

doi: 10.12097/gbc.2023.06.019

川西藏东交通廊道区域工程地质条件评价

杨志华^{1,2}, 郭长宝^{1,2*}, 吴瑞安^{1,2}, 张永双³, 李彩虹^{1,3}, 邵慰慰^{1,4}

YANG Zhihua^{1,2}, GUO Changbao^{1,2*}, WU Ruian^{1,2}, ZHANG Yongshuang³, LI Caihong^{1,3},
SHAO Weiwei^{1,4}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

3. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

4. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*

摘要: 区域工程地质条件是重大工程规划建设地质安全的重要保障。川西藏东交通廊道位于青藏高原东部, 穿越世界上地形地貌和地质构造最复杂的地区, 区域工程地质环境复杂。响应重大工程规划建设的地质安全需求, 以川西藏东交通廊道重大线性工程沿线为研究区, 在分析区域工程地质环境的基础上, 选取 9 个地质环境因子指标, 采用基于 GIS 的层次分析法, 完成了区域工程地质条件评价, 将研究区划分为工程地质条件好、较好、中等和差 4 个等级。结果显示, 活动断裂是最不利的工程地质条件因素, 其次是地形起伏度和地质灾害易发程度。工程地质条件好的地区远离活动断裂带和深切峡谷, 呈块状、条带状分布于活动断裂带及深切峡谷之间。工程地质条件差的地区主要分布于活动断裂带和高山峡谷区, 突出表现为距活动断裂较近, 尤其是多条断裂相交或近于相交的地区。研究结果能够为川西藏东交通廊道重大工程规划建设地质安全提供科学支撑。

关键词: 区域工程地质条件; 川西藏东交通廊道; 层次分析法; 重大工程; 青藏高原

中图分类号: P642; P694; X951 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)09-1650-13

Yang Z H, Guo C B, Wu R A, Zhang Y S, Li C H, Shao W W. Regional engineering geological condition evaluation in the Sichuan-Xizang traffic corridor. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1650-1662

Abstract: The regional engineering geological conditions are the important guarantee for geological safety of major engineering planning and construction. The Sichuan-Xizang traffic corridor is located in the eastern Qinghai-Xizang Plateau, and passes through the zone with the most complex terrain and geological structure all over the world, and faces the extremely complex regional engineering geological environment. In order to respond to the geological safety requirements of major engineering planning and construction, this paper takes the major linear project regions in the Sichuan-Xizang traffic corridor as the study area. On the basis of summarizing and analyzing the regional geological settings, the regional engineering geological condition evaluation is completed by using the GIS analytical hierarchy process and 9 geological environment factors, and the regional engineering geological conditions are divided into 4 levels: good, relatively good, moderate and poor. The results show that the active faults are the most unfavorable factors of engineering geological conditions, followed by terrain relief and geo-hazard susceptibility. The areas with good engineering geological conditions

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-08-05

资助项目: 中国地质调查局项目《全国重大工程地质安全风险区划与综合评价》(编号: DD20221816)和国家自然科学基金项目《融合斜坡先存形变的活动断裂带潜在地震滑坡危险性预测研究》(批准号: 42277180)

作者简介: 杨志华(1982-), 男, 博士, 副研究员, 从事工程地质和地质灾害风险评估研究。E-mail: yangzh99@163.com

* 通信作者: 郭长宝(1980-), 男, 博士, 研究员, 从事工程地质和地质灾害研究。E-mail: guochangbao@163.com

are far away from active faults and deep canyons, and are distributed in the blocks and strips between active faults and deep canyons. The areas with poor engineering geological conditions are mainly distributed in the fault zones and alpine and canyon regions. The outstanding performance is that they are relatively close to strongly active faults, especially the regions with intersection of multiple faults. The research results can provide scientific support for the geological safety of major engineering planning in the Sichuan–Xizang traffic corridor.

Key words: regional engineering geological condition; Sichuan–Xizang traffic corridor; analytical hierarchy process; major project; Qinghai–Xizang Plateau

区域工程地质学的主要研究对象是长期自然地质历史发展演化过程中形成的工程地质条件(刘国昌, 1961; 唐辉明, 2020)。工程地质条件指与工程建设有关的地质因素的综合, 这些地质因素包括地形地貌、地质结构、岩土体类型及工程性质、水文地质、不良地质作用、天然建筑材料等方面(张咸恭等, 2000)。区域地壳稳定性是区域工程地质条件的重要基础, 主要指地球内动力地质作用, 如地震、火山活动、断层错动, 以及显著的地壳升降运动等对工程建设安全稳定的影响程度(李四光, 1977; Tan et al., 1997; 胡海涛, 2001; 彭建兵, 2001)。

区域工程地质条件综合考虑了内外动力地质因素, 以及岩土体性质、水文条件、表生地质灾害等因素, 是区域地壳稳定性的延伸研究。区域工程地质条件评价已经发展了多种研究方法。首先需要收集整理自然地理、区域地质、构造地质、水文地质等基础资料, 然后进行工程地质和岩土体调查分析(王学潮等, 2005)。在区域地质环境现场调查分析的基础上, 基于专家知识经验定性判断工程地质条件(Huang et al., 2009), 进一步进行地质环境影响因素的缓冲分析、拓扑分析和叠加分析(Mei et al., 2019), 再进行综合研判。在区域工程地质条件的定量评价方面, 目前缺乏成熟的模型方法, 且多为定性一半定量模型方法, 如数值模拟(Liu et al., 2018)、加权因子叠加(张永双等, 2022)、模糊数学方法(祁生文等, 2022)、层次分析结构模型(郭长宝等, 2009)。在空间尺度上, 工程的不同规划建设阶段对应于不同的评价尺度要求, 张永双等(2022)提出高原山区铁路工程的不同规划建设阶段对应于不同的评价尺度要求。

区域工程地质条件评价是保障重大工程规划建设地质安全的重要工作内容。川西藏东交通廊道位于青藏高原东部板块碰撞和构造活跃的地形急变带, 穿越世界上地形地貌和地质构造最复杂的地区, 从位于第二阶梯的四川盆地过渡到第一阶梯的青藏

高原, 区域工程地质条件和工程地质问题极为复杂(Lu et al., 2019; 潘桂棠等, 2020; 彭建兵等, 2020)。川西藏东交通廊道及其周边区域已经完成了一些工程地质条件评价的相关研究, 例如围绕区域地质环境条件和工程地质问题, 完成了大量调查分析工作, 积累了丰富的基础数据(徐正宣等, 2021); 采用三维结构建模、数值统计建模、动力建模、时空建模等方法, 进行了川藏铁路可研阶段地表、地下重大工程地质灾害综合定量风险分析(兰恒星等, 2021), 基于因子图层叠加, 完成了青藏高原东缘区域地壳稳定性评价(姚鑫等, 2015), 基于全新世活动断裂和地形地貌因子, 完成了青藏高原工程地质稳定性分区(祁生文等, 2022)。本文以川西藏东交通廊道铁路、公路、输电线路等国家重大工程沿线区域为研究区, 梳理最新区域地质环境调查资料, 在分析区域地质环境概况的基础上, 建立地质环境因子指标体系, 采用基于 GIS 的层次分析法, 完成川西藏东交通廊道区域工程地质条件评价, 为重大工程规划建设地质安全提供科学支撑。

1 区域工程地质条件评价方法

层次分析法(AHP)适用于多准则、多目标复杂问题的决策分析, GIS 技术与层次分析方法相结合大大提高了传统 AHP 方法在地学研究中的应用效果(Harris et al., 2000), 其基本思想是: 采用层次分析法获得地质环境因子指标的权重, 采用 GIS 技术管理因子指标的数据图层, 并完成数据图层的加权叠加分析工作, 已经广泛应用于区域地壳稳定性、工程地质条件和地质灾害风险评价(李国和等, 2001; Zhang et al., 2012)。

总结已有研究成果, 梳理了基于 GIS 技术和层次分析法的区域工程地质条件评价方法, 主要有以下步骤(图 1): ①调查分析区域工程地质条件和主要工程地质问题, 收集区域工程地质环境基础数据; ②按照统一的数据格式(矢量或者栅格), 整理工程

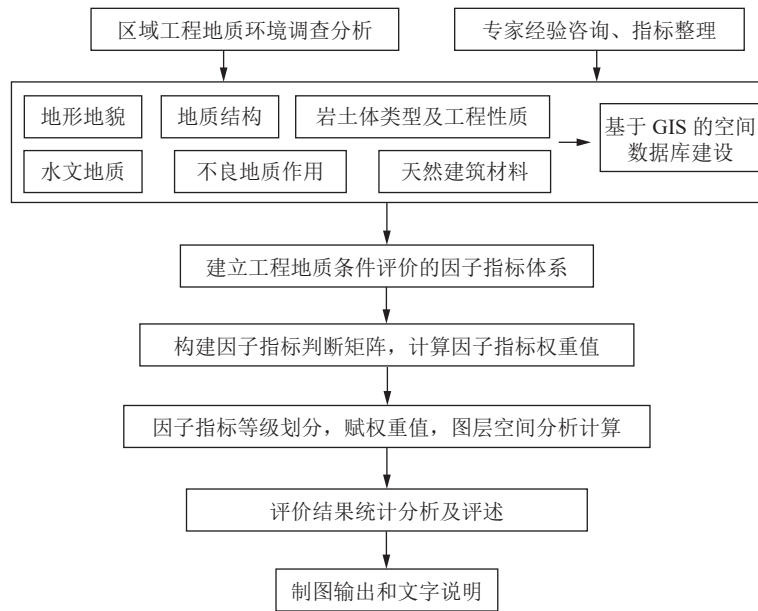


图1 基于GIS技术和层次分析法的区域工程地质条件评价技术路线图

Fig. 1 Technical route of regional engineering geological condition evaluation based on GIS and analytic hierarchy process

地质环境基础数据,建立基于GIS的空间数据库,为每一个地质环境因子建立一个图层;③建立工程地质条件评价的地质环境因子指标体系,构建因子指标的判断矩阵,计算因子指标的权重值;④划分因子指标等级,赋值因子指标等级权重,采用区域工程地质条件评价的数学模型(公式1),进行因子指标图层的加权叠加运算,获得区域工程地质条件指数值;⑤统计分析区域工程地质条件评价结果,完成制图输出和文字说明。

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

式中: B —区域工程地质条件指数; a_j —因子指标权重; N_j —因子指标等级权重。

2 区域工程地质条件影响因素分析

区域地壳稳定性主要考虑地震、活动构造等内动力因素,而区域工程地质条件评价需要综合考虑内外动力因素和地质环境背景因素。在综合分析川西藏东交通廊道区域地质背景的基础上,结合区域工程地质条件的基本内涵(刘国昌, 1961; 张咸恭等, 2000; 唐辉明, 2020),选择地形地貌、地质构造、岩土体类型及工程性质、水文地质、不良地质作用等地质环境因子作为区域工程地质条件的评价指标。地形地貌的数字高程模型数据(DEM)来自 ARSTER

GDEM, 活动断裂数据来自中国地质科学院地质力学研究所编制的川西藏东交通廊道活动断裂分布图(1:25万),地震动峰值加速度和历史地震数据来自中国地震局,最大剪应力梯度数据来自于数值模拟结果(孙玉军等, 2017),地壳垂直形变速率水平梯度数据来自张郢珍等(1992),工程地质岩组根据区域1:25万地质图进行划分,水文地质、地热异常数据分别来自中国地质科学院水文地质环境地质研究所修编的川西藏东交通廊道水文地质图、地热异常分布图。

2.1 地形地貌

川西藏东交通廊道地形地貌复杂,总体地势西高东低,地貌形态以盆地丘陵和高原深切峡谷为主,地势险要、山坡陡峻(郭长宝等, 2017)。地势对重大工程建设具有较大影响,斜坡山脊与谷底的相对高差可以侧面反映重大工程建设的难易程度,因此采用地形起伏度来表征地势对重大工程建设的影响,地形起伏度越大,工程建设难度越大,工程地质条件越差。基于数字高程模型(DEM),设置搜索半径1000 m,计算地形起伏度(图2)。盆地、草原、宽阔河床等地区的地形起伏度较小,小于200 m,高山峡谷和深切河谷等地区的地形起伏度较大,大于800 m。

2.2 地质构造

川西藏东交通廊道由东向西横贯扬子地块、川滇地块、羌塘地块和拉萨地块4个一级大地构造单

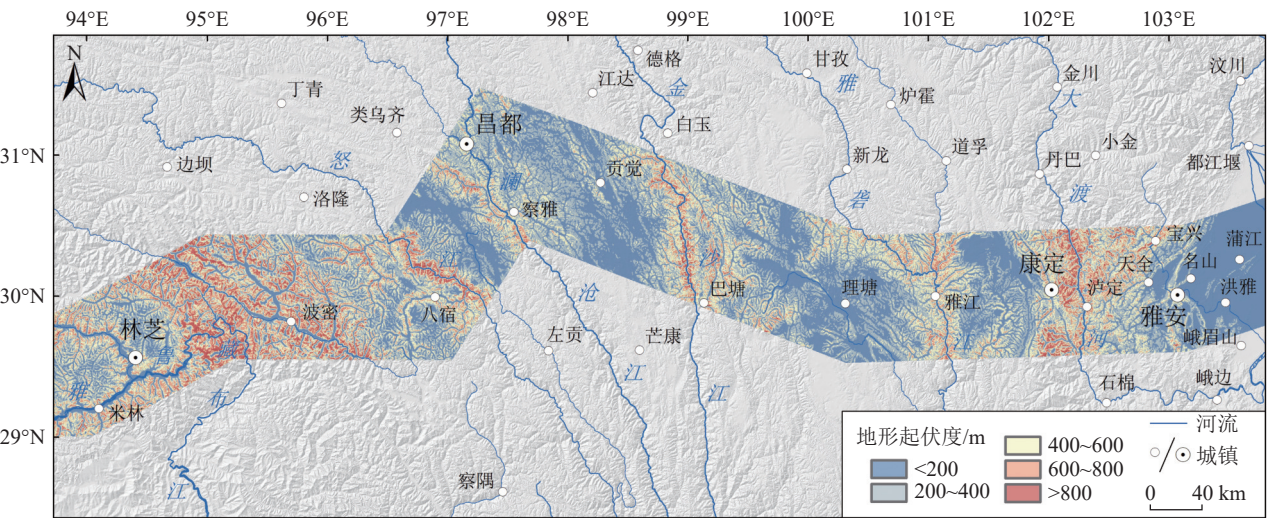


图 2 川西藏东交通廊道地形起伏度

Fig. 2 Topographic relief of the Sichuan-Xizang traffic corridor

元,南邻喜马拉雅地块。第四纪以来,印度板块向欧亚板块俯冲与挤压,形成强烈的现代地壳活动和高地应力场,在地壳向东运动过程中的不均匀部位形成不同方向的断裂带(谢富仁等,2004;朱守彪等,2005;徐纪人等,2006)。

2.2.2.1 活动断裂

新构造运动代表地球上最新一幕地质构造活动过程,是最新岩石圈变形与地表作用过程的集中体现,也是现今地貌塑造过程的内在动力(刘凤山等,2014)。活动断裂主要指晚更新世以来(距今约12万年)活动过,在未来一定时期内仍有可能活动的断裂(邓起东,2002),一般也称为活断层。区域工程地质条件评价需要考虑3个断裂参数:断裂活动时间、断裂活动速率和断裂切割深度(Zhang et al.,2012)。根据断裂参数,对活动断裂进行缓冲区分析。根据活动时间划分为3种类型活动断裂:全新世活动断裂、晚更新世活动断裂和早—中更新世活动断裂,前第四纪断裂不予考虑。距离断裂越近,断裂影响程度越大,且根据断裂活动性差异,采用了不同的断裂距离划分方式。将活动断裂的影响程度划分为极强、强、中等和弱4个级别(表1;图3)。

2.2.2.2 地震活动

青藏高原及其周边地震分布与活动构造密切相关(曾融生等,1992;张培震等,2003;徐锡伟等,2007),川西藏东交通廊道强震主要集中于康定—甘孜地震带和喜马拉雅地震带。根据中国第五代地震动峰值加速度区划(GB18306—2015)(图4),川西藏

东交通廊道地震动峰值加速度均大于等于0.10g(即地震烈度≥Ⅶ度),康定—道孚和波密—林芝—米林2个地区的地震动峰值加速度达到或接近0.3g($g=9.8\text{ m/s}^2$),其中康定部分地段和林芝东南部超过0.4g。最小地震动峰值加速度为0.10g,主要分布在雅安以东、贡觉等地区。大部分区域地震动峰值加速度为0.15~0.20g。

2.2.3 地应力

印度板块向欧亚板块持续性挤压作用,导致青藏高原内部形成空间非均匀性显著的复杂构造应力

表 1 川西藏东交通廊道活动断裂影响程度和范围
Table 1 Influence degree and range of active faults in the Sichuan-Xizang traffic corridor km

活动断裂	影响程度	岩石圈断裂	地壳断裂	基底断裂	盖层断裂
全新世活动断裂	极强	5	2	1	0
	强	8	6	3	1
	中等	10	8	6	2
	较弱	25	20	15	10
晚更新世活动断裂	极强	2	1.5	0.5	0
	强	5	3	2	0.5
	中等	8	6	4	1.5
	较弱	20	15	10	6
早—中更新世活动断裂	极强	1	0.5	0	0
	强	4	3	1	0
	中等	6	4	3	1
	较弱	18	13	8	4

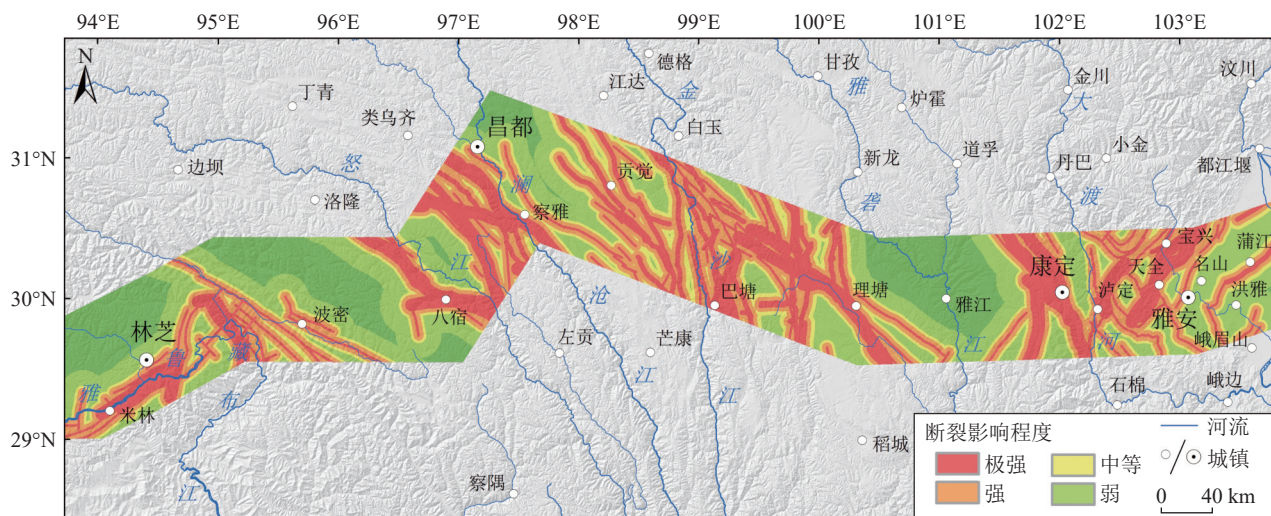


图3 川西藏东交通廊道活动断裂影响程度

Fig. 3 Influence degree of active faults in the Sichuan-Xizang traffic corridor

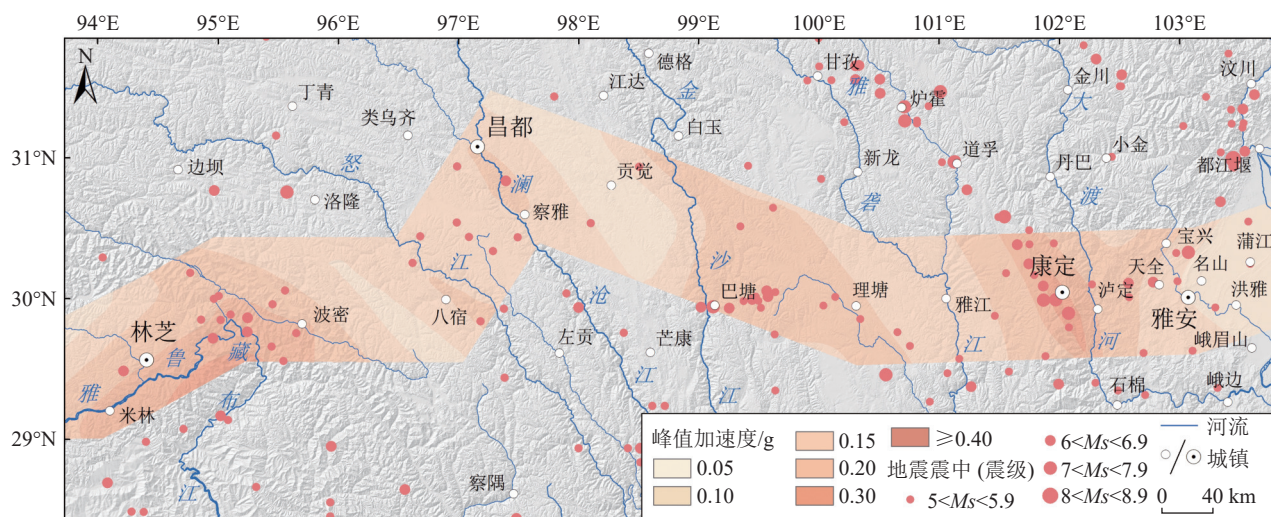


图4 川西藏东交通廊道地震动峰值地面加速度

Fig. 4 Seismic peak ground acceleration of the Sichuan-Xizang traffic corridor

环境。地壳现今应力场特征和量级是重要的工程地质条件,高地应力将带来严重的工程地质问题(王成虎等, 2019; 徐正宣等, 2020; 任洋等, 2021)。将GPS 位移速率作为已知条件,反演区域地应力分布特征,获得地壳块体相对运动产生的应力增量(孙玉军等, 2017),其中剪应力增量是导致地壳破裂和断裂活动及地震活动的重要力源,选择剪应力梯度(Δs)作为工作地质条件的评价指标,划分为4个等级(图5): $\Delta s \geq 25 \text{ kPa/km}^2$, $10 \text{ kPa/km}^2 \leq \Delta s < 25 \text{ kPa/km}^2$, $5 \text{ kPa/km}^2 \leq \Delta s < 10 \text{ kPa/km}^2$, $\Delta s < 5 \text{ kPa/km}^2$ 。嘉黎-察隅断裂带、怒江断裂带、澜沧江断裂带、理塘-德巫断裂带、鲜水河断裂带等大型活动断裂带区

域的剪应变梯度值较高。

2.2.4 地壳形变

地壳相对升降速率与区域地壳稳定性、工程地质环境具有密切关系,采用地壳垂直形变速率水平梯度作为工程地质条件的评价指标。根据中国大陆地壳垂直形变速率水平梯度值(v_g)(张郢珍等, 1992),将川西藏东交通廊道区域地壳垂直形变速率水平梯度划分为4个等级: $0.06 \text{ mm/km} \leq v_g < 0.17 \text{ mm/km}$, $0.03 \text{ mm/km} \leq v_g < 0.05 \text{ mm/km}$, $0.02 \text{ mm/km} \leq v_g < 0.03 \text{ mm/km}$, $v_g < 0.02 \text{ mm/km}$ (图6)。西藏波密-八宿、四川理塘、康定-雅安等区域的地壳垂直形变速率水平梯度较高。

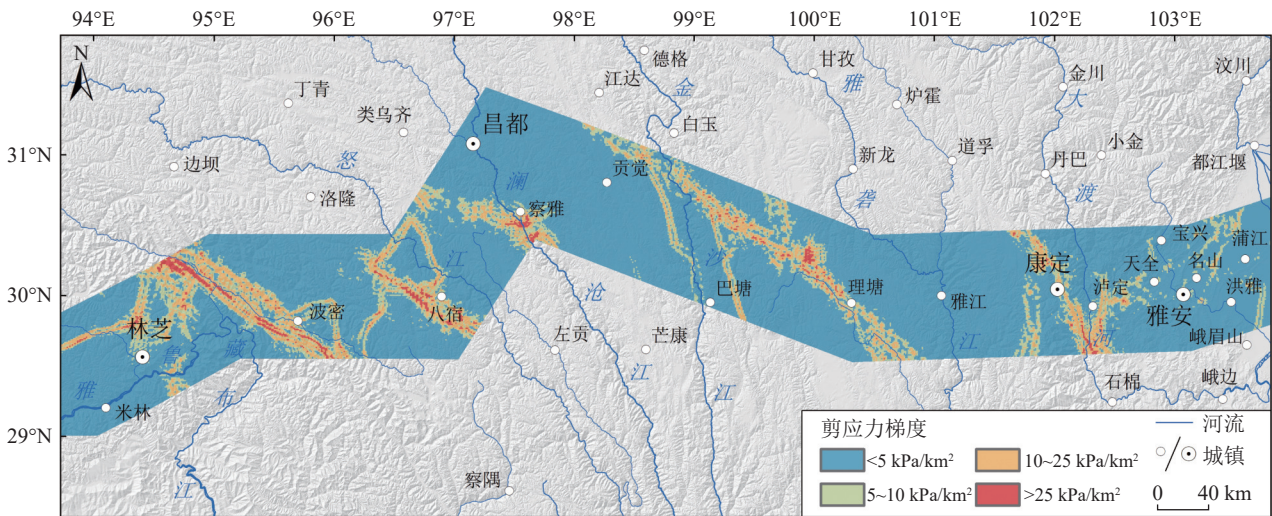


图 5 川西藏东交通廊道最大剪应力梯度图

Fig. 5 Maximum shear stress gradient of the Sichuan-Xizang traffic corridor

2.3 岩土体工程性质

川西藏东交通廊道地层从震旦系—新生界均有分布,岩性有以砂岩、板岩、千枚岩为主的沉积岩、变质岩,以花岗岩为主的侵入岩,以及以灰岩为主的高原可溶岩。川西藏东交通廊道贯穿 7 条特提斯洋俯冲消减碰撞形成的蛇绿混杂岩带或俯冲增生杂岩带:雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带、嘉黎—迫龙藏布蛇绿混杂岩带、怒江俯冲增生杂岩带、澜沧江增生杂岩带、金沙江增生杂岩带、甘孜—理塘增生杂岩带及炉霍—道孚蛇绿混杂岩带。根据地层岩性生成关系、工程地质特性,将川西藏东交通廊道区域地层岩性划分为 14 个工程地质岩组,其中构造混杂岩单独作为

一个岩组。在工程地质岩组分类的基础上,进一步根据工程性质的差异性对地层岩性进行了合并,划分为 4 类,分别为工程性质好、工程性质较好、工程性质中等和工程性质差(表 2;图 7)。

2.4 水文地质

川西藏东交通廊道地下水类型多样,主要有松散岩土孔隙水、基岩裂隙水和构造岩溶水 3 种类型,区域碳酸盐岩地层时代贯穿震旦纪—三叠纪,岩性以灰岩、白云岩和大理岩为主,主要分布于二郎山—康定、巴塘—罗麦、贡觉—昌都、邦达—康玉、多吉—鲁朗 5 个主要区段(张永双等, 2021)。地下水分布主要受地形地貌、地质构造和地层岩性控制,

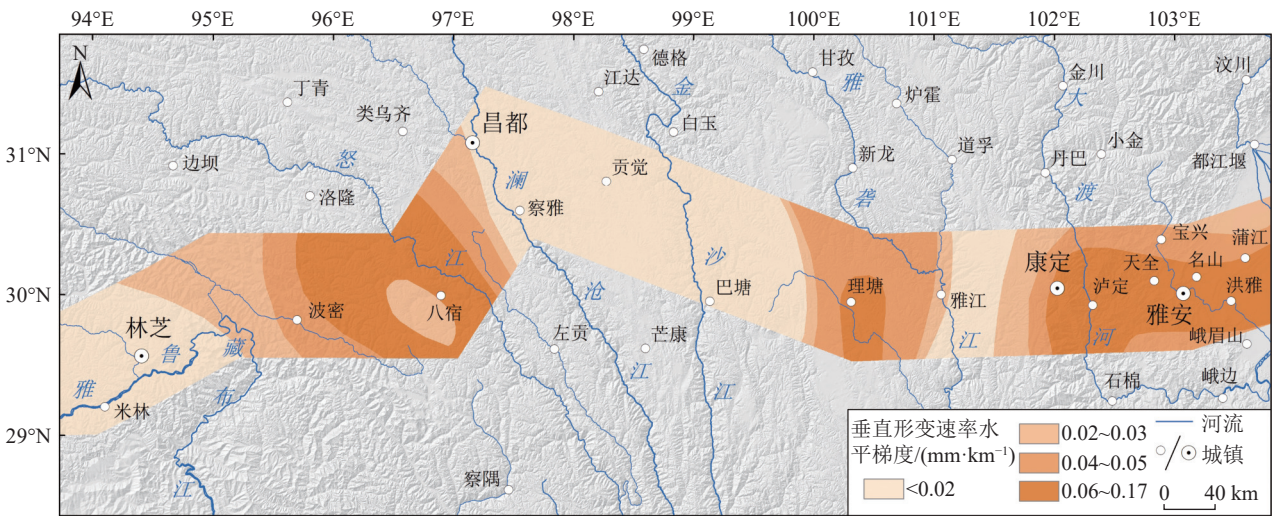


图 6 川西藏东交通廊道地壳垂直形变速率水平梯度

Fig. 6 Horizontal gradient of vertical crustal deformation velocity of the Sichuan-Xizang traffic corridor

表 2 岩性特征划分与工程地质岩组对应表
Table 2 Lithologic characteristics and engineering geological units

工程性质	工程地质岩组分类名称	编号
工程性质好	坚硬的厚层状砂岩岩组	1
	坚硬的中—厚层状灰岩及白云岩岩组	6
	坚硬块状花岗岩、安山岩、闪长岩岩组	12
工程性质较好	较坚硬—坚硬的中—厚层状砂岩夹砾岩、泥岩、板岩岩组	2
	较坚硬—坚硬薄—中厚层状板岩、千枚岩与变质砂岩互层岩组	9
	较坚硬的薄—中厚层状灰岩、泥质灰岩岩组	7
工程性质中等	软弱—较坚硬薄—中厚层状砂、泥岩及砾、泥岩互层岩组	4
	软硬相间的中—厚层状砂岩、泥岩夹灰岩、泥质灰岩及其互层岩组	3
	软硬相间的中—厚层状灰岩、白云岩夹砂、泥岩、千枚岩、板岩岩组	8
	以坚硬的块状玄武岩为主的岩组	11
	软弱的薄层状泥、页岩岩组	5
工程性质差	较弱—较坚硬的薄—中厚层状千枚岩、片岩夹灰岩、砂岩、火山岩岩组	10
	构造混杂岩带	14
	软质散体结构岩组	13

并以大江大河为排泄终点。根据地下水赋存条件、地下水类型和泉流量,含水层富水性可以划分为丰

富(<1000 m³/d)、中等(300~1000 m³/d)、贫乏(100~300 m³/d)和极贫乏(<100 m³/d)(图 8)。地下水主要富集在天全—大鱼溪、二郎山—火夹仲、巴塘—罗麦、扩达—昌都、邦达—康玉、多吉—鲁朗 6 个区段。

2.5 不良地质作用

2.5.1 地热异常

川西藏东交通廊道水热活动频繁强烈,地热温泉是近期构造运动的伴生现象,活动性深大断裂与大型褶皱为重要控热构造(漆继红等, 2022)。大地热流值可以反映地壳近代活动性,高热流值反映地壳深部热源距地表近,地壳上部受拉张应力,地壳活动性强;相反,热流值低的地方岩浆熔融体埋深大,地壳活动性低。

地热对工程建设存在重大影响。川西藏东交通廊道高温地热异常区主要分布在康定、巴塘、理塘、察雅等地区;中温地热异常区主要分布在芒康、左贡、昌都等地区;低温地热异常区主要分布在高、中温地热异常区外围(图 9)(张永双等, 2021)。

2.5.2 地质灾害

川西藏东交通廊道地质灾害极发育,对工程规划建设危害较大的主要有高位远程滑坡及灾害链、深层蠕滑型滑坡、地震滑坡、高位冰川泥石流等,这些地质灾害成为工程规划建设的“拦路虎”(郭长宝等, 2021; 袁东等, 2023)。地质灾害易发性指在一定的地质构造、地形地貌、气候条件等地质环境条件下地质灾害的易发程度。通过分析地质灾害发育分布

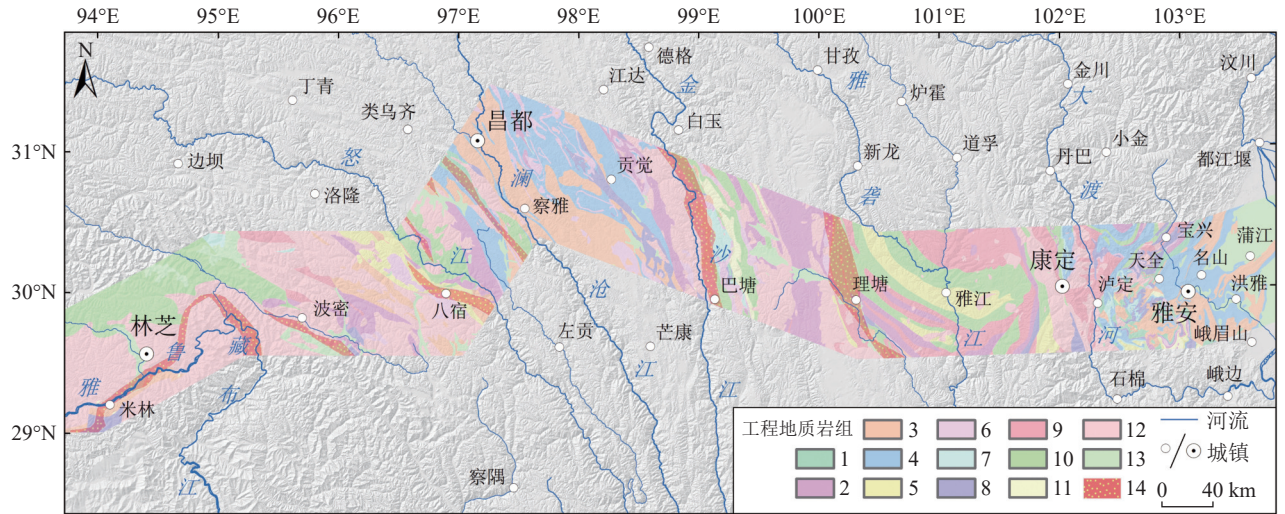


图 7 川西藏东交通廊道工程地质岩组(工程地质岩组编号同表 2)

Fig. 7 Engineering geological units of the Sichuan-Xizang traffic corridor

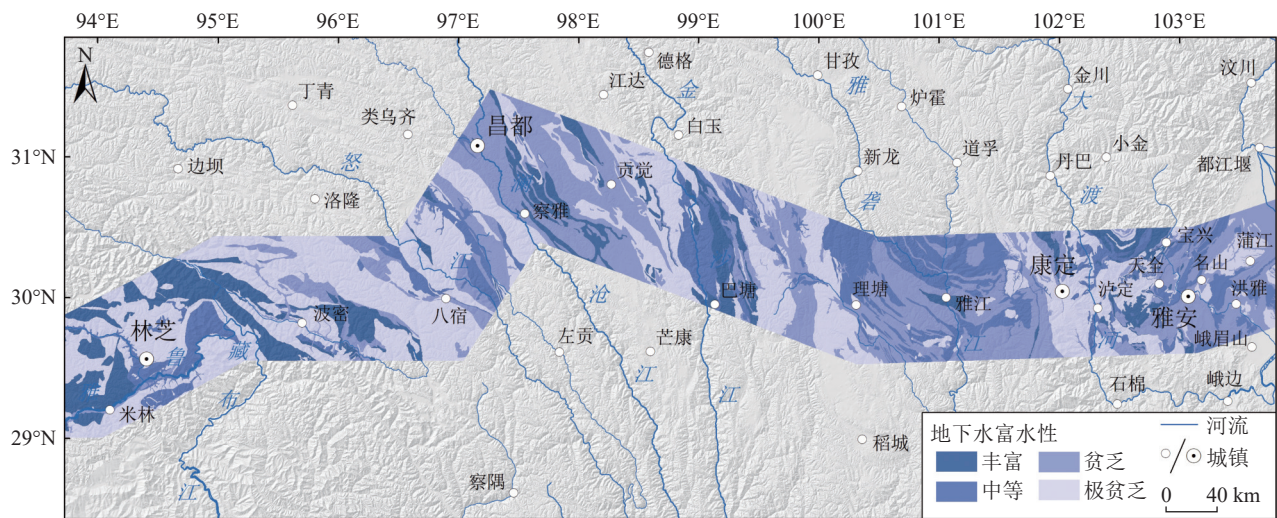


图 8 川西藏东交通廊道地下水富水性分布图

Fig. 8 Groundwater rich strength of the Sichuan-Xizang traffic corridor

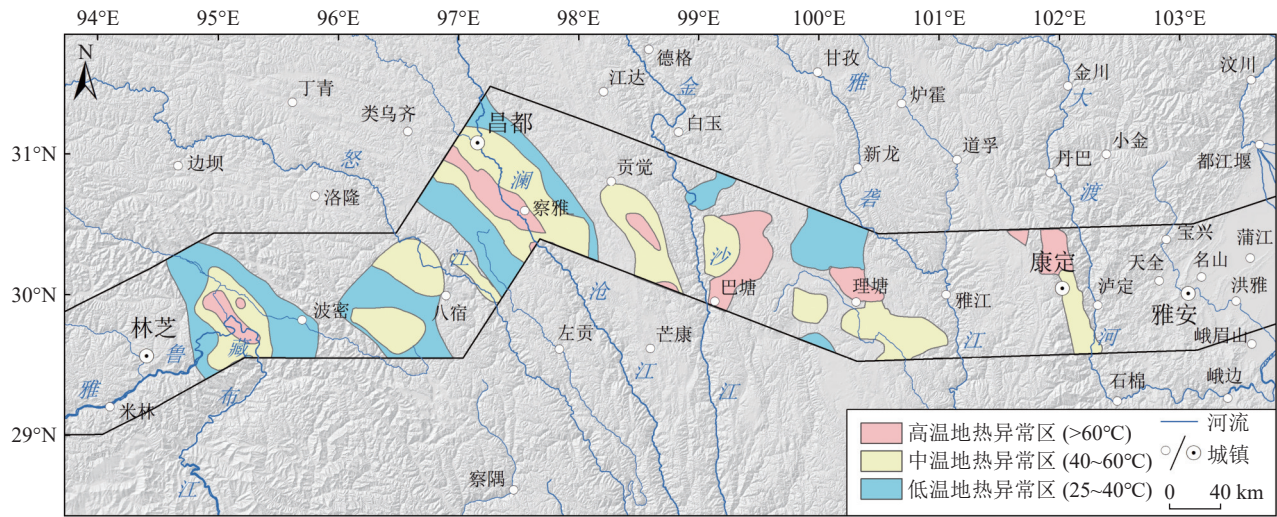


图 9 川西藏东交通廊道地热异常分布图

Fig. 9 Geothermal anomaly distribution of the Sichuan-Xizang traffic corridor

规律与地质环境因素的相关关系,采用加权信息量方法计算获得了区域地质灾害易发性(图 10)。地质灾害易发性划分为 4 个等级:低易发、中等易发、高易发和极高易发,其中地质灾害极高易发区和高易发区主要沿断裂带及大江大河展布。

3 区域工程地质条件评价

3.1 层次分析与指标权重

在 ArcGIS 平台上编制因子指标专题图,根据区域工程地质条件评价需求和数据精度,将栅格数据分辨率定为 25 m×25 m,矢量数据离散化为栅格数据,并进行因子指标的等级量化。采用层次分析法

计算因子指标的权重。首先,邀请工程地质领域的专家学者,根据因子指标对区域工程地质条件的影响程度,逐次给出 2 个因子指标之间的相对重要程度(打分),相对重要程度大则分值高,相对重要程度小则分值低;然后,计算专家打分的均值,取其近似整数或倒数,构建因子指标的判断矩阵(表 3),求解获得 $\lambda_{max}=9.68$, $CI=0.085$, $RI=1.32$, $CR=0.062<0.1$,符合一致性判据。活动断裂的权重最高,其次是地形起伏度和地质灾害易发性。在因子指标权重确定的基础上,对因子指标等级赋权重值(表 4),数值的大小表示其对工程地质条件的影响程度,数值越大,代表不利影响越大。

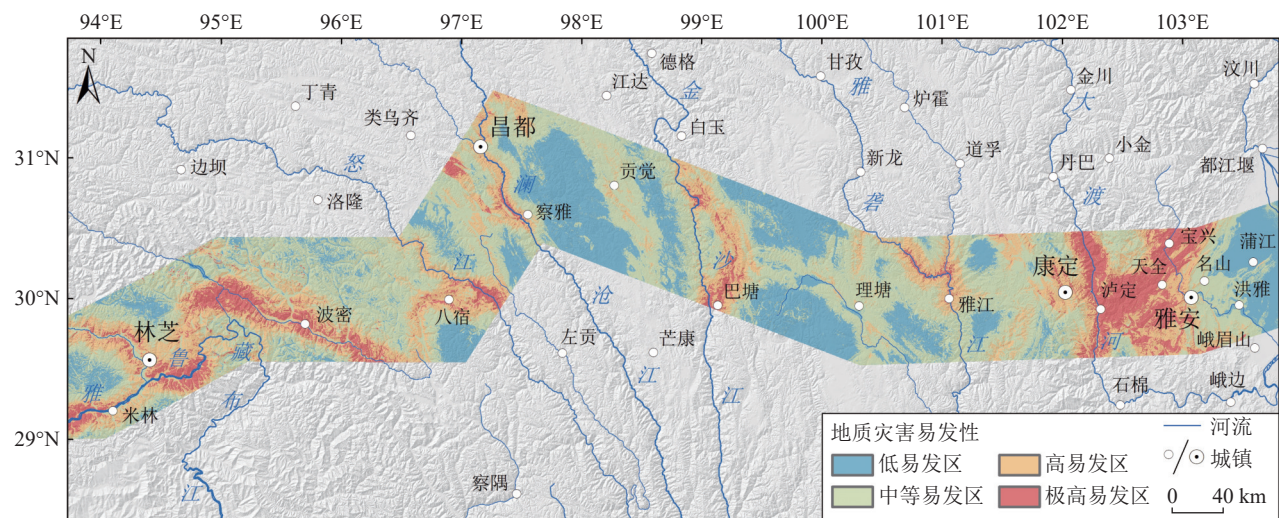


图 10 川西藏东交通廊道地质灾害易发性分布图

Fig. 10 Geological hazard susceptibility of the Sichuan-Xizang traffic corridor

表 3 川西藏东交通廊道工程地质条件因子指标判断矩阵

Table 3 Factor judgment matrix of engineering geological condition of the Sichuan-Xizang traffic corridor										
因子	地形起伏度	活动断裂	PGA	剪应力梯度	地壳形变	岩土体性质	地下水富水强度	高温地热	地质灾害易发性	权重
地形起伏度	1	1/3	1	4	4	3	3	5	1	0.17
活动断裂	3	1	3	4	4	3	3	4	2	0.25
PGA	1	1/3	1	3	3	1	1	3	1	0.11
剪应力梯度	1/4	1/4	1/3	1	1	1/3	1/3	1	1/4	0.04
地壳形变	1/4	1/4	1/3	1	1	1/3	1/3	1	1/4	0.04
岩土体性质	1/3	1/3	1	3	3	1	1	1/3	1/2	0.08
地下水富水强度	1/3	1/3	1	3	3	1	1	3	1/2	0.10
高温地热	1/5	1/4	1/3	1	1	3	1/3	1	1/3	0.06
地质灾害易发性	1	1/2	1	4	4	2	2	3	1	0.15

3.2 评价结果与分析

采用 ArcGIS 空间分析功能,对因子指标的栅格图层进行权重赋值和图层叠加运算,获得工程地质条件指数值。综合考虑区域工程地质条件评价指数值,结合野外地质调查和工程地质环境认识,将川西藏东交通廊道区域工程地质条件划分为好、较好、中等和差 4 个等级,生成工程地质条件区划栅格图,经过局部平滑和噪音处理,获得工程地质条件评价成果图(图 11)。

工程地质条件好:该类分区面积约 29.95×10^2 km²,占研究区总面积的 28.77%,远离活动断裂带和深切峡谷,呈块状、条带状分布于活动断裂带及深切峡谷之间,历史地震少,地质灾害不发育,地形坡度一般小于 15°,地形起伏度小。

工程地质条件较好:该类分区面积约 32.12×10^2 km²,占研究区总面积的 30.86%,主要分布在断裂带 5 km 以外的地区,多呈块状、条带状零散分布,受活动断裂影响较小,距离沟谷水系较远,地质灾害发育一般,地形坡度较小、地形起伏度较小。

工程地质条件中等:该类分区面积约 27.78×10^2 km²,占研究区总面积的 26.68%,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,虽然部分区域距强活动断裂小于 1 km,但由于地形较平坦或斜坡平缓,工程地质岩组好,远离沟谷影响,因而工程地质条件为中等。

工程地质条件差:该类分区面积约 14.25×10^2 km²,占研究区总面积的 13.69%,主要分布在活动断

表 4 川西藏东交通廊道工程地质条件因子指标权重

Table 4 Factor level weights of engineering geological condition of the Sichuan–Xizang traffic corridor

地质条件	因子指标/单位	权重值	因子指标等级	权重/%	权重值
地形地貌	地形起伏度/(m·km ⁻²)	0.17	<200	7	1.19
			200~400	10	1.70
			400~600	15	2.55
			60~800	25	4.25
			>800	43	7.31
地质结构	活动断裂	0.25	较弱影响区	13	3.25
			中等影响区	18	4.50
			强影响区	29	7.25
			极强影响区	40	10.00
	地震动峰值加速度/g	0.11	0.1	5	0.55
			0.15	11	1.21
			0.2	16	1.76
			0.3	28	3.08
			0.4	40	4.40
	剪应力梯度/ (kPa·km ⁻²)	0.04	<5	18	0.72
			5~10	21	0.84
			10~25	26	1.04
			≥25	35	1.40
	地壳垂直形变速率水平梯度/ (mm·km ⁻¹)	0.04	<0.02	17	0.68
			0.02~0.03	20	0.80
			0.03~0.05	26	1.04
			0.06~0.17	37	1.48
岩土体	岩土体工程性质	0.08	工程性质差	37	2.96
			工程性质中等	28	2.24
			工程性质较好	20	1.60
			工程性质好	15	1.20
水文地质	地下水富水强度	0.1	极贫乏	12	1.20
			贫乏	17	1.70
			中等	28	2.80
			丰富	43	4.30
不良地质作用	地热异常	0.06	无地热异常区	0	0
			低温地热异常区(25℃≤T<40℃)	24	1.44
			中温地热异常区(40℃≤T<60℃)	33	1.98
			高温地热异常区(T≥60℃)	43	2.58
	地质灾害易发性	0.15	低易发	8	1.20
			中等易发	18	2.70
			高易发	30	4.50
			极高易发	44	6.60

裂带和高山峡谷区。工程地质条件的主要影响因素是活动断裂和高山峡谷大起伏度地形地貌,突出表

现为距强活动断裂距离较近,特别是距活动断裂 1 km 范围内、多条断裂相交或近于相交的地区影响

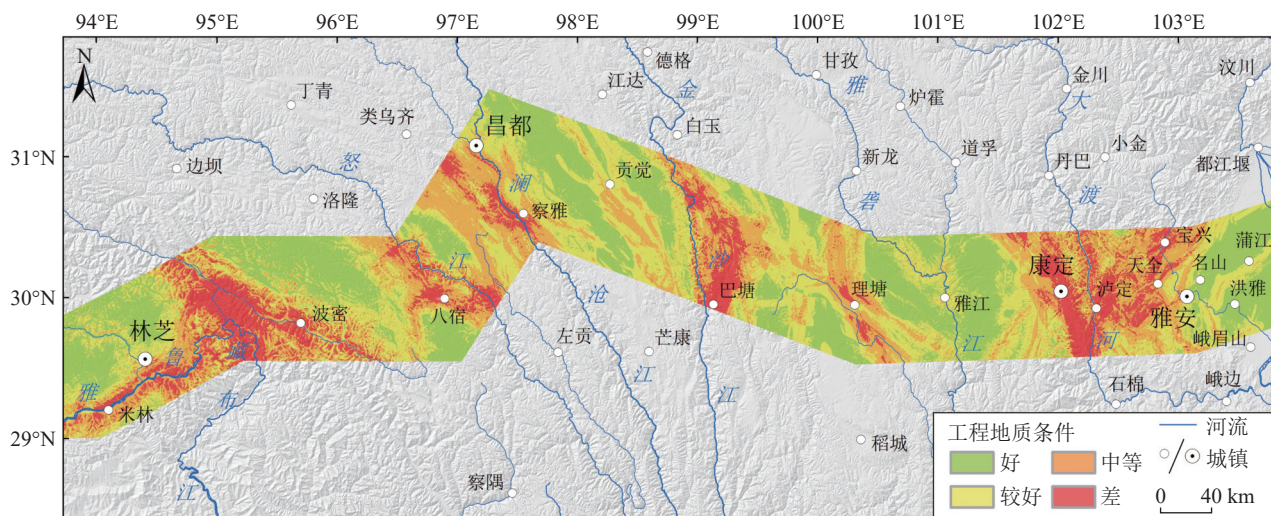


图 11 川西藏东交通廊道区域工程地质条件评价结果图

Fig. 11 Evaluation results of regional engineering geological condition of the Sichuan-Xizang traffic corridor

较大。地质灾害强烈发育地带、地形起伏较大及斜坡坡度大于 35° 的地带一般也位于工程地质条件差的区域。

4 讨论

层次分析法是一种基于专家知识经验的层次权重决策分析方法,首先需要根据专家知识经验,为地质环境因子指标之间的相对重要程度进行打分,然后统计计算因子指标权重。再者,地质环境因子指标本身的等级权重也是由专家经验打分确定的。因此,最终获得的是定性和定量相结合的区域工程地质条件评价结果。

根据区域工程地质条件的基本内涵,工程地质条件包含地形地貌、地质结构、岩土体类型及工程性质、水文地质、不良地质作用、天然建筑材料等方面。本文不特定指向某个工程建设,因此只选取了工程地质环境背景因素,没有考虑天然建筑材料。

研究区覆盖范围大,数据精度不够精细,GIS 技术的因子指标计算采用的是栅格数据,分辨率为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$,研究结果为区域尺度,工程地质条件等级划分综合了自然间断法、野外地质调查和工程地质环境认识。评价结果需要依据后续工程地质勘察或工程建设验证,缺乏定量化的验证方法,这是区域工程地质条件研究的难点。因此,区域工程地质条件评价结果可以指导重大工程规划阶段的地质风险防控,但不能代替后续的工程地质勘察工作。

5 结论

(1)川西藏东交通廊道位于青藏高原东部板块碰撞和构造活跃的地形急变带,历史地震和地质灾害发育,岩体破碎,高原构造岩溶发育,水热活动频繁强烈。

(2)活动断裂是最不利的工程地质条件因素,其次是地形地貌(地形起伏度)和地质灾害易发程度。选取 9 个地质环境因子指标,采用层次分析法,完成区域工程地质条件评价,将研究区工程地质条件划分为好、较好、中等和差 4 个等级。

(3)工程地质条件好的地区远离活动断裂带和深切峡谷,呈块状、条带状分布于活动断裂带及深切峡谷之间。工程地质条件较好的地区主要分布在活动断裂带 5 km 以外,多呈块状、条带状零散分布。工程地质条件中等的地区主要分布在工程地质条件差地区的外围,多位于距活动断裂 1~5 km 的范围内。工程地质条件差的地区主要分布于活动断裂带和高山峡谷区,突出表现为距强活动断裂较近,尤其是多条断裂相交或近于相交的地区。

致谢:感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所马剑飞副研究员、张春潮副研究员、李向全研究员提供的川西藏东交通廊道水文地质图及说明书,以及刘锋副研究员提供的川西藏东交通廊道地热异常分布图。

References

Deng Q D. 2002. Advances and overview on researches of active

- tectonics in China[J]. *Geological Review*, 48(2): 168–177 (in Chinese with English abstract).
- Guo C B, Zhang Y S, Jiang L W, et al. 2009. Research on geo-engineering conditions of the Lijiang–Shangri-La railway section of the Yunnan–Tibet Railway based on the GIS method[J]. *Geoscience*, 23(3): 545–552 (in Chinese with English abstract).
- Guo C B, Zhang Y S, Jiang L W, et al. 2017. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan–Tibet Railway and its adjacent area[J]. *Geoscience*, 31(5): 877–889 (in Chinese with English abstract).
- Guo C B, Wu R A, Jiang L W, et al. 2021. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an–Linzhi section of the Sichuan–Tibet Railway, China[J]. *Geoscience*, 35(1): 1–17 (in Chinese with English abstract).
- Harris J R, Wilkinson L, Grunsky E C. 2000. Effective use and interpretation of lithogeochemical data in regional mineral exploration programs: Application of geographic information systems (GIS) technology[J]. *Ore Geology Reviews*, 16(3/4): 107–143.
- Hu H T. 2001. The theory and method of evaluation of regional crustal stability based on concept of “Safe Island” [J]. *Journal of Geomechanics*, 7(2): 97–103 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, Li Y S, Li W L. 2009. Engineering geological evaluation of reconstruction sites following the Wenchuan earthquake[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68: 449–488.
- Lan H X, Zhang N, Li L P, et al. 2021. Risk analysis of major engineering geological hazards for Sichuan–Tibet Railway in the phase of feasibility study[J]. *Journal of Engineering Geology*, 29(2): 326–341(in Chinese with English abstract).
- Li G H, Wang S J, Sun C Z, et al. 2001. Comprehensive assessment of engineering geological environment in hydroelectric development zone, Jinshajiang River[J]. *Earth Science*, 26(3): 309–313(in Chinese with English abstract).
- Li S G. 1977. On Earthquake[M]. Beijing: Geology Press(in Chinese).
- Liu F S, Wu Z H, Zhang Y Q, et al. 2014. New progress and prospects of neotectonics and active tectonics synthetical study on eastern edge Qinghai–Xizang Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(4): 403–418 (in Chinese with English abstract).
- Liu G C. 1961. Regional engineering geology of China[M]. Beijing: China Industry Press(in Chinese).
- Liu J, Wei J H, Hu H, et al. 2018. Research on the engineering geological conditions and stability evaluation of the B2 talus slide at the Jin'an Bridge hydropower station, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77: 105–125.
- Lu C F, Cai C X. 2019. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan–Tibet Railway Project[J]. *Engineering*, 5(5): 833–838.
- Mei S, Chu H X, Dong L Y, et al. 2019. Influencing factors and evaluation application of regional crustal stability in the Bohai Strait[J]. *China Geology*, 3: 354–363.
- Pan G T, Ren F, Yin F G, et al. 2020. Key zones of oceanic plate geology and Sichuan–Tibet Railway Project[J]. *Earth Science*, 45(7): 2293–2304(in Chinese with English abstract).
- Peng J B. 2001. Theory–method system in study of dynamics of the regional stability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 9(1): 3–11(in Chinese with English abstract).
- Peng J B, Cui P, Zhuang J Q. 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan–Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377–2389(in Chinese with English abstract).
- Qi J H, Xu M, Jiang L W, et al. 2022. Characteristics of geothermal cycle and tunnel geothermal disaster controlled by hydrogeological structure in Ya'an to Linzhi Section of Sichuan–Tibet Traffic Corridor[J]. *Earth Science*, 47(6): 2106–2119(in Chinese with English abstract).
- Qi S W, Li Y C, Song S H, et al. 2022. Regionalization of engineering geological stability and distribution of engineering disturbance disasters in Tibetan Plateau[J]. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 599–608 (in Chinese with English abstract).
- Ren Y, Wang D, Li T B, et al. 2021. In-situ geostress characteristics and engineering effect in Ya'an–Xinduqiao section of Sichuan–Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(1): 65–76(in Chinese with English abstract).
- Sun Y J, Guo C B, Wu Z H, et al. 2017. Numerical study of the crustal stress, strain rate and fault activity in the Eastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(3): 385–392(in Chinese with English abstract).
- Tan C X, Sun Y, Wang R J, et al. 1997. Assessment and zonation of regional crustal stability in and around the dam region of the Three Gorges Project on the Yangtze River[J]. *Environmental Geology*, 32(4): 285–295.
- Tang H M. 2020. Fundaments of Engineering Geology[M]. Beijing: Chemical Industry Press(in Chinese).
- Wang C H, Gao G Y, Yang S X, et al. 2019. Analysis and prediction of stress fields of Sichuan–Tibet Railway area based on contemporary tectonic stress field zoning in Western China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(11): 2242–2253(in Chinese with English abstract).
- Wang X C, Chen S T, Zhang H, et al. 2005. Engineering geological conditions of the west line of the South-to-North Water Diversion Project[M]. Zhengzhou: Yellow River Press(in Chinese).
- Xie F R, Cui X F, Zhao J T, et al. 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(4): 654–662(in Chinese with English abstract).
- Xu J R, Zhao Z X. 2006. Characteristic of the regional stress field and tectonic movement on the Qinghai–Tibet Plateau and in its surrounding areas[J]. *Geology in China*, 33(2): 275–285(in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Yu G H, Chen G H, et al. 2007. Near-surface character of permanent geologic deformation across the mega-strike-slip faults in the Northern Tibetan Plateau[J]. *Seismology and Geology*, 29(2): 201–217(in Chinese with English abstract).
- Xu Z X, Meng W, Guo C B, et al. 2020. In-situ stress measurement and its application of a deep-buried tunnel in Zheduo Mountain, West Sichuan[J]. *Geoscience*, 35(1): 114–125(in Chinese with English abstract).
- Xu Z X, Zhang L G, Jiang L W, et al. 2021. Engineering geological environment and main engineering geological problems of Ya'an–Linzhi Section of the Sichuan–Tibet Railway[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 53(3): 29–42(in Chinese with English abstract).
- Yao X, Li L J, Zhang Y S, et al. 2015. Regional crustal stability assessment of the eastern margin of Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 32–44(in Chinese with English abstract).

- Yuan D, Zhang G Z, Wang D, et al. 2023. Analysis on development characteristics of deris flow and route selection countermeasures along the traffic lines in mountain areas of Western China[J]. Geological Bulletin of China, 42(5): 743–752(in Chinese with English abstract).
- Zeng R S, Sun W G. 1992. Discussion on the seismoactivity and focal mechanism of the Qinghai–Tibet Plateau and its adjacent areas and the eastern flow of the plateau material[J]. Acta Seismologica Sinica, 14(S): 534–564(in Chinese).
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. 2003. Strong earthquake activities and active blocks in Chinese mainland[J]. Science in China (Series D), 33(S): 12–20(in Chinese).
- Zhang X G, Wang S J, Zhang Z Y. 2000. Engineering Geology of China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhang Y Z, Zhang L R, Su S P, et al. 1992. Gradients of vertical deformation rates and high-risk areas of strong earthquake in China[J]. Seismology and Geology, 14(3): 237–244(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Yao X, Hu D G, et al. 2012. Quantitative zoning assessment of crustal stability along the Yunnan–Tibet Railway Line, Western China[J]. Acta Geological Sinica, 86(4): 1004–1012.
- Zhang Y S, Guo C B, Li X Q, et al. 2021. Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan–Tibet Railway Corridor: Current status and development direction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 48(5): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Wu R A, Guo C B, et al. 2022. Geological safety evaluation of railway engineering construction in plateau mountainous region: ideas and methods[J]. Acta Geologica Sinica, 96(5): 1736–1751(in Chinese with English abstract).
- Zhu S B, Shi Y L. 2005. Genetic Algorithm–finite element inversion of topographic spreading forces and drag forces of lower crust to upper crust in Tibetan Plateau[J]. Acta Scientiarum Naturalium, 41(2): 225–234(in Chinese with English abstract).
- 究新进展及展望[J]. 地质通报, 33(4): 403–418.
- 刘国昌. 1961. 中国区域工程地质学[M]. 北京: 中国工业出版社.
- 潘桂棠, 任飞, 尹福光, 等. 2020. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J]. 地球科学, 45(7): 2293–2304.
- 彭建兵. 2001. 区域稳定动力学研究(一)——理论与方法体系[J]. 工程地质学报, 9(1): 3–11.
- 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 39(12): 2377–2389.
- 漆继红, 许模, 蒋良文. 2022. 川藏交通廊道雅林段水文地质结构控制的水热循环及隧道热害特征[J]. 地球科学, 47(6): 2106–2119.
- 祁生文, 李永超, 宋帅华, 等. 2022. 青藏高原工程地质稳定性分区及工程扰动灾害分布浅析[J]. 工程地质学报, 30(3): 599–608.
- 任洋, 王栋, 李天斌, 等. 2021. 川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 40(1): 65–76.
- 孙玉军, 郭长宝, 吴中海, 等. 2017. 数值模拟探讨青藏高原东部应力应变场及断裂活动性[J]. 地球学报, 38(3): 385–392.
- 唐辉明. 2020. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 王成虎, 高桂云, 杨树新, 等. 2019. 基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J]. 岩石力学与工程学报, 38(11): 2242–2253.
- 王学潮, 陈书涛, 张辉, 等. 2005. 南水北调西线工程地质条件研究[M]. 郑州: 黄河出版社.
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 47(4): 654–662.
- 徐纪人, 赵志新. 2006. 青藏高原及其周围地区区域应力场与构造运动特征[J]. 中国地质, 33(2): 275–285.
- 徐锡伟, 于贵华, 陈桂华, 等. 2007. 青藏高原北部大型走滑断裂带近地表地质变形带特征分析[J]. 地震地质, 29(2): 201–217.
- 徐正宣, 孟文, 郭长宝, 等. 2020. 川西折多山某深埋隧道地应力测量及其应用研究[J]. 现代地质, 35(1): 114–125.
- 徐正宣, 张利国, 蒋良文, 等. 2021. 川藏铁路雅安至林芝段工程地质环境及主要工程地质问题[J]. 工程科学与技术, 53(3): 29–42.
- 姚鑫, 李凌婧, 张永双, 等. 2015. 青藏高原东缘区域地壳稳定性评价[J]. 地质通报, 34(1): 32–44.
- 袁东, 张广泽, 王栋, 等. 2023. 西部山区交通廊道泥石流发育特征及选线对策[J]. 地质通报, 42(5): 743–752.
- 曾融生, 孙为国. 1992. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报, 14(增刊): 534–564.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑), 33(增刊): 12–20.
- 张咸恭, 王思敬, 张倬元. 2000. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社.
- 张郅珍, 张立人, 粟生平, 等. 1992. 中国大陆垂直形变速率梯度与强震危险区[J]. 地震地质, 14(3): 237–244.
- 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 2021. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向[J]. 水文地质工程地质, 48(5): 1–12.
- 张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 2022. 高原山区铁路工程建设地质安全评价: 思路与方法[J]. 地质学报, 96(5): 1736–1751.
- 朱守彪, 石耀霖. 2005. 青藏高原地形扩展力以及下地壳对上地壳的拖曳力的遗传有限单元法反演[J]. 北京大学学报(自然科学版), 41(2): 225–234.

附中文参考文献

- 邓起东. 2002. 中国活动构造研究的进展与展望[J]. 地质论评, 48(2): 168–177.
- 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 2009. 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, 23(3): 545–552.
- 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 2017. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. 现代地质, 31(5): 877–889.
- 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 等. 2021. 川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. 现代地质, 35(1): 1–17.
- 胡海涛. 2001. 区域地壳稳定性评价的“安全岛”理论及方法[J]. 地质力学学报, 7(2): 97–103.
- 兰恒星, 张宁, 李郎平, 等. 2021. 川藏铁路可研阶段重大工程地质风险分析[J]. 工程地质学报, 29(2): 326–341.
- 李国和, 王思敬, 孙承志. 2001. 金沙江水电开发区域工程地质环境综合评价[J]. 地球科学, 26(3): 309–313.
- 李四光. 1977. 论地震[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘凤山, 吴中海, 张岳桥, 等. 2014. 青藏高原东缘新构造与活动构造研