

引用格式: 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. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232908](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232908)

Citation: 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. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232908](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232908)

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

张 斌^{1,2,3}, 孙 尧^{1,2,3}, 马秀敏^{1,2,3,4}, 彭 华^{1,2,3}, 姜景捷^{1,2,3}, 毛佳睿^{1,2,3},
张文汇^{1,5}, 翟玉栋¹

ZHANG Bin^{1,2,3}, SUN Yao^{1,2,3}, MA Xiumin^{1,2,3,4}, PENG Hua^{1,2,3}, JIANG Jingjie^{1,2,3}, MAO Jiarui^{1,2,3},
ZHANG Wenhui^{1,5}, ZHAI Yudong¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部北京地壳应力应变野外科学观测研究站, 北京 100081;
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
4. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
5. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Observation and Research Station of Crustal Stress and Strain in Beijing, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*
5. *School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China*

Analysis of in-situ stress field characteristics and tectonic stability in the Motuo key area of the eastern Himalayan syntaxis

Abstract: In order to obtain the in-situ stress field characteristics and analyze tectonic stability in the Motuo key area of the eastern Himalayan syntaxis, the in-situ stress measurement of one in-situ stress hole and 11 test sections of the Xirang section of the Motuo fault zone were carried out by the hydraulic fracturing method. The results show that the maximum and minimum horizontal principal stress values (S_H , S_h) in the test section of 61.43–121.34 m are 3.05–14.50 MPa and 2.16–9.87 MPa, respectively, and the vertical principal stress values (S_v) are 1.63–3.31 MPa, namely, $S_H > S_h > S_v$. The in-situ stress field at the measuring point is dominated by horizontal compression, and all of them belong to the in-situ stress state of reverse fault. The principal stress values gradually increase with the increase of depth, and the dominant direction of the maximum principal stress is NEE. In the whole range of in-situ stress depth, the lateral pressure coefficients (K_{av}) are 1.39–4.38, the maximum horizontal stress coefficients (K_{Hv}) are greater than 1, and the ratio increases with the increase of depth. The regional stress field of this key area is dominated by horizontal stress and it is highly directional. The horizontal stress coefficients (K_{Hh}) of all test sections are 1.23–1.66, which are similar to the calculation results of in-situ stress characteristic parameters in Linzhi–Tongmai section. The horizontal tectonic stress of the shallow level at 98 m is relatively small, and the stress accumulation level is low. The friction coefficient required to maintain fault stability is smaller than

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20230249, DD20221644, DD20230014); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务项目 (DZLXJK202106)

This research is financially supported by the China Geological Survey Project (Grants DD20230249, DD20221644 and DD20230014) and the Basic Research Fund of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences (Grant DZLXS202106).

第一作者: 张斌 (1989—), 男, 博士, 副研究员, 从事工程地震学、地应力测量和监测等方面研究。E-mail: vincent_zhang0322@163.com

通讯作者: 孙尧 (1983—), 男, 博士, 助理研究员, 从事地震学、地应力测量和监测等方面研究。E-mail: 980483939@qq.com

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-18; 责任编辑: 王婧

the critical friction coefficient of actual fault, and the tectonic environment is relatively stable. When the depth exceeds 98 m, the friction coefficient required to maintain fault stability is close to the critical friction coefficient value of the actual fault due to the dominant role of horizontal tectonic stress, and there is a small risk of fault instability slip. The superposition of the Coulomb stress change in the sinistral strike-slip direction and the thrust direction caused by the strong regional earthquakes on the fault plane of the Motuo fault zone in the study area are all negative numbers, which inhibits fault slip and does not increase the risk of fault activity in the study area.

Keywords: eastern Himalayan syntaxis; hydraulic fracturing; in-situ stress measurements; in-situ stress field characteristics; tectonic stability

摘 要: 为获取东构造结关键构造部位地应力特征、分析其构造稳定性, 采用水压致裂法开展了墨脱断裂带西让段1个地应力孔、11个测试段的原位地应力测量工作。结果表明: 61.43~121.34 m 测试段最大、最小水平主应力值 (S_H 、 S_h) 分别为 3.05~14.50 MPa 和 2.16~9.87 MPa, 垂向主应力值 (S_v) 为 1.63~3.31 MPa, 即 $S_H > S_h > S_v$; 测点处应力场以水平挤压作用为主, 均处于逆断层应力状态, 且其主应力值随深度增加而逐渐增大, 测点的最大水平主应力优势方位为北东东向; 在整个地应力测量深度范围内, 侧压系数值 (K_{av}) 为 1.39~4.38, 最大水平应力系数值 (K_{Hv}) 均大于 1, 且比值随深度的增加而增大, 该关键部位区域应力场以水平应力为主导, 方向性较强, 所有测试段水平应力系数值 (K_{th}) 为 1.23~1.66, 与林芝—通麦段地应力特征参数计算结果基本相似; 测点位置 98 m 以浅地层水平构造应力作用程度较小, 应力积累水平较低, 保持断层稳定所需的摩擦系数值小于实际断层的临界摩擦系数值, 构造环境相对稳定, 超过 98 m 深度地层由于水平构造应力起主要作用, 保持断层稳定所需的摩擦系数值接近于实际断层的临界摩擦系数值, 存在小概率发生断层失稳滑动的风险; 区域强震在墨脱断裂带断层面上造成的左旋走滑方向上及逆冲方向上的库仑应力变化值的叠加量均为负值, 抑制了断层的滑动, 未能增加墨脱关键区域断层活动的危险性。

关键词: 喜马拉雅东构造结; 水压致裂; 地应力测量; 构造应力场特征; 构造稳定性

中图分类号: P315.72+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0388-14

DOI: 10.1090/j.issn.1006-6616.20232908

0 引言

喜马拉雅东构造结位于喜马拉雅造山带的东端, 其构造格架、地貌与水系均有一个近铅直的转折。该地区是喜马拉雅造山带地壳大规模缩短和构造运动方向发生转变的轴心地区, 是喜马拉雅造山带岩石圈变形最为强烈的地区之一, 区内地形变化剧烈、地质构造复杂、地震活动频繁、地质灾害频发, 是开展陆-陆碰撞过程中岩石圈变形模式和构造演化规律等地球动力学研究的天然实验场所 (黄臣宇等, 2021; 王凯悦等, 2021)。该地区分布着诸多构造复杂的断裂带, 且多为地震构造, 主要以北北东—北东向和北西西—北西向 2 组断裂为主, 如北西西—北西向的班公错—怒江断裂、仲沙断裂、嘉黎断裂、迫龙—旁辛断裂、阿帕龙断裂等; 北北东—北东向的东久—米林断裂、雅鲁藏布江断裂、拉孜—扎日—拿格断裂、墨脱断裂带、喜马拉雅南麓主边界断裂等。中国历史和现代地震目录表明, 喜马拉雅东构造结地区发生过大量地震和强

震。地震活动具有空间分布不均匀性, 大震和强震主要发生在隆起区差异运动强烈地带或地段。历史上发生 $M_s \geq 4.7$ 地震 100 余次, 其中破坏性地震 27 次 ($M_s > 6.0$), 最大地震为 1950 年察隅 8.6 级地震。

构造应力变化和聚集是诱发地震的重要因素之一, 构造应力场在一定程度上能反映板块构造运动特征。为了获取东构造结地区构造应力场特征, 许多学者开展了构造应力场理论和实测数据研究。许忠淮 (2001) 根据震源机制解计算了东亚地区的现今构造应力场, 认为在喜马拉雅东构造结区域主压应力场以北北东向或北东向为主。徐纪人和赵志新 (2006) 通过震源机制解分析出东构造结区域地应力优势方位为北东 20° —北东 40° , 大多垂直于喜马拉雅山弧。Wan (2010) 基于中国地壳应力数据库和哈佛大学矩心矩张量目录, 反演了中国现代构造应力场, 结果显示东构造结地区最大主应力为水平应力, 从西到东主应力方向从北北东向到北东东向转变。Chang et al. (2015) 以喜马拉雅东构造结及周边地区 GPS 和第四纪断裂滑动速率数据为基础,

利用曲线网格模型联合模拟出研究区地表连续应变率场,结果显示该区域挤压应力场主要为北北东—北东方向。黄艺丹等(2020)从造山机制出发,结合GIS技术和相关地学理论,对喜马拉雅3个地块进行了对比分析,认为喜马拉雅东构造结地区水平应力相对较大,最大主应力方向近北东—南西方向。丰成君等(2022)基于震源机制解数据,采用应力张量反演方法,揭示南迦巴瓦地区现今构造应力场最大主应力方向为北东—北北东向。综上所述,东构造结地区构造应力场以水平应力为主,最大主应力方向为北东—北北东向。

近年来,依托西部某铁路建设和重大水电工程规划,部分学者在喜马拉雅东构造结北部区域开展实测地应力相关研究工作。王成虎等(2019)在波密西至林芝段实测地应力数据表明,林芝附近水平最大主应力优势方向为北北东—北北西向,东构造结区域水平最大主应力方向由北北西向北西西向转化,并从构造形迹分析波密西—林芝段水平最大主应力优势方向为南北—北东向。严健等(2019)对拉(萨)—林(芝)铁路的桑珠岭隧道和巴玉隧道进行了现场地应力试验及应力场三维反演,结果表明最大水平主应力方向为NW 20°—NW 30°,2个隧道轴线最大水平主应力和垂向主应力分别为32.98 MPa、35.80 MPa和22.97 MPa、45.77 MPa。郭长宝等(2021)获取林芝地区500 m深孔地应力实测数据,揭示了以水平构造应力为主导的逆断型应力场特征,且最大水平主应力方向近南北—北北东向。黄艺丹等(2021)对拉林铁路13个地应力测量数据分析表明,地应力结构以逆断型和走滑型为主,最大主应力方向分布于NW 19°—NE 30°之间。张重远等(2022)采用水压致裂法在东构造结西侧某铁路林芝—通麦段进行了20个钻孔原位地应力测量,结果表明实测主应力随埋深的增大而增加,但整体应力积累水平相对偏低,500 m以深发育走滑型应力,水平主应力占主导,实测最大水平主应力(S_H)平均方位角为NE 61°—NE 72°,构造应力方向受区域构造运动方式控制。综上,东构造结北缘地应力测量与应力场反演结果表明,以水平应力为主,多数处于逆断或走滑应力状态,其最大水平主应力方位由西向东具有一定的转换,即北西向北东东转向。

尽管已有研究在喜马拉雅东构造地区获得了一些地应力实测数据,但主要集中于某铁路波密—林芝段和拉林铁路工程区,对于新构造活动最为强烈的雅鲁藏布江下游墨脱断裂带地应力实测及其

应力场精细化研究几乎为空白。随着国家“十四五”在该地区规划部署重要交通廊道以及清洁能源基地建设,亟需开展该地区地应力测量工作,获取研究区关键部位实测地应力状态,补充完善研究区构造应力场特征,为重大工程规划设计、建设施工提供地应力参数。

1 研究区概况

墨脱地区位于雅鲁藏布江中下游,属东喜马拉雅构造结的一部分。雅鲁藏布江板块结合带从中部弯曲而过,沿着这条构造带,在悠久的地质演化过程中发生过新特提斯洋(雅鲁藏布江洋)的生成、俯冲、闭合和印度板块—欧亚板块的陆—陆碰撞以及碰撞后陆内汇聚阶段的逆冲、伸展、隆升、走滑、变质、熔融等地质作用,是喜马拉雅山造山带中最引人瞩目的地区之一,也是目前青藏高原上隆升和剥蚀速率最快的地区。因此,以雅鲁藏布江结合带(大致沿雅鲁藏布江及支流桑曲一线)为界,区域内的地壳分为东、西两部分,东部属冈底斯陆块,西部为喜马拉雅陆块。而区域最南部以主边界断裂为界,以南属印度陆块。研究区活动断裂分布众多,全新世活动断裂如墨脱断裂、巴登则断裂、月尔东断裂仍在强烈活动,地震活动频繁。

研究区地震活动频繁、活动断裂分布众多,尤其是全新世活动断裂如墨脱断裂、巴登则断裂、月尔东断裂仍在强烈活动。为了获取墨脱地区关键构造部位地应力分布特征,补充完善研究区应力场资料,根据资料收集、遥感解译、地表断裂调查、地球物理探测等技术手段,确定墨脱地区关键构造部位为巴登则断裂和月尔东断裂的交汇地带(图1),并在该构造部位完成150 m深的墨脱地应力孔。根据地应力孔钻探编录情况,地层分为4层。0~16.00 m为河流沉积,主要为砂砾石、卵石、砾、粗砂等;16.00~24.00 m为冰碛物;24.00~32.00 m为漂砾;32.00~150.00 m均为片麻岩,主要由石英、斜长石和黑云母等组成,条带较多,裂隙较发育,倾角为10°~35°。

2 地应力测量情况

目前,地应力测量方法有很多,水压致裂法由于测量设备操作简单、数据处理方便,被认为是获取深部地应力信息最可靠的原位测量方法之一,也

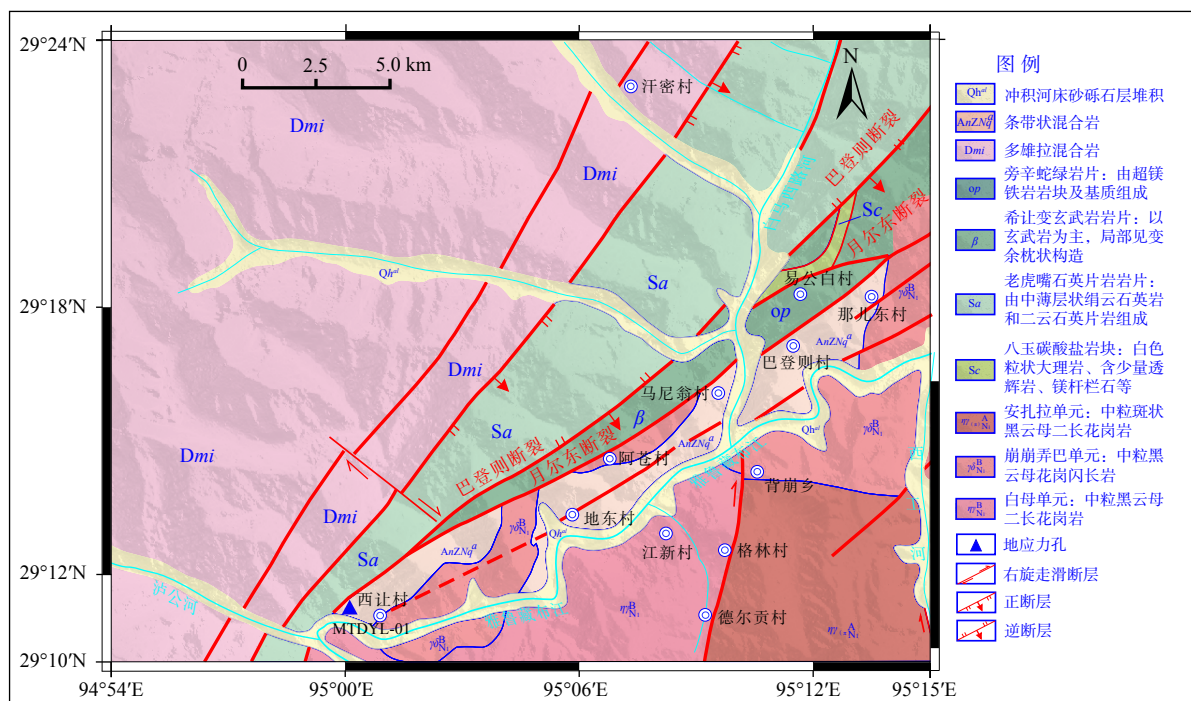


图1 墨脱地应力孔位置的构造与岩性

Fig. 1 Structure and lithology surrounding the borehole for in-situ stress measurement in Motuo

是国际岩石力学学会建议的地应力测量方法 (Haimson and Cornet, 2003; 王成虎等, 2020; 张浩等, 2020)。该方法是以弹性力学为基础, 利用一对可膨胀的封隔器在选定的测段深度封隔一段钻孔, 然后通过泵入流体对试验段 (常称压裂段) 增压, 同时利用数据采集器记录压力随时间的变化。对实测记录曲线进行分析, 得到压力特征参数, 再根据相应的理论计算公式, 可得到测试段处的最大、最小水平主应力值、垂向主应力值和岩石抗拉强度等岩石力学参数。文章在墨脱县背崩乡西让村施工了1个150 m深地应力孔 (图1), 该孔位于片麻岩地层上, 钻孔中岩石较为完整, 为开展水压致裂原位地应力测量提供了良好的地质条件。严格遵循ISRM建议的测量流程 (Lee and Haimson, 1989), 在该地应力孔完成了11段压裂和2段印模。从压裂曲线来看, 11个测试段大多数压裂特征明显, 其压力-时间记录较为标准, 破裂压力峰值清晰, 各个重张循环可重复性强, 具有良好的一致性 (图2)。因此, 该测点的地应力测量值较为可信地反映出各测试段的应力状态。

3 地应力测量结果及其特征分析

3.1 地应力测量结果

通过整理原位地应力测试资料及数据计算分

析, 确定了各个测试段破裂压力 (P_b)、重张压力 (P_r)、瞬时闭合压力 (P_s)、孔隙压力 (P_0) 及抗拉强度 (T)。根据获得的力学参数及相关力学理论公式, 计算出各测段最大水平主压力 (S_H)、最小水平主压力 (S_h) 及垂向主应力 (S_v) 等主应力值 (表1)。其中, 垂向主应力值是根据水压致裂理论, 由上覆岩层厚度计算得到, 计算中土层和岩石容重综合取 2.7 g/cm^3 。

利用该孔11个有效测试段最大水平主应力、最小水平主应力、垂向主应力的散点图 (图3), 将主应力测值进行线性回归, 得出该测孔 S_H 、 S_h 和 S_v 随深度变化规律 (式1—式3)。

$$S_H = 0.1612H - 7.6017 \quad \text{相关系数: } 0.8241 \quad (1)$$

$$S_h = 0.0871H - 3.2129 \quad \text{相关系数: } 0.7539 \quad (2)$$

$$S_v = 0.0283H - 0.1307 \quad \text{相关系数: } 0.9999 \quad (3)$$

其中, H —钻孔深度 (向下为正), 单位为 m; 主应力单位为 MPa。

由表1和图3可知, 墨脱地应力孔61.43~121.34 m深度范围内, 最大水平主应力值为3.05~14.50 MPa, 最小水平主应力值为2.16~9.87 MPa, 垂向主应力值为1.63~3.31 MPa, 即 $S_H > S_h > S_v$, 整个测试段深度范围内均处于逆断层地应力状态 (RF), 表明在该深度范围内实测地应力以水平挤压作用为主, 且该孔各

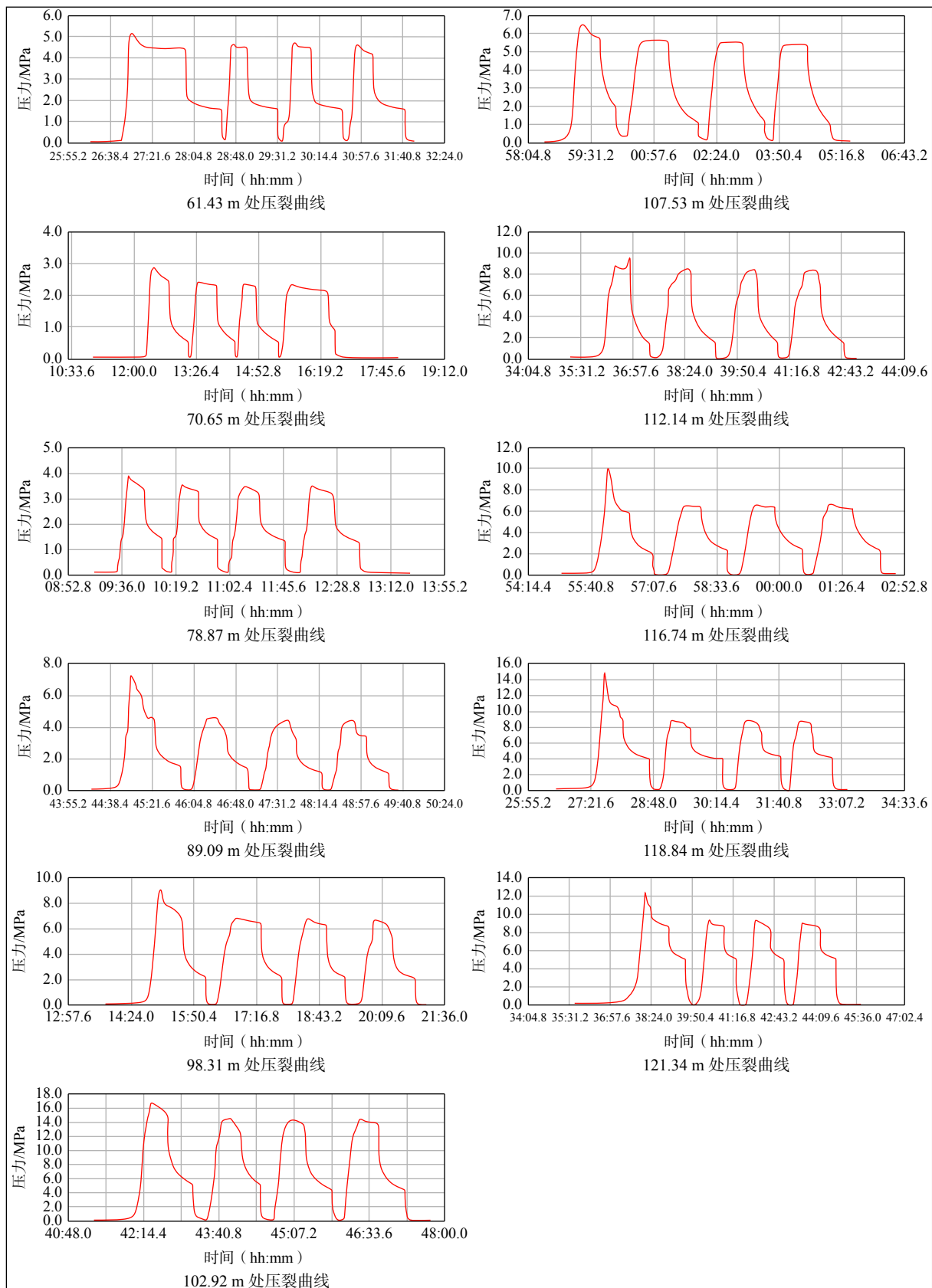


图2 墨脱地应力孔各测段水压致裂时间-压力曲线特征

Fig. 2 Characteristics of the time-pressure curves by hydraulic fracturing method in each measuring section of the Motuo in-situ stress hole

表 1 水压致裂地应力测量结果

Table 1 Results of hydraulic fracturing in-situ stress measurement

测段深度/m	破裂压力 P_b /MPa	重张压力 P_r /MPa	瞬时关泵压力 P_d /MPa	抗拉强度 T /MPa	孔隙水压力 P_0 /MPa	最大水平主应力 S_H /MPa	最小水平主应力 S_h /MPa	垂向主应力 S_v /MPa	最大主应力方向
61.43	5.03	4.48	2.22	0.55	0.60	4.58	3.42	1.63	
70.65	2.73	2.45	1.47	0.68	0.69	3.05	2.16	1.87	
79.87	3.85	3.43	2.11	0.42	0.78	3.68	2.89	2.12	
89.09	7.48	4.61	2.45	3.97	0.88	3.72	3.03	2.38	
98.31	8.64	7.52	3.86	3.62	0.98	7.54	4.84	2.65	
102.92	16.27	14.25	8.84	3.22	1.03	14.50	9.87	2.78	
107.53	6.55	5.41	2.39	1.74	1.08	8.84	5.47	2.91	NE79.6°
112.14	8.91	6.35	4.09	2.56	1.13	10.06	6.22	3.04	
116.74	9.81	6.16	4.13	3.65	1.18	10.42	6.31	3.18	
118.84	13.46	6.54	6.49	6.92	1.20	11.13	6.69	3.24	
121.34	12.07	8.46	6.53	4.01	1.23	12.74	7.75	3.31	NE70.5°

注：地应力测量孔静水位为9.60 m

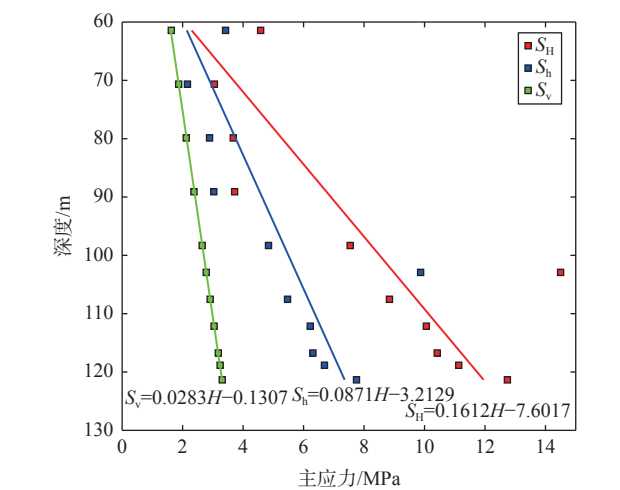
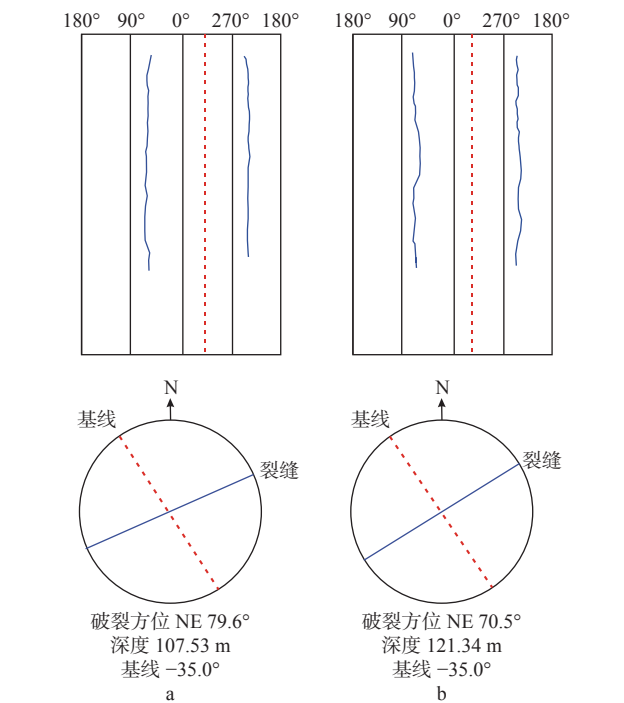


图 3 主应力随深度变化特征
Fig. 3 Characteristics of principal stress variation with depth

测试段主应力值有逐渐增大趋势。而 11 个测试段中 70.65 m 处测得的最大主应力最小，102.92 m 处测得的最大主应力最大，这可能是由局部应力松弛或集中所致。

3.2 最大水平主应力方向确定

利用印模定向法，确定测试段最大水平主应力方向。按照水压致裂应力测量的基本原理，水压致裂产生的破裂面走向就是最大水平主应力的方向。为确定该孔具有代表性的测段主应力方向，通过分析压裂测试曲线，选取 107.53 m、121.34 m 测试段完成了印模定向。107.53 m 测试段的定向结果表明，最大水平主应力方位角为 NE 79.6°(图 4a)。121.34 m 测段的定向结果表明，最大水平主应力方



a—107.53 m 压裂段印模定向；b—121.34 m 压裂段印模定向

图 4 墨脱地应力孔不同压裂段印模定向
Fig. 4 Impression orientation of different fractured sections in the Motuo in-situ stress hole

(a) Impression orientation at the 107.53-meter fracture section; (b) Impression orientation at the 121.34-meter fracture section

位角为 NE 70.5°(图 4b)，即最大水平主应力优势方向为北东东向。

3.3 测区地应力特征分析

一般情况下，不仅采用上述参数分析地应力特

征,通常还会采用侧压力系数 K_{av} 、最大水平应力系数 K_{Hv} 、水平应力系数 K_{Hh} (式4—式6),如表2所示。

$$K_{av} = (S_H + S_h) / 2S_v \quad (4)$$

$$K_{Hv} = S_H / S_v \quad (5)$$

$$K_{Hh} = S_H / S_h \quad (6)$$

其中, K_{Hv} 反映水平向应力作用相对于自重作用的强度, K_{Hh} 反映水平向差应力作用强度。从表2可以看出,在61.43~121.34 m测试段, K_{av} 值在1.39~4.38之间变化,显示研究区应力场以水平应力为主导;测孔内所有测段 K_{Hv} 值均大于1,且比值随深度增加逐渐增大,在98 m深度以下均大于3,反映出研究区原岩应力状态以水平应力为主导,且在98 m深度以下水平构造应力起主要作用。测孔内所有测段的 K_{Hh} 值在1.23~1.66之间变化,未出现较高的 K_{Hh} 值,与张重远等(2022)获得的林芝—通麦段结果基本一致。 K_{av} 、 K_{Hv} 、 K_{Hh} 值显示测试钻孔在地应力作用下,岩体破坏或节理面错动倾向于逆冲或走滑。在同一区域应力背景下,地应力大小明显受岩石完整程度、断裂构造的影响而差异较大。同一孔内,较完整孔段的地应力值较高;节理、裂隙发育、岩石破碎孔段的地应力值偏低。

表2 墨脱地应力孔水压致裂主应力间的变化规律

Table 2 Variation law of hydraulic fracturing principal stress in the Motuo in-situ stress hole

H/m	K_{av}	K_{Hh}	K_{Hv}
61.43	2.46	1.34	2.82
70.65	1.39	1.41	1.63
79.87	1.55	1.27	1.73
89.09	1.42	1.23	1.57
98.31	2.34	1.56	2.85
102.92	4.38	1.47	5.21
107.53	2.46	1.62	3.04
112.14	2.68	1.62	3.31
116.74	2.63	1.65	3.28
118.84	2.75	1.66	3.44
121.34	3.10	1.64	3.85

4 构造稳定性分析

地应力钻孔位于墨脱地区关键构造部位,即墨脱断裂带的分支断裂巴登则断裂和月尔东断裂的

交汇地带。墨脱断裂带是南迦巴瓦地块东南边界,总体呈北东走向,倾向南东,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$,全长约180 km。该断裂由多条次级断层左行斜列组成,第四纪活动性较强,为以左旋走滑运动为主的全新世活动断裂(谢超等,2016)。

4.1 地应力与构造稳定性

大量研究成果表明,一个地区的断裂活动特征和地震地质情况与该地区的地应力状态具有非常重要的关系(Lin et al., 2011, 2013; 秦向辉等, 2014; 丰成君等, 2017; 陈群策等, 2019; 王斌等, 2020)。因此,利用东构造结墨脱关键构造部位的实测地应力数据,探讨该区域地应力状态与构造稳定性的关系。

根据库伦摩擦滑动准则,假设断裂面内聚力为零,当断裂面上的剪应力与有效正应力满足式(7)时,该断裂将沿某个有利的方位出现滑动失稳(Stock et al., 1985; Zoback and Townend, 2001; Zoback, 2007; Jaeger et al., 2009)。

$$\tau = \mu(S_n - P_0) \quad (7)$$

式中, τ —剪应力, μ —断裂面的摩擦系数, S_n —断裂面上的正应力, P_0 —孔隙压力。

式(7)还可以用有效主应力来表示,对于断层活动性质为走滑的墨脱断裂带,使断层发生走滑错动的最大水平主应力和最小水平主应力分别为 S_H 和 S_h (式(8); McGarr et al., 1982; Zoback and Hickman, 1982; Evans and Engelder, 1989; Zoback and Healy, 1992; Jaeger et al., 2009)。

$$\frac{S_H - P_0}{S_h - P_0} = \left(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu \right)^2 \quad (8)$$

当式(8)左边的比值大于右边比值时,该断裂可能发生滑动,反之则断裂稳定,换言之, S_H 与 S_h 比值即 K_{Hh} 值越大,使断层保持稳定所需的摩擦系数 μ 值就越大。因此,评价断裂是否稳定与断裂面上实际的摩擦系数 μ 值有非常重要的关系。通过式(8)分别计算各个测点在水平主应力作用下可能引起断裂滑动的摩擦系数临界值,研判断层摩擦系数在取值区间为 $[0.2, 1.0]$ 时,绘制出不同的实际摩擦系数值下发生断层失稳滑动的可能性(图5)。

由图5可知,所有测试段处发生断层失稳滑动的临界摩擦系数在 $\mu=0.2$ 和 $\mu=0.3$ 之间,即研究区断层面的实际摩擦系数 $\mu < 0.2$ 时,断层发生滑动的可能性较大, $\mu > 0.3$ 时,断层相对稳定。丰成君等(2022)通过反演震源机制解,给出墨脱—昌都地区断层临

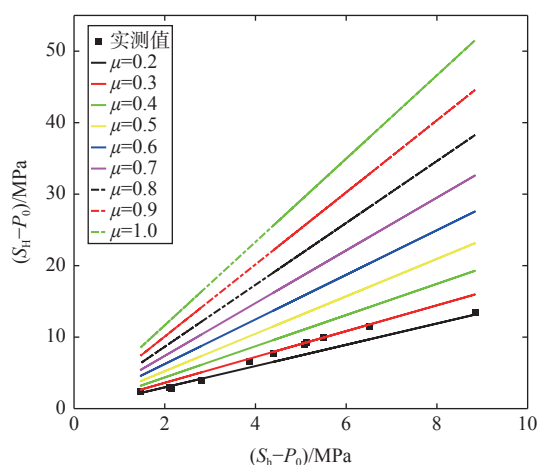


图5 测点地应力数据的库伦破裂准则计算结果与实测值的对比

Fig. 5 Comparison between the calculated results of the Coulomb fracture criterion and the measured values based on ground stress data at the measuring points

界摩擦系数 μ 值为0.29,大体上大于或等于测试钻孔各个测点在地应力作用下断层保持稳定所需摩擦系数临界值。通过对比可得,研究区内距离地应力孔孔口98 m以浅地层的地应力积累总体水平较低,未达到断层失稳的极限状态;超过98 m深度地层由于水平构造应力作用增大,存在小概率发生断层失稳滑动的风险。这里需要说明的是,上述分析并未完全考虑区域邻近断裂产状和理想滑动角之间的差别,而是假定断裂沿着式(8)确定的某个有利方位失稳滑动;此外,实测地应力数值仅为121.34 m以浅的测试结果,深部的地应力特征特别是 K_{Hv} 、 K_{Hh} 值可能与浅部的实测情况有所不同,即断层保持稳定所需的摩擦系数临界值与浅部存在差异。尽管如此,上述局部地应力数据的断裂稳定性分析,对于墨脱断裂带构造稳定性评价仍具有一定的参考意义。

综合上述,研究区墨脱地应力孔地应力测量与断裂稳定性分析结果,可得到以下初步认识:研究区地层在98 m以浅水平构造应力作用程度较小,应力积累水平较低,保持断层稳定所需的摩擦系数值小于实际断层的临界摩擦系数值,构造环境相对稳定;超过98 m深度地层受水平构造应力主要作用,保持断层稳定所需的摩擦系数值趋近于实际断层的临界摩擦系数值,存在小概率发生断层失稳滑动的风险。

4.2 区域地震活动对构造稳定性的影响

构造应力变化和聚集是诱发地震的重要因素

之一,一定程度上能反映板块构造运动特征。根据IRIS数据库下载的地震目录,1970年以来地应力孔所在墨脱关键构造部位半径40 km范围内发生了33个 $M>3.0$ 地震。其中, $M 5.0\sim 6.0$ 级地震4个, $M 4.0\sim 5.0$ 级地震12个, $M 3.0\sim 4.0$ 级地震17个(图6)。IRIS地震目录显示,研究区内强震($M>5.0$)发生频度较低,多为2~4级地震,且震源深度较浅,均在30 km以内,特别是地应力孔位置(图6黑色三角),近年无强震发生。

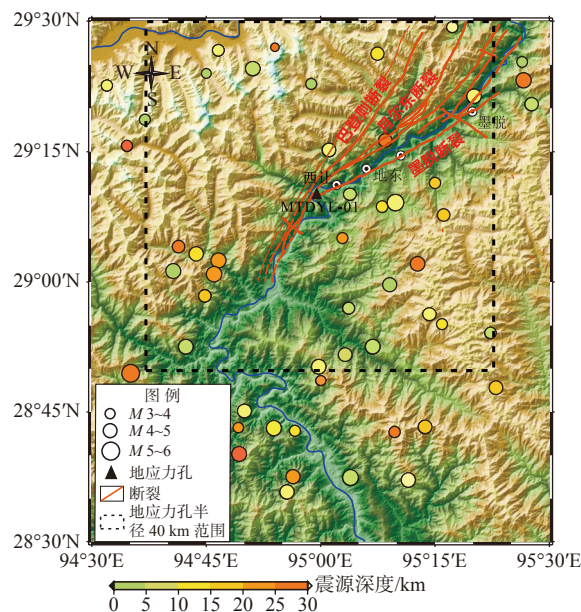


图6 墨脱关键区域活动断裂和1970—2013年 $M>3$ 地震空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of active faults and earthquakes with $M>3$ from 1970—2013 in the key areas of Motuo

地震所释放的应力一部分会转移到相邻地区,造成这些地区的应力变化并最终触发断层滑动(Harris and Simpson, 1992; King et al., 1994)。由于研究区周边多次发生5级以上强震,故需要计算这些强震引起的应力场变化,进而研究区域地震活动对研究区构造稳定性的影响。

根据库伦破裂准则,当破裂发生时,破裂面上的库伦应力变化量 ΔCFS (Harris, 1998)为:

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n \quad (9)$$

式中, μ' —视摩擦系数,其包括了孔隙流体和断层面的介质特性; $\Delta\tau$ —剪应力变化量; $\Delta\sigma_n$ —正应力变化量。

这里,文章使用Toda等开发的Coulomb 3.3软件(Toda et al., 2011)来计算近年来研究区附近强震

所造成的地应力孔位置沿墨脱断裂带的库仑应力变化量,进而估算墨脱断裂带的构造稳定性。研究区附近区域发生9次地震的震源参数取自 GlobalCMT (表3),地震的位错量亦可根据震级、破裂面的走向、倾角和滑动角由 Coulomb 3.3 计算得出,并分解为滑动角 0°方向的位错量(走滑)及滑动角 90°方向的位错量(逆冲)。已有研究没有给出地震所造成

的破裂面长度和宽度,文章通过 Wells 等人经验公式 (Wells and Coppersmith, 1994)由矩震级计算得出。参考已有经验(Stein et al. 1992; King et al. 1994),将 μ' 设为 0.35;目标断层则根据已有地质调查、物探等结果,拟定断层走向为 NE 60°,断层倾角 65°,倾向南东,断层活动性质为左旋走滑(董汉文, 2018)。

表 3 研究区的附近区域强震的震源机制
Table 3 Focal mechanism of the strong earthquakes in the vicinity of the study area

日期	经度	纬度	深度	震级	走向1	倾角1	滑动角1	走向2	倾角2	滑动角2	破裂面长度	位错量/走滑	位错量/逆冲
1985-08-01	95.53°E	29.24°N	40.0 km	M_w 5.7	176°	15°	153°	292°	83°	76°	6.49 km	0.102 m	0.408 m
1988-01-25	94.87°E	29.80°N	33.0 km	M_w 5.2	37°	69°	159°	135°	71°	23°	3.84 km	0.164 m	0.063 m
2003-08-18	95.91°E	29.26°N	33.0 km	M_w 5.5	65°	77°	-6°	156°	84°	-167°	6.10 km	0.237 m	0.025 m
2004-09-27	95.70°E	29.78°N	31.1 km	M_w 4.9	126°	79°	-176°	35°	86°	-11°	2.41 km	0.129 m	0.009 m
2005-06-01	94.72°E	28.81°N	19.0 km	M_w 5.8	209°	6°	26°	93°	87°	95°	7.57 km	0.040 m	0.451 m
2013-04-16	95.12°E	28.67°N	39.6 km	M_w 4.9	300°	39°	90°	120°	51°	90°	1.88 km	0.000 m	0.236 m
2017-11-17	95.14°E	29.69°N	12.0 km	M_w 6.5	119°	24°	72°	318°	67°	98°	22.34 km	0.105 m	0.746 m
2019-04-23	94.67°E	28.35°N	16.1 km	M_w 6.1	208°	9°	21°	97°	87°	99°	12.04 km	0.088 m	0.557 m
2022-11-10	94.41°E	28.38°N	15.0 km	M_w 5.6	226°	10°	43°	93°	83°	97°	5.56 km	0.048 m	0.389 m

利用地应力测量结果计算了研究区墨脱断裂带断层面上正应力 σ 及剪应力值(表4)。其中,剪应力分解为滑动角 0°的应力分量 τ 及滑动角 90°方向的应力分量 τ' ,其数值由三角函数推导出公式(10)、公式(11)和公式(12)计算得到。其中, S_H 为最大水平主应力, S_h 为最小水平主应力, S_v 为垂向

应力, α 为最大主应力方位角,取平均值 75°, β 为断层走向方位角,取 60°, θ 为断层倾角,取 65°。

$$\sigma = [S_H \sin^2(\alpha - \beta) + S_h \cos^2(\alpha - \beta)] \sin^2 \theta + S_v \cos^2 \theta \quad (10)$$

$$\tau = S_H \cos^2(\alpha - \beta) - S_h \sin^2(\alpha - \beta) \quad (11)$$

$$\tau' = S_v \sin^2 \theta - [S_H \sin^2(\alpha - \beta) + S_h \cos^2(\alpha - \beta)] \cos^2 \theta \quad (12)$$

使用 Coulomb 3.3 分别计算 0.10 km(地应力测量深度)、1.00 km、5.00 km、10.00 km 深度处断层面左旋走滑方向上的库仑应力变化。由于地应力实测显示研究区垂向应力为最小主应力,在较大的水平构造应力环境下断层面存在逆冲滑动的可能性,则同时计算了各个深度断层面逆冲方向上的库仑应力变化(表5)。由表5可知,0.10~10.00 km 处库伦应力变化量随深度的增加逐渐减小。

表 4 通过地应力实测结果推算研究区墨脱断裂带断面上的应力值

Table 4 Estimation of the stress values on the fault plane of the Motuo fault zone in the study area based on the measured results of in-situ stress

深度/ m	最大水平主 应力 S_H /MPa	最小水平主 应力 S_h /MPa	垂向主应力 S_v /MPa	正应力 σ /MPa	剪应力 τ /MPa	剪应力 τ' /MPa
61.43	4.58	3.42	1.63	3.16	4.04	0.71
70.65	3.05	2.16	1.87	2.16	2.70	1.14
79.87	3.68	2.89	2.12	2.80	3.24	1.22
89.09	3.72	3.03	2.38	2.95	3.27	1.41
98.31	7.54	4.84	2.65	4.60	6.71	1.28
102.92	14.50	9.87	2.78	8.86	12.87	0.47
107.53	8.84	5.47	2.91	5.20	7.88	1.37
112.14	10.06	6.22	3.04	5.86	8.97	1.34
116.74	10.42	6.31	3.18	5.98	9.30	1.44
118.84	11.13	6.69	3.24	6.32	9.94	1.41
121.34	12.74	7.75	3.31	7.23	11.37	1.27

表 5 研究区断层面在区域强震影响下库仑应力变化
Table 5 Variation of Coulomb stress on the fault planes in the study area under the influence of regional strong earthquakes

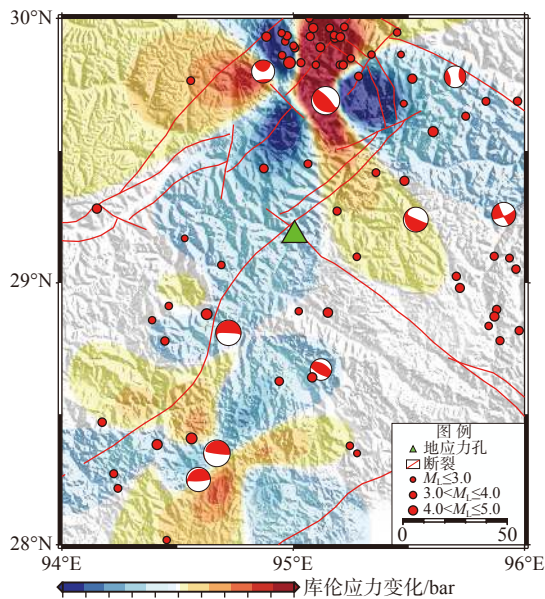
深度/km	正应力 变化/bar	剪应力 变化/bar (左旋走滑)	剪应力 变化/bar (逆冲)	库仑应力 变化/bar (左旋走滑)	库仑应力 变化/bar (逆冲)
0.10	-0.013	-0.004	0.003	-0.0086	-0.0016
1.00	-0.012	-0.003	0.003	-0.0072	-0.0012
5.00	-0.010	0.001	0.002	-0.0025	-0.0015
10.00	-0.008	0.002	0.002	-0.0008	-0.0008

通过库仑应力变化量计算可以得出, 区域强震在研究区墨脱断裂带断层面上造成的左旋走滑方向及逆冲方向上库仑应力变化值的叠加量均为负值, 可抑制断层的滑动, 即区域内强震目前并未增加研究区及附近区域断层活动的危险性(图7)。

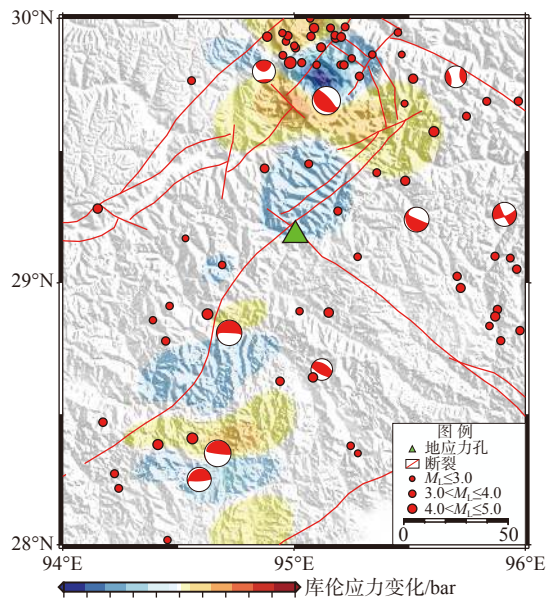
5 讨论

此次地应力钻孔位置位于雅鲁藏布江右岸高阶河流阶地上, 距离雅鲁藏布江约 150 m, 落差约 90 m。因雅鲁藏布江河谷下切, 原本自上而下连续分布的水平构造应力被河谷截断, 导致河底以上的测点受

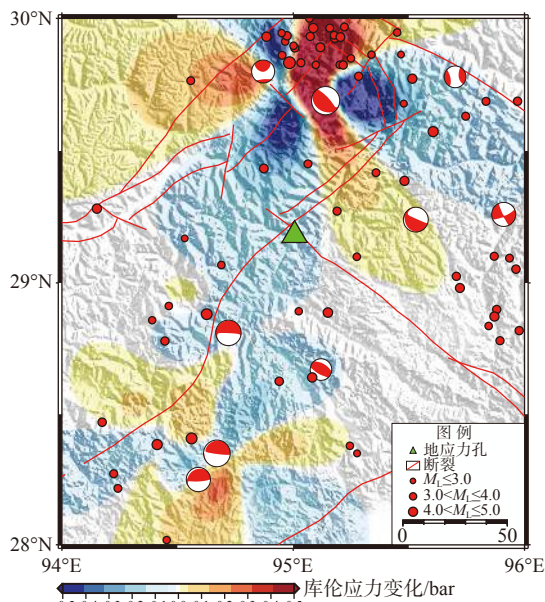
水平构造应力影响较小, 河底以下水平构造应力开始起主要作用, 并在河底处出现水平应力相对集中的构造应力面, 该应力面大致距离孔口深度 100 m 左右, 即测点 6 所在位置。推测此状况与地下巷道、硐室地应力测量时顶板或底板位置处出现高水平应力的原因类似。这对于该地区重大水利工程高压、超高压输水管道的安全稳定性至关重要, 合理利用高应力环境可以极大地减小高压输水管道的支护成本以及产生破坏的可能性。文章实测地应力数值仅为 121.34 MPa 以浅的测试结果, 深部的地应力特征特别是 K_{Hv} 、 K_{Hh} 值可能与浅部的实测情况



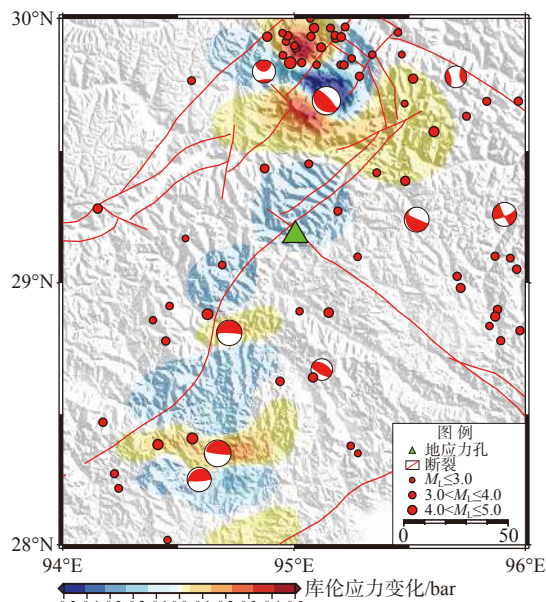
(a) 0.10 km 深度左旋走滑方向库仑应力变化



(b) 0.10 km 深度逆冲方向库仑应力变化



(c) 1.00 km 深度左旋走滑方向库仑应力变化



(d) 1.00 km 深度逆冲方向库仑应力变化

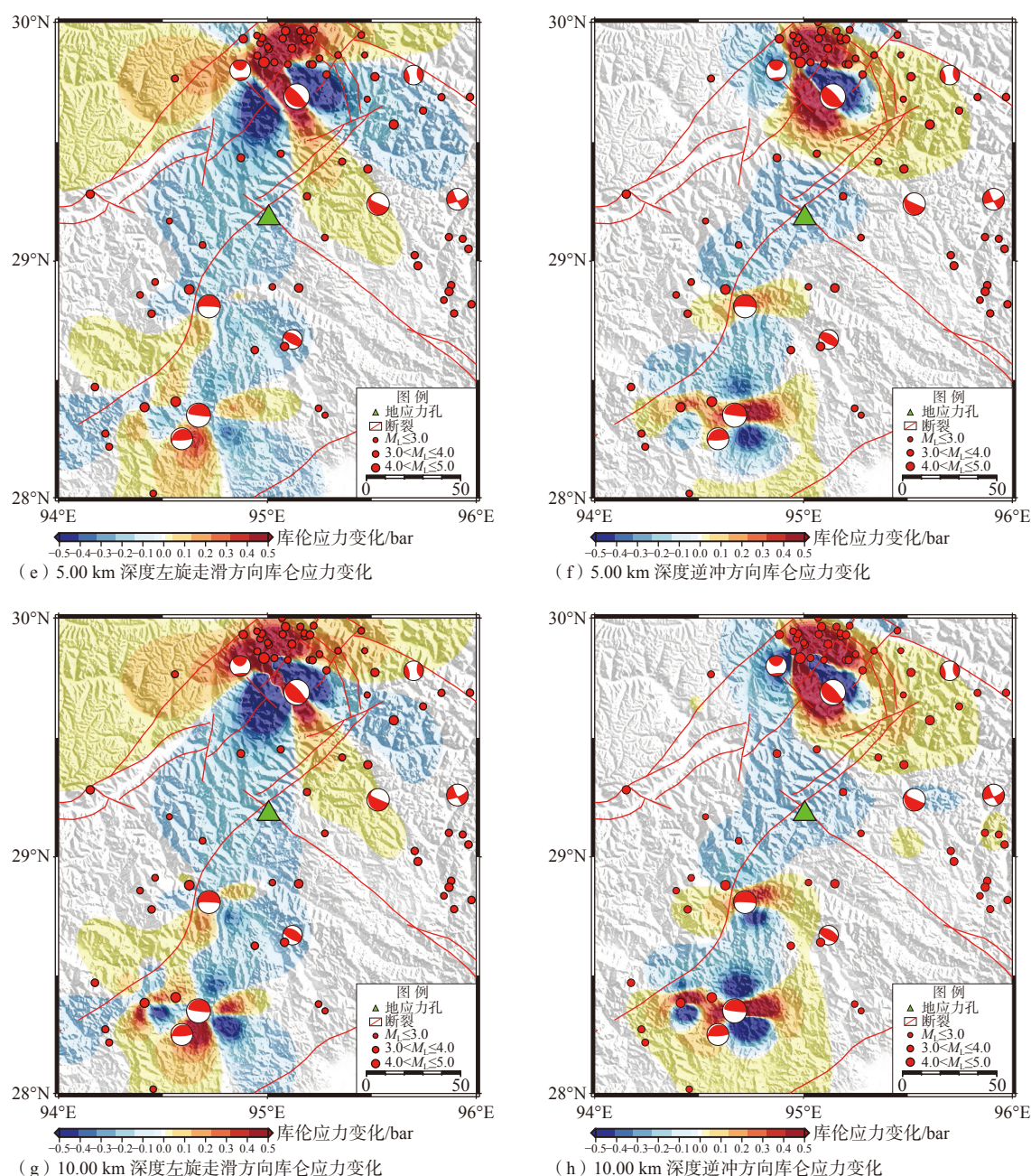


图7 研究区及附近区域断层面在区域强震影响下不同深度处左旋走滑和逆冲库仑应力变化图(沙滩球表示地震的震源机制解)

Fig. 7 Variation of sinistral strike-slip and thrust Coulomb stress at different depths (a-h) on the fault plane in the study area and nearby area under the influence of regional strong earthquakes (The beach balls represent the source mechanism of the earthquake)

有所不同。一般在发生构造地震的几千米至几十千米的地壳深部,若 K_{Hv} 、 K_{Hh} 相较浅部实测值大,则存在断裂失稳滑动的可能性,反之则构造环境相对稳定。

此次工作主要是基于地应力绝对测量结果,在探讨地应力状态与区域断裂稳定性时,采用了合理的假设,如假定断裂失稳滑动时要满足式(8)的条件。由于区域构造、新构造活动的影响,以及区域

地应力实测数据偏少、偏浅等,对断裂稳定性的认识难免存在偏差。另外,研究表明构造应力场随时间、构造活动而变化调整,地应力绝对测量结果为其现今地应力状态研究提供了一个时间点的参考,而要研究应力场的演化调整,要进行长期的地应力监测;同时,仅通过区域强震推算构造活动对研究区构造稳定性的影响略显片面,因为区域强震只是构造活动的形式之一,对区域应力环境的影响属于

突发性的,除此之外在构造应力场作用下区域应力环境的长期稳态变化的累积量对构造稳定性的影响亦需加以考虑,此数据也需要通过长期的地应力监测获取。这部分工作已在开展中,为后续研究该关键区域构造应力场的动态变化特征以及分析其构造稳定性奠定了基础。此外,从2000年以来研究区发生的中小地震分布看(图7中红圈),5 km以下深度库仑应力显著增加的区域(29.7°N—30°N, 94.9°E—95.3°E)地震分布较为密集,库仑应力变化量超过使断层失稳的0.1 bar的经验阈值,推测是未来可能发生中强地震的孕震区,需重点关注并加强该地区的地应力测量与监测工作。

6 结论

通过巴登则断裂、月尔东断裂交汇部位的1个地应力孔(11个测试段)的原位地应力测量工作,获得了实测地应力数据,补充了喜马拉雅东构造结墨脱关键构造部位应力场资料,并初步分析了其构造稳定性。具体结论如下:

(1)墨脱关键构造区西让地应力孔61.43~121.34 m测试段的最大水平主应力值为3.05~14.50 MPa,最小水平主应力值为2.16~9.87 MPa,垂向主应力值为1.63~3.31 MPa,其主应力值随着深度增加有逐渐增大的趋势;整个地应力孔测量深度范围内均呈现逆断层地应力状态,表明测点处地应力场以水平挤压应力为主。

(2)墨脱关键构造区测点处两测试段的最大主应力方位角分别为NE79.6°和NE70.5°,即最大水平主应力优势方向为北东东向。

(3)在测量深度范围内,地应力特征参数 K_{av} 值在1.39~4.38之间变化, K_{Hv} 值均大于1,反映出测点处应力场以水平应力为主导。测孔内所有测试段 K_{Hh} 值在1.23~1.66之间变化,未出现较高的 K_{Hh} 值,与林芝—通麦段的相应测量结果基本相似。 K_{av} 、 K_{Hv} 、 K_{Hh} 值显示出测点在地应力作用下,岩体破坏或节理面错动倾向于逆冲或走滑。

(4)依据库伦破裂准则,所有测试段处发生断层失稳滑动的临界摩擦系数 μ 在0.2~0.3之间,与已有研究在研究区获取的临界摩擦系数值对比发现,研究区测点位置98 m以浅地层水平构造应力作用程度较小,应力积累水平较低,保持断层稳定所需的摩擦系数值小于实际断层的临界摩擦系数值,构

造环境相对稳定;超过98 m深度地层受水平构造应力强烈作用,保持断层稳定所需的摩擦系数趋近于实际断层的临界摩擦系数值,存在小概率发生断层失稳滑动的风险。

(5)通过计算近二十年研究区周边区域强震造成的地应力测点位置墨脱断裂带的库仑应力变化量,发现区域强震在研究区墨脱断裂带断层面上造成的左旋走滑方向及逆冲方向上库仑应力变化值的叠加量均为负值,可抑制断层滑动,故区域内已发的强震暂未增加研究区断层活动的危险性。

致谢:感谢 IRIS (<https://ds.iris.edu>) 为本文提供地震目录。感谢现场钻机组技术人员对水压致裂地应力测量的协助。两位审稿专家为文章的完善提供了非常宝贵的意见,在此表示感谢。

References

- CHANG L J, FLESCHE L M, WANG C Y, et al., 2015. Vertical coherence of deformation in lithosphere in the eastern Himalayan syntaxis using GPS, Quaternary fault slip rates, and shear wave splitting data[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(14): 5813-5819.
- 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)
- DONG H W, XU Z Q, CAO H, et al., 2018. Comparison of eastern and western boundary faults of eastern Himalayan syntaxis, and its tectonic evolution[J]. *Earth Science*, 43(4): 933-951. (in Chinese with English abstract)
- EVANS K, ENGELDER T, 1989. Some problems in estimating horizontal stress magnitudes in "thrust" regimes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(6): 647-660.
- FENG C J, ZHANG P, MENG J, et al., 2017. In situ stress measurement at deep boreholes along the Tanlu fault zone and its seismological and geological significance[J]. *Progress in Geophysics*, 32(3): 946-967. (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)
- 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)
- 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.
- HARRIS R A, 1998. Introduction to special section: stress triggers, stress

- shadows, and implications for seismic hazard[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 103(B10): 24347-24358.
- HARRIS R A, SIMPSON R W, 1992. Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake[J]. *Nature*, 360(6401): 251-254.
- HUANG C Y, CHANG L J, DING Z F, 2021. Crustal anisotropy in the eastern Himalayan syntaxis and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(11): 3970-3982. (in Chinese with English abstract)
- HUANG Y D, YAO L K, TAN L, et al., 2020. Engineering effect of the Himalayan orogen and engineering geological zoning of China-Nepal railway[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(2): 421-430. (in Chinese with English abstract)
- HUANG Y D, PAN Q, YAO L K, et al., 2021. Characteristics of measured stress and route selection strategy under high in-situ stress risk control along Lalin section of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Journal of Engineering Geology*, 29(2): 375-382. (in Chinese with English abstract)
- JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R, 2009. *Fundamentals of rock mechanics*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons.
- KING G C P, STEIN R S, LIN J, 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3): 935-953.
- LEE M Y, HAIMSON B C, 1989. Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(6): 447-456.
- LIN W R, SAITO S, SANADA Y, et al., 2011. Principal horizontal stress orientations prior to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake in its source area[J]. *Geophysical Research Letters*, 38(7): L00G10.
- LIN W R, CONIN M, MOORE J C, et al., 2013. Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Science*, 339(6120): 687-690.
- MCGARR A, ZOBACK M D, HANKS T C, 1982. Implications of an elastic analysis of in situ stress measurements near the San Andreas fault[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 87(B9): 7797-7806.
- QIN X H, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(7): 2165-2180. (in Chinese with English abstract)
- STEIN R S, KING G C P, LIN J, 1992. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake[J]. *Science*, 258(5086): 1328-1332.
- STOCK J M, HEALY J H, HICKMAN S H, et al., 1985. Hydraulic fracturing stress measurements at Yucca Mountain, Nevada, and relationship to the regional stress field[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 90(B10): 8691-8706.
- TODA S, STEIN R S, SEVILGEN V, et al., 2011. Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—user guide[R]. US Geological Survey Open-File Report, 2011-1060: 63.
- WAN Y G, 2010. Contemporary tectonic stress field in China[J]. *Earthquake Science*, 23(4): 377-386.
- WANG B, QIN X H, CHEN Q C, et al., 2020. Measurement results of in-situ stress in Guyuan area of Ningxia on the southwest margin of Ordos block and its causation analysis[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(7): 983-994. (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 C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(2): 167-174. (in Chinese with English abstract)
- WANG K Y, CHANG L J, DING Z F, 2021. Upper crustal anisotropy in the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 43(2): 168-179. (in Chinese with English abstract)
- WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.
- XIE C, YANG X P, HUANG X N, et al., 2016. Geological evidences of late quaternary activity of Motuo fault in eastern Himalayan syntaxis[J]. *Seismology and Geology*, 38(4): 1095-1106. (in Chinese with English abstract)
- XU J R, ZHAO Z X, 2006. Characteristics 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 Z H, 2001. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 23(5): 492-501. (in Chinese with English abstract)
- YAN J, HE C, JIANG 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)
- 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 H, SHI G, WU H, et al., 2020. In-situ stress measurement in the shallow basement of the Shanghai area and its structural geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(4): 583-594. (in Chinese with English abstract)
- ZOBACK M D, HICKMAN S, 1982. In situ study of the physical mechanisms controlling induced seismicity at Monticello Reservoir, South Carolina[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 87(B8): 6959-6974.
- 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.
- ZOBACK M D, TOWNEND J, 2001. Implications of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate litho-

sphere[J]. *Tectonophysics*, 336(1-4): 19-30.

ZOBACK M D, 2007. *Reservoir geomechanics*[M]. New York: Cambridge University Press.

附中文参考文献

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.

董汉文, 许志琴, 曹汇, 等, 2018. 东喜马拉雅构造结东、西边界断裂对比及其构造演化过程[J]. *地球科学*, 43(4): 933-951.

丰成君, 张鹏, 孟静, 等, 2017. 郯庐断裂带及邻区深孔地应力测量与地震地质意义[J]. *地球物理学进展*, 32(3): 946-967.

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.

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.

黄臣宇, 常利军, 丁志峰, 2021. 喜马拉雅东构造结及周边地区地壳各向异性特征[J]. *地球物理学报*, 64(11): 3970-3982.

黄艺丹, 姚令侃, 谭礼, 等, 2020. 喜马拉雅造山带工程效应及中尼铁路工程地质分区[J]. *工程地质学报*, 28(2): 421-430.

黄艺丹, 潘前, 姚令侃, 等, 2021. 川藏铁路拉林段地应力特征及高地应力风险调控选线策略[J]. *工程地质学报*, 29(2): 375-382.

秦向辉, 张鹏, 丰成君, 等, 2014. 北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析[J]. *地球物理学报*, 57(7): 2165-2180.

王斌, 秦向辉, 陈群策, 等, 2020. 鄂尔多斯地块西南缘宁夏固原地区原位地应力测量结果及其成因[J]. *地质通报*, 39(7): 983-994.

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.

王成虎, 高桂云, 王洪, 等, 2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. *地质力学学报*, 26(2): 167-174.

王凯悦, 常利军, 丁志峰, 2021. 喜马拉雅东构造结上地壳各向异性特征[J]. *地震学报*, 43(2): 168-179.

谢超, 杨晓平, 黄雄南, 等, 2016. 东喜马拉雅构造结墨脱断裂晚第四纪活动地质证据的发现[J]. *地震地质*, 38(4): 1095-1106.

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.

许忠淮, 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. *地震学报*, 23(5): 492-501.

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.

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.

张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2020. 上海地区浅部地应力测量及其构造地质意义分析[J]. *地质力学学报*, 26(4): 583-594.