引用格式：王斌，董志宏，刘元坤，等，2025. 喜马拉雅东构造结北缘某大型水电站工程区地应力特征研究[J]. 地质力学学报，31（6）：1222−1237. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025101

Citation: WANG B，DONG Z H，LIU Y K，et al.，2025. In-situ stress characteristics in the project area of a large hydropower station on the northern margin of the eastern Himalayan syntaxis[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1222−1237. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025101

喜马拉雅东构造结北缘某大型水电站工程区地应力特征研究

王　斌[1,2]，董志宏[1,2]，刘元坤[1,2]，付　平[1,2]，韩晓玉[1,2]，艾　凯[1,2]，周春华[1,2]，张新辉[1,2]，罗　笙[1,2]，杨跃辉[3]

WANG Bin[1,2]，DONG Zhihong[1,2]，LIU Yuankun[1,2]，FU Ping[1,2]，HAN Xiaoyu[1,2]，AI Kai[1,2]，ZHOU Chunhua[1,2]，ZHANG Xinhui[1,2]，LUO Sheng[1,2]，YANG Yuehui[3]

1. 长江水利委员会长江科学院，湖北 武汉 430010；
2. 水利部岩土力学与工程重点实验室，湖北 武汉 430010；
3. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081

1. *Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission*, *Wuhan* 430010, *Hubei*, *China*;
2. *Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources*, *Wuhan* 430010, *Hubei*, *China*;
3. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*

In-situ stress characteristics in the project area of a large hydropower station on the northern margin of the eastern Himalayan syntaxis

Abstract: ［**Objective**］We analyzed and evaluated the in-situ stress distribution characteristics and fault stability in the project area of a large hydropower station on the northern margin of the eastern Himalayan syntaxis. ［**Methods**］We combined hydraulic fracturing measurements with three-dimensional stress field inversion analysis to obtain stress field information for key structures, such as the underground powerhouse and water diversion tunnels. ［**Results**］The study revealed the following: (1) The principal stress relationship generally follows $S_H>S_v>S_h$, dominated by horizontal stress, indicating a strike-slip stress regime. The predominant orientation of the maximum horizontal principal stress is ENE, consistent with the principal compressive stress direction derived from focal mechanism solutions. This is inferred to be primarily controlled by the NE-directed compression of the Indian Plate against the Eurasian Plate and the clockwise rotation around the eastern Himalayan syntaxis. (2) The principal stresses increase linearly with depth. Within the depth range of 77.8 m to 386.4 m, S_H and S_h range from 3.0 MPa to 11.0 MPa and 2.0 MPa to 6.7 MPa, with gradients of 1.82 MPa/100 m and 0.72 MPa/100 m, respectively. Compared to the Tibetan Plateau block, the stress magnitude in the study area is relatively low. This is due to the Jiali Fault, which is predominantly characterized by strike-slip motion, accommodating and partially releasing tectonic stress. (3) Risk analysis of active faults based on the Mohr-Coulomb criterion and Byerlee's law shows that the stress state of the Jiali Fault in the project area has not reached the critical condition for shallow crustal fault slip instability, indicating relative stability. (4) Stress field inversion results reveal that along the water diversion tunnels and the underground powerhouse (burial depth 160 m to 400 m), the maximum horizontal principal stress ranges from 3.9 MPa to 11.0 MPa, the vertical stress from 5.8 MPa to 10.7 MPa, and the minimum

基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费项目（CKSF2025715/YT，CKSF20241017/YT，CKSF2025714/YT）；国家重点研发计划项目（2024YFC3211203）

This research is financially supported by the Fundamental Research Funds for the Central Public Welfare Research Institutes (Grant Nos. CKSF2025715/YT, CKSF20241017/YT and CKSF2025714/YT), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No.2024YFC3211203).

第一作者：王斌（1990—），男，博士，高级工程师，主要从事地应力测量理论及其应用的研究。Email：hpuwangbin@163.com

通信作者：董志宏 (1978—)，男，博士，教授级高级工程师，主要从事岩土工程稳定性与监测方面的研究。Email：14968857@qq.com

收稿日期：2025−07−31；**修回日期**：2025−09−21；**录用日期**：2025−12−03；**网络出版日期**：2025−12−11；**责任编辑**：范二平

horizontal principal stress from 4.5 MPa to 7.8 MPa. The azimuth of the maximum horizontal principal stress is between 48° and 66°. The orientation of the maximum horizontal principal stress in the rock surrounding the tunnel often intersects the tunnel axis at large angles (generally 62° to 70°), which is unfavorable for the stability of the rock surrounding the tunnel. [**Conclusion**] A combined analysis of in-situ stress and surrounding rock strength indicates the possibility of slight rockbursts. Necessary protective measures should be implemented during excavation based on actual site conditions. [**Significance**] This study provides key evidence for evaluating fault stability and engineering safety in the project area.
Keywords: eastern Himalayan syntaxis; active fault; in-situ stress; fault stability; inverse analysis

摘　要：为分析和评价喜马拉雅东构造结北缘某大型水电站工程区的地应力分布特征及断层稳定性，采用水压致裂法进行地应力实测，并结合三维应力场反演分析，获取了地下厂房、引水隧洞等关键部位应力场信息。研究结果表明：工程区主应力关系整体呈最大水平主应力（S_H）>垂向应力（S_v）>最小水平主应力（S_h），水平应力主导，属走滑型应力状态，最大水平主应力优势方位为北东东向，与震源机制解主压应力方位一致，推断其形成主要受控于印度板块向欧亚板块的北东向挤压作用以及绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动；主应力随深度线性增加，在 77.8～386.4 m 深度范围内 S_H 和 S_h 分别为 3.0～11.0 MPa 和 2.0～6.7 MPa，梯度分别为 1.82 MPa/hm 和 0.72 MPa/hm；相较于青藏地块，工程区应力水平偏低，以走滑运动为主的嘉黎断裂调节并释放了部分的构造应力；基于 Mohr-Coulomb 准则及 Byerlee 定律的活动断裂危险性分析表明，工程区嘉黎断裂的应力状态未达到地壳浅部断层滑动失稳的临界条件，处于相对稳定状态；应力场反演结果表明，引水线路及地下厂房（埋深介于 160～400 m）的最大水平主应力为 3.9～11.0 MPa，垂向应力为 5.8～10.7 MPa，最小水平主应力为 4.5～7.8 MPa，最大水平主应力方位角 48°～66°，隧洞围岩最大水平主应力的方位角与隧洞轴线多呈大角度相交（一般在 62°～70°之间），不利于隧洞围岩的稳定，结合地应力和围岩强度分析有发生轻微岩爆的可能，开挖时需根据现场实际情况采取必要的防护措施。研究成果为工程区的断裂稳定性和工程安全评价提供了关键依据。
关键词：东构造结；活动断裂；地应力；断层稳定性；反演分析
中图分类号：P315.72+7　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)06−1222−16
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025101

0　引言

喜马拉雅东构造结作为印度板块与欧亚板块碰撞的前缘关键区域，是全球构造活动最活跃、地质条件最复杂的地区之一（李滨等，2022）。该区域不仅是研究青藏高原构造演化的天然实验室，也是中国重大基础设施建设的重要区域，规划有川藏铁路、雅鲁藏布江下游水电开发等国家重大工程。东构造结北缘地处青藏高原东南缘，受强烈板块挤压和复杂断裂系统控制，构造应力场复杂，构造变形显著、地震活动频繁，水能资源丰富。近年来，随着中国“双碳”目标的推进，水电作为清洁能源的重要性日益凸显，该区域已成为大型水电工程建设的重点区域（陈平光等，2023；张斌等，2023）。然而，深埋地下洞室群在高地应力环境下普遍面临岩爆、大变形等施工风险，地应力研究是水电工程智能建造中的关键环节，其核心在于通过科学分析工程区域地应力分布及其动态变化，指导工程的设计、施工和运营，提升工程安全性与智能化水平。因此，开展喜马拉雅东构造结北缘水电工程区地应力特征研究及反演分析，不仅是保障深埋地下工程稳定的技术前提，更是揭示青藏高原东南缘构造动力学机制的重要窗口。

东构造结北缘构造应力场具显著非均匀性，学者们利用水压致裂、震源机制、卫星定位系统（GPS）观测等方法开展了部分量化研究。王成虎等（2019）基于实测数据揭示波密西至林芝段水平最大主应力的主导方位从北北西向北东东转变，这种应力方向的区域性变化，可能与东构造结独特的深部结构和强烈的构造活动密切相关。丰成君等（2022）基于震源机制解和应力形因子反演研究揭示出南迦巴瓦地区现今最大主应力方向为北东—北北东向，最大、最小水平主应力大小随深度线性增加梯度分别为 0.032～0.0355 MPa/m、0.0227 ～0.0236 MPa/m，存在非均匀特征。东构造结西侧铁路沿线水压致裂法测量结果表明，主应力随埋深增大而增加，但整体应力水平偏低，500 m 以深应力结构为走滑型，

最大水平主应力平均方位为NE61°—NE72°，相较构造地质和震源机制解揭示的北东向区域主应力方向，呈现明显顺时针偏转，应力梯度略低于青藏地块和东构造结西缘（张重远等，2022；秦向辉等，2023）。GPS应变分析表明，该区最大主压应力轴自西向东由北北东向北东偏转，与印度板块北东或北北东向挤压方向一致，印度板块向北楔入、青藏高原物质东向挤出及川滇地块顺时针旋转共同导致应力场绕东构造结偏转（杨帆等，2019；陈平光等，2023），形成独特的应力分布格局。尽管喜马拉雅东构造节部分区域已开展地应力实测，但针对工程选址区的构造应力场量化研究仍显不足，精细化分析尤为缺乏。随着西南清洁能源基地建设的战略推进，亟需在该区域关键部位补充实测数据，深化构造应力场认识，为重大工程提供可靠的地应力参数支撑。

文章依托藏东南某水电工程，在工程区实施水压致裂法地应力测量，利用实测数据研究现今地应力场特征；应用库伦准则和拜尔利定律分析现今构造应力环境，探讨活动断裂危险性；并综合地层岩性、地质构造等因素开展三维数值应力场回归反演，基于反演结果，评价了水电站地下厂房和引水隧洞等关键部位的应力场分布特征。研究成果可为工程规划及施工提供依据，同时能够深化对喜马拉雅东构造结现今构造应力场的认识。

1 区域地质背景

工程区位于喜马拉雅东构造结北缘易贡−波密段，属雅鲁藏布江缝合带与班公湖−怒江缝合带间拉萨地体东南部。该区经历多期构造演化，自新生代印度−欧亚板块碰撞以来长期处于强烈构造挤压环境（张波等，2011）。地貌表现为高山峡谷相间，地形起伏剧烈，相对高差多逾2000 m，形成典型“V”型深切河谷，显著影响浅表地应力场分布。受板块碰撞及持续挤压作用，区内发育主中央断裂、主边界断裂、冈底斯逆冲带等逆冲断裂及嘉黎断裂、墨脱断裂等大型右旋走滑断层（钟宁等，2021）。藏东南某大型水电站位于易贡藏布干流，采用引水式开发，初拟正常蓄水位2700 m、库容8.0×10^8 m^3，装机容量900 MW，厂房大致埋深约400 m。工程区地层属冈底斯−腾冲地层区，拉萨−察隅和班戈−八宿地层分区，分区界线受嘉黎断裂主干断层控制。规划河段主要出露中新元古界、奥陶系、石炭系—二叠系、侏罗系、白垩系及第四系（图1）。与工程关系最密切的断裂为东构造结嘉黎断裂带中段，现今构造变形以右旋走滑为主（李鸿儒等，2021）。该断裂作为藏东南走滑断裂系重要调节断裂，影响了青藏高原内部物质流动和应力场特征（刘世杰等，2022）。

2 测试方法及测点分布

研究采用国际岩石力学学会（ISRM）推荐的水压致裂法进行深部地应力原位测量（Haimson and Cornet, 2003）。该方法通过在钻孔中水力压裂岩体孔壁，观测诱发裂缝的开闭循环，确定主应力大小和方向，已在交通、水电及基础地质领域广泛应用（Zhao et al., 2015；秦向辉等，2018；陈群策等，2019）。文中使用自主研发的深孔测量设备，测试严格遵循ISRM建议程序（Haimson and Cornet, 2003），水压致裂过程及典型曲线如图2和图3所示。关键参数计算依据ISRM建议方法，其中关闭压力（P_s）通过综合单切线法、dt/dP法、dP/dt法确定（丰成君等，2012；杨跃辉等，2024），以提高测试结果精度，计算采用自主研发软件完成。工程区共实施4个钻孔水压致裂法地应力测试，钻孔分布于嘉黎断层南侧，总体沿断裂近北西向分布（图1），孔深172～400 m，孔口高程2800～3100 m。根据数字高程模型及地貌特征，工程区侵蚀基准面约2600～2800 m，大部分钻孔深度达到或超过此基准面。钻孔岩性主要为石英砂岩等，满足水压致裂测量要求。

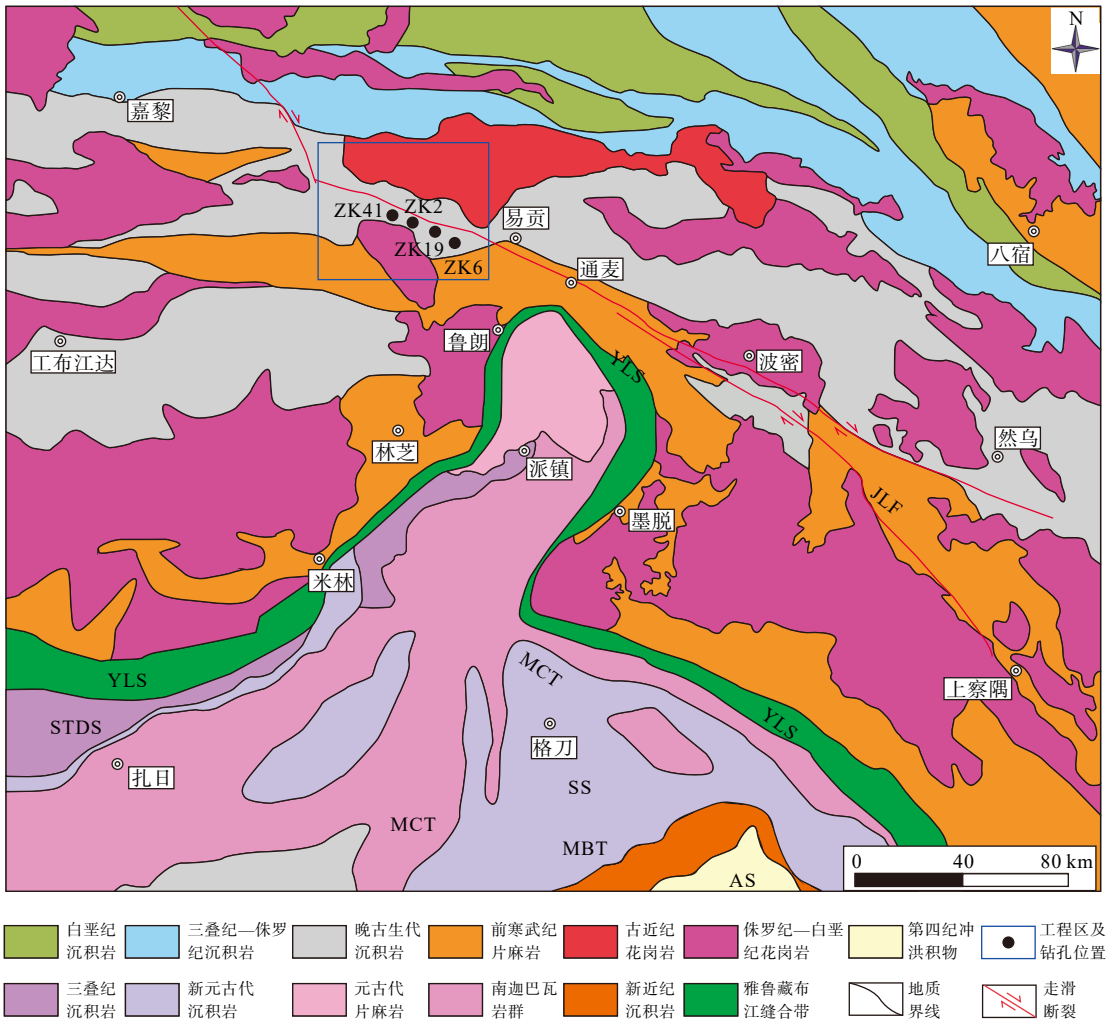
根据水压致裂地应力测试原理（Haimson and Cornet, 2003），可以从压力−时间曲线直接获取岩体破裂压力（P_b）、裂缝重张压力（P_r）和瞬时闭合压力（P_s）。相应地，3个主应力计算如下：

$$S_h = P_s \tag{1}$$

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0 \tag{2}$$

$$S_v = \rho g h \tag{3}$$

式中，S_H—最大水平主应力；S_h—最小水平主应力；S_v—垂向应力；P_0—孔隙压力；ρ—岩石密度（取ρ=2.65×10^3 kg/m^3）；g—重力加速度；h—上覆岩层埋深。最大水平主应力方向采用水压致裂印模技术确定，具体方法见ISRM建议（Haimson and Cornet, 2003），具体地应力测试结果见表1。



SS—桑构造结；AS—阿萨姆构造结；YLS—雅鲁藏布江缝合带；STDS—藏南拆离系；MCT—主中央断裂；MBT—主边界断裂；JLF—嘉黎断裂带

图 1　喜马拉雅东构造结构造地质简图（据李滨等，2022 修改）

Fig. 1　Geological sketch map of the eastern Himalayan syntaxis (modified from Li et al., 2022)

SS–Siang syntaxis; AS–Assam syntaxis; YLS–Yarlung Zangbo suture zone; STDS–Southern Tibetan detachment system; MCT–Main Central Thrust; MBT–Main Boundary Thrust; JLF–Jiali fault

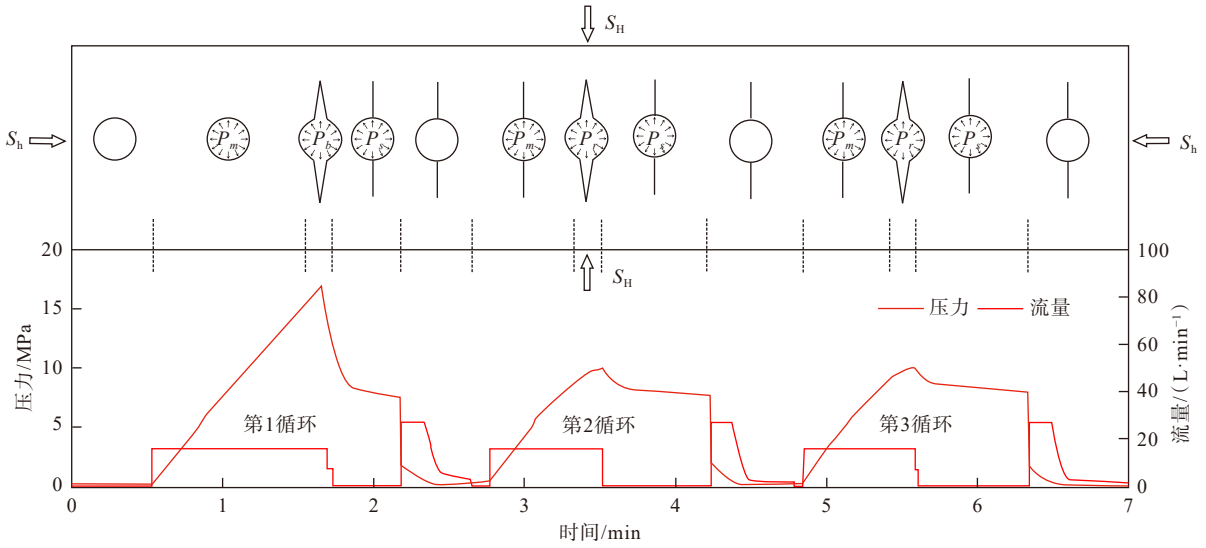
3　地应力测量结果及主要特征

3.1　地应力量值

基于实测数据，分析了工程区测试深度内主应力随深度分布特征（图 4）。研究结果表明，主应力随深度线性增加，浅部（约 200 m 以内）数据略显离散（图 4 中 A 段），可能与地形影响有关（Pan et al., 1995；谭成轩等，2006；何万超等，2025）；在 77.8～386.4m 深度范围内，S_H 和 S_h 分别为 3.0～11.0 MPa 和 2.0～6.7 MPa，对应梯度分别为 1.82 MPa/hm 和 0.72 MPa/hm。为对比认识工程区应力状态，将结果分别与中国大陆整体应力背景（景锋等，2007；王艳华等，2012；杨树新等，2012）及作为其关键构造单元的青藏地块（杨树新等，2012）的研究成果进行对比（表 2）。结果显示，相较于这些区域，工程区整体应力水平偏低。原因可能在于：一是数据的深度范围可能存在差异，工程区浅表受地形影响明显；二是断裂的复杂发育程度与地应力状态的变化密切相关，通常断裂结构越复杂，地应力的变化幅度也越大，在断裂高度发育的区域，应力方向表现出显著离散性，应力值呈现异常波动。工程区断裂密集且规模大、间距近，断裂错动过程中的能量释放导致其影响范围内应力降低，即多断裂影响区的叠加形成了相对较低的应力环境。

3.2　主应力方向

水压致裂法测量结果显示（图 5），工程区的最大



S_H—最大水平主应力；S_h—最小水平主应力；P_m—孔内流体压力；P_b—岩体破裂压力；P_r—裂缝重张压力；P_s—瞬时闭合压力

图 2 水压致裂测量过程及典型测量曲线（Hayashi and Haimson，1991；孙炜锋等，2024）

Fig. 2 Hydraulic fracturing measurement process and typical measurement curves (Hayashi and Haimson, 1991; Sun et al., 2024)

S_H–maximum horizontal principal stress; S_h–minimum horizontal principal stress; P_m–borehole fluid pressure; P_b–formation breakdown pressure; P_r–fracture reopening pressure; P_s–shut-in pressure

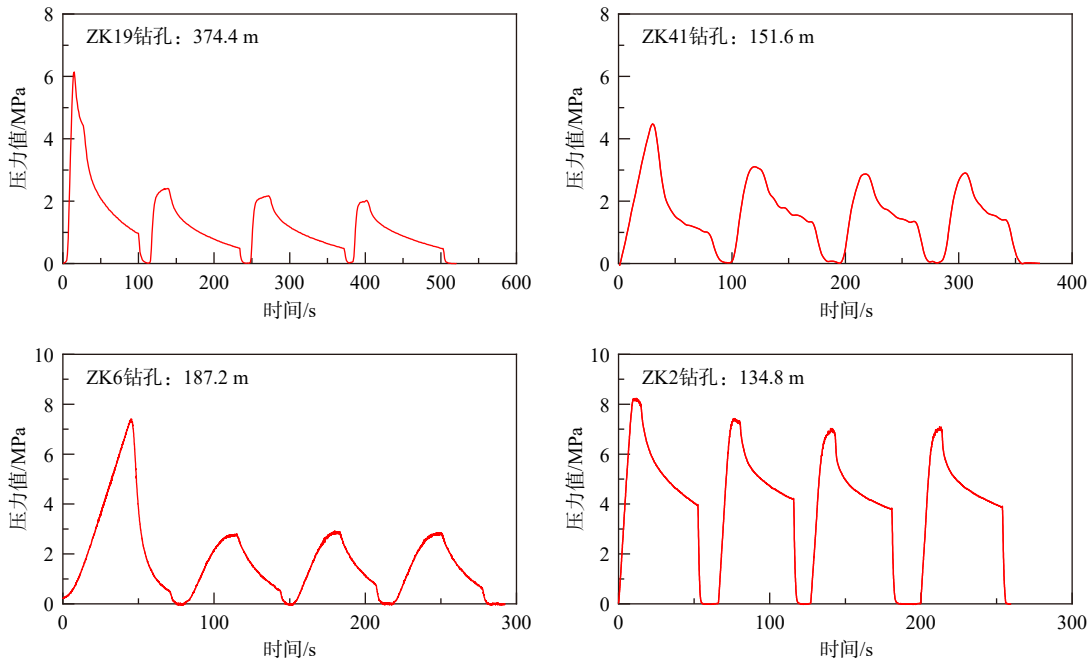


图 3 工程区地应力测量典型压裂曲线

Fig. 3 Typical fracturing curves for in-situ stress measurements in the engineering area

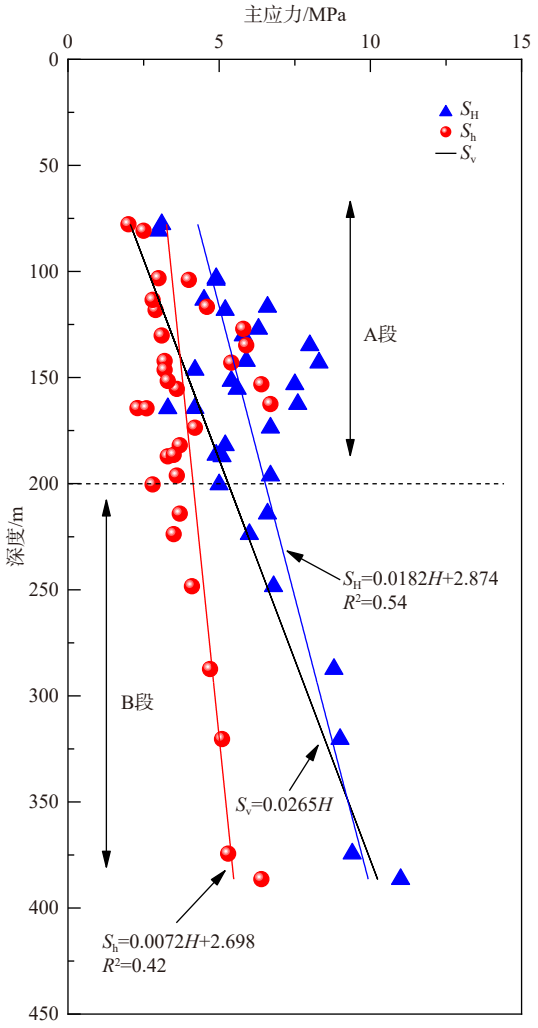
水平主应力方向一致性良好，分布在NE50°—NE65°，数学平均值为NE57.0°±8.5°，总体呈北东东向。该区在中国大陆构造应力场分区（谢富仁等，2007）中位于青藏高原南部三级应力区下的墨脱–昌都四级应力区。目前区域内的应力数据主要来源于震源机制解反演，原地实测资料相对匮乏，工程区地应力结构以走滑型为主，区域水平最大主应力总体为北东—北东东向。空间上，主应力方向在东构造结附近发生顺时针偏转，且呈现出自南（北北东向）向北（北东向）的偏转趋势，该方向与区内北西西走向断裂近垂直或大角度相交。邻近的林芝地区及拉日线峡谷区的水压致裂法测量结果（孟文等，2017）同

表 1　水压致裂地应力测量结果

Table 1　Results of in-situ stress measurements

钻孔	深度/m	压裂参数/MPa				应力值/MPa			最大水平主应力方向
		P_b	P_r	P_s	P_0	S_H	S_h	S_v	
ZK19	113.4	4.8	2.9	1.7	0.0	4.5	2.8	3.0	
	155.4	4.4	3.5	2.0	0.0	5.6	3.6	4.1	
	200.4	2.0	1.4	0.8	0.0	5.0	2.8	5.3	
	248.4	5.3	3.0	1.6	0.0	6.8	4.1	6.6	
	287.4	4.7	2.3	1.8	0.0	8.8	4.7	7.6	NE52°
	320.4	4.5	3.1	1.9	0.1	9.0	5.1	8.5	
	374.4	6.1	2.3	1.6	0.6	9.4	5.3	9.9	
	386.4	6.4	3.5	2.5	0.7	11.0	6.4	10.2	NE64°
ZK41	146.4	5.0	3.8	1.7	0.0	4.2	3.2	3.9	
	151.6	4.5	3.0	1.8	0.0	5.4	3.3	4.0	
	164.5	4.9	2.9	1.0	0.1	3.3	2.6	4.4	NE50°
	173.7	4.8	4.1	2.5	0.2	6.7	4.2	4.6	
	181.9	4.8	3.9	1.9	0.2	5.2	3.7	4.8	
	186.5	3.6	3.3	1.6	0.3	4.9	3.5	4.9	NE61°
ZK6	77.8	5.3	2.1	1.2	0.0	3.1	2.0	2.1	
	103.2	4.9	3.2	2.0	0.0	4.9	3.0	2.7	
	118.2	3.9	2.3	1.7	0.0	5.2	2.9	3.1	
	130.2	6.4	2.2	1.8	0.0	5.8	3.1	3.5	
	142.2	4.7	2.3	1.8	0.0	5.9	3.2	3.8	NE51°
	164.4	1.8	1.2	0.7	0.0	4.2	2.3	4.4	
	187.2	7.3	2.8	1.4	0.0	5.1	3.3	5.0	
	196.2	5.6	2.1	1.6	0.0	6.7	3.6	5.2	
	214.2	6.3	2.3	1.6	0.1	6.6	3.7	5.7	
	223.8	6.2	2.1	1.3	0.2	6.0	3.5	5.9	NE60°
ZK2	80.8	3.6	2.9	1.7	0.8	3.0	2.5	2.1	
	104.0	6.6	5.1	3.0	1.0	4.9	4.0	2.8	
	116.7	6.8	4.8	3.4	1.2	6.6	4.6	3.1	NE56°
	127.1	9.6	8.5	4.5	1.3	6.3	5.8	3.4	
	134.8	8.2	7.1	4.6	1.3	8.0	5.9	3.6	
	143.0	7.1	5.1	4.0	1.4	8.3	5.4	3.8	NE65°
	153.2	9.0	8.7	4.9	1.5	7.5	6.4	4.1	
	162.5	10.6	9.3	5.1	1.6	7.6	6.7	4.3	

注：S_H—最大水平主应力；S_h—最小水平主应力；S_v—垂向应力；P_b— 岩体破裂压力；P_r— 裂缝重张压力；P_s—瞬时闭合压力；P_0—孔隙压力



S_H—最大水平主应力；S_h—最小水平主应力；S_v—垂向应力；H—深度

图 4　主应力量值随深度分布特征

Fig. 4　Variation of principal stresses with depths

S_H–maximum horizontal principal stress; S_h–minimum horizontal principal stress; S_v–vertical stress; H–depth

表 2　不同区域地应力量值随深度变化统计

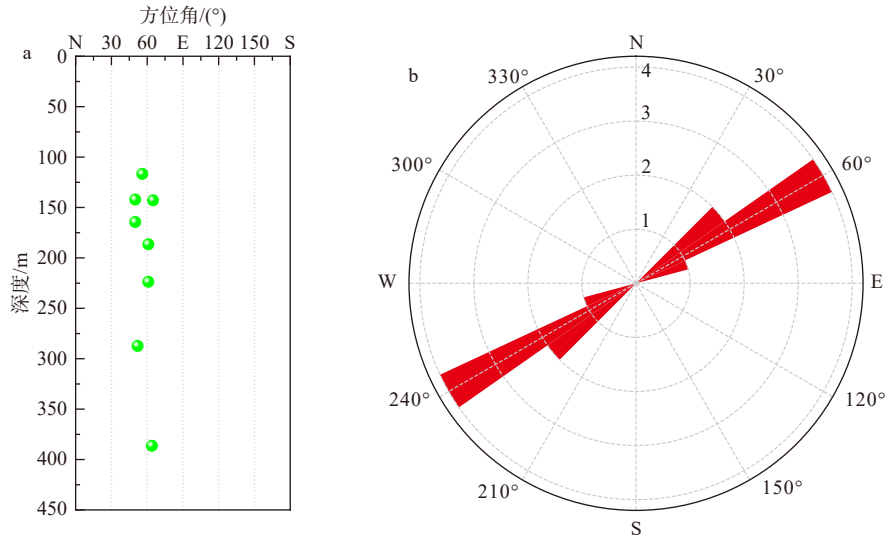
Table 2　Variation of S_H and S_h with the depth in different regions

地区	S_H	S_h	资料来源
喜马拉雅东构造结北缘	0.0182H+2.874	0.0072H+2.698	文中
中国大陆青藏地块关键构造单元	0.0292H+5.185	0.0172H+3.681	杨树新等, 2012
中国大陆	0.0227H+6.590	0.0164H+3.590	王艳华等, 2012
中国大陆	0.0216H+6.781	0.0182H+2.233	景锋等, 2007
中国大陆	0.0229H+4.738	0.0171H+1.829	杨树新等, 2012

注：S_H—最大水平主应力；S_h—最小水平主应力；H—深度

样显示最大水平主应力为北东向。其中，距离工程区较近的林芝测点应力方向与工程区较为一致；而距离较远的朗县测点，受地形、岩性及局部构造影响，其主应力方向与工程区存在一定偏差。吴啸龙等(2020)基于喜马拉雅构造带 GPS 观测数据，发现东西向剖面的 GPS 速率分量自西向东呈线性缓慢增强

趋势，在东构造结处达到最高的 19.24±0.75 mm·a^{-1}，该变化趋势表明板块边界带地壳水平形变自西向东逐渐向东偏转，跨过喜马拉雅东构造结的剖面速率减弱为 15.62±1.00～11.54±0.29 mm·a^{-1}，该趋势变化与区域地壳水平形变围绕构造结的顺时针旋转现象密切相关（图 6）。工程区实测北东东向的最大水平主应力方向佐证了喜马拉雅东构造结是青藏高原南部地壳由南北向挤压转换为顺时针旋转挤出变形的构造结点（吴啸龙等，2020）。



a—主应力方向随深度变化特征；b—主应力方向分布玫瑰花图

图 5 工程区最大水平主应力方向分布特征

Fig. 5 Distribution of the S_H orientation in the engineering area

(a) Variation of the S_H orientation with depth; (b) Rose diagrams of the S_H orientation

3.3 应力类型

根据 Anderson 断层几何形态与应力关系分类（Anderson, 1951），工程区整体处于走滑型应力场（S_H>S_v>S_h）。现今 GPS 数据分析揭示，嘉黎断裂带中段兼具右旋走滑（速率 1.3～2.0 mm/a）和逆冲（挤压速率 2.5～2.9 mm/a）分量，呈现出低活动速率与长复发周期的地震特征（钟宁等，2021）。该断裂带中南段的活动性主要受青藏高原东向挤出和绕喜马拉雅东构造结顺时针旋转运动的驱动，其右旋走滑的运动学特征反映了区域走滑型应力场对活动断裂展布方向的控制作用。整体看来，喜马拉雅构造带区域地震活动以逆冲型破裂为最主要特征，且地震活动的空间分布特征与应变分布具有良好的一致性。整个喜马拉雅构造带的地壳形变自西向东存在南北向挤压至顺时针旋转挤出的空间演化趋势，相应地震活动也由逆冲型破裂转变为走滑破裂，区内最大主压应力方向与 GPS 速率矢量方向一致，表明现今该区域的地壳应力场主要与高原南部地壳的东向运动逃逸过程有关（吴啸龙等，2020）。

4 地应力场数值反演

4.1 反演分析方法

文中采用多元线性回归法（周朝等，2022）进行地应力场反演，将应力场视为垂向应力与构造应力的叠加，其中垂向应力场是基于岩体密度计算自重得到，构造应力场是在模型两侧面施加水平位移模拟构造运动，剪切应力通过在边界施加切向水平位移实现，模型侧面及底面施加法向位移约束（图 7）。以地应力回归计算值作为因变量，以数值模型所对应的各实测点应力计算值作为自变量，结合自变量的回归系数，得到的初始地应力计算值方程如下：

$$\sigma_{回归} = k_1\sigma_{\mu 1} + k_2\sigma_{\mu 2} + k_3\sigma_{\mu 3} + k_4\sigma_z \quad (4)$$

式中，$\sigma_{\mu 1}$、$\sigma_{\mu 2}$、$\sigma_{\mu 3}$、σ_z—东西方向构造应力、南北方向构造应力、水平面内剪切应力和自重应力；k_1、k_2、k_3、k_4—回归系数。

4.2 模型建立与参数选取

工程区位于高山峡谷，地质条件复杂，综合地应力实测特征、地质构造差异、数值模型长宽比及

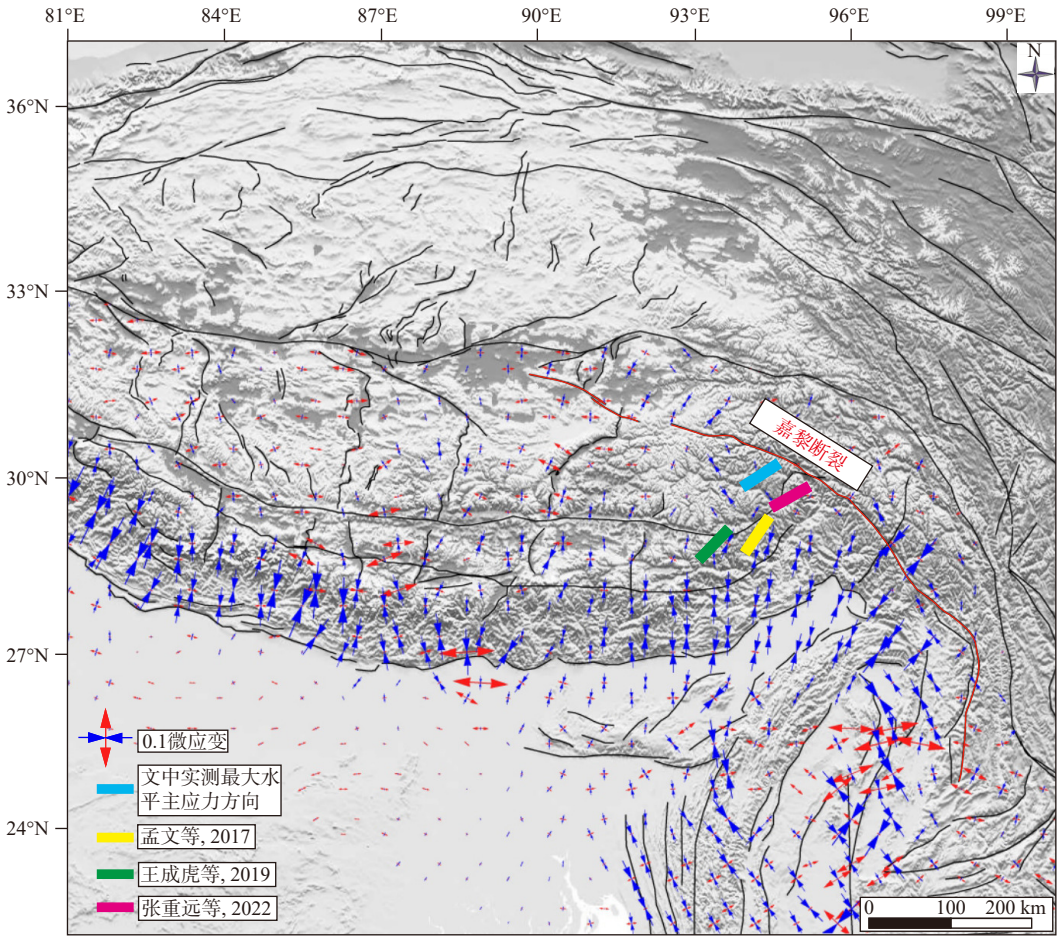
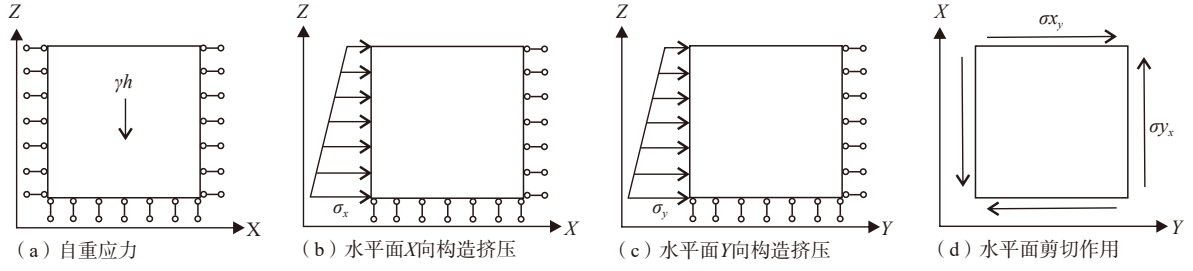


图 6　喜马拉雅东构造结地区最大、最小主应变率分布（据吴啸龙等，2020 修改）

Fig. 6　Distribution of maximum and minimum principal strain rates in the eastern Himalayan Syntaxis region (modified after Wu et al., 2020)



γh—自重应力；σ_x—X向构造应力；σ_y—Y向构造应力；σ_{xy}、σ_{xy}—剪切应力

图 7　边界约束及边界荷载示意图

Fig. 7　Schematic diagram of boundary constraints and boundary loads

(a) Self-weight stress; (b) Tectonic compression in the *X*-direction of the horizontal plane; (c) Tectonic compression in the *Y*-direction of the horizontal plane; (d) Shearing action in the horizontal plane

γh—self-weight stress; σ_x—*X*-direction tectonic stress; σ_y—*Y*-direction tectonic stress; σ_{xy}, σ_{xy}—shear stress

工程需求，以坝址区引水隧洞为主确定计算范围。地质模型在深入认识工程地质条件的基础上，综合考虑地形地貌、地层岩性及断裂构造等因素，并对基本岩层结构和主要断层进行了概化。模型包含断层、风化层、石英砂岩、花岗岩地层，断层产状参考实际揭露资料。三维数值模型的整体计算域尺寸设定为：*X*轴（正东，方位角 90°）5000 m，*Y*轴（正北）3500 m，*Z*轴（垂直向上）从−1000 m 延伸至地表高程。模型的数值计算网格分布见图 8。为提高计算效率并确保关键区域精度，网格密度根据位置调

整：工程区及地应力测孔周边局部加密，外围区域网格稀疏，总单元 423530 个，节点 87901 个。采用线弹性本构模型表征岩层特性，模型中所需岩体物理力学参数见表 3。

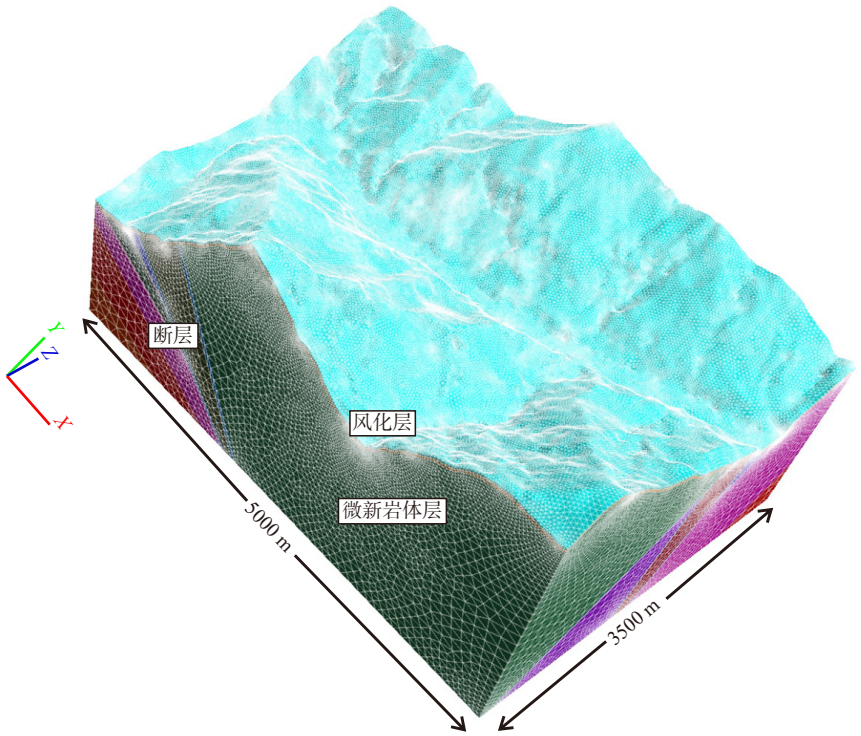


图 8 三维有限元网格图

Fig. 8 Three dimensional finite element mesh diagram

表 3 岩体力学特性参数表

Table 3 Table of physical and mechanical parameters of rock mass

地层	变形模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm^{-3})
风化层	0.80	0.37	2.10
断层	0.90	0.36	2.30
石英砂岩	14.90	0.26	2.74
花岗岩	17.40	0.23	2.65

4.3 地应力反演结果

为获取模型边界条件，研究基于水压致裂法地应力实测结果（剔除异常点后）和多元线性回归理论，利用 FLAC3D 软件进行反演分析。所用测点数据来自：ZK19 钻孔（4 点）、ZK41 钻孔（3 点）、ZK6 钻孔（4 点）、ZK2 钻孔（3 点）。反演确定了 4 类应力源的回归系数：垂向应力分量（L_1=1.10）、X 轴向构造应力分量（L_2=0.07）、Y 轴向构造应力分量（L_3=0.23）、水平剪切应力分量（L_4=0.70）。随后，将这些系数输入式（4），计算出各监测点的地应力回归理论值。实测值与理论计算值的对比详见表 4。

由表 4 可以看出反演结果与实测值差值总体较小，说明了模拟结果的合理性。根据模拟结果，对拟选坝址引水线路进行插值，得到整个剖面的应力分布规律。根据各主应力的等色云图（图 9）可以看出，坝址区引水线路围岩应力量值整体呈现出 $S_H \geqslant S_v > S_h$ 的关系特征，以水平应力场为主，应力结构有利于走滑断层活动。总体上应力分布随地形起伏而变化，在两侧沟谷部位会出现不同程度的应力集中现象，断层附近及岩性分界处的岩体应力分异现象明显。引水线路埋深范围在 160～400 m，最大水平主应力为 3.9～11.0 MPa，垂向应力为 5.8～10.7 MPa，最小水平主应力为 4.5～7.8 MPa，最大水平主应力方位角在 48°～66°之间。

5 工程区活动断裂稳定性分析

地壳应力状态与断层活动性密切相关，根据库伦摩擦滑动准则，若假设断层面内聚力为零，当剪应力（τ）$\geqslant \mu\sigma_n$ 时（μ 为摩擦系数、σ_n 为正应力），断裂将发生失稳滑动。引入有效应力概念（Zoback and Healy, 1992），有效最大与最小主应力之比可以表示

表 4　钻孔水压致裂法实测值与回归计算值对比

Table 4　Comparison between measured values and regression-calculated values for the borehole hydraulic fracturing method

测孔号	测深/m	对比项	S_H/MPa	S_h/MPa	S_v/MPa	α_H/(°)
ZK19	287.4	实测值	8.8	4.7	7.6	52
		计算值	7.4	4.2	10.1	60
		相对差	1.4	0.5	−2.5	−8
		误差百分比	16%	11%	33%	15%
	320.4	实测值	9.0	5.1	8.5	
		计算值	8.0	5.1	10.3	
		相对差	1.0	0.0	−1.8	
		误差百分比	11%	0.0	21%	
	374.4	实测值	9.4	5.3	9.9	
		计算值	8.8	4.4	11.9	
		相对差	0.6	0.9	−2.0	
		误差百分比	6%	17%	20%	
	386.4	实测值	11.0	6.4	10.2	64
		计算值	9.0	5.8	9.6	55
		相对差	2.0	0.6	0.6	9
		误差百分比	18%	9%	6%	14%
ZK41	164.5	实测值	3.3	2.6	4.4	50
		计算值	2.5	1.8	5.5	56
		相对差	0.8	0.8	−1.1	−6
		误差百分比	24%	31%	25%	12%
	181.9	实测值	5.2	3.7	4.8	
		计算值	4.0	0.8	4.9	
		相对差	1.2	2.9	−0.1	
		误差百分比	23%	78%	2%	
	186.5	实测值	4.9	3.5	4.9	61
		计算值	2.6	2.0	5.0	48
		相对差	2.3	1.5	−0.1	13
		误差百分比	47%	43%	2%	21%
ZK6	142.2	实测值	5.9	3.2	3.8	51
		计算值	6.0	2.8	5.6	58
		相对差	−0.1	0.5	−1.8	−7
		误差百分比	2%	16%	47%	14%
	196.2	实测值	6.7	3.6	5.2	
		计算值	5.2	3.0	6.8	
		相对差	1.5	0.6	−1.6	
		误差百分比	22%	17%	31%	
	214.2	实测值	6.6	3.7	5.7	
		计算值	6.5	3.1	7.3	
		相对差	0.1	0.6	−1.6	
		误差百分比	2%	16%	28%	
	223.8	实测值	6.0	3.5	5.9	60
		计算值	6.4	3.3	7.4	66
		相对差	−0.4	0.2	−1.5	−6
		误差百分比	7%	6%	25%	10%

续表 4

测孔号	测深/m	对比项	S_H/MPa	S_h/MPa	S_v/MPa	α_H/(°)
ZK2	116.7	实测值	6.6	4.6	3.1	56
		计算值	4.8	4.7	3.5	51
		相对差	1.8	−0.1	−0.4	5
		误差百分比	27%	2%	13%	9%
	143.0	实测值	8.3	5.4	3.8	65
		计算值	6.0	3.9	3.5	58
		相对差	2.3	1.5	0.3	7
		误差百分比	28%	28%	8%	11%
	153.2	实测值	7.5	6.4	4.1	
		计算值	5.2	4.7	2.5	
		相对差	2.3	1.7	1.6	
		误差百分比	31%	27%	39%	

注：S_H–最大水平主应力；S_h–最小水平主应力；S_v–垂向应力；α_H–最大水平主应力方向

为“摩擦系数”的函数：

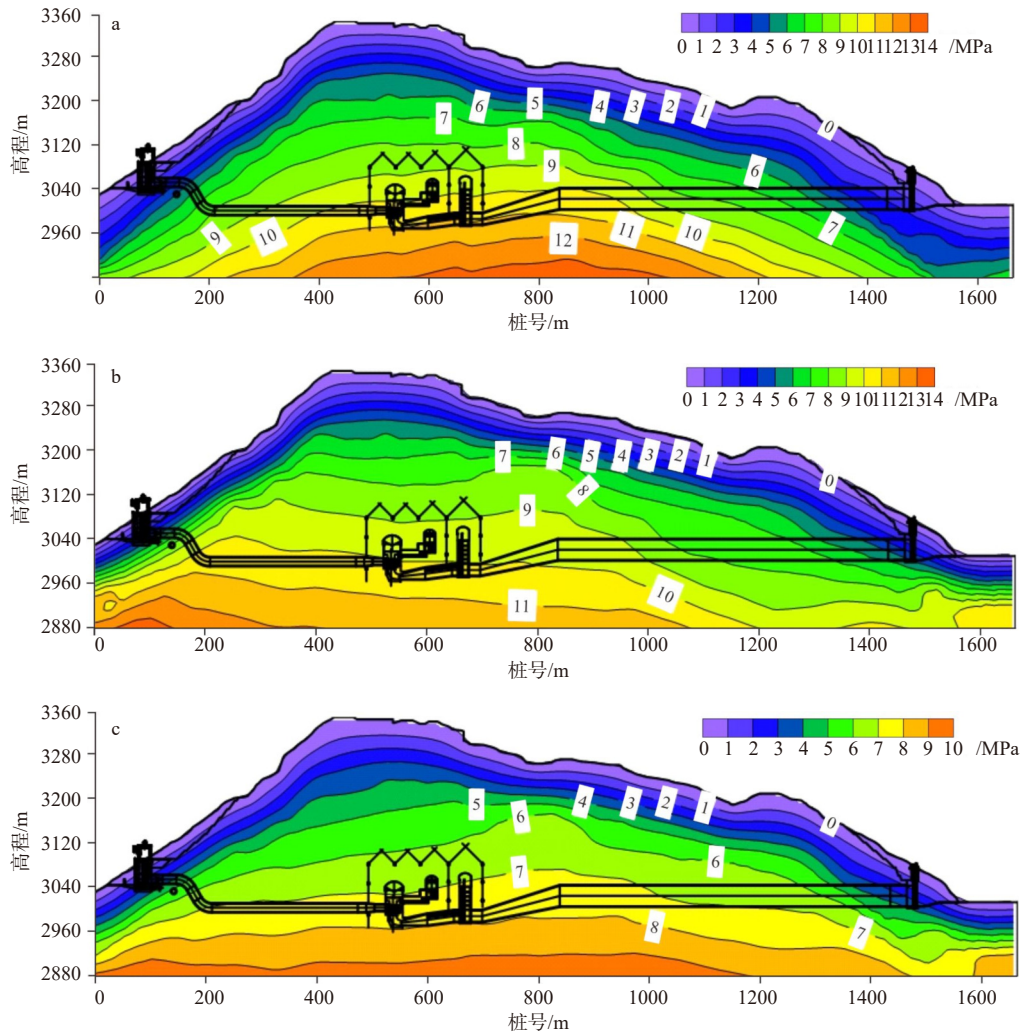
$$(S_1-P_0)/(S_3-P_0)=\left[\left(1+\mu^2\right)^{1/2}+\mu\right]^2=K_\mu \qquad (5)$$

式中，S_1、S_3—断层附近的最大主应力与最小主应力，P_0—孔隙压力；其余变量含义同上。

若有效最大与最小主应力之比小于 K_μ（摩擦系数的函数），断层稳定；若大于或等于 K_μ，则可能沿特定优势方向发生黏滑失稳（Zoback and Healy, 1984）。Byerlee 综合岩石摩擦实验，认为大部分岩石摩擦系数介于 0.6～1.0 之间（Byerlee, 1978）。基于实测地应力计算各测点最大与最小有效主应力比值，并与不同 K_μ 值（0.1、0.2、0.3、0.4、0.6）对比，评估嘉黎断裂的失稳滑动危险性。

分析结果显示（图 10a），工程区地壳应力水平整体低于 μ=0.6 的理论失稳临界值，受地形影响，200 m 以浅数据表现出较强的离散性，200 m 以深应力总体低于 μ=0.3 的理论地壳应力值。根据测试钻孔与断裂的空间位置关系，ZK2 钻孔和 ZK41 钻孔的应力积累程度略低于 ZK6 钻孔和 ZK19 钻孔，表明断裂沿线不同位置的应力积累存在差异（图 10b）。工程区内主要活动断裂–嘉黎断裂呈北西西向右旋走滑特征，第四纪以来活动强烈且具有明显的空间差异性（邹任洲, 2018）。GPS 观测结果显示，虽然在构造结两侧的米林地区观测到 3～5 mm/a 的高运动速率，但由于南迦巴瓦顶端嘉黎断裂的调节作用（唐方头等, 2019），使得工程区应力水平较低，暂时处于相对稳定的构造应力环境。

最大剪应力与平均应力之比（μ_m）是反映地壳破坏状态和区域应力积累的参数，与断层活动性相



图中数字代表应力量值，单位为 MPa

a—最大水平主应力；b—垂向应力；c—最小水平主应力

图 9 坝址区输水系统应力分布云图

Fig. 9 Contour plot of the stress distribution in the bank water conveyance system at the dam site area

(a) Maximum horizontal principal stress; (b) Vertical stress; (c) Minimum horizontal principal stress

The numbers represent stress values in MPa

关。考虑孔隙水压力的作用下，μ_m 可表示为：

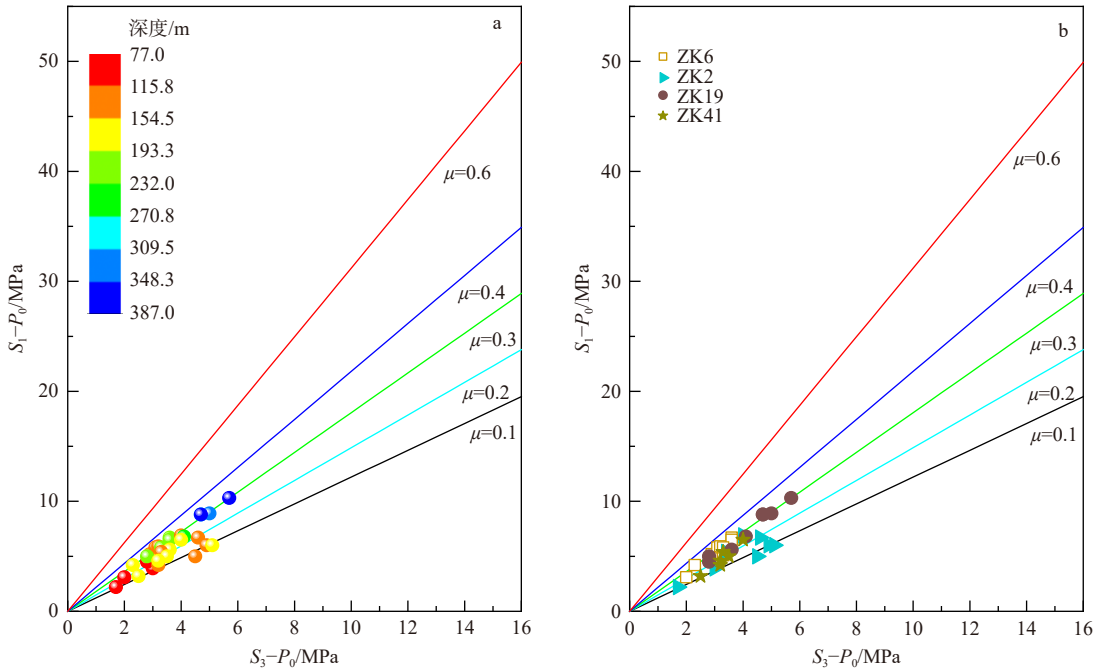
$$\mu_m = (S_1 - S_3)/(S_1 + S_3 - 2P_0) \quad (6)$$

式中变量含义同上。

当 μ_m 接近 0.5 时，表示高应力积累；当 μ_m<0.3，表示低应力积累（Townend and Zoback, 2000）。根据式（6）将各测点地应力数据绘制于图 11，大部分的应力数据均落在 μ_m=0.1～0.4 区间内。隧洞埋深在 200 m 以浅时，μ_m 值表现出较大的离散性；而当埋深超过 200 m 时，μ_m 值则趋于 0.3 且比较稳定。这一现象指示该区域的构造应力积累水平相对较低。相关研究指出嘉黎断裂的活动主要受 2 个因素控制：印度板块向欧亚板块的北东向挤压作用以及绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动（钟宁等, 2021），使得嘉黎断裂呈现右旋走滑特征，走滑断裂相较于逆冲断裂更易于充分释放地应力（Liao et al., 2003）。此外，其邻近的东构造结缝合带具有较大的宽度，同样能够充分吸收地壳变形（Chen et al., 2023），从而削弱了应力的进一步积累，上述因素共同导致该地区应力水平总体较低。

6 工程安全性分析

最大主应力以及规模较大结构面（如断层、错动带等）是引水隧洞轴线的走向需要考虑的主导因素（张勇等, 2012）。在常规水电站引水隧洞及地下



a—有效最大与最小主应力比值随深度分布；b—有效最大与最小主应力比值随钻孔分布

图 10　基于库伦摩擦失稳准则的地应力分析结果

Fig. 10　Estimates of in-situ stress according to the Coulomb frictional–failure criterion incorporating Byerlee's law

(a) Distribution of the ratio of the effective maximum to minimum principal stress with depth; (b) Distribution of the ratio of effective maximum to minimum principal stress with borehole

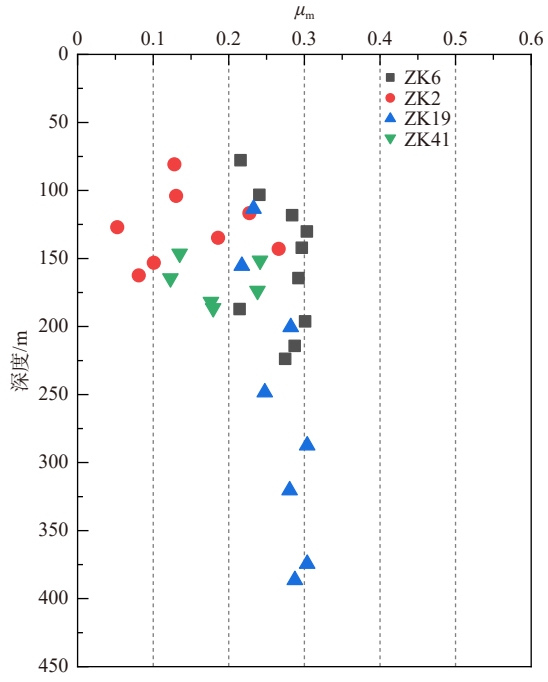


图 11　工程区 μ_m 随深度分布图

Fig. 11　Distribution of μ_m with depth in the engineering area

厂房洞室群布置设计中，通常要求主洞室轴线与最大主应力成较小夹角，与结构面呈较大夹角。工程实践与理论研究均表明，在水平构造应力为主导的区域，为保障洞室稳定，其轴线方向应尽可能与最大水平主应力方向保持一致（黄书岭等，2014）。否则，洞室边墙极易因应力重分布不均而发生显著的变形破坏。根据隧洞轴线布置，对隧洞轴线与反演得到的地应力方位数据对比分析，二者普遍以大角度相交（多数区段夹角超过 60°）。这种大角度相交的出现，可能会威胁隧洞围岩的长期稳定。隧洞围岩主要为花岗岩等硬质岩，需结合地应力和围岩强度考虑岩爆风险，文中采用岩石强度应力比法和应力强度比法（徐林生和王兰生，1999；张重远等，2022）来探讨岩爆问题（表 5），参照《水力发电工程地质勘察规范》（GB 50287—2016）（中华人民共和国住房和城乡建设部，2017）中采用最大主应力（σ_m）的量级和岩石强度应力比（R_b/σ_m；R_b 为岩石单轴饱和抗压强度）来综合判定岩体初始应力及岩爆分级。根据室内试验成果花岗岩单轴饱和抗压强度为 70.0 MPa，输水线路最大主应力为 14.6 MPa，$4<R_b/\sigma_m<7$ 且 $10\leqslant\sigma_m<20$ MPa，因此工程区应力分级为中等应力，有发生轻微岩爆的可能；在岩石应力强度比判据下，隧洞开挖面最大切向应力（$\sigma_{\theta max}$）为 21.8 MPa，$0.3\leqslant\sigma_{\theta max}/R_b<0.5$，同样有发生轻微岩爆的可能，即开

挖过程中洞壁岩体局部可能有剥离和掉块现象，但成洞性尚好，一般对施工影响较小，开挖时需根据现场实际情况采取合适的控制和防护措施。由于影响岩爆发生的因素很多，除初始地应力因素外，还有岩石性状、地质构造及开挖方式等，实际应用中需综合分析多种因素的影响。

表 5 岩爆风险判别和分级

Table 5 Rockburst risk criteria and classification

判别方法	判别公式	参数	判据阈值	岩爆分级	判据特点
岩石强度应力比法	R_b/σ_m	R_b为岩石单轴饱和抗压强度；σ_m为最大主应力	4～7	轻微岩爆	主要考虑隧洞岩体初始应力的影响作用
			2～4	中等岩爆	
			1～2	强烈岩爆	
			<1	极强岩爆	
岩石应力强度比法	$\sigma_{\theta max}/R_b$	R_b为岩石单轴饱和抗压强度；$\sigma_{\theta max}$为隧道开挖面最大切向应力	[0.3,0.5)	轻微岩爆	主要考虑隧洞开挖过程和初始应力场重分布的影响
			[0.5,0.7)	中等岩爆	
			[0.7,0.9)	强烈岩爆	
			≥0.9	极强岩爆	

7 结论

基于喜马拉雅东构造结北缘某大型水电站工程区的地应力测试结果，初步揭示了工程区现今地应力状态，结合 Mohr-Coulomb 准则及 Byerlee 定律，探讨了活动断裂的稳定性，通过结合地层岩性、地质构造条件等因素进行三维数值应力场回归反演分析，评价了水电站地下厂房和引水隧洞等关键工程部位的应力场分布特征。取得如下几点认识：

（1）工程区实测主应力随深度增加而增大，386.4 m 深度范围内 S_H 和 S_h 分别为 3.0～11.0 MPa 和 2.0～6.7 MPa，对应梯度分别为 1.82 MPa/hm 和 0.72 MPa/hm。相较于中国大陆的整体应力背景及作为其关键构造单元的青藏地块，工程区整体应力水平偏低，认为以走滑运动为主的嘉黎断裂，调节并释放了部分的构造应力。

（2）主应力关系整体表现为 $S_H>S_v>S_h$，水平应力起主导作用，属于走滑型应力状态，最大水平主应力优势方位为北东东向，与震源机制解主压应力方位一致，推断现今北东东向走滑剪切应力环境的形成主要受控于印度板块向欧亚板块的北东向挤压作用以及绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动。

（3）利用 Mohr-Coulomb 准则及 Byerlee 定律，对嘉黎断裂的稳定性进行了分析，认为断裂附近的应力大小未达到地壳浅部断层产生滑动失稳的临界条件，处于较稳定的应力状态。

（4）基于模拟分析结果，引水线路及地下厂房（埋深 160～400 m）最大水平主应力为 3.9～11.0 MPa，垂向应力为 5.8～10.7 MPa，最小水平主应力为 4.5～7.8 MPa，最大水平主应力方位角在 48°～66°之间，隧洞围岩最大水平主应力的方位角与隧洞轴线夹角整体以大角度相交（大于 60°），不利于隧洞围岩的稳定，结合地应力和围岩强度分析有发生轻微岩爆的可能，开挖时需根据现场实际情况采取合适的控制和防护措施。

References

ANDERSON E M, 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain[M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd.

BYERLEE J, 1978. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 116(4-5): 615-626.

CHEN P G, HE X H, XU S F, et al., 2023. Earthquake relocation and regional stress field around the eastern Himalayan syntaxis[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 54(6): 667-683. (in Chinese with English abstract)

CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in Xuefengshan deep borehole and its significance[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 853-865. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z, ZHOU J B, LI G Y, et al., 2023. The nature and spatial-temporal evolution of suture zones in Northeast China[J]. Earth-Science Reviews, 241: 104437.

FENG C J, CHEN Q C, WU M L, et al., 2012. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data: discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 33(7): 2149-2159. (in Chinese with English abstract)

FENG C J, LI B, LI H, et al., 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 919-937. (in Chinese with English abstract)

HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.

HAYASHI K, HAIMSON B C, 1991. Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination of in situ minimum compressive stress[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96(B11): 18311-18321.

HE W C, REN Y, YANG C B, et al., 2025. Influence of deeply incised valley evolution and slope morphology on stress field in southwestern region of China[J]. Yangtze River, 56(6): 107-114. (in Chinese with English abstract)

HUANG S L, DING X L, LIAO C G, et al., 2014. Initial 3D geostress field recognition of high geostress field at deep valley region and considerations on underground powerhouse layout[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(11): 2210-2224. (in Chinese with English abstract)

JING F, SHENG Q, ZHANG Y H, et al., 2007. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(10): 2056-2062. (in Chinese with English abstract)

LI B, YIN Y P, TAN C X, et al., 2022. Geo-safety challenges against the site selection of engineering projects in the eastern Himalayan syntaxis area[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 907-918. (in Chinese with English abstract)

LI H R, BAI L, ZHAN H L, 2021. Research progress of Jiali fault activity[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 52(2): 182-193. (in Chinese with English abstract)

LIAO C T, ZHANG C S, WU M L, et al., 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 30(20): 2027.

LIU S J, LAN H X, ZHANG N, 2022. Geomechanical analysis of major engineering region in middle segment of Jiali fault[J]. Journal of Engineering Geology, 30(6): 1947-1961. (in Chinese with English abstract)

MENG W, GUO C B, ZHANG C Y, et al., 2017. In situ stress measurements and implications in the Lhasa Terrane, Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(6): 2159-2171. (in Chinese with English abstract)

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2017. Code for hydropower engineering geological investigation: GB 50287-2016[S]. Beijing: China Planning Press: 23-27. (in Chinese)

PAN E, AMADEI B, SAVAGE W Z, 1995. Gravitational and tectonic stresses in anisotropic rock with irregular topography[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 32(3): 201-214.

QIN X H, CHEN Q C, MENG W, et al., 2018. Evaluating measured in-situ stress state changes associated with earthquakes and its implications: a case study in the Longmenshan fault zone[J]. Journal of Geomechanics, 24(3): 309-320. (in Chinese with English abstract)

QIN X H, CHEN Q C, MENG W, et al., 2023. Determination of the current *in-situ* stress field of the Tongmai-Bomi section in the northern margin of the eastern Himalayan syntaxis[J]. Acta Geologica Sinica, 97(7): 2126-2140. (in Chinese with English abstract)

SUN W F, HUANG H L, SUN D S, et al., 2024. Present in situ stress measurement in the eastern segment of Yarlung Zangbo River fault and fault activity analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 45(4): 1129-1141. (in Chinese with English abstract)

TAN C X, SUN W F, SUN Y, et al., 2006. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1627-1632. (in Chinese with English abstract)

TANG F T, YOU H C, LIANG X H, et al., 2019. A discussion on seismogenic fault of the Milin M_S6.9 Earthquake, Tibet, and its tectonic attributes[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 213-218. (in Chinese with English abstract)

TOWNEND J, ZOBACK M D, 2000. How faulting keeps the crust strong[J]. Geology, 28(5): 399-402.

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 Y H, CUI X F, HU X P, et al., 2012. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(9): 3016-3027. (in Chinese with English abstract)

WU X L, XIANG Y, TANG F Q, 2020. Study on current crustal deformation of the Himalayan tectonic zone by GPS strain-rate estimation and focal mechanism stress inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(8): 2924-2939. (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 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)

YANG F, SHENG S Z, WAN Y G, et al., 2019. Impact of the stress field in the grid not satisfies the assumption of uniformity on stress field inversion results: the study of stress field in the eastern Himalayan Syntaxis and its surrounding area is an example[J]. Progress in Geophysics, 34(2): 479-488. (in Chinese with English abstract).

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

YANG Y H, SUN D S, QIN X H, et al., 2024. Error analysis and discussion of determining the maximum horizontal principal stress by hydraulic frac-

turing based on the compliance analysis of testing system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(S1): 3385-3396. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B, ZHANG J J, ZHONG D L, et al., 2011. Structural feature and its significance of the northernmost segment of the Tertiary Biluoxueshan-Chongshan shear zone, east of the eastern Himalayan Syntaxis[J]. Science China Earth Sciences, 54(7): 959-974.

ZHANG B, SUN Y, MA X M, et al., 2023. Analysis of in-situ stress field characteristics and tectonic stability in the Motuo key area of the eastern Himalayan syntaxis[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 388-401. (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 Y, XIAO P X, DING X L, et al., 2012. Study of deformation and failure characteristics for surrounding rocks of underground powerhouse caverns under high geostress condition and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(2): 228-244. (in Chinese with English abstract)

ZHAO X G, WANG J, QIN X H, et al., 2015. In-situ stress measurements and regional stress field assessment in the Xinjiang candidate area for China's HLW disposal[J]. Engineering Geology, 197: 42-56.

ZHONG N, GUO C B, HUANG X L, et al., 2021. Late Quaternary activity and paleoseismic records of the middle south section of the Jiali-Chayu fault[J]. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3642-3659. (in Chinese with English abstract)

ZHOU C, YIN J M, DONG Z H, et al., 2022. The partitioned inversion method of initial stress field of extra-long tunnel considering the direction of boundary load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(S1): 2725-2734. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, HEALY J H, 1984. Friction, faulting and in-situ stress[J]. Annals of Geophysics, 2: 689-698.

ZOBACK M D, HEALY J H, 1992. In situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass Scientific Research Borehole: implications for the mechanics of crustal faulting[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B4): 5039-5057.

ZOU R Z, 2018. Study on the of landslides by active tectonics in the north west of the eastern Himalayan syntaxis region of Tibetan plateau[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈平光，何骁慧，徐树峰，等，2023. 喜马拉雅东构造结地震精定位及其区域应力场研究[J]. 地球与行星物理论评(中英文)，54(6)：667-683.

陈群策，孙东生，崔建军，等，2019. 雪峰山深孔水压致裂地应力测量及其意义[J]. 地质力学学报，25(5)：853-865.

丰成君，陈群策，吴满路，等，2012. 水压致裂应力测量数据分析：对瞬时关闭压力 p_s 的常用判读方法讨论[J]. 岩土力学，33(7)：2149-2159.

丰成君，李滨，李惠，等，2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J]. 地质力学学报，28(6)：919-937.

何万超，任洋，杨存斌，等，2025. 西南地区深切河谷演化及谷坡形态对应力场的影响[J]. 人民长江，56(6)：107-114.

黄书岭，丁秀丽，廖成刚，等，2014. 深切河谷区水电站厂址初始应力场规律研究及对地下厂房布置的思考[J]. 岩石力学与工程学报，33(11)：2210-2224.

景锋，盛谦，张勇慧，等，2007. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，26(10)：2056-2062.

李滨，殷跃平，谭成轩，等，2022. 喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战[J]. 地质力学学报，28(6)：907-918.

李鸿儒，白玲，詹慧丽，2021. 嘉黎断裂带活动性研究进展[J]. 地球与行星物理论评，52(2)：182-193.

刘世杰，兰恒星，张宁，2022. 嘉黎断裂中段重大工程区地质力学分析[J]. 工程地质学报，30(6)：1947-1961.

孟文，郭长宝，张重远，等，2017. 青藏高原拉萨块体地应力测量及其意义[J]. 地球物理学报，60(6)：2159-2171.

秦向辉，陈群策，孟文，等，2018. 大地震前后实测地应力状态变化及其意义：以龙门山断裂带为例[J]. 地质力学学报，24(3)：309-320.

秦向辉，陈群策，孟文，等，2023. 喜马拉雅东构造结北缘通麦—波密段现今地应力场特征研究[J]. 地质学报，97(7)：2126-2140.

孙炜锋，黄火林，孙东生，等，2024. 雅鲁藏布江断裂带东段现今地应力测量与断层活动性分析[J]. 岩土力学，45(4)：1129-1141.

谭成轩，孙炜锋，孙叶，等，2006. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. 地质学报，80(10)：1627-1632.

唐方头，尤惠川，梁小华，等，2019. 西藏米林6.9级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球学报，40(1)：213-218.

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.

王艳华，崔效锋，胡幸平，等，2012. 基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究[J]. 地球物理学报，55(9)：3016-3027.

吴啸龙，向洋，汤伏全，2020. 基于GPS应变与震源机制解应力反演喜马拉雅构造带现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报，63(8)：2924-2939.

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.

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.

杨帆，盛书中，万永革，等，2019. 网格内不满足均匀性假设对应力场反演结果的影响：以喜马拉雅东构造结及其周边地区应力场研究为例[J]. 地球物理学进展，34(2)：479-488.

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.

杨跃辉，孙东生，秦向辉，等，2024. 基于测试系统柔度分析的水压

致裂法确定最大水平主应力误差分析与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 43(S1): 3385-3396.

张斌, 孙尧, 马秀敏, 等, 2023. 东构造结墨脱关键区域地应力场特征及其构造稳定性分析[J]. 地质力学学报, 29(3): 388-401.

张波, 张进江, 钟大赉, 等, 2011. 喜马拉雅东构造结东缘碧罗雪山—崇山剪切带北段构造变形特征及构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 41(7): 945-959.

张重远, 杜世回, 何满朝, 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.

张勇, 肖平西, 丁秀丽, 等, 2012. 高地应力条件下地下厂房洞室群围岩的变形破坏特征及对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 31(2): 228-244.

中华人民共和国住房和城乡建设部, 2017. 水力发电工程地质勘察规范: GB 50287-2016[S]. 北京: 中国计划出版社: 23-27.

钟宁, 郭长宝, 黄小龙, 等, 2021. 嘉黎-察隅断裂带中南段晚第四纪活动性及其古地震记录[J]. 地质学报, 95(12): 3642-3659.

周朝, 尹健民, 董志宏, 等, 2022. 考虑边界荷载作用方向的特长隧道初始应力场分区反演方法[J]. 岩石力学与工程学报, 41(S1): 2725-2734.

邹任洲, 2018. 喜马拉雅东构造结北西侧活动断裂对滑坡的控制作用研究[D]. 成都: 成都理工大学.