

文章编号: 1674—8247(2025)02—0001—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.001

## 滇西红层大变形地质选线风险评价研究

杜建军 张营旭 宋 章 陈 伟 沈 维

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**针对滇西红层区深埋、高地应力以及软弱破碎围岩的隧道工程,软岩大变形问题日益严重,然而在选线阶段缺乏隧道软岩大变形风险评价方法。本研究通过分析滇西红层区隧道工程的勘察与施工数据,基于岩石强度应力比确定软岩大变形等级。研究结果表明,(1)滇西红层区砂泥岩岩心的砂质含量与其天然单轴抗压强度平均值呈正相关;(2)该地区软岩大变形普遍存在,但以低风险为主,不影响该地区隧道选线;(3)局部泥质富集带叠加断裂密集区叠加形成高风险单元,隧道选线应尽量避免;(4)隧道施工中软岩大变形等级与风险评估结果的一致性验证了本研究方法在滇西红层区隧道选线阶段评估软岩大变形风险的适用性。本研究可为滇西红层的深埋长大隧道工程选线提供参考。

**关键词:**选线阶段;软岩大变形;风险评价;滇西红层

**中图分类号:**U212.22;U25 **文献标志码:**A

## Risk Assessment Study on Geological Route Selection for Large Deformation in Red Beds of Western Yunnan

DU Jianjun ZHANG Yingxu SONG Zhang CHEN Wei SHEN Wei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Tunnel engineering in the deep-buried, high-stress, and weak, fractured rock mass of the red beds in western Yunnan is increasingly confronted with significant soft rock deformation issues. However, there is a lack of risk assessment methods for soft rock deformation during the route selection phase. This study analyzed the survey and construction data of tunnel projects built in the red beds of western Yunnan and determined the grades of soft rock deformation based on the rock strength-stress ratio. The results indicate that: (1) There is a positive correlation between the sand content of sand-mudstone cores and their average natural uniaxial compressive strength in the red beds of western Yunnan. (2) Although large deformation of soft rocks is common in this area, it is mainly low-risk and does not significantly impact tunnel route selection. (3) High-risk units formed by the superposition of locally enriched muddy zones and fault-dense areas should be avoided during tunnel route selection. (4) The consistency between the grades of soft rock deformation and risk assessment results during tunnel construction validates the applicability of the proposed method for assessing soft rock deformation risks during the tunnel route selection in the red beds of western Yunnan. This study can provide a reference for route selection in deep and long tunnel projects in the red beds of western Yunnan.

**Key words:** route selection phase; large deformation of soft rocks; risk assessment; red beds of western Yunnan

收稿日期:2025-02-10

作者简介:杜建军(1971-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中国铁路经济规划研究院有限公司科研课题(2021YJJ06)

引文格式:杜建军,张营旭,宋章,等.滇西红层大变形地质选线风险评价研究[J].高速铁路技术,2025,16(2):1-6.

DU Jianjun, ZHANG Yingxu, SONG Zhang, et al. Risk Assessment Study on Geological Route Selection for Large Deformation in Red Beds of Western Yunnan [J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2): 1-6.

随着国家基础设施建设的持续发展,地下工程领域具有显著增长潜力,但同时面临一系列工程挑战,特别是在深埋、高地应力以及软弱破碎围岩的隧道工程中,软岩大变形问题尤为突出。例如,兰新铁路乌鞘岭隧道、兰渝铁路木寨岭隧道和新城子隧道<sup>[1]</sup>、丽香铁路中义隧道、成兰铁路茂县隧道以及萍莲高速公路莲花隧道等,均遭遇了不同程度的软岩大变形问题。由于软岩变形量大、变形速率快、持续时间长等特点,常导致支护结构侵陷和破坏,进而造成工期延误和经济损失,严重时甚至可能造成人员伤亡,给隧道工程安全建设与运营带来了严峻挑战<sup>[2]</sup>。

在地质勘察阶段,国内外学者对软岩大变形的分级指标和预测方法进行了深入研究。软岩大变形的预测方法涵盖了基于岩体力学参数的定量分析、经验公式的应用<sup>[3]</sup>,以及结合现场监测数据的半经验方法。李国良等<sup>[4]</sup>基于均质地层圆形洞室弹塑性位移解析解和我国现行规范围岩参数,研究了软岩隧道挤压大变形的规律,并提出了大变形分级标准;张广泽等<sup>[5]</sup>通过系统分析国内外隧道围岩大变形案例,以岩石强度应力比为基础,提出了适用于不同地质勘察阶段的隧道围岩大变形分级方法;张沛远等<sup>[6]</sup>则运用经验法和半经验-半理论法预测了莲花隧道的变形趋势。此外,还有研究者采用模糊数学理论、可拓理论、概率云模型、关联规则、支持向量机、神经网络等多种模糊评价方法<sup>[7]</sup>对软岩大变形进行分级预测,并取得了较好的应用效果。这些方法通过综合考量多种因素,提升了软岩大变形预测的准确性和可靠性,为隧道及地下工程的安全建设与运营提供了重要的科学支持。

尽管这些研究成果对于隧道软岩大变形的风险评估和预测具有重要的指导意义,但其主要基于单个隧道勘察与施工的相关实测数据来预测和评估该工程的软岩大变形情况,尚未能在选线阶段就对软岩大变形进行系统的预测与评估。

由紫红色、褐红色的泥岩与砂岩交替组成的滇西红层广泛分布在云南西部地区<sup>[8]</sup>,如图1所示。由于其易破碎和变形的特性,该地区隧道软岩大变形问题尤为突出,严重制约着云南西部地区交通、水利、能源工程的建设。同时,滇西红层地区的大瑞铁路、大临铁路、玉磨铁路、昆磨高速公路等工程已建成多条隧道,积累了大量软岩大变形相关数据。基于此,本研究以滇西红层区为研究对象,研究一种适用于滇西红层选线阶段的软岩大变形风险评价方法,为滇西红层区隧道工程考虑软岩大变形的选线研究提供参考,并为其他地区红层的长大深埋隧道工程选线研究提供科学依据和工程指导。

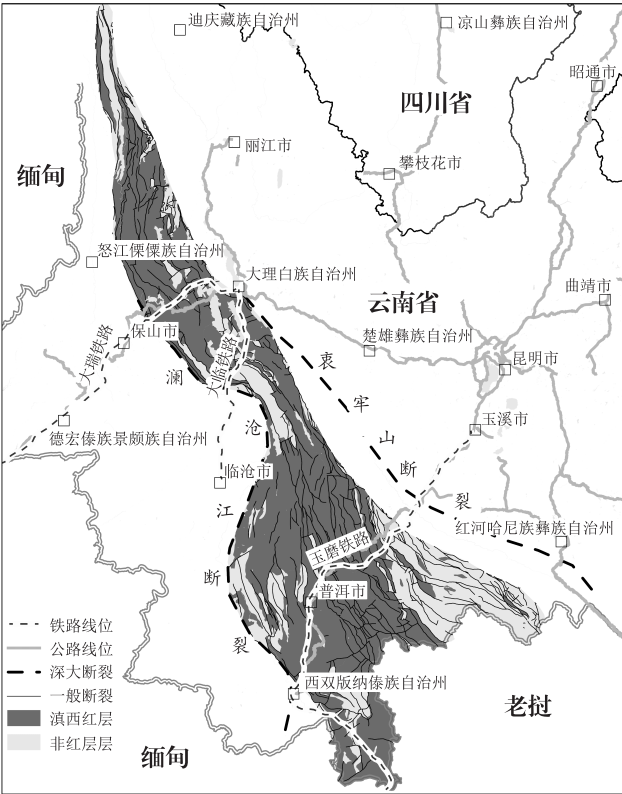


图1 滇西红层区分布图

1 区域地质概况

(1) 地层

根据区域地质研究成果,滇西红层的地层主要由新近系、古近系、白垩系与侏罗系的砂泥岩地层组成,各地层的基本岩性组成如表1所示。

表1 滇西红层各地层基本岩性组成表

系	组	基本岩性组成
新近系	三营组(N <sub>2</sub> s)	紫红色砾岩、粗砂岩、中-细砂岩、泥质岩组合
	三号沟组(N <sub>1</sub> sh)	深灰色泥岩、炭质泥岩、粉砂质细砂岩夹砾岩
古近系	勐腊组(E <sub>2-3</sub> m)	上段为灰紫色砾岩/粗砂岩;中段为灰紫/砖红色砂泥岩;下段为灰紫色砾岩/粗砂岩
	等黑组(E <sub>2</sub> d)	下部灰紫色泥质粉砂岩夹泥岩;上部紫红色泥岩与细-粉砂岩互层
	勐野井组(E <sub>1</sub> m)	紫红色泥岩、粉砂岩,局部夹泥砾岩和泥质灰岩
白垩系	南新组(K <sub>1</sub> n)	下段灰白色石英砂岩夹紫红色泥岩;上段紫红色粉砂岩/细砂岩
	景星组(K <sub>1</sub> j)	下段黄灰色长石石英砂岩夹紫红泥岩;上段暗红色泥岩夹砂岩
侏罗系	坝注路组(J <sub>3</sub> b)	紫红色泥岩/粉砂质泥岩与细砂岩互层
	花开左组(J <sub>2</sub> h)	下段紫红色泥质粉砂岩;上段杂色泥岩夹砂岩
	漾江组(J <sub>1</sub> y)	下部为灰紫色岩屑砂岩、粉砂质泥岩和泥岩;中部为紫红色粉砂岩、泥岩;上部紫红色中厚层细粒岩屑砂岩、粉砂岩和泥岩

滇西红层主要以陆源碎屑沉积为主,各地层普遍含有软质泥岩,在高地应力作用下易发生变形与破坏,进而产生软岩大变形。然而,由于沉积微相的差异,各地层在沉积厚度、砂泥岩比例等方面表现出不同的特征,从而影响软岩大变形等级。

(2)构造

滇西红层区长期受东侧哀牢山造山带和西侧澜沧江造山带的影响,区内断裂构造发育显著。根据1:250万地质图统计资料,区内共发育1 080条断裂,这些断裂导致岩体进一步破碎,显著降低了岩体强度,从而使得该区域更容易发生软岩大变形。

(3)地应力

根据《中国大陆地壳应力环境基础数据库》的数据,研究区的地应力优势方位主要为NNW-NNE向,研究区构造应力场在水平方向上主要呈现近NS向的挤压。结合大瑞铁路大保段、大临铁路和玉磨铁路相关隧道地应力测试结果,将滇西红层区地层的构造应力划分为4个区,分别为:①地应力Ⅰ区:最大水平地应力的范围值为10~15 MPa,平均值取12 MPa;②地应力Ⅱ区:最大水平地应力的范围值为15~20 MPa,平均值取18 MPa;③地应力Ⅲ区:最大水平地应力的范围值为20~25 MPa,平均值取22 MPa;④地应力Ⅳ区:最大水平地应力的范围值为25~35 MPa,平均值取30 MPa。地应力分区如图2所示。

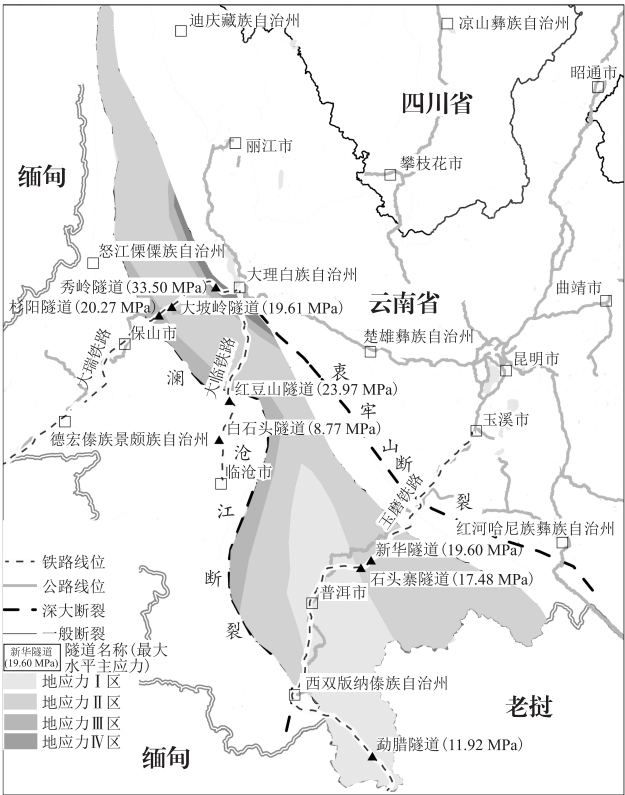


图2 研究区地应力分区图

2 选线阶段软岩大变形风险评价方法

通过调研国内外软岩大变形研究成果,定量评价软岩大变形等级的方法主要基于岩体强度应力比 $M$ ,其计算公式为:

$$M = R_{cm} / \sigma_{max}$$
 (1)

式中: $R_{cm}$ ——岩体强度(MPa);

$\sigma_{max}$ ——区域平均正应力(Pa)。

不同的岩体强度应力比 $M$ 与大变形风险等级以及分级标准的相关性如表2所示。

表2 高地应力软岩大变形风险等级与分级标准表

大变形风险	大变形等级	岩体强度应力比 $M$
极低风险	无	$>0.5$
低风险	Ⅰ级	$0.50 \sim 0.25$
中风险	Ⅱ级	$0.15 \sim 0.25$
高风险	Ⅲ级	$0.05 \sim 0.15$
	Ⅳ级	$<0.05$

对于岩体强度,张广泽等<sup>[5]</sup>根据拉林、成昆等多条铁路的多个软岩大变形隧道经验,总结出一种较为普适的方法:岩体强度为岩石天然单轴抗压强度与地层时代影响系数、小夹角影响系数、岩石强度影响系数、岩层厚度影响系数、岩体完整性指数的乘积。该方法在多个隧道勘察与施工阶段软岩大变形的判识中均取得了较好的应用效果。然而,对于近乎同一时期地层出露地区隧道选线而言,更强调对软岩大变形的宏观判断,因此可以忽略地层时代和隧道与地层的夹角这两个因素。简化后公式为:

$$R_{cm} = R_c a_1 a_2 K_v$$
 (2)

式中: $R_c$ ——岩石天然单轴抗压强度(MPa);

$a_1$ ——岩石强度影响系数;

$a_2$ ——岩层厚度影响系数;

$K_v$ ——岩体完整性指数。

各参数取值如下:

(1)岩石天然单轴抗压强度

岩石天然单轴抗压强度基于区域内既有工程的钻孔岩心测试结果确定。

天然单轴抗压强度如图3所示。通过对大瑞铁路(大保段)、大临铁路和玉磨铁路穿越滇西红层区域的920个岩心样本的天然单轴抗压强度进行分析,结果表明:随着岩心中砂质成分的增加,岩石的天然单轴抗压强度显著提高,其中砂岩岩心的单轴抗压强度最高,可达143.5 MPa。

基于不同砂泥岩比例对应的岩石天然抗压强度数据,推导出滇西红层区砂泥岩比例( $x$ )与岩石天然抗

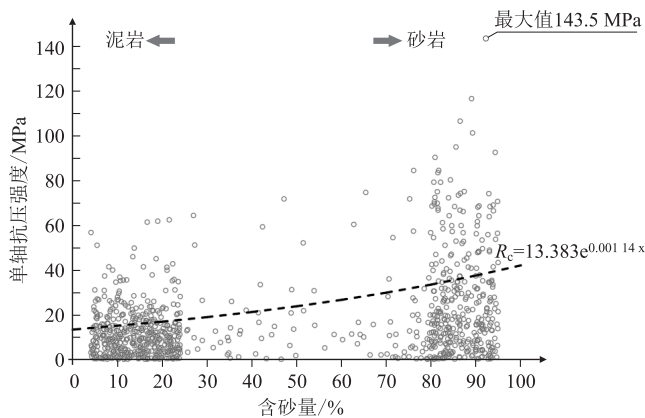


图3 滇西红层区砂泥岩天然单轴抗压强度统计图

压强度( $R_c$ )之间的关系式:

$$R_c = 13.383e^{0.00114x} \tag{3}$$

根据区域地质资料、隧道勘察资料以及施工揭示资料中各地层砂泥岩比例数据,可估算出滇西红层区地层平均岩石单轴抗压强度,估算结果如表3所示。

表3 各地层部分软岩大变形影响参数取值表

系	组	主要岩性	砂岩占比/%		$R_c$ /MPa
			范围值	均值	
新近系	三营组(N <sub>2</sub> s)	砂岩	60~82	71	30
	三号沟组(N <sub>1</sub> sh)	泥岩、炭质泥页岩	5~15	10	15
古近系	勐腊组(E <sub>2-3</sub> m)	砂岩夹泥岩、泥岩夹砂岩	40~56	48	23
	等黑组(E <sub>2</sub> d)	泥质粉砂岩、泥岩砂岩互层	35~47	41	21
	勐野井组(E <sub>1</sub> m)	粉砂质泥岩	40~50	45	22
白垩系	南新组(K <sub>1</sub> n)	砂岩	60~76	68	29
	景星组(K <sub>1</sub> j)	砂岩、泥岩夹粉砂岩	50~60	55	25
侏罗系	坝注路组(J <sub>3</sub> b)	泥岩、粉砂质泥岩夹细砂岩	12~20	16	16
	花开左组(J <sub>2</sub> h)	粉砂岩、泥岩	22~32	27	18
	漾江组(J <sub>1</sub> y)	砂岩、粉砂质泥岩、泥岩	50~58	54	25

(2) 岩石强度影响系数与厚度影响系数

岩石强度影响系数主要依据岩石天然抗压强度进行取值,参考张广泽等<sup>[5]</sup>的研究成果,并结合红层区勘察经验,取值关系如表4所示,具体取值结果如表6所示。

表4 岩石强度影响系数表

岩石强度/MPa	$R_c \leq 5$	$5 < R_c \leq 15$	$15 < R_c \leq 30$	$R_c > 30$
$a_1$	0.9	1.0	1.1	1.2

岩层厚度影响系数主要依据岩层的厚度进行取值,参考张广泽等<sup>[5]</sup>的研究成果,根据红层地区勘察经验取值,取值的关系如表5所示,取值结果如表6所示。

表5 岩层厚度影响系数表

岩层厚度/cm	薄层	中厚层	厚层至巨厚层
$a_2$	0.75	1.00	1.20

表6 各地层部分软岩大变形影响参数取值表

系	组	主要岩性	$R_c$ /MPa	$a_1$	$a_2$
新近系	三营组(N <sub>2</sub> s)	砂岩	30	1.1	1.00
	三号沟组(N <sub>1</sub> sh)	泥岩、炭质泥页岩	15	1.0	0.75
古近系	勐腊组(E <sub>2-3</sub> m)	砂岩夹泥岩、泥岩夹砂岩	23	1.1	0.75
	等黑组(E <sub>2</sub> d)	泥质粉砂岩、泥岩砂岩互层	21	1.1	0.75
	勐野井组(E <sub>1</sub> m)	粉砂质泥岩	22	1.1	0.75
白垩系	南新组(K <sub>1</sub> n)	砂岩	29	1.1	1.00
	景星组(K <sub>1</sub> j)	砂岩、泥岩夹粉砂岩	25	1.1	0.75
侏罗系	坝注路组(J <sub>3</sub> b)	泥岩、粉砂质泥岩夹细砂岩	16	1.1	1.00
	花开左组(J <sub>2</sub> h)	粉砂岩、泥岩	18	1.1	1.00
	漾江组(J <sub>1</sub> y)	砂岩、粉砂质泥岩、泥岩	25	1.1	1.00

(3) 岩体完整性指数

岩体完整性指数主要依据岩体与断层的位置关系确定,参考张广泽等<sup>[5]</sup>的研究成果,并结合红层地区勘察经验取值,取值关系如表7所示。

表7 岩体完整性指数表

断层影响区	范围	岩体完整性指数 $K_v$
断层破碎带	深大断裂两侧200 m,一般断层两侧20 m范围	不按式(2)取值
断层影响带	深大断裂两侧200~1 000 m,一般断层两侧20~200 m范围	0.45
非断层影响区	深大断裂两侧1 000 m以外,一般断层两侧200 m以外范围	0.65

此外,断层破碎带的岩体完整指数不单独取值,参考张广泽等<sup>[5]</sup>的研究成果并结合勘察经验取值,岩体强度直接采用经验参数法取值,如表8所示。

表8 断层破碎带岩体强度表

母岩岩石强度/MPa	$R_c \leq 15$	$15 < R_c \leq 30$	$R_c > 30$
岩体强度/MPa	0.8~1.8	1.8~3.0	3.0~4.2



3 结果分析

利用 GIS 软件,建立岩石天然抗压强度、岩石强度影响系数、厚度影响系数以及断层影响的岩石完整性指数的要素图层,并根据上述软岩大变形风险评价方法对各图层进行分组赋值。随后,将各图层栅格化并提取栅格数据至点,分别用式(2)计算各点的岩体强度  $R_{cm}$ ,利用式(1)计算各点的岩体强度应力比  $M$ ,并通过表 2 对高地应力软岩大变形风险等级进行划分,划分结果如图 4 所示。

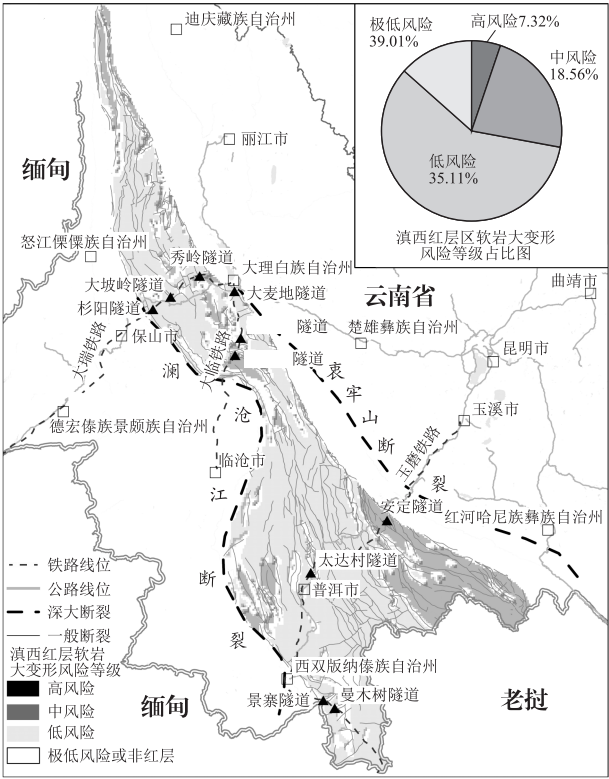


图 4 滇西红层软岩大变形风险分布图

表 9 大变形风险分级划分成果与施工揭示情况对比表

线路名称	施工揭示主要大变形隧道	大变形风险分级	施工确定大变形等级与长度
大瑞铁路	秀岭隧道	中风险	I 级 355 m, II 级 585 m
	大坡岭隧道	低~中风险	I 级 50 m, II 级 1 048 m
	杉阳隧道	低~中风险	I 级 375 m, II 级 2 311 m
大临铁路	大麦地隧道	中风险	I 级~II 级
	林保山隧道	中风险	I 级~II 级
	杏子山隧道	中风险	I 级~II 级
玉磨铁路	安定隧道	中风险	I 级 1 476 m, II 级 592 m
	太达村隧道	中风险	II 级 592 m
	景寨	中风险	I 级 1 535 m、II 级 524 m
	曼木树隧道	低风险	I 级 315 m

区域。

(5)施工期大变形等级与预测结果吻合度较高,

由图 4 可知,(1)滇西红层区软岩大变形现象普遍,软岩大变形的低风险级以上等级的面积比达 86.87%,该地区已建成的隧道在施工中也揭示了多段软岩大变形;(2)滇西红层区软岩大变形以低风险为主,面积占比为 59.1%,高风险区域面积较小,仅 5.20%,该地区隧道施工中判定的软岩大变形等级主要为 I 级~II 级(如表 9 所示);(3)软岩大变形高风险区主要分布在临沧东侧与红河东侧,该区域地层泥质含量更高,且断层密布,导致软岩大变形等级高,隧道选线应尽量避免;(4)隧道施工揭示软岩大变形等级与风险评价结果的一致性验证了本研究方法在滇西红层区隧道选线阶段软岩大变形风险评价的可行性。

4 结论

基于勘察与施工期间岩石强度应力比确定软岩大变形等级的方法,结合滇西红层区隧道工程勘察与施工的相关数据,研究了一种适用于选线阶段的软岩大变形风险评价方法,并对滇西红层区软岩大变形风险进行了评价。得到主要结论如下:

(1)选线阶段易获取的参数包括:邻近工程岩石天然单轴抗压强度、岩石强度影响系数、岩层厚度影响系数以及岩体完整性指数,这些参数可作为软岩大变形风险评价的输入参数。

(2)滇西红层区砂泥岩岩体力学特性研究表明,砂泥岩岩心的砂质含量与其天然单轴抗压强度平均值呈正相关,关系式为: $R_c = 13.383e^{0.00114x}$ 。

(3)滇西红层区软岩大变形以低风险为主(占比接近 60%),整体上不制约隧道选线布局。

(4)零星分布的软岩大变形高风险区具有地层泥质含量高、断层密集的特点,隧道选线应尽量避免这些

证实该方法在滇西红层选线中的适用性;然而,由于本次研究区域较大,所采用的地质图比例尺较

小(1: 250 万),精度可能偏低。在具体的工程选线实践中,可通过增大地质图比例尺来提高评价结果精度。

## 参考文献:

- [1] 何春保,舒丽红. 兰渝铁路高地应力软岩隧道变形机理和施工控制[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(5): 68-73.  
HE Chunbao, SHU Lihong. Deformation Mechanization and Construction Control of High Ground Stresses Soft Rock Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(5): 68-73.
- [2] 张营旭,张广泽,许胜,等. 复杂艰险山区铁路隧道勘察现状分析与总结[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(2): 6-10, 15.  
ZHANG Yingxu, ZHANG Guangze, XU Sheng, et al. Analysis and Summary of the Current Situation of Railway Tunnel Survey in Complex and Dangerous Mountainous Areas[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(2): 6-10, 15.
- [3] 崔光耀,韩驰,王明胜,等. 高地应力软岩隧道大变形机制及控制技术研究综述[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 13-18.  
CUI Guangyao, HAN Chi, WANG Mingsheng, et al. Review of Mechanism of Large Deformation in Soft Rock Tunnels with High Geo-Stress and Its Control Techniques[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 13-18.
- [4] 李国良,刘志春,朱永全. 兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 62-68.  
LI Guoliang, LIU Zhichun, ZHU Yongquan. On the Large Squeezing Deformation Law and Classification Criteria for the Lanzhou-Chongqing Railway Tunnels in Soft and High Geostress Rocks[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 62-68.
- [5] 张广泽,邓建辉,王栋,等. 隧道围岩构造软岩大变形发生机理及分级方法[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 1-12.  
ZHANG Guangze, DENG Jianhui, WANG Dong, et al. Mechanism and Classification of Tectonic-induced Large Deformation of Soft Rock Tunnels[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 1-12.
- [6] 张沛远,张晓辉,张晗,等. 莲花隧道软弱围岩大变形预测方法适用性评价研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1689-1702.  
ZHANG Peiyuan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Han, et al. Applicability Evaluation of Prediction Method for Large Deformation of Soft Surrounding Rock in Lianhua Tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1689-1702.
- [7] 刘伟,常兴旺,周航,等. 西部山区某深埋长大隧道地应力特征及大变形危险性分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(6): 98-103.  
LIU Wei, CHANG Xingwang, ZHOU Hang, et al. Analysis of In-situ Stress Characteristics and Large Deformation Risk for a Deep and Long Tunnel in the Western Mountainous Area[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6): 98-103.
- [8] 张彧齐,周训,刘海生,等. 云南兰坪—思茅盆地红层中温泉和盐泉的水文地质特征[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 40-48.  
ZHANG Yuqi, ZHOU Xun, LIU Haisheng, et al. Hydrogeological Characteristics of the Hot Springs and Salty Springs Occurring in the Redbeds in the Lanping-Simao Basin of Yunnan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 40-48.