引用格式：代向前，王成虎，高桂云，等，2025. 川藏铁路高地应力评价与灾变案例分析研究[J]. 地质力学学报，31（3）：458−474. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025021

Citation: DAI X Q，WANG C H，GAO G Y，et al.，2025. High in-situ stress evaluation and disaster case analysis for the Sichuan–Tibet railway[J]. Journal of Geomechanics，31（3）：458−474. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025021

川藏铁路高地应力评价与灾变案例分析研究

代向前[1,2]，王成虎[2]，高桂云[2]，杨鑫帅[1,2]，刘冀昆[1,2]

DAI Xiangqian[1,2]，WANG Chenghu[2]，GAO Guiyun[2]，YANG Xinshuai[1,2]，LIU Jikun[1,2]

1. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083；
2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085

1. *School of Engineering and Technology*, *China University of Geosciences*(Beijing), *Beijing* 100083, *China*;
2. *National Institute of Natural Hazards*, *Ministry of Emergency Management*, *Beijing* 100085, *China*

High in-situ stress evaluation and disaster case analysis for the Sichuan–Tibet railway

Abstract: ［**Objective**］The challenges posed by high in-situ stress along the newly constructed Sichuan–Tibet railway are significant, characterized by frequent catastrophic events such as rock bursts and large deformations in soft rocks, which substantially impact tunnel construction for the Sichuan–Tibet railway. ［**Method**］Based on 366 sets of in-situ stress measurement data from the Yalin section of the Sichuan–Tibet railway and 28 documented cases of tunnel catastrophes in the areas along the Sichuan–Tibet railway, this study analyzes the characteristics of in-situ stress along the route, categorizes the catastrophic events, and evaluates the high in-situ stress conditions of the Sichuan–Tibet railway. ［**Results**］In the B218, B219, and B222 stress divisions traversed by the Yalin section of the Sichuan–Tibet railway, the maximum (S_H) and minimum (S_h) horizontal principal stresses increase with depth. Within a burial depth of 1000 m, S_H and S_h range from 30.80–37.50 MPa and 21.40–23.56 MPa, respectively. At a burial depth of 2500 m, S_H and S_h increase to 69.80–90.0 MPa and 48.40–56.56 MPa, respectively. The preferred orientations of S_H are NWW, NW, and NE, consistent with focal mechanism solutions, albeit with some local deviations. The lateral pressure coefficient (k_H/k_h) is generally greater than 1, indicating that the Sichuan–Tibet railway is predominantly influenced by S_H. Stress values in each stress division exhibit the pattern $S_H > S_V > S_h$, reflecting a strike-slip fault stress state in the deeper regions below 500 m burial depth. The stress accumulation level (μ_m) values for each stress division are concentrated around 0.3, suggesting a low regional stress accumulation level. Among the 28 documented tunnel catastrophe cases (12 involving rock bursts and 16 involving large deformations in soft rocks), the minimum burial depth for tunnels experiencing rock bursts is 700 m, while the minimum burial depth for tunnels experiencing large deformations in soft rocks is 275 m. Six tunnels are rated as under high stresses, and eight tunnels are rated as under extremely high stresses. High in-situ stress serves as the energy source and the fundamental cause of frequent catastrophes. ［**Conclusion**］Through comparing the actual grades of tunnel disasters, the most appropriate criterion for predicting rock burst and large deformations in Sichuan–Tibet railway tunnels is determined after comparison and selection. Therefore, they should be prioritized in the studies for the subsequent construction of Sichuan–Tibet railway tunnels as a reference basis. ［**Significance**］The research findings offer crucial evidence for the analysis of in-situ stress states and the prevention and control of high in-situ stress disasters in the regions along the Sichuan–Tibet railway, and possess significant engineering guiding significance for enhancing the safety of tunnel engineering and construction efficiency.

基金项目：国家自然科学基金项目(42174118)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174118)

第一作者：代向前（1996—），男，在读硕士，主要研究方向为地质力学与岩土工程等方面。Email：2284504868@qq.com

通信作者：王成虎（1978—），男，博士，研究员，主要从事地应力与地质力学、断层力学等研究工作。Email：huchengwang@163.com

收稿日期：2025−03−06；**修回日期**：2025−05−10；**录用日期**：2025−05−16；**网络出版日期**：2025−05−16；**责任编辑**：王婧

Keywords: Sichuan–Tibet railway; high in-situ stress; stress division; rock burst; large deformation

摘　要：川藏铁路沿线高地应力问题突出，导致硬岩岩爆和软岩大变形等灾变现象频发，严重影响川藏铁路隧道建设。搜集川藏铁路雅林段沿线地应力实测数据366组以及川藏铁路沿线区域内28座隧道灾变案例，从应力分区角度刻画沿线地应力特征，梳理总结高地应力灾变案例，并对川藏铁路廊道沿线区域的高地应力特征进行评价。研究结果表明，川藏铁路雅林段所经过的B218、B219和B222应力分区，最大水平主应力（S_H）和最小水平主应力（S_h）随埋深（Z）增加而增大，埋深1000 m的S_H和S_h范围分别为30.80～37.50 MPa和21.40～23.56 MPa，埋深2500 m的S_H和S_h范围分别为69.80～90.00 MPa和48.40～56.56 MPa；其S_H优势方向分别为北西西向、北西向和北东向，并与震源机制解结果基本一致，局部有所偏转。侧压力系数（k_H/k_h）普遍大于1，表明川藏铁路沿线主要受S_H影响。各应力分区应力值在埋深小于500 m时，主要深部范围表现为S_H>垂直应力（S_V）>S_h，表明该沿线地应力状态主要为走滑型；最大剪应力与平均应力的比值（μ_m）均集中在0.3附近，表明该沿线地应力积累水平较低。28个隧道灾变案例中（12个为硬岩岩爆、16个为软岩大变形），发生岩爆的隧道最小埋深为700 m，发生大变形的隧道最小埋深为275 m；其中有9座隧道地应力评价等级为高，19座隧道地应力等级评价为极高，表明高地应力是灾变频发的根本原因。通过对比各类隧道灾变判据与实际隧道灾变等级，得出相对适用于川藏铁路隧道岩爆预测和大变形预测的判据，为后续川藏铁路隧道建设提供了案例依据。研究结果为川藏铁路沿线区域的地应力状态分析与高地应力灾变防控提供了关键依据，对提升隧道工程安全性和施工效率具有重要工程指导意义。

关键词：川藏铁路；高地应力；应力分区；岩爆；大变形

中图分类号：P553　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)03−0458−17

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025021

0　引言

川藏铁路作为中国藏区综合交通运输体系的重要组成部分，将是中国青藏高原建设与发展的重要战略铁路交通廊道，也是中国2018年10月提出的九大工程之一。川藏铁路交通廊道规划与建设对于提高西藏综合交通运输能力，推动西藏经济社会跨越式发展，提升西藏地区发展能力，提高沿线各族人民生活水平意义重大（郑宗溪和孙其清，2017）。川藏铁路建设长度l742.39 km，位于青藏高原东南缘，起于四川盆地成都平原，从成都经雅安、康定、昌都、林芝、山南到拉萨，横跨中国第一阶梯与第二阶梯地形。川藏铁路线路位于高地震烈度区，沿线及其周边地区构造和地震活动非常强烈，历史上曾发生过中国大陆迄今为止震级最大的1950年墨脱8.6级地震，2017年又发生了米林6.9级地震（丁林和钟大赉，2013）。川藏铁路全线隧道共计198座，总长l223.451 km，占线路总长的70.2%；特长隧道46座，长724.441 km。川藏铁路特长隧道面临的工程难题主要有地震高烈度、高地应力岩爆、软岩大变形和高地温。其中，高地温隧道10座，地温为28.7～86.0 ℃；高地应力隧道35座，隧道最大埋深2600 m；跨活动断裂隧道7座；同时受上述工程难题耦合作用的隧道12座（郑宗溪和孙其清，2017）。晚新生代以来，由于印度洋板块和欧亚板块持续俯冲碰撞作用，青藏高原已经成为世界上构造活动最强烈的区域之一。川藏铁路位于青藏高原东缘，其地应力来源于两大板块之间的构造作用，构造作用强烈，地应力也随之较高（薛翊国等，2020）。川藏铁路深埋段隧道围岩在开挖过程中高地应力灾变问题突出，位于雅鲁藏布江缝合带的桑珠岭隧道发生岩爆高达1.6×10^4次，而单次岩爆时间高达20 h以上的巴玉隧道，其岩爆规模之大更是有着世界岩爆博物馆之称（严健等，2019）；拉林段的江木拉隧道在施工过程中发生大变形段的变形量最大可达3155 mm（张瑞国，2022）。高地应力灾变的频繁发生，不仅危及施工人员和设备的安全，更是严重阻碍工程项目进展，制约着我国山岭铁路隧道的整体发展。因此隧道围岩地应力场的确定与研究对于隧道的稳定性控制与工程岩体灾害防控至关重要（王成虎等，2019；范玉璐等，2023；谭成轩等，2023）。

针对高地应力问题，众多科学家利用原地应力实测、数值模拟、工程类比等手段对川藏铁路沿线

的地应力状态进行了系统研究，并且针对潜在的岩爆和大变形灾害进行了深入预测研究。王栋等(2017)基于川藏铁路折多山隧道内地应力实测数据以及数值模拟对隧道洞身地应力特征进行分析，并采用岩爆倾向性指数波兰国家标准对岩爆进行预测。王成虎等(2019)利用 Sheorey 模型对川藏铁路沿线地应力值进行预估，并利用应力强度比法和 Hoek 变形预测公式对沿线可能发生的岩爆及大变形进行了预测。任洋等(2021)利用 19 个水压致裂地应力测孔的实测数据对雅安至新都桥段的地应力特征进行分析，并采用《铁路隧道设计规范：TB 10003—2016》(国家铁路局，2016)中的强度应力比法和 Hoek 变形预测公式对区段内的隧道展开岩爆及大变形预测分析。徐正宣等(2021a)在折多山某隧道开展了地应力实测，并结合 Russenes 岩爆判据和 Hoek 判据提出了综合岩爆判据法对折多山某隧道岩爆可能性进行了预测分析。张重远等(2022)采用水压致裂法在林芝至通麦段测量了 20 个孔的地应力数据，分析了林芝至通麦段的地应力特征，并采用岩石强度应力比和岩石应力强度比 2 种不同的岩爆判据分别对区段内的 3 座隧道进行了岩爆预测。已有研究成果中地应力特征分析多聚焦于局部线路段，而未能对川藏铁路沿线区域进行分区特征分析，且现有研究在灾变预测分析中所采用的判据不一，不同判据对灾变的预测结果显著不同，这使得工程人员在后续建设中难以准确预测及应对灾变的发生。

为了进一步理解川藏铁路沿线的地应力状态，以及由此引发的工程灾害问题，为后续川藏铁路雅安至林芝段深埋隧道工程建设提供支撑和参考，通过搜集已发表的文献中地应力实测数据以及梳理总结川藏铁路已建成的拉林段上的灾变案例，从地质力学、应力分区角度再次研究区域地应力特点，分析川藏铁路沿线的地应力特征，围绕隧道灾变案例探究各灾变判据对川藏铁路沿线区域的适用性，从而为隧道围岩高地应力灾变预测判据提供建议和案例支撑。

1 地应力特征分析

川藏铁路雅林段正线长度约 1000 km，隧道拟建 72 座，占比 90% 以上。结合中国大陆应力场分区原则(谢富仁等，2004)，沿线主要穿过龙门山−松潘应力区(B218)、川−滇应力区(B219)和墨脱−昌都应力区(B222)3 个四级应力分区；沿线 1000 m 以上大埋深隧道分布广泛。搜集川藏铁路雅林段沿线地应力实测数据 366 组，测点位置分布如图 1，其中 B218 分区 77 组(王成虎等，2014a；任洋等，2021)，B219 分区 49 组(任洋等，2021；孙炜锋等，2021；田四明等，2021；徐正宣等，2021a)，B222 分区 240 组(张鹏等，2017；巫升山，2020；常帅鹏，2021；张重远等，2022；陈兴强，2022；许俊闪等，2022；廖昕等，2024)。测量方法为水压致裂法和应力解除法。

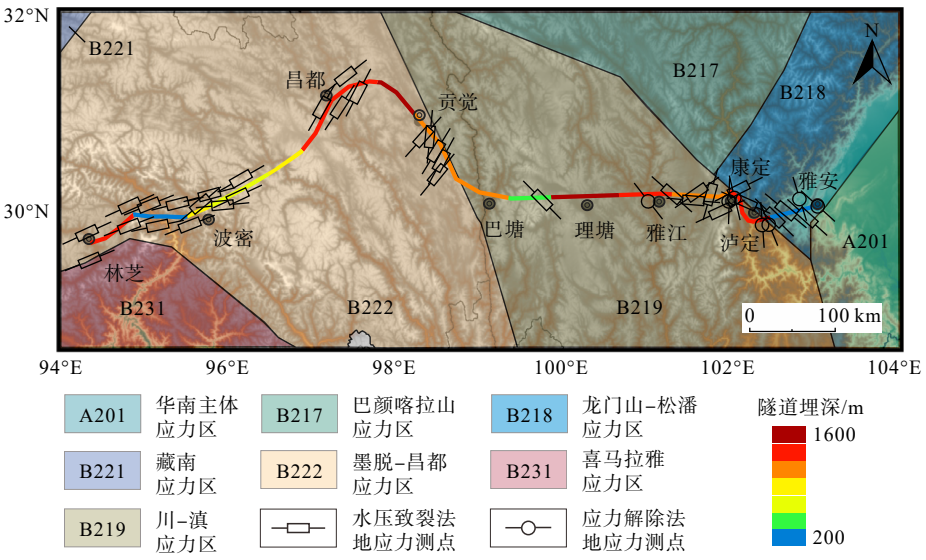
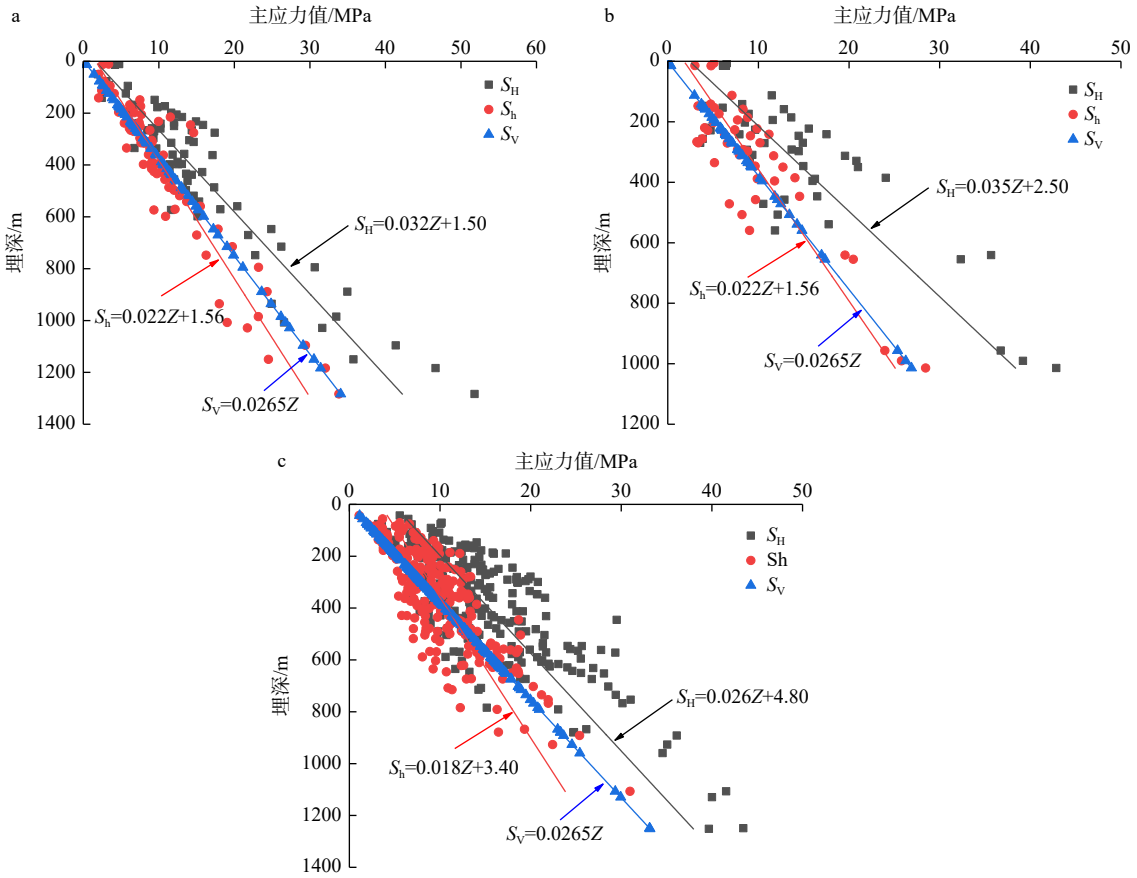


图 1 川藏铁路沿线应力分区及测点位置图

Fig. 1 Stress division and stress measurement locations along the Sichuan-Tibet railway

1.1　主应力量值

对各应力分区的地应力数据进行绘图分析，铁路沿线地应力值随深度变化如图 2 所示，其中垂直应力 S_V 由上覆岩层的重度及埋深求得。B218、B219 和 B222 分区 S_H 和 S_h 均随着 Z 的不断增加而增大。B218 分区对其进行线性拟合可得拟合关系式为 S_H=0.032Z+ 1.50 和 S_h=0.022Z+1.56，应力增加梯度分别为 3.20 MPa/100 m 和 2.20 MPa/100 m；B219 分区拟合关系式为 S_H=0.035Z+2.50 和 S_h=0.022Z+1.56，应力增加梯度分别为 3.5 MPa/100 m 和 2.2 MPa/100 m；B222 分区拟合关系式为 S_H=0.026Z+4.80 和 S_h=0.018Z+3.40，应力增加梯度分别为 2.60MPa/100 m 和 1.80 MPa/100 m（表 1）。从应力增加梯度上看最大值为 B219 分区的 3.5 MPa/100 m，这反应了 B219 分区构造作用最为强烈。总体应力特征呈现为从西到东先强后弱的趋势，即 B219 分区应力量值最大，B218 分区和 B222 分区应力量值相对较小。各应力分区段的 S_H 和 S_h 在埋深 1000 m 的范围为 30.80～37.50 MPa 和 21.40～23.56 MPa，在埋深 2500 m 的范围为 69.80～90.00 MPa 和 48.40～56.56 MPa。通过对比王成虎等（2019）对川藏铁路沿线地应力预测结果发现，川藏铁路沿线 S_H 和 S_h 在埋深 1000 m 处为 26.19～38.41 MPa 和 13.88～21.81 MPa，在埋深 2500 m 处为 66.44～86.48 MPa 和 35.02～49.11 MPa，S_H 基本吻合，S_h 略大于预测值。



S_H—最大水平主应力；S_h—最小水平主应力；S_V—垂直应力；Z—埋深

a—B218 分区；b—B219 分区；c—B222 分区

图 2　各应力分区主应力值随埋深变化图

Fig. 2　Variation of principal stress values with burial depth in different stress division

(a) B218 stress division; (b) B219 stress division; (c) B222 stress division

S_H–maximum horizontal principal stress; S_h–minimum horizontal principal stress; S_V–vertical principal stress; Z–burial depth

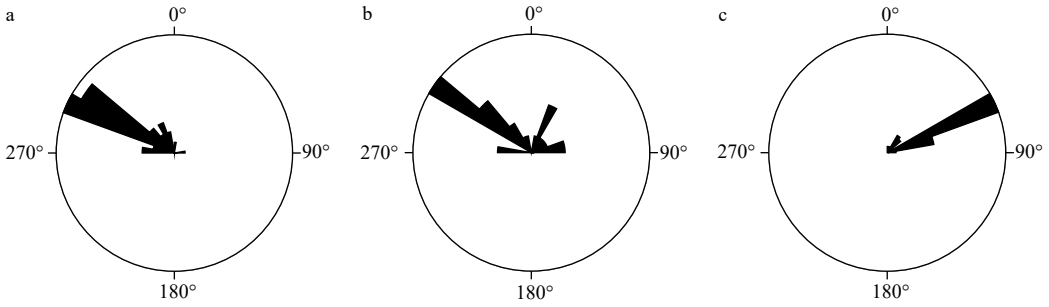
1.2　主应力方向

对各应力分区的最大水平主应力方向进行绘图分析，如图 3 所示。B218 分区段 S_H 的优势方向为北西西向；B219 分区段 S_H 的优势方向为北西向；

表 1 各应力分区主应力值拟合结果

Table 1 Fitting results of principal stress values in different stress division

应力分区	主应力类型	拟合关系式	应力增加梯度/(MPa/100 m)	埋深500 m 应力值/ MPa	埋深1000 m 应力值 /MPa	埋深1500 m 应力值 /MPa	埋深2000 m 应力值 /MPa	埋深2500 m 应力值 /MPa
B218	S_H	S_H=0.032Z+1.50	3.20	17.50	33.50	49.50	65.50	81.50
	S_h	S_h=0.022Z+1.56	2.20	12.56	23.56	34.56	45.56	56.56
B219	S_H	S_H=0.035Z+2.50	3.50	20.00	37.50	55.00	72.50	90.00
	S_h	S_h=0.022Z+1.56	2.20	12.56	23.56	34.56	45.56	56.56
B222	S_H	S_H=0.026Z+4.80	2.60	17.80	30.80	43.80	56.80	69.80
	S_h	S_h=0.018Z+3.40	1.80	12.40	21.40	30.40	39.40	48.40



a—B218 分区; b—B219 分区; c—B222 分区

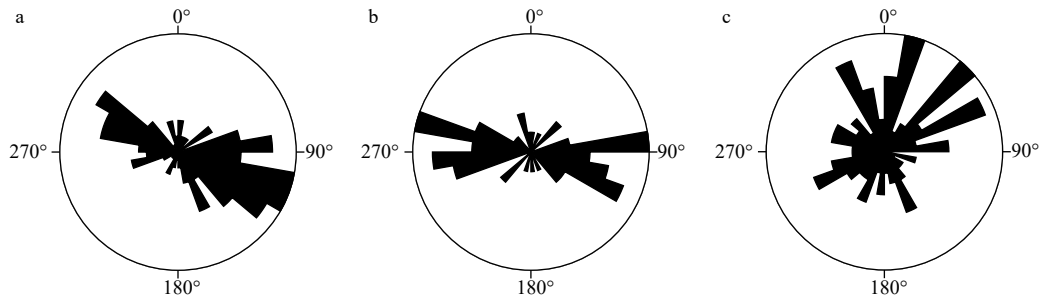
图 3 各应力分区实测数据最大水平主应力方向

Fig. 3 Orientation of maximum horizontal principal stress based on measured data in different stress division

(a) B218 stress division; (b) B219 stress division; (c) B222 stress division

B222 分区段 S_H 的优势方向为北东向。

实测地应力数据的测段较浅,代表了浅部地壳的地应力状态;震源机制解数据多为 10～20 km 深部范围内,代表了中部地壳的地应力状态。搜集新建川藏铁路沿线所在分区的震源机制解数据共 396 个(谢富仁等, 2007),其 S_H 如图 4所示。B218 分区 S_H 的优势方向为北西西向,与实测地应力方向相一致。B219 分区 S_H 的优势方向为北西西向和北东东向,对比实测地应力方向显示局部存在 20°～30°逆时针偏转,主要原因推测为 B219 分区受鲜水河断裂带影响,浅部地壳和中部地壳存在解耦(杨宜海, 2017)。B222 分区 S_H 的优势方向为北东向,与实测地应力方向一致但结果更为分散,主要原因为实测地应力数据一般反映 2 km 以内的浅部地壳应力状态,而震源机制解代表着 10～20 km 更深更广范围的应力状态,受影响因素较多。对比实测地应力数据和震源机制解数据表明浅部地壳和中部地壳的地应力方向基本一致,局部有所偏转,而在



a—B218 分区; b—B219 分区; c—B222 分区

图 4 各应力分区震源机制解数据最大水平主应力方向

Fig. 4 Orientation of maximum horizontal principal stress based on focal mechanism solutions in different stress division

(a) B218 stress division; (b) B219 stress division; (c) B222 stress division

横向跨度上，各应力分区地应力方向显著不同，尤其在泸定至康定段即 B218 分区和 B219 分区的交界带，地应力方向复杂多变。

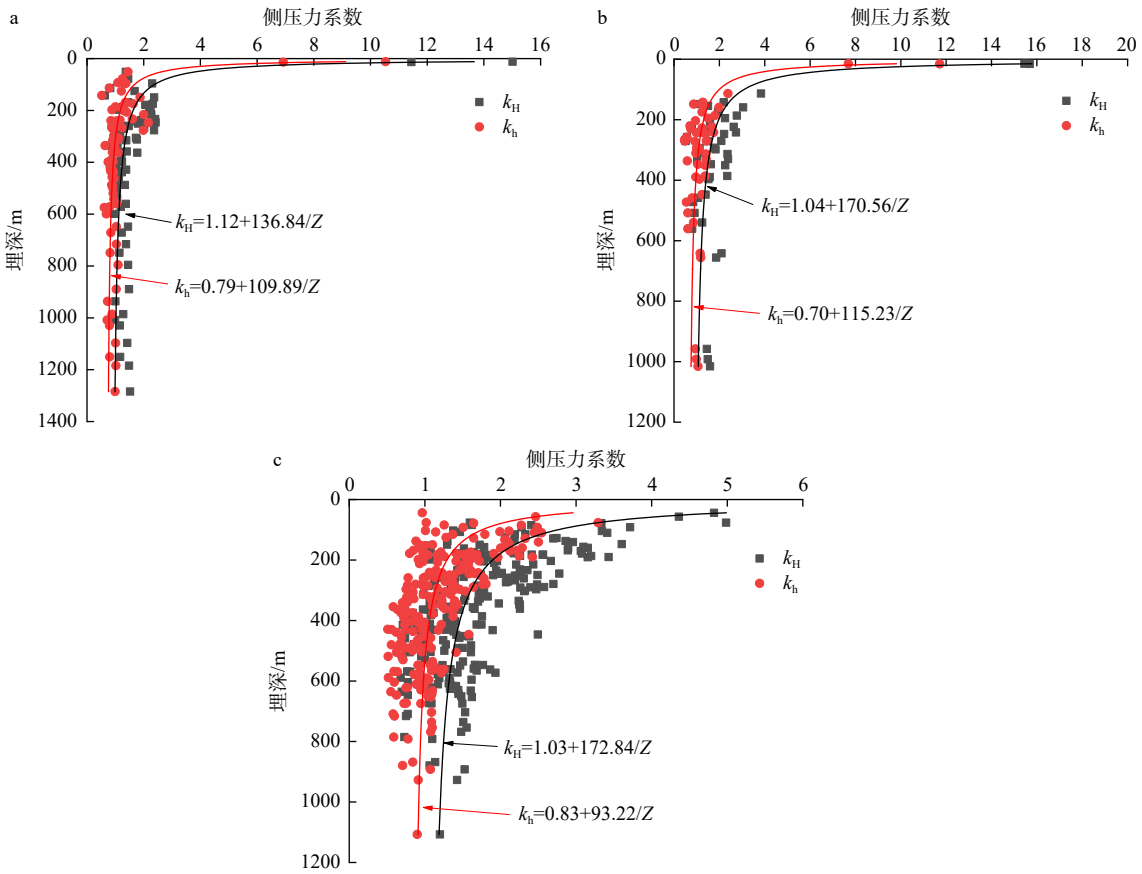
1.3　区域应力状态

为更好地分析各应力分区的地应力状态，引入地应力特征参数侧压力系数 k_H 和 k_h，计算公式如下：

$$k_H = S_H/S_V \quad (1)$$

$$k_h = S_h/S_V \quad (2)$$

将 k_H 和 k_h 随深度的变化进行画图分析并根据 Sheorey 模型对其进行分式拟合（王成虎等，2012；刘卓岩等，2017）。如图 5 所示，各应力分区侧压力系数随埋深增加逐渐减小并趋于稳定，而在浅部范围内，受高山地形和地质构造影响显著，侧压力系数分布较离散，这一分布现象与杨树新等（2012）的研究成果相符，即符合埋深 456 m 以上侧压系数十分离散的特征。其中 B218 分区拟合关系式为 k_H=1.12+136.84/Z 和 k_h=0.79+109.89/Z，埋深 523 m 以上应力值表现为 S_H>S_h>S_V，埋深 523 m 以下应力值表现为 S_H>S_V>S_h。根据 Anderson 断层理论（王成虎等，2014b；刘卓岩等，2017；王成虎等，2019），B218 分区的地应力状态在埋深 523 m 处从逆断型过渡为走滑型。B219 分区拟合关系式为 k_H=1.04+170.56/Z 和 k_h=0.70+115.23/Z，埋深 384 m 以上应力值表现为 S_H>S_h>S_V，埋深 384 m 以下应力值表现为 S_H>S_V>S_h，地应力状态在埋深 384 m 处从逆断型过渡为走滑型。B222 分区拟合关系式为 k_H=1.03+172.84/Z 和 k_h=0.83+93.22/Z，埋深 548 m 以上应力值表现为 S_H>S_h>S_V，埋深 548 m 以下应力值表现为 S_H>S_V>S_h，地应力状态在埋深 548 m 处从逆断型过渡为走滑型。



k_H/k_h—侧压力系数；Z—埋深

a—B218 分区；b—B219 分区；c—B222 分区

图 5　各应力分区侧压力系数随埋深变化图

Fig. 5　Variation of lateral pressure coefficients with burial depth in different stress division

(a) B218 stress division; (b) B219 stress division; (c) B222 stress division

k_H/k_h–lateral pressure coefficient; Z–burial depth

综上所述，川藏铁路沿线主要受水平构造作用，主应力之间关系在B218、B219及B222应力分区均有明显的分段特征，分别在埋深523 m、384 m和548 m以上表现为$S_H>S_h>S_V$，在此埋深以下表现为$S_H>S_V>S_h$，地应力状态从逆断型过渡为走滑型，沿线区域地应力状态在主要深部范围内为走滑型。此外，计算各应力分区应力形因子$R=(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_1-\sigma_3)$的平均值分别为0.62、0.67和0.63，表明区域应力状态为拉张型，其中σ_1、σ_2和σ_3分别为最大主应力、中间主应力、最小主应力，其值可由S_H、S_h和S_V比较大小近似代替（王成虎等，2012）。

1.4 应力积累水平

最大剪应力与平均应力的比值μ_m的大小可以反映区域应力积累水平的高低（王成虎等，2014a），计算公式如下：

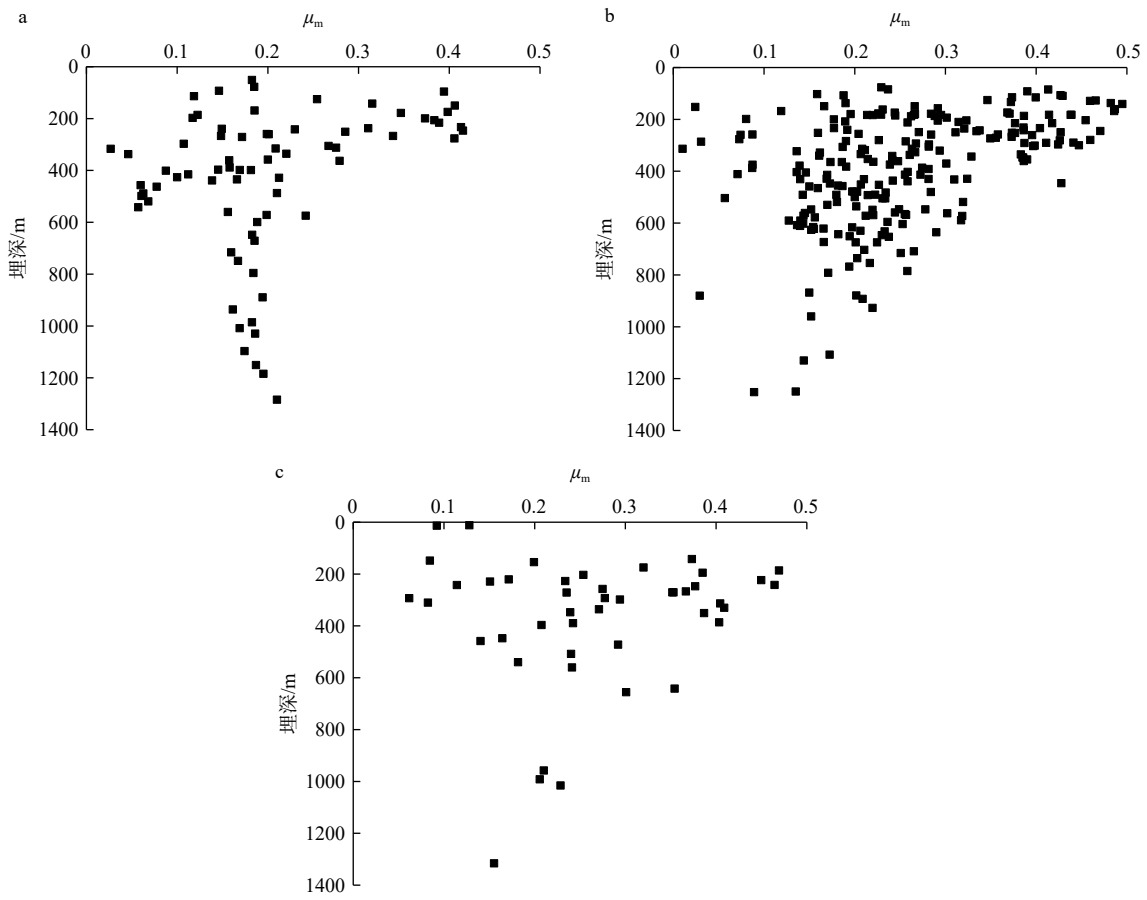
$$\mu_m=(\sigma_1-\sigma_3)/(\sigma_1+\sigma_3) \tag{3}$$

当μ_m<0.3时表明其区域应力积累水平较低，μ_m接近0.5时表明其区域应力积累水平较高。将μ_m和埋深进行绘图分析（图6）所示，埋深400 m以上范围内，数据分布较为离散，这与川藏铁路沿线高山河谷地形分布广泛，浅部数据受高山河谷影响强烈相关。B218、B219和B222应力分区的μ_m平均值分别为0.22、0.32和0.27，均集中在0.3附近，且均小于0.5，表明川藏铁路沿线地应力积累水平较低。

2 高地应力灾变案例统计与分析

2.1 灾变案例统计

在川藏铁路隧道建设过程中，岩爆和大变形等灾变是其主要科学难题，徐正宣等（2021b）利用数值模拟预测全线将会有27座隧道发生硬岩岩爆，43座隧道发生软岩大变形。灾变的频繁发生严重约束着川藏铁路的整体进程，只有对已发生的灾变



a—B218分区；b—B219分区；c—B222分区

图6 各应力分区应力积累水平μ_m值

Fig. 6 Stress accumulation level (μ_m) values in different stress division

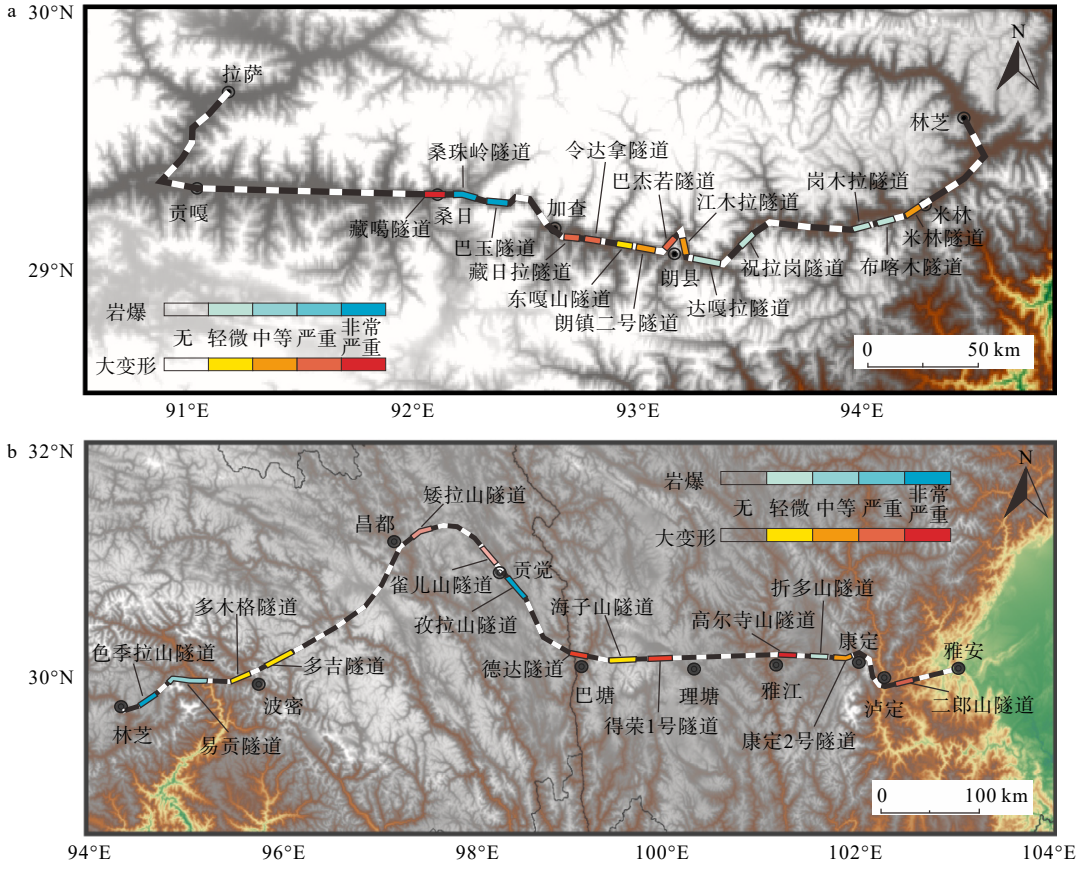
(a) B218 stress division; (b) B219 stress division; (c) B222 stress division

案例进行统计分析，深入研究灾变的发生规律和特征才能避免和提前应对灾变的发生。参考《工程岩体分级标准》(GB/T 500218—2014)中对高低应力状态下硬岩和软岩的灾变现象的详细描述，同时综合考虑工程中灾变对人员安全以及支护措施的影响，作出了灾变等级划分，详见表 2。搜集已建成的川藏铁路拉林段发生灾变的隧道，以及正在建设中的雅林段已发生灾变的隧道(图 7)。其中拉林段发生非常严重岩爆的隧道有 2 座，发生轻微岩爆的隧道有 4 座；发生非常严重大变形的隧道有 1 座，发生严重大变形的隧道有 3 座，发生中等大变形的隧道有 3 座，发生轻微大变形的隧道有 1 座。雅林段发生非常严重岩爆的隧道有 2 座，发生严重岩爆的隧道有 1 座，发生中等岩爆的隧道有 3 座；发生非常严重

表 2　灾变等级划分

Table 2　Classification of catastrophe levels

灾变等级	灾变现象及工程影响
非常严重	岩爆：强烈岩爆段较多，岩爆时间具有延续性并向深部扩展，严重威胁施工人员、设备安全，施工效率影响很大 大变形：严重大变形段较多，变形速率很快，变形量很大，支护措施受损非常严重
严重	岩爆：强烈岩爆段多，岩爆持续时间较长，威胁施工人员、设备安全，施工效率影响较大 大变形：严重大变形段多，变形速率较快，变形量较大，支护措施受损严重
中等	岩爆：中等岩爆段多，岩爆持续时间长，对施工人员、设备安全有一定威胁，施工效率影响大 大变形：中等大变形段多，变形速率快，变形量大，支护措施受损
轻微	岩爆：轻微岩爆段多，岩爆零星间断，施工效率影响小 大变形：轻微大变形段多，变形速率缓慢，围岩轻微挤出，支护措施未受损
无	无灾变或缺省



a—川藏铁路拉林段灾变隧道位置图；b—川藏铁路雅林段灾变隧道位置图

图 7　川藏铁路沿线灾变隧道位置图

Fig. 7　Location map of catastrophic tunnels in the Sichuan-Tibet railway

(a) Location map of catastrophic tunnels in the Lhasa–Linzhi section of the Sichuan–Tibet railway; (b) Location map of catastrophic tunnels in the Ya'an–Linzhi section of the Sichuan–Tibet railway

大变形的隧道有2座，发生严重大变形的隧道有1座，发生中等大变形的隧道有1座，发生轻微大变形的隧道有4座。

川藏铁路沿线发生灾变的隧道案例及其地应力等级评价如表3所示，其中表4的案例来源于川藏铁路邻近区域内的公路隧道案例，由于雅林段仍处于建设阶段，案例公开有限，因此补充其位于同一构造背景下，有着相同地层岩性的邻近公路隧道案例仍具有指导意义（钟勇等，2009；陶伟，2016；陈志春，2017；辜良仙，2017；王勇等，2017；苗永旺，2018；龚建辉和孙晓，2019；严健等，2019；程刚等，2020；高阳，2020；龚海军等，2021；张钧博，2021；赵煜，2021；傅甜甜，2022；田朝阳等，2022；张瑞国，2022；陶琦，2023；王刘勋，2023；张晓军，2023）。最大地应力按照隧道所在的应力分区 S_H 拟合关系式，根据隧道的最大埋深计算所得，地应力等级划分采用《铁路工程不良地质勘察规程：TB/T10027—2022》（国家铁路局，2022）中岩石强度应力比法，相关岩石力学参数由相关文献中室内试验得出或根据Hoek岩体强度估算方法利用软件Roclab进行估算。

表3 川藏铁路灾变案例及其地应力等级评价

Table 3 Evaluation of Sichuan-Tibet railway catastrophe cases and their in-situ stress levels

隧道名称	灾变类型	隧道总长/m	隧道最大埋深/m	最大地应力/MPa	岩石单轴抗压强度/MPa	地层岩性	灾变等级	地应力等级评价结果
桑珠岭隧道	岩爆	16499	1500	43.80	160.00	闪长岩、花岗岩	非常严重	极高
巴玉隧道	岩爆	13047	2080	58.88	170.00	花岗岩	非常严重	极高
岗木拉隧道	岩爆	11660	1814	51.96	95.00	闪长岩、片麻岩	轻微	极高
祝拉岗隧道	岩爆	7684	1237	36.96	115.00	花岗岩	轻微	高
达嘎拉隧道	岩爆	17324	1760	50.56	115.00	花岗岩	轻微	高
布喀木隧道	岩爆	9240	1381	40.71	100.00	片麻岩	轻微	高
孜拉山隧道	岩爆	30370	1480	43.28	120.00	片麻岩、花岗岩	非常严重	高
色季拉山隧道	岩爆	38014	1680	48.48	156.20	花岗岩、闪长岩及片麻岩	非常严重	高
易贡隧道	岩爆	42488	1400	41.20	160.00	片麻岩、花岗岩	轻微	高
折多山隧道	岩爆	20870	1251	46.29	160.00	黑云母花岗岩	轻微	高
藏噶隧道	大变形	8775	778	25.03	8.00	蚀变花岗岩	非常严重	极高
巴杰若隧道	大变形	2105	334	13.48	8.00	千枚岩	严重	极高
令达拿隧道	大变形	2515	1200	36.00	8.00～12.00	千枚岩	严重	极高
藏日拉隧道	大变形	3964	392	14.99	8.00	千枚岩、板岩	严重	极高
朗镇二号隧道	大变形	2652	305	12.73	8.00～12.00	千枚岩、砂岩	中等	极高
江木拉隧道	大变形	8700	1493	43.62	8.00	板岩、千枚岩	中等	极高
米林隧道	大变形	11560	1200	36.00	17.40	砂质泥岩、英安岩	中等	极高
东嘎山隧道	大变形	3722	840	26.64	12.00	千枚岩、砂岩	轻微	极高
康定2号隧道	大变形	20193	1215	45.03	8.00	粉砂质板岩	非常严重	极高
高尔寺山隧道	大变形	18820	1125	41.88	4.00	板岩、千枚岩	严重	极高
海子山隧道	大变形	33090	1230	45.55	10.00	板岩	严重	极高
多吉隧道	大变形	24188	1845	52.77	20.00	砂岩、板岩	严重	极高
多木格隧道	大变形	15695	1600	46.40	20.00	砂岩、灰岩	中等	极高

灾变的发生受隧道埋深、围岩抗压强度、地层岩性和地应力等多种因素影响。在川藏铁路沿线及邻近区域内28个灾变案例中发生岩爆的隧道埋深范围为700～2080 m，穿越的地层岩性多为花岗岩、闪长岩等硬质岩，大埋深下硬质岩隧道易有发生岩爆的风险；发生大变形的隧道埋深范围为275～1845 m，穿越的地层岩性多为千枚岩、板岩等软岩，表明大变形灾变的发生不仅受埋深影响还与隧道软弱围岩直接相关。在地应力方面，灾变隧道案例中有9座地应力评价等级为高，19座地应力等

表 4　川藏铁路廊道邻近公路隧道灾变案例及其地应力等级评价

Table 4　Evaluation of adjacent highway tunnel in Sichuan–Tibet railway corridor catastrophe cases and their in-situ stress levels

隧道名称	灾变类型	隧道总长/m	隧道最大埋深/m	最大地应力/MPa	岩石单轴抗压强度/MPa	地层岩性	灾变等级	地应力等级评价结果
二郎山隧道(雅康高速)	岩爆	13459	1500	49.50	180.00	花岗岩	轻微	高
雀儿山隧道(G317)	岩爆	7083	700	23.00	90.00	花岗岩	轻微	高
得荣1号隧道(G215)	大变形	2100	275	12.13	16.60	强风化云母片岩	中等	极高
德达隧道(G318)	大变形	659	700	27.00	2.50	炭质千枚岩	中等	极高
矮拉山隧道(G317)	大变形	4810	1200	36.00	4.60	软弱凝灰岩	轻微	极高

级评价为极高，可见高地应力仍是灾变发生的根本原因。

2.2　隧道岩爆判据对比分析

为更好地预测和应对隧道岩爆，众多学者提出了不同的预测岩爆的判据方法，并不断地通过岩爆案例修正判据的准确度。目前应用较广泛的判据如表 5 所示(徐林生和王兰生, 1999; 张镜剑和傅冰骏, 2008; 宫凤强等, 2022; 张士安等, 2024)。《铁路隧道设计规范》中根据原岩的最大主应力和岩石单轴抗压强度提出了强度应力比法岩爆判据以及分级；宫凤强等(2022)总结和分析了 50 个岩爆案例，提出了岩爆的强度与应力耦合判据，即当强度、应力处于边界方程范围之内时，以 $R_c+8\sigma_1$ 的值来进行岩爆分级；张镜剑和傅冰骏(2008)综合考虑了岩体完整性和蕴含能量，对已有判据进行了修正，提出了新的岩爆判据方法；徐林生和王兰生(1999)分析了川藏公路二郎山隧道的 200 多次岩爆资料，提出了修正 σ_θ/R_c 判据。

表 5　岩爆判据方法及分级

Table 5　Rock burst criterion methods and classifications

判据指标				岩爆等级
《铁路隧道设计规范》(国家铁路局, 2016)	宫凤强判据(宫凤强等, 2022)	张镜剑判据(张镜剑和傅冰骏, 2008)	徐林生判据(徐林生和王兰生, 1999)	
$R_c/\sigma_1>7$	$R_c+8\sigma_1\leqslant220$	$\sigma_1/R_c<0.15$	$\sigma_\theta/R_c<0.3$	无岩爆
$4<R_c/\sigma_1<7$	$220\leqslant R_c+8\sigma_1\leqslant320$	$0.15<\sigma_1/R_c<0.2$	$0.3\leqslant\sigma_\theta/R_c<0.5$	轻微岩爆
$2<R_c/\sigma_1<4$	$320\leqslant R_c+8\sigma_1\leqslant540$	$0.2<\sigma_1/R_c<0.4$	$0.5\leqslant\sigma_\theta/R_c<0.7$	中等岩爆
$1<R_c/\sigma_1<2$	$540\leqslant R_c+8\sigma_1\leqslant730$	$\sigma_1/R_c>0.4$	$\sigma_\theta/R_c\geqslant0.7$	严重岩爆
$R_c/\sigma_1<1$	$R_c+8\sigma_1\geqslant730$			非常严重岩爆

注: σ_1为最大主应力, σ_3为最小主应力, 此次分析中取$\sigma_1=S_H$; R_c为岩石单轴抗压轻度, 使用软件Roclab进行估算; σ_θ为洞壁最大切向应力, 可由σ_1、σ_3计算得出(张士安等, 2024)。

将各岩爆判据应用于岩爆案例中，对比分析各判据评价结果与实际岩爆等级(表 6)。各岩爆判据结果差异较大，其主要原因为各判据考虑的影响因素不同，在进一步修正中结合的工程案例所在的区域也不相同。对比结果发现，《铁路隧道设计规范》对中等岩爆评价结果较好，但面对严重岩爆则出现了误判；宫凤强判据(宫凤强等, 2022)对中等岩爆出现了高判，综合来说相对保守；张镜剑判据(张镜剑和傅冰骏, 2008)对中等岩爆和严重岩爆评价时出现了不同程度的误判；徐林生判据(徐林生和王兰生, 1999)对岩爆的评价结果与实际岩爆吻合较好，表明此判据为最适用于川藏铁路隧道岩爆的判据，建议在后续川藏铁路隧道工程中主要使用此判据进行隧道岩爆的可能性分析和分级。

2.3　隧道围岩大变形判据对比分析

隧道大变形按其成因主要分为材料型、结构型和应力型(王成虎等, 2011)，此次分析研究对象主要指深埋隧道在高地应力作用下的应力挤压大变形。为应对隧道围岩大变形的发生，提高其相对应的支护措施，国内外学者从多角度多方面提出了预测分析隧道围岩大变形倾向性的判据，应用较为广泛的有强度应力比法、临界深度法和相对变形量法(丁秀丽等, 2023)。其中国内地下工程应用较广泛的为强度应力比法和相对变形量法，而各方法所运用的量化指标又有所不同，为经过改进和完善的大变形判据(表 7)。刘志春等(2008)考虑岩体而非岩

表 6 各岩爆判据评价结果及对比

Table 6 Evaluation results and comparison of various rock burst criteria

岩爆隧道	判据指标				判据方法及结果				实际岩爆等级
	R_c/σ_1	$R_c+8\sigma_1$	σ_1/R_c	σ_θ/R_c	《铁路隧道设计规范》（国家铁路局, 2016）	宫凤强判据 (宫凤强等, 2022)	张镜剑判据 (张镜剑和傅冰骏, 2008)	徐林生判据 (徐林生和王兰生, 1999)	
桑珠岭隧道	3.20	490.40	0.31	0.72	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆	强烈岩爆	非常严重岩爆
巴玉隧道	2.38	611.04	0.42	0.97	中等岩爆	严重岩爆	高岩爆	强烈岩爆	非常严重岩爆
岗木拉隧道	4.62	655.71	0.22	0.50	轻微岩爆	严重岩爆	中等岩爆	轻微岩爆	轻微岩爆
祝拉岗隧道	4.87	475.70	0.21	0.47	轻微岩爆	中等岩爆	中等岩爆	轻微岩爆	轻微岩爆
达嘎拉隧道	4.75	644.48	0.21	0.49	轻微岩爆	严重岩爆	中等岩爆	轻微岩爆	轻微岩爆
布喀木隧道	5.90	565.65	0.17	0.39	轻微岩爆	严重岩爆	轻微岩爆	轻微岩爆	轻微岩爆
孜拉山隧道	2.77	466.24	0.36	0.83	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆	强烈岩爆	非常严重岩爆
色季拉山隧道	3.22	544.04	0.31	0.72	中等岩爆	严重岩爆	严重岩爆	强烈岩爆	非常严重岩爆
易贡隧道	3.88	489.60	0.26	0.59	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆
折多山隧道	3.46	530.28	0.29	0.72	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆	严重岩爆	严重岩爆
二郎山隧道	3.64	576.00	0.28	0.63	中等岩爆	严重岩爆	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆
雀儿山隧道	3.91	274.00	0.26	0.59	中等岩爆	轻微岩爆	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆

注：σ_1为最大主应力，σ_3为最小主应力，此次分析中取$\sigma_1=S_H$；R_c为岩石单轴抗压轻度，使用软件Roclab进行估算；σ_θ为洞壁最大切向应力，可由σ_1、σ_3计算得出（张士安等, 2024）。

石单轴抗压强度提出 R_{cm}/σ_0 强度应力比法；Jethwa et al.（1984）则以原地应力为应力指标提出了 R_{cm}/p_0 强度应力比法；Goel et al.（1996）提出以围岩相对变形量为指标进行围岩大变形的预测与分级；丁秀丽等（2023）根据各级围岩特点以及地层挤压程度对相对变形量分级标准进行了重新定义。

表 7 大变形判据方法及分级

Table 7 Criteria methods and classifications for large deformation

判据指标				大变形等级
刘志春判据（刘志春等, 2008）	Jethwa判据（Jethwa et al., 1984）	Goel判据（Goel et al., 1996）	丁秀丽判据（丁秀丽等, 2023）	
$R_{cm}/\sigma_0>0.5$	$R_{cm}/p_0>2.0$	$\varepsilon<2\%$	$\varepsilon<2.5\%$	无大变形
$0.25<R_{cm}/\sigma_0<0.5$	$0.8<R_{cm}/p_0<2.0$	$2\%<\varepsilon<4\%$		轻微大变形
$0.15<R_{cm}/\sigma_0<0.25$	$0.4<R_{cm}/p_0<0.8$	$4\%<\varepsilon<5\%$	$2.5\%<\varepsilon<5\%$	中等大变形
$R_{cm}/\sigma_0<0.15$	$R_{cm}/p_0<0.4$	$5\%<\varepsilon<7\%$	$5\%<\varepsilon<10\%$	严重大变形
		$\varepsilon>7\%$	$\varepsilon>10\%$	非常严重大变形

注：R_{cm}为岩体单轴抗压强度，可使用软件Roclab进行估算；σ_0为初始地应力，此次分析中取$\sigma_0=S_V$；p_0为原地应力，此次分析中取$3S_H-S_h$（王成虎等, 2011），ε为围岩相对变形量。

将各大变形判据应用于大变形案例中，对比分析各判据评价结果与实际大变形等级（表 8）。各大变形判据对已有大变形案例的评价结果差异较大，刘志春判据对严重大变形的评价结果较好，与已有案例相对吻合，但在轻微大变形的评价中出现了高判；Jethwa 判据对轻微大变形出现了高判，此判据在川藏铁路隧道大变形评价中相对保守；Goel 判据因对大变形的分级量化标准不同，在川藏铁路隧道大变形评价中出现了不同程度的误判；丁秀丽判据对川藏铁路隧道围岩大变形的评价，与实际大变形等级吻合较好，表明此判据为最适用于川藏铁路隧道大变形评价的判据，建议在后续川藏铁路隧道工程中主要使用此判据进行隧道大变形的倾向性分析和分级，并相应提高其支护措施。

3 讨论

3.1 实测地应力与预测结果讨论与分析

在川藏铁路建设中，准确的地应力数据对于隧道围岩的灾变预测与防范起着不可或缺的作用，是

表 8　各大变形判据评价结果及对比

Table 8　Evaluation results and comparison of various large deformation criteria

大变形隧道	判据指标			判据方法及结果				实际大变形等级
	R_{cm}/p_0	R_{cm}/σ_0	ε/%	刘志春判据（刘志春等, 2008）	Jethwa判据（Jethwa et al., 1984）	Goel判据（Goel et al., 1996）	丁秀丽判据（丁秀丽等, 2023）	
藏噶隧道	0.05	0.14	10.84	严重大变形	严重大变形	非常严重大变形	非常严重大变形	非常严重大变形
巴杰若隧道	0.05	0.17	6.96	中等大变形	严重大变形	严重大变形	严重大变形	严重大变形
令达拿隧道	0.06	0.16	8.09	中等大变形	严重大变形	非常严重大变形	严重大变形	严重大变形
藏日拉隧道	0.06	0.19	5.40	中等大变形	严重大变形	严重大变形	严重大变形	严重大变形
朗镇二号隧道	0.07	0.25	3.27	中等大变形	严重大变形	轻微大变形	中等大变形	中等大变形
江木拉隧道	0.08	0.20	4.89	中等大变形	严重大变形	中等大变形	中等大变形	中等大变形
米林隧道	0.10	0.25	3.16	中等大变形	严重大变形	轻微大变形	中等大变形	中等大变形
东嘎山隧道	0.20	0.54	0.69	轻微大变形	严重大变形	轻微大变形	轻微大变形	轻微大变形
康定2号隧道	0.07	0.25	3.24	严重大变形	严重大变形	轻微大变形	中等大变形	中等大变形
高尔寺山隧道	0.04	0.13	11.11	严重大变形	严重大变形	非常严重大变形	非常严重大变形	非常严重大变形
海子山隧道	0.09	0.31	2.12	严重大变形	严重大变形	轻微大变形	轻微大变形	轻微大变形
多吉隧道	0.16	0.41	1.20	中等大变形	中等大变形	轻微大变形	轻微大变形	轻微大变形
多木格隧道	0.19	0.47	0.90	中等大变形	中等大变形	轻微大变形	轻微大变形	轻微大变形
得荣1号隧道	0.58	2.28	0.04	无大变形	无大变形	轻微大变形	轻微大变形	轻微大变形
德达隧道	0.04	0.13	11.01	严重大变形	严重大变形	非常严重大变形	非常严重大变形	非常严重大变形
矮拉山隧道	0.06	0.14	9.56	严重大变形	严重大变形	非常严重大变形	严重大变形	严重大变形

注：R_{cm}为岩体单轴抗压强度，可使用软件Roclab进行估算；σ_0为初始地应力，此次分析中取$\sigma_0=S_V$；p_0为原地应力，此次分析中取$3S_H-S_h$（王成虎等, 2011），ε为围岩相对变形量。

保障工程建设顺利进行的重要资料。然而川藏铁路沿线存在着诸多恶劣的地形地质条件，受限于施工难度和钻孔条件等各因素，难以开展实测地应力工作。建设初期，面对沿线区域实测地应力数据匮乏等问题，王成虎等（2019）利用修正 Sheorey 模型对川藏铁路沿线区域进行了地应力值预测。搜集沿线区域各标段隧道建设中实测地应力值与预测值对比（表 9），大部分区域实测值落在预测值范围内，适用性较高，其中通麦隧道实测值高于预测值，推测原因为通麦隧道穿过嘉黎断裂带（陈兴强，2022），而断裂带内岩体破碎，通麦隧道完整岩体处发生了应力集中。对比 S_H 实测值与预测值发现，修正 Sheorey 模型对川藏铁路沿线区域地应力预测吻合度较高。因此在后续建设中无法开展地应力实测的川藏铁路沿线区域可以采用修正 Sheorey 模型预测，可靠性较高。

表 9　川藏铁路沿线区域实测地应力值与预测值对比分析

Table 9　Comparative analysis of measured and predicted in-situ stress values along the Sichuan–Tibet railway region

隧道名称	隧道最大埋深/m	地层岩性	S_H实测值/MPa	S_H预测值/MPa	预测准确度
拉月隧道	2080	闪长岩、片麻岩	58.88	52.63～66.92	一致
折多山隧道	1124	黑云母花岗岩、石英砂岩	34.02	30.13～41.93	一致
色季拉山隧道	1406	花岗岩、闪长岩及片麻岩	41.36	37.37～49.87	一致
鲁朗隧道	1470	花岗岩、片麻岩	43.02	39.71～52.76	一致
岗木拉隧道	1814	闪长岩、片麻岩	51.96	47.51～61.31	一致
祝拉岗隧道	1237	花岗岩	36.96	32.10～44.08	一致
达嘎拉隧道	1760	花岗岩	50.56	47.88～61.66	一致
布喀木隧道	1381	片麻岩	40.71	36.60～44.50	一致
通麦隧道	1107	片麻岩	45.52	31.86～39.70	低判

3.2 灾变判据准确性讨论与分析

川藏铁路建设中,合理并准确地使用判据预测灾变尤为重要。在川藏铁路建设早期地应力资料匮乏的背景下,王成虎等(2019)利用强度应力比方法和Hoek变形公式对川藏铁路岩爆和大变形风险进行了前瞻性预测,为川藏铁路隧道建设指明了正确方向,也为后续工程判据研究奠定了重要基础。通过上文28个隧道灾变案例的对比分析,表明徐林生判据和丁秀丽判据分别为最适用于川藏铁路岩爆和大变形的预测判据,这与川藏铁路独特的地质力学特征密切相关。川藏铁路大埋深硬岩隧道在高地应力作用下,洞壁切向应力集中显著,围岩易引发脆性破坏。徐林生判据以洞壁最大切向应力与岩石单轴抗压强度比值为评价指标,充分考虑了开挖扰动下洞壁切向应力重分布效应,与该区走滑型主要应力状态下水平主应力主导的地质力学特征高度契合。此外,徐林生判据从川藏公路二郎山隧道岩爆案例中总结得出,其研究对象区域地质背景特征与川藏铁路隧道地质背景岩爆特征相契合。相比之下,《铁路隧道设计规范》的最大主应力与岩石单轴抗压强度比法仅依赖原岩最大主应力,未能充分体现开挖后洞壁切向应力集中效应,导致对严重岩爆以及非常严重岩爆等级的低估预判。宫凤强判据的“强度−应力”耦合判据虽考虑了应力组合,但对该区高脆性硬岩的能量积聚特性刻画不足,预测结果相对保守。除此之外,在构造运动和岩浆活动影响下的高地温对岩爆的作用也不容忽视,如桑珠岭隧道在埋深1500 m处实测最高温度可达85℃之高。严健等(2019)通过建立数值模型,发现高地温对围岩压力释放具有积极的作用,在此影响下岩爆次数也将增多,这也可能为实际岩爆现象和各判据预测岩爆现象出现偏差原因作出解释。

川藏铁路沿线隧道板岩、泥岩及千枚岩等软岩在高地应力作用下极易发生大变形,仅是朗县境内的拉林段LLZQ-8标内的7座隧道就有5座发生了大变形(辜良仙,2017),其中令达拿隧道发生大变形段的比例高达87.8%。对于大变形灾变的预测,丁秀丽判据以围岩相对变形量为分级标准,结合了地层挤压与围岩大变形挤压的作用,其量化分级标准精准反映了千枚岩、板岩等软弱围岩在高地应力下的大变形程度。刘志春判据以岩体单轴抗压强度和初始地应力比值为指标,但地下水渗流会使岩体强度降低,加剧围岩大变形,因而在大变形的评价中出现了误判。Jethwa判据以岩体单轴抗压强度和原地应力比值为指标,同样未考虑地下水渗流等情况,不同围岩在不同应力环境下变形有所差异,无法适用于川藏铁路沿线多样隧道围岩。Goel判据对大变形的分级量化标准不同,在应用川藏铁路隧道大变形中出现不同程度误判。此外地下水渗流不仅会降低岩石的强度和围岩的稳定性还会在一定程度上加快大变形的速率,尤其是在高海拔和高山峡谷等降雨丰富地区,在地下水的渗流下围岩大变形普遍有着变形速率快的特点,这也造成了实际大变形现象和各判据预测大变形现象出现了偏差。埋深较深线路较长的隧道围岩面临着更复杂的地质环境,如“三高一扰动”,高地应力虽然是软岩大变形发生的主要驱动力,但高地温、高渗压和工程扰动都将对围岩的变形速率和变形量起到促进的作用,这也给准确预测隧道围岩大变形带来了挑战。

4 结论

通过搜集川藏铁路沿线的实测地应力数据,从应力分区角度进行地应力特征分析,结合隧道灾变案例对沿线的灾变特征进行深入研究,并开展高地应力状态分析,得到如下结论:

(1)实测数据显示,新建川藏铁路雅林段所经过的B218、B219和B222应力分区的S_H和S_h随着埋深的不断增加而增大,埋深1000 m的范围分别为30.80～37.50 MPa和21.40～23.56 MPa,埋深2500 m的范围分别为69.80～90.00 MPa和48.40～56.56 MPa。S_H增加梯度分别为3.20 MPa/100 m、3.50 MPa/100 m和2.60 MPa/100 m,最大值为B219分区的3.50 MPa/100 m,显示B219分区构造作用最为强烈。

(2)综合分析实测地应力资料和应力分区原则得出,新建川藏铁路雅林段B218、B219及B222应力分区的S_H优势方向分别为北西西向、北西向和北东向,与震源机制解数据大体一致,局部有所偏转。

(3)利用Sheorey模型对B218、B219和B222应力分区地应力侧压力系数进行分式拟合,得出各应力分区主应力关系有明显的分段特征,埋深523 m、384 m和548 m以上分别表现为$S_H>S_h>S_V$,以下表现为$S_H>S_V>S_h$,在此埋深以下主要深部范围内地应力状态为走滑型。各分区应力形因子R平均值分别

为 0.62、0.67 和 0.63，表明区域应力状态均为拉张型。

（4）B218、B219 和 B222 应力分区的应力积累水平 μ_m 值均集中在 0.3 附近，小于 0.5，表明川藏铁路沿线地应力积累水平较低。

（5）统计川藏铁路沿线区域内 28 座隧道灾变案例（12 座为硬岩岩爆，16 座为软岩大变形），发生岩爆的隧道最小埋深为 700 m，发生大变形的隧道最小埋深为 275 m，隧道围岩较为软弱。在地应力评价方面，灾变隧道案例中有 9 座地应力评价等级为高，19 座地应力等级评价为极高，可见高地应力仍是灾变频发的能量源泉和根本原因。在隧道岩爆可能性分析与分级方面，徐林生判据结果与实际岩爆等级吻合较好，为最适用于川藏铁路隧道岩爆的判据，建议在后续川藏铁路隧道工程中使用此判据；在隧道围岩大变形倾向性分析与分级方面，丁秀丽判据结果与实际大变形等级吻合较好，为最适用于川藏铁路隧道大变形的判据，建议在后续川藏铁路隧道工程建设中使用此判据，并相应提高其支护措施。

References

CHANG S P, 2021. Engineering geological study on route selection of Tongmai to Lulang section of Sichuan-Tibet railway[J]. Tunnel Construction, 41(6): 988. (in Chinese with English abstract)

CHEN X Q, 2022. Influence of fault fracture zone on initial in-situ stress field in Tongmai tunnel of Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. Earth Science, 47(6): 2120-2129. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z C, 2017. The rock burst prediction and prevention measure of Lalin railway gneiss tunnel[J]. Shanxi Architecture, 43(14): 165-166. (in Chinese)

CHENG G, GONG L, YU J W, et al., 2020. Study on large deformation characteristics and construction control technology in high altitude slate tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 16(S2): 744-751. (in Chinese with English abstract)

DING L, ZHONG D L, 2013. Evolution of the East Himalayan tectonic syntaxis since the collision between the Indian and Eurasian plates[J]. Chinese Journal of Geology, 48(2): 317-333. (in Chinese with English abstract)

DING X L, ZHANG Y T, HUANG S L, et al., 2023. Large deformation mechanism of surrounding rock masses of tunnels, prediction method of squeezing large deformation and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(3): 521-544. (in Chinese with English abstract)

FAN Y L, CAO J W, YU S, et al., 2023. Prediction and analysis on large deformation of surrounding rocks in the Muzhailing Tunnel of the Weiyuan–Wudu Expressway under high in-situ stress[J]. Journal of Geomechanics, 29(6): 786-800. (in Chinese with English abstract)

FU T T, 2022. Comparative Study on Excavation Methods of Langzhen No. 2 Soft Rock Tunnel[D]. Lhasa: Tibet University. (in Chinese with English abstract)

GAO Y, 2020. Quality control of initial support construction for large deformation of weak surrounding rock[J]. Construction Machinery & Maintenance(4): 94-95. (in Chinese)

GOEL R K, JETHWA J L, DHAR B B, 1996. Effect of tunnel size on support pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 33(7): 749-755.

GONG F Q, DAI J H, WANG M Y, et al., 2022. "Strength & stress" coupling criterion and its grading standard for high geostress[J]. Journal of Engineering Geology, 30(6): 1893-1913. (in Chinese with English abstract)

GONG H J, ZHAO G P, YAN J, et al., 2021. Characteristics and influencing factors of large deformation of Ailashan tunnel of Sichuan-Tibet highway[J]. Tunnel Construction, 41(S2): 129-136. (in Chinese with English abstract)

GONG J H, SUN X, 2019. Reinforcement technology for high-steep natural slope at tunnel portal of Sichuan-Tibet railway[J]. Sichuan Architecture, 39(3): 78-80. (in Chinese)

GU L X, 2017. Study on deformation control technology of high stress soft rock large deformation tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

JETHWA J L, SINGH B, SINGH B, et al. , 1984. Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions—A new approach[C]//Proceedings of the design and performance of underground excavations. Cambridge: ISRM Symposium: 231-238.

LIAO X, LÜ G J, CHEN S K, et al., 2024. Study on distribution characteristics and influencing factors of in-situ stress field in Gonjo region of eastern Tibet[J]. Progress in Geophysics, 39(3): 938-950. (in Chinese with English abstract)

LIU Z C, ZHU Y Q, LI W J, et al., 2008. Mechanism and classification criterion for large deformation of squeezing ground tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 30(5): 690-697. (in Chinese with English abstract)

LIU Z Y, WANG C H, XU X, et al., 2017. Slip tendency analysis of the mid-segment of Tan-Lu fault belt based on stress measurements[J]. Modern Geology, 31(4): 869-876. (in Chinese with English abstract)

MIAO Y W, 2018. Construction technology research on large deformation of Zangga tunnel surrounding rock[J]. High Speed Railway Technology, 9(S2): 127-133. (in Chinese)

National Railway Administration, 2016. Code for Design of Railway Tunnels: TB 10003—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House. (in Chinese)

National Railway Administration, 2022. Code for Investigation of Adverse Geology in Railway Engineering: TB/T 10027—2022 [S]. Beijing: China Railway Publishing House. (in Chinese)

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 W F, GUO C B, ZHANG G Z, et al., 2021. In-situ stress measurement

of Guodashan tunnel horizontal borehole in West Sichuan and the engineering significance[J]. Geoscience, 35(1): 126-136. (in Chinese with English abstract)

TAN C X, ZHANG P, WANG J M, et al., 2023. Considerations on the application of in-situ stress measurement and real-time monitoring in deep underground engineering in strong tectonic activity region[J]. Journal of Geomechanics, 29(6): 757-769. (in Chinese with English abstract)

TAO Q, 2023. Stability control of high geo-stress soft rock tunnels considering rock expansion effect: a case study of Milin tunnel[J]. Tunnel Construction, 43(8): 1327-1337. (in Chinese with English abstract)

TAO W, 2016. Characteristics of rockburst and prevention measures in New Erlangshan Tunnel[J]. Sichuan Architecture, 36(2): 264-265. (in Chinese with English abstract)

TIAN C Y, LAN H X, ZHANG N, et al., 2022. Quantitative prediction of rockburst risk in sejila tunel of one railway[J]. Journal of Engineering Geology, 30(3): 621-634,

TIAN S M, WANG W, TANG G R, et al., 2021. Study on countermeasures for major unfavorable geological issues of tunnels on Sichuan-Tibet railway[J]. Tunnel Construction, 41(5): 697-712. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, SHA P, HU Y F, et al., 2011. Study of squeezing deformation problems during tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 32(S2): 143-147. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, DING L F, LI F Q, et al., 2012. Characteristics of in-situ stress measurement in northwest Sichuan basin with timespan of 23 years and its crustal dynamics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(11): 2171-2181. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, SONG C K, GUO Q L, et al., 2014a. Stress build-up in the shallow crust before the Lushan Earthquake based on the in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(1): 102-114. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, XING B R, CHEN Y Q, 2014b. Prediction of stress field of super-long deep-buried tunnel area and case analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 36(5): 955-960. (in Chinese with English abstract)

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 D, LI T B, JIANG L W, et al., 2017. Analysis of the stress characteristics and rock burst of ultra deep buried tunnel in Sichuan-Tibet railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 34(4): 46-50. (in Chinese with English abstract)

WANG L X, 2023. Research on tunnel construction technology in high altitude and high stress areas[J]. Value Engineering, 42(13): 31-33. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, AI Y X, 2017. Reason analysis and treatment measures for the slip collapse of Zangrila tunnel crossing moraine body[J]. Subgrade Engineering(2): 220-224. (in Chinese)

WU S S, 2020. Study on large deformation classification of Changdu tunnel of Sichuan-Tibet railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

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)

XIE F R, CHEN Q C, CUI X F, et al., 2007. Fundamental database of crustal stress environment in continental China[J]. Progress in Geophysics, 22(1): 131-136. (in Chinese with English abstract)

XU J S, WANG J X, CHEN X Q, et al., 2022. Effects of Poisson ratio on in-situ stress field near the Jiali fault along the Sichuan-Tibet railway[J]. Earth Science, 47(3): 818-830. (in Chinese with English abstract)

XU L S, WANG L S, 1999. Study on the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang mountain road[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 21(5): 569-572. (in Chinese with English abstract)

XU Z X, MENG W, GUO C B, et al., 2021a. 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., 2021b. 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)

XUE Y G, KONG F M, YANG W M, et al., 2020. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(3): 445-468. (in Chinese with English abstract)

YAN J, HE C, WANG B, et al., 2019. Inoculation and characters of rockbursts in extra-long and deep-lying tunnels located on Yarlung Zangbo suture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(4): 769-781. (in Chinese with English abstract)

YANG S X, YAO R, CUI X F, et al., 2012. Analysis of measured stress characteristics in the Chinese mainland, active blocks, and North-South Seismic Belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4207-4217. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H. 2017. The dynamics of eastern Tibet from focal mechanism and seismic anisotropy[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C Y, DU S H, HE M C, et al., 2022. Characteristics of in-situ stresses on the western margin of the eastern Himalayan syntaxis and its influence on stability of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(5): 954-968. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J B, 2021. Research on classification of rockburst intensity and criterion of stress intensity for LASA to Linzhi railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J J, FU B J, 2008. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(10): 2034-2042. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P, QU Y M, GUO C B, et al., 2017. Analysis of in-situ stress measurement and real-time monitoring results in Nyching of Tibetan Plateau and its response to Nepal M_S8.1 earthquake[J]. Geoscience, 31(5): 900-910. (in Chinese with English abstract)

ZHANG R G, 2022. Research on construction quality control of soft rock

large deformation tunnel[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 21(2): 12-17. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S A, WU M L, JIANG J, et al., 2024. Analysis of rockburst criteria based on measured data of in-situ stress during tunnel construction[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation, 40(3): 1-9. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X J, ZHANG G, 2023. Study on construction treatment measures for soft rock large deformation in tunnels of the Western Sichuan Plateau[J]. Modern Transportation Technology, 20(2): 54-58, 70. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y, 2021. Study on mechanical properties and deformation control of layered surrounding rock of deep buried tunnel[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology. (in Chinese with English abstract)

ZHENG Z X, SUN Q Q, 2017. Tunnel engineering of Sichuan-Tibet railway[J]. Tunnel Construction, 37(8): 1049-1054. (in Chinese with English abstract)

ZHONG Y, LIU Y, ZHENG Z Q, 2009. Comprehensive treatment technology for large deformation of surrounding rock in Sichuan-Tibet road tunnels[J]. Southwest Highway, (4): 129-132. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

常帅鹏，2021. 川藏铁路通麦至鲁朗段选线工程地质研究[J]. 隧道建设(中英文)，41(6)：988.

陈兴强，2022. 断层破碎带对川藏交通廊道通麦隧道初始地应力场影响[J]. 地球科学，47(6)：2120-2129.

陈志春，2017. 拉林铁路片麻岩隧道岩爆预测及防治措施[J]. 山西建筑，43(14)：165-166.

程刚，龚伦，俞景文，等，2020. 高海拔板岩隧道大变形特性及控制技术研究[J]. 地下空间与工程学报，16(S2)：744-751.

丁林，钟大赉，2013. 印度与欧亚板块碰撞以来东喜马拉雅构造结的演化[J]. 地质科学，48(2)：317-333.

丁秀丽，张雨霆，黄书岭，等，2023. 隧洞围岩大变形机制、挤压大变形预测及应用[J]. 岩石力学与工程学报，42(3)：521-544.

范玉璐，曹佳文，余顺，等，2023. 高地应力作用下渭武高速木寨岭隧道围岩大变形灾变预测分析研究[J]. 地质力学学报，29(6)：786-800.

傅甜甜，2022. 朗镇二号软岩隧道开挖工法对比研究[D]. 拉萨：西藏大学.

高阳，2020. 软弱围岩大变形初期支护施工质量控制[J]. 工程机械与维修(4)：94-95.

宫凤强，代金豪，王明洋，等，2022. 高地应力“强度&应力”耦合判据及其分级标准[J]. 工程地质学报，30(6)：1893-1913.

龚海军，赵耿鹏，严健，等，2021. 川藏公路矮拉山隧道大变形特征及其影响因素分析[J]. 隧道建设(中英文)，41(S2)：129-136.

龚建辉，孙晓，2019. 川藏铁路隧道洞口高陡自然边坡加固技术[J]. 四川建筑，39(3)：78-80.

辜良仙，2017. 高地应力软岩大变形隧道变形控制技术研究[D]. 重庆：重庆交通大学.

国家铁路局，2016. 铁路隧道设计规范：TB 10003—2016[S]. 北京：中国铁道出版社.

国家铁路局，2022. 铁路工程不良地质勘察规程：TB/T 10027—2022[S]. 北京:中国铁道出版社.

廖昕，吕改杰，陈仕阔，等，2024. 藏东贡觉地区地应力场分布特征及影响因素研究[J]. 地球物理学进展，39(3)：938-950.

刘志春，朱永全，李文江，等，2008. 挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J]. 岩土工程学报，30(5)：690-697.

刘卓岩，王成虎，徐鑫，等，2017. 基于地应力实测数据分析郯庐断裂带中段滑动趋势[J]. 现代地质，31(4)：869-876.

苗永旺，2018. 藏噶隧道围岩大变形施工技术研究[J]. 高速铁路技术，9(S2)：127-133.

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.

孙炜锋，郭长宝，张广泽，等，2021. 川西郭达山隧道水平孔地应力测量与工程意义[J]. 现代地质，35(1)：126-136.

谭成轩，张鹏，王继明，等，2023. 原位地应力测量与实时监测在强构造活动区深埋地下工程中应用的思考[J]. 地质力学学报，29(6)：757-769.

陶琦，2023. 考虑岩体膨胀效应的高地应力软岩隧道稳定性控制研究：以米林隧道为例[J]. 隧道建设(中英文)，43(8)：1327-1337.

陶伟，2016. 新二郎山隧道岩爆特征与防治经验总结[J]. 四川建筑，36(2)：264-265.

田朝阳，兰恒星，张宁，等，2022. 某交通线路色季拉山隧道高地应力岩爆风险定量预测研究[J]. 工程地质学报，30(3)：621-634,

田四明，王伟，唐国荣，等，2021. 川藏铁路隧道工程重大不良地质应对方案探讨[J]. 隧道建设(中英文)，41(5)：697-712.

王成虎，沙鹏，胡元芳，等，2011. 隧道围岩挤压变形问题探究[J]. 岩土力学，32(S2)：143-147.

王成虎，丁立丰，李方全，等，2012. 川西北跨度23a的原地应力实测数据特征及其地壳动力学意义分析[J]. 岩石力学与工程学报，31(11)：2171-2181.

王成虎，宋成科，郭启良，等，2014a. 利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累[J]. 地球物理学报，57(1)：102-114.

王成虎，邢博瑞，陈永前，2014b. 长大深埋隧道工程区地应力状态预测与实例分析[J]. 岩土工程学报，36(5)：955-960.

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.

王栋，李天斌，蒋良文，等，2017. 川藏铁路某超深埋隧道地应力特征及岩爆分析[J]. 铁道工程学报，34(4)：46-50.

王刘勋，2023. 高海拔高应力地区隧道施工工艺技术研究[J]. 价值工程，42(13)：31-33.

王勇，艾永祥，2017. 藏日拉隧道穿越冰碛体掌子面发生溜坍原因分析及处治措施[J]. 路基工程(2)：220-224.

巫升山，2020. 川藏铁路昌都隧道大变形分级研究[D]. 成都：西南交通大学.

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.

谢富仁，陈群策，崔效锋，等，2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. 地球物理学进展，22(1)：131-136.

许俊闪，王建新，陈兴强，等，2022. 泊松比对川藏铁路嘉黎断裂附近地应力场的影响[J]. 地球科学，47(3)：818-830.

徐林生, 王兰生, 1999. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 21(5): 569-572.

徐正宣, 孟文, 郭长宝, 等, 2021a. 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, 2021b. 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.

薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等, 2020. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 39(3): 445-468.

严健, 何川, 汪波, 等, 2019. 雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆孕育及特征[J]. 岩石力学与工程学报, 38(4): 769-781.

杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等., 2012. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报, 55(12): 4207-4217.

杨宜海, 2017. 用地震震源机制和各向异性研究青藏高原东缘动力学特征[D]. 成都: 成都理工大学.

张重远, 杜世回, 何满潮, 等, 2022. 喜马拉雅东构造结西缘地应力特征及其对隧道围岩稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 41(5): 954-968.

张镜剑, 傅冰骏, 2008. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 27(10): 2034-2042.

张钧博, 2021. 拉萨至林芝铁路隧道岩爆烈度分级与应力强度判据标准研究[D]. 成都: 西南交通大学.

张鹏, 曲亚明, 郭长宝, 等, 2017. 西藏林芝地应力测量监测与尼泊尔M_S8.1级强震远场响应分析[J]. 现代地质, 31(5): 900-910.

张瑞国, 2022. 软岩大变形隧道施工质量控制研究[J]. 广东交通职业技术学院学报, 21(2): 12-17.

张士安, 吴满路, 江蛟, 等, 2024. 基于隧道施工阶段地应力实测数据的岩爆判据研究[J]. 防灾减灾学报, 40(3): 1-9.

张晓军, 张贵, 2023. 川西高原隧道软岩大变形施工处治措施研究[J]. 现代交通技术, 20(2): 54-58, 70.

赵煜, 2021. 深埋隧道层状围岩力学特性及变形防控研究[D]. 淮南: 安徽理工大学.

郑宗溪, 孙其清, 2017. 川藏铁路隧道工程[J]. 隧道建设, 37(8): 1049-1054.

钟勇, 刘勇, 郑仲钦, 2009. 川藏路隧道围岩大变形综合处治技术[J]. 西南公路, (4): 129-132.