highway—a case study of Basu–Linzi section [M]. Beijing: Science press, 2006: 90–101]
- [10] 西藏自治区地质调查院一分院. 1:25 万区域地质调查报告八宿幅 [R]. 2007: 419 [The First Branch of Geological Survey Institute in Tibet Autonomous Region. 1:250000 regional geological survey report of BaSu [R]. 2007: 419]
- [11] 四川省广汉地质工程勘察院. 西藏自治区八宿县地质灾害调查与区划报告 [R]. 2003: 24–25 [Geological Engineering Investigation Institute of Guanghan in Sichuan Province. Geological disaster investigation and regionalization reports of BaSu in Tibet autonomous region [R]. 2003: 24–25]
- [12] 成都地质矿产研究所. 喜马拉雅–冈底斯造山带新构造图 [Z]. 2005 [Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources. The new structure diagram of the Himalayas–the mountain orogenic belt [Z]. 2005]
- [13] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000: 25–47 [ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000: 25–47]
- [14] 王文圣, 金菊良, 李跃清. 基于集对分析的自然灾害风险度综合评价研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2009, 41(6): 6–12 [WANG Wensheng, JIN Juliang, LI Yueqing. Risk Degree Assessment of Natural Disaster Based on Set Pair Analysis Method [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(6): 6–12]
- [15] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 33(1): 12–20 [CHENG Qiansheng. Attribute Recognition Theoretical Model With Application [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(1): 12–20]
- [16] WANG Wensheng, JIN Juliang, DING Jing, et al. A new approach to water resources system assessment—setpair analysis method [J]. Sci China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(10): 3017–3023

## Engineering Geological Assessment and Zonation for the Lengqu River Section in Sichuan – Tibet Highway

YANG Wei<sup>1</sup>, CUI Peng<sup>2</sup>, ZOU Qiang<sup>2,3</sup>

(1. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, Yunnan, 650051, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** The engineering geological condition along the Lengqu River section of Sichuan – Tibet Highway is extremely poor and complicated. Rich geological hazards developed along the Lengqu River section is posing a direct threat to the Highway safety and compromising improvement project of the Highway. It's extremely imperative to investigate the engineering geological condition for the sake of the Highway improvement project. By analyzing engineering geological conditions, a qualitative engineering geological evaluation and zonation was completed in terms of differences in engineering geological conditions at highway sections; Some governing factors—slope, surface rolling, internal friction angle and cohesion of rock, density and activity of fault, exogenic geological process and hydrogeological conditions—were selected as evaluation indices; Then a hierarchical model was introduced and weight of each factor was determined properly. Quantitative engineering geological evaluation was performed according to Engineering Geological Index and Set Pair Analysis method. Reasonable results was acquired after comparison of preliminary and quantitative evaluation as well as verification of disaster distribution. The referred area was divided into 3 zones and 6 subzones, and a sketch of engineering geological zonation was drawn to serve engineering renovation, disaster prevention and reduction.

**Key words:** Sichuan – Tibet highway; engineering geological zonation; engineering geological index; set pair analysis; landslide; debris flow