

引用格式: 唐荣, 李金玺, 罗超, 等, 2024. 四川盆地华蓥山断裂带南段地应力方向的差异: 来自钻孔成像测井的启示 [J]. 地质力学学报, 30 (4): 547–562. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023109](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023109)

Citation: TANG R, LI J X, LUO C, et al., 2024. Differences in crustal stress direction in the southern section of the Huayingshan fault zone in Sichuan Basin: Insights from in situ borehole image logging [J]. Journal of Geomechanics, 30 (4): 547–562. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023109](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023109)

四川盆地华蓥山断裂带南段地应力方向的差异: 来自钻孔成像测井的启示

唐 荣¹, 李金玺², 罗 超³, 蔡鸿燕², 谢荣洁¹, 刘傲东¹, 公子龙¹

TANG Rong¹, LI Jinxi², LUO Chao³, CAI Hongyan², XIE Rongjie¹, LIU Aodong¹, GONG Zilong¹

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学地球物理学院地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 四川 成都 610059;

3. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院, 四川 成都 610051

1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3. Shale gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610051, Sichuan, China

Differences in crustal stress direction in the southern section of the Huayingshan fault zone in Sichuan Basin: Insights from in situ borehole image logging

Abstract: [Objective] The Huayingshan fault zone, the largest fault zone within Sichuan Basin, exhibits notable differences in geological structures on both sides. Historically, earthquakes with a magnitude of ≤ 5 have occurred frequently along this fault zone, which remains relatively active to this day, disturbing the crustal stress field of the basin. Clarifying the crustal stress state of the Huayingshan fault zone can enhance our understanding of its active deformation and its tectonic and seismic activities and serve as a reference for subsequent research regarding this fault zone. Currently, geostress studies in this area rely mainly on analyzing seismic data, whereas the investigation of borehole data remains relatively scarce. [Methods] We collected and collated imaging data regarding borehole collapse and borehole-induced tensile fractures from eight borehole logging sites in the southern segment of the Huayingshan fault zone; the geostress directions of these eight boreholes were determined by analyzing these data. Subsequently, a comprehensive analysis of the geostress characteristics was performed by combining the data regarding China's modern stress field and the earthquake focal mechanism solutions in the southeastern margin of Sichuan Basin. [Results] The maximum horizontal principal stress in four boreholes located in the southern region of the southern segment of the Huayingshan fault zone was oriented in the NW-SEE direction, which aligns with the regional stress field direction in Sichuan Basin; only one borehole in the southern region exhibited a maximum horizontal principal stress in the NEE—SWW direction, representing a counterclockwise deviation relative to the regional stress field of Sichuan Basin. Meanwhile, the maximum horizontal principal stress in all three boreholes in the central region of the southern segment of the Huayingshan fault zone was also oriented in the NEE—SWW direction, representing a counterclockwise deviation relative to the regional stress field of Sichuan Basin. [Conclusion] Through the comprehensive analysis of the above results and the tectonic features and basement properties of the study area, the following conclusions are drawn: (1) The deviations in stress direction in the southern segment of the fault zone are primarily caused by the combined effects of changes in the basement properties of

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42230310)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42230310).

第一作者: 唐荣 (1998—), 男, 在读硕士, 主要从事构造地质学等相关研究。Email: 1040829352@qq.com

通讯作者: 李金玺 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事造山带和含油气盆地构造地质等相关研究。Email: lijinxi23@qq.com

收稿日期: 2023-06-27; 修回日期: 2023-12-27; 录用日期: 2024-01-08; 网络出版日期: 2024-03-27; 责任编辑: 范二平

the region, tectonic stress near the boreholes, and the regional stress field. (2) The geostress characteristics obtained in the present study, along with the focal mechanism solutions of earthquakes in the southern segment of the Huayingshan fault zone, indicate that the stress direction in the southeastern margin of Sichuan Basin is relatively divergent, resulting from the combined effects of complex local structures and the regional stress field in this region. [Significance] The present study aims to supplement the geostress data regarding the southern segment of the Huayingshan fault zone based on borehole data, analyze the current stress field state of the rock mass, and determine the direction of the maximum horizontal principal stress. These findings will provide supporting geostress data for subsequent research on the frequent seismic activities in this region.

Keywords: borehole image logs; in situ stress field; Huayingshan fault zone; Sichuan Basin

摘要: 华蓥山断裂带作为四川盆地内规模最大的断裂带, 两侧地质构造存在较大差异, 历史上该断裂带上频发 5 级左右地震, 现今仍具一定活动性, 扰动着盆地的地应力场。明确华蓥山断裂带的地壳应力状态可以提高对该地区活动变形、构造活动以及地震活动性的认识, 并对后续华蓥山断裂带研究提供参考依据。在收集整理华蓥山断裂带南段 8 处钻孔测井成像 (钻孔崩落与钻孔诱发张裂缝) 数据基础上, 结合中国现代地应力场和四川盆地东南缘的地震震源机制解数据对其地应力特征进行了综合分析。研究表明: 华蓥山断裂带南段南部地区大多数钻孔的最大水平主应力为北西西—南东东向, 与四川盆地区域应力场方向一致, 仅 1 处钻孔的最大水平主应力呈北东东—南西西向; 在南段中部地区钻孔的最大水平主应力均为北东东—南西西向, 对比四川盆地应力场呈逆时针偏转。应力方向发生偏转主要是由华蓥山断裂带基底性质变化、构造应力和区域应力场的综合作用造成的。

关键词: 测井成像; 地应力场; 华蓥山断裂带; 四川盆地

中图分类号: P553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 04-0547-16

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023109

0 引言

地应力主要是由重力作用和构造运动引起的, 其中岩体自重引起的自重应力场相对稳定, 而构造应力场在空间分布上较为复杂且随着时间的推移不断变化(康红普等, 2009)。华蓥山断裂带是四川盆地川中地块和川东褶皱带的重要边界断裂带, 断裂带两侧构造特征截然不同, 东侧发育阻挡式褶皱带, 而西侧为平缓褶皱带, 表明华蓥山断裂带对四川盆地的构造变形起着重要的影响(徐世荣和徐锦华, 1986; 王赞军等, 2018)。

目前对华蓥山断裂带南段地应力状态的研究, 主要还是基于地震资料进行震源机制解区域应力场反演以及利用地震剪切波分裂分析各向异性特征(武小何, 2017; 易桂喜等, 2020; 刘慧敏等, 2022; Yang et al., 2022), 仅有少数学者利用钻孔资料进行应力场分析。易桂喜等(2020)对四川盆地荣县—威远—资中地区进行震源机制解区域应力场反演, 获得其最大主压应力方向为北西—南东向, 与该区域构造应力场的主压应力方向一致; 刘慧敏等(2022)基于 CAP 方法对 2021 年泸县 M_s 6.0 地震进行反演,

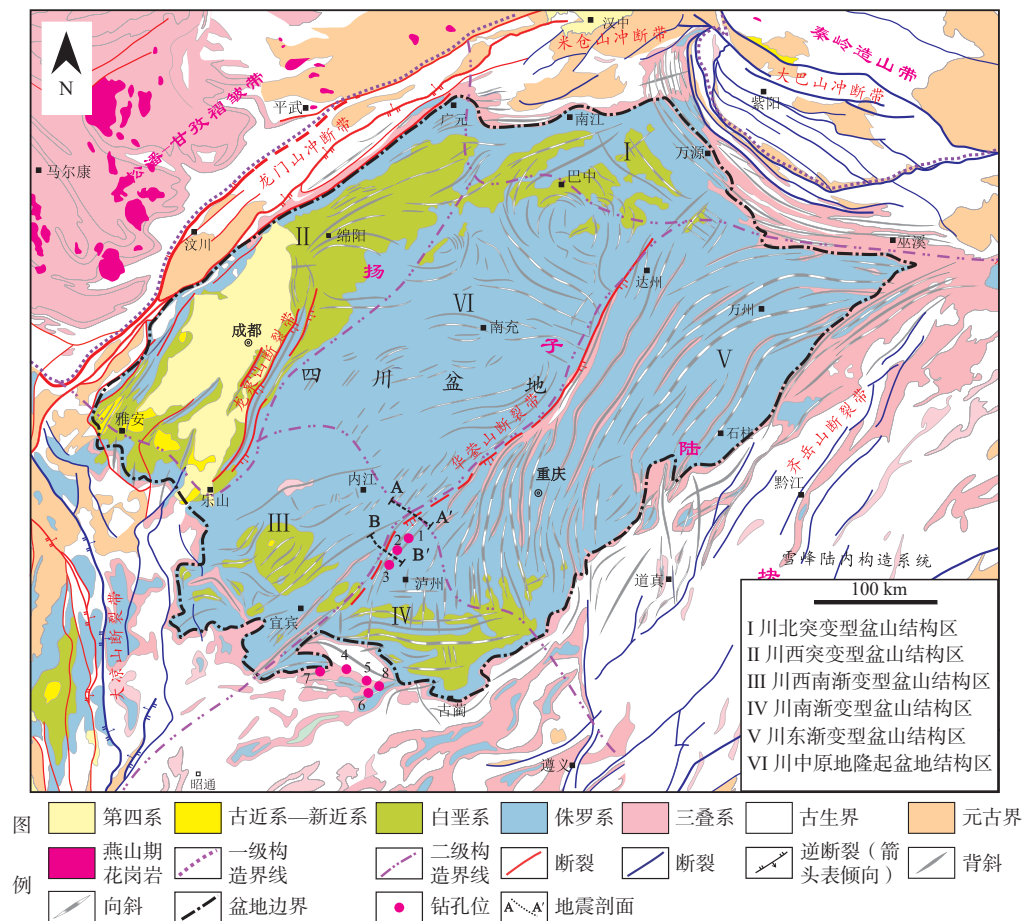
得出该次地震可能发生在未知或未标注的断裂上, 随后利用震源机制解进行阻尼区域应力反演方法反演泸州地区的构造应力场, 分析出该地区最大主压应力方向由西向东(近水平方向)顺时针旋转至北西—南东向; Yang et al.(2022)对盆地内东南部长宁地区的局部地震进行剪切波分裂分析, 结果表明该区域内快波方向变化很大且具有显著的各向异性强度, 不同区域的快波方向由构造、压力诱导等不同因素控制; 武小何(2017)通过分析川东南地区多口钻井的正交偶极测井资料得出川东南区块志留系龙马溪组的最大水平主应力方向为北东东—南西西向, 应力大小集中在 50~80 MPa。华蓥山断裂带南段位于四川盆地南缘的盆山结合地带, 处于构造变形模式转换区域(张岳桥等, 2011), 局部应力场的差异性显著。高原等(2018)利用区域地震台网资料分析地震各向异性, 结果表明长宁区域快波方向具有北西—南东向和北东向优势方向, 其中北西—南东向代表该区域主压应力的方向, 北东向为区域内北东向断裂影响导致; Yang et al.(2022)通过震源机制解和测井资料明确了长宁地区应力场的分布特征, 揭示出该区域最大水平应力与西部背斜和向斜的走向具有一致性, 但在东部与其正交。

综上所述, 华蓥山断裂带南段处于四川盆地构造变形过渡区, 具有复杂的构造环境; 另外该区域地应力场研究程度较低, 尤其缺乏钻孔资料。为此, 文章基于华蓥山断裂带南段8处钻孔中获得的清晰钻孔崩落及钻孔诱发裂缝的图像数据, 详细分析了华蓥山断裂带南段现今的地应力场状态, 并确定最大水平主应力方向, 为后续研究该地区频繁的地震活动提供地应力数据支撑。

1 区域地质背景

四川盆地位于扬子地台西北侧, 是在扬子克拉通台地基础上形成和发展起来的一个典型的多期构造叠合盆地。四川盆地北与秦岭造山带接壤, 西

与龙门山冲断带和松潘-甘孜褶皱带相连, 东以齐岳山断裂为界, 向南为大凉山断裂带(图1; 邓宾等, 2009; Cheng et al., 2021; Gu et al., 2021)。华蓥山断裂带南段地跨川东南高陡褶皱带和川南低陡褶皱带, 区域内褶皱变形强烈且经历了多期复杂构造运动(黄涵宇等, 2019)。从大地构造背景来看, 研究区东南缘为江南-雪峰造山带, 在中三叠世受深部动力、板块等因素的综合影响, 持续向北西方向推进, 产生了一系列逆冲推覆构造(汤双立等, 2011), 控制了扬子板块内部的构造变形格架; 早白垩世晚期其推至川东南褶皱带北西段(梅廉夫等, 2010), 使得南北向张性南川-遵义断裂带发生构造反转, 于西侧形成东西向挤压主应力, 并具有明显的左旋走滑变形特征; 晚白垩世, 江南-雪峰造山带北西向挤



红色断裂表示晚更新世—全新世(距今10万~12万年)以来的活动断裂; 蓝色表示第四纪活动过但晚更新世以来活动情况不清楚的断裂; 1—钻孔 L203H57-3; 2—钻孔 L203H79-4; 3—钻孔 L206; 4—钻孔 N203; 5—钻孔 N213; 6—钻孔 N215; 7—钻孔 N217; 8—钻孔 N224; 下图同

图1 四川盆地及周缘地质构造与钻孔分布图

Fig. 1 Tectonics and borehole distribution in Sichuan Basin and its environs

The red color indicates active faults since the Late Pleistocene-Holocene (100,000 to 120,000 years ago); the blue color indicates faults that have been active in the Quaternary period but have not been well understood since the Late Pleistocene. 1—Borehole L203H57-3; 2—Borehole L203H79-4; 3—Borehole L206; 4—Borehole N205; 5—Borehole N213; 6—Borehole N215; 7—Borehole N217; 8—Borehole N224.

压应力场仍旧持续,黔中地区受紫云-罗甸断裂影响沿北西向切入大娄山地区,同时受四川盆地刚性基底的强烈阻挡作用,于川南地区形成一系列东西走向的构造形迹;新生代早期,印度-亚洲板块碰撞形成东西向挤压应力场,向东传递至四川盆地而受到阻挡,形成川东南北东-南西向的构造应力场;上新世早期受北西-南东向挤压区内发生快速隆升剥蚀,新近系完全剥蚀,形成第四系与古近系的角度不整合接触以及大量北东向构造线理,从而奠定了川东南构造格架(覃作鹏等, 2013)。

华蓥山断裂带北起达州市宣汉县黄金口,向南经合川、宜宾至金川,长达 600 km 左右。断裂带主体沿北北东向展布,倾向南东,倾角为 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$,具有挤压逆冲性质并且有一定的右旋滑动分量。地球物理资料显示,华蓥山断裂带是一条切割基底的大断裂(徐世荣和徐锦华, 1986; 王赞军等, 2018)。研究表明,华蓥山断裂带形成于晋宁运动,后经东吴、印支及喜马拉雅等多期构造运动的影响(徐世荣和徐锦华, 1986; 宋鸿彪和罗志立, 1995; 王赞军等, 2018)。华蓥山断裂带对川东和川中地区的古生代沉积和后期构造变形起着明显的控制作用。在地层浅部,川东高陡构造带位于华蓥山断裂带至齐岳山断裂带之间,呈背斜紧闭、向斜宽缓的构造

样式,是中国大陆最典型的隔档式褶皱(李忠权等, 2002; Gu et al., 2021);川中低缓构造带位于华蓥山断裂带至龙泉山断裂之间,呈平缓褶皱构成的各种旋扭构造,地表断裂较少(邓康龄, 1992; 管树巍等, 2022)。物探资料表明(赵从俊, 1984; 徐世荣和徐锦华, 1986; 宋鸿彪和罗志立, 1995; 王赞军等, 2018),地层深部华蓥山断裂带两侧的结晶基底埋深与性质差别巨大。西侧川中地区的基底由一套基性-中性及较强磁性的火成岩组成,具有高密度、强磁性的特点,表明该基底为一变质程度大且硬化程度高的刚性块体,埋深为 5~6 km。东侧川东地区的基底由一套巨厚的沉积变质碎屑岩夹碳酸盐岩和火山碎屑岩的复理石建造所组成,属于低密度、弱至无磁性的塑性基底结构,埋深通常为 7~9 km,最深处可达 12 km。从华蓥山断裂带的基底断裂特征、断裂活动性、地震空间分布、地表背斜及平面展布形态和地球物理场特征来看,华蓥山断裂带大致以合川与邻水为界,分为北段、中段和南段(王赞军等, 2018)。

在地震反射测线时间剖面上(图 2),可大致分辨出 5 个反射层序,分别是二叠系茅口组(P_1m)、奥陶系五峰组(O_3w)、寒武系高台组(C_2g)、寒武系筇竹寺组(C_1q)和震旦系灯影组(Z_2dn)。地震解释剖

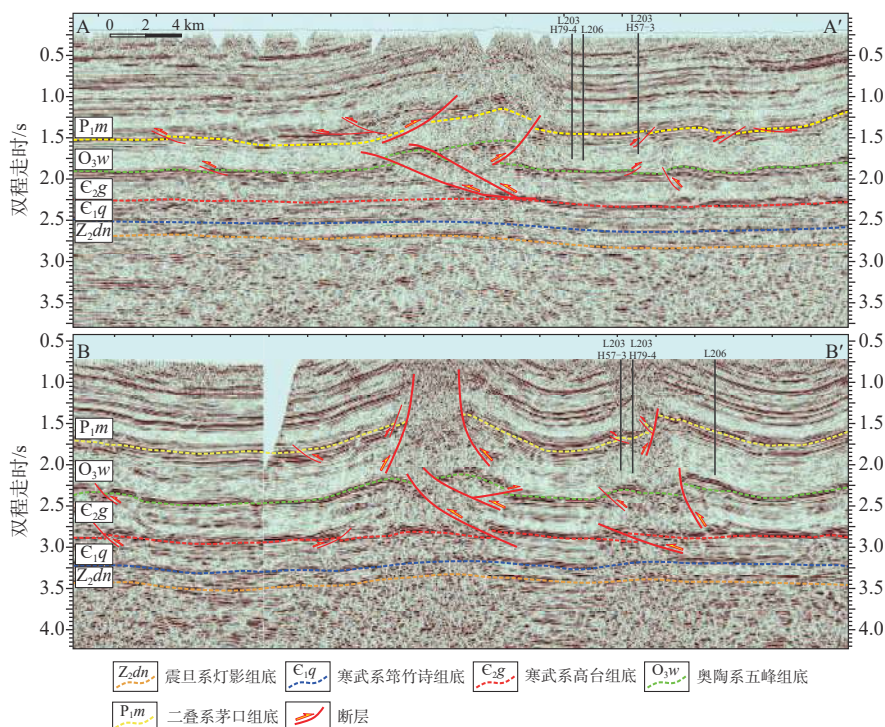


图 2 华蓥山断裂带南段 AA'、BB'地震解释剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 2 AA', BB' Seismic interpretation profile of the southern section of the Huayingshan fault zone (The position of the measuring line is shown in Fig. 1)

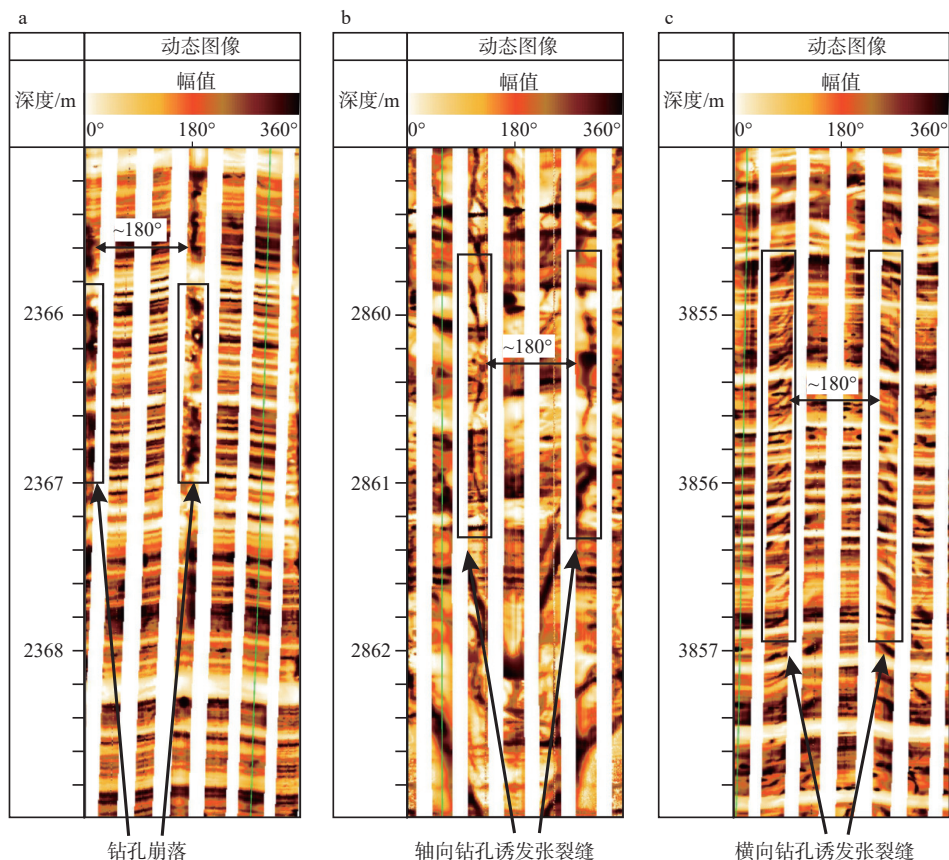
面显示, 华蓥山断裂带对该区的构造分区起到了非常明显的控制作用。浅层地层产状较为平缓, 但在华蓥山断裂带附近产状明显变陡。华蓥山基底断裂上陡、下缓, 在南段没有露头。华蓥山断裂带南段的褶皱和断裂构造主要发生在沉积盖层中, 表现为盖层在基底上的滑脱变形, 发育大量褶皱与逆断裂。在深部基底顶、底界面不清晰, 下部反射杂乱, 可能是强烈的晋宁运动形成的褶皱基底的表现(王赞军等, 2018)。

2 钻孔成像测井原理与特征

2.1 钻孔崩落

在钻孔过程中, 孔壁岩体会产生相应的变形破坏, 仔细分析这些细小的破坏现象便可得到该区域的应力场特征(Bell and Gough, 1979; Zoback et al., 2003; Behboudi et al., 2022)。钻孔崩落(BO)的出现是由于钻孔过程中在孔壁周围产生的压应力过于集中, 切向应力超过岩石的抗压强度而产生钻孔孔

壁压缩、剪切破坏, 进而导致钻孔直径扩大(Brudy and Zoback, 1999; 王成虎, 2014)。钻孔崩落的长轴方位与最大水平主应力(S_H)方向垂直(Bell and Gough, 1979; 李朋武等, 2005; Nian et al., 2016), 这意味着崩落将在沿着平行于最小水平主应力的方向上发生。钻孔崩落可作为最大和最小水平主应力方向的指示器, 或者通过钻孔崩落破坏区的角度范围, 并结合孔壁围岩强度属性的研究参数进行地应力量值估算。利用钻孔崩落进行地应力分析已在国内外被广泛实践(陈念等, 2021; Bashmagh et al., 2022; Kruszewski et al., 2022), 对其形成机理和过程也有大量研究。Lin et al.(2020)利用离散元法(DEM)模型研究了钻孔尺寸和温度对钻孔崩落宽度的影响; Stricker et al.(2023)分析了钻井过程对钻孔崩落形成的影响。在成像测井图像上钻孔崩落表现为一对宽的失焦区域, 2条较宽且呈 180° 或近 180° 对称式分布的暗色条带或斑块, 规则性很强(图3a), 因此可以从钻孔图像上很容易辨认出崩落区域。但钻孔崩落最大的局限性是该现象并不是



a—钻孔崩落; b—轴向(垂直)钻孔诱发张裂缝; c—横向钻孔诱发张裂缝

图3 动态电阻率成像测井图

Fig. 3 Dynamic resistivity imaging logging

(a) Borehole breakouts; (b) Axial (vertical) drilling-induced tensile fractures; (c) Transverse drilling-induced tensile fractures

在每个钻孔中都出现,例如,在瑞典据地表深度1000 m以内的岩石通常不存在钻孔崩落,因此该方法不适合浅孔使用(Ljunggren et al., 2003)。

2.2 钻孔诱发张裂缝

钻孔诱发张裂缝(DITF)常作为一种附加技术来约束钻孔崩落分析结果(Zhang and Stephansson, 2010),在钻井过程中远场构造应力集中在靠近井筒处,当这种应力超过导致钻孔壁拉伸破坏所需的应力时就会形成钻孔诱发张裂缝(Chatterjee and Mukherjee, 2023)。这种裂隙不仅可以用来分析周围当今的应力状态,还能为分析主应力轴的方向和大小提供约束。在成像测井图中,钻孔诱发张裂缝具有以下特征:①张裂缝成对出现在井壁中,相隔180°左右;②张裂缝长度通常为0.1~2.0 m;③与井眼轴平行的裂隙并不完全笔直。大量证据证明,钻孔诱发的张裂缝可分为2种类型:轴向(垂直)钻孔诱发张裂缝(图3b)和横向钻孔诱发张裂缝(图3c)。Brudy and Zoback(1999)统计了2处钻井中2种诱发张裂缝的深度和方向,发现2种裂缝大多方位相同,只有极少数的方位不同,而垂直诱发张裂缝的方向受构造应力场方向的控制,表明横向诱发张裂缝方向也受构造应力场控制。Nelson et al.(2005)对

澳大利亚吉普斯兰盆地西图纳地区的横向钻孔诱发张裂缝分析认为该类裂隙可能会在走滑断裂和逆断裂边界的特定应力状态下形成。

3 华蓥山断裂带南段的地应力分析

3.1 华蓥山断裂带南段中部地应力特征

从华蓥山断裂带南段中部地区L203H57-3、L203H79-4、L206钻孔获得的测井电成像中共识别出钻孔诱发张裂缝267条(表1,图4)。钻孔诱发张裂缝均遵循世界应力图(WSM)数据质量等级标准,以确保数据质量的可靠性(Heidbach et al., 2018)。3口钻井的钻孔诱发张裂缝数据质量在B级—C级之间(A级质量数据代表区域应力方向的可靠性最高,E级质量数据更有可能代表局部应力方向)。数据结果表明,L203H57-3和L206钻孔的数据质量较高,推断最大主应力方向为北东东—南西西向。L203H79-4钻孔(WSM的数据质量等级为C)的诱发张裂缝数据较少,且分布深度较为集中。在L203H57-3、L203H79-4和L206钻孔中并未发现较为明显的崩落现象。

表1 四川盆地华蓥山断裂带南段中部地区钻孔测井成像数据分析的应力指标(质量等级以钻孔诱发张裂缝为评判标准)

Table 1 Stress index form analysis of image log data from the central part of the southern section of the Huayingshan fault zone in Sichuan Basin (The quality level was evaluated based on drilling-induced tensile fractures)

钻孔编号	总深度/m	选取段/m	诱发张裂缝/条	崩落/段	DITF优势方位	BO优势方位	平均最大主应力方向	解释质量等级
L203H57-3	3343.6~3777.2	3607.2~3743.8	108	—	70°~80°/250°~260°	—	75°/255°	B
L203H79-4	3621.3~3879.9	3706.0~3778.8	32	—	80°~90°/260°~270°	—	70°/250°	C
L206	3570.0~4085.0	3705.0~3912.0	127	—	80°~90°/260°~270°	—	77°/257°	B

注:平均方位角和质量排名是根据世界应力图(Heidbach et al., 2018)统计得出;世界应力图质量分级系统分为A级—E级,A级数据质量表明最大水平主应力(S_{H1})方向的精确度在15°以内,B级表示其精确度在15°~20°,C级表示其精确度在20°~25°,D级表示其精确度在25°~40°,E级表示数据不完整、不可靠或精确度>40°;DITF—钻孔诱发张裂缝;BO—钻孔崩落

Notes: The average azimuth and quality ranking were calculated using the world stress map (Heidbach et al., 2018); The world stress map divides the data quality into A to E levels; Level A indicates an S_{H1} accuracy within 15°; Level B indicates an S_{H1} accuracy of 15°—20°; Level C indicates an S_{H1} accuracy of 20°—25°; Level D indicates an S_{H1} accuracy of 25°—40°; Level E indicates incomplete, unreliable, or accurate data of >40°. DITF—drilling-induced tensile fractures; BO—borehole breakouts.

华蓥山断裂带南段中部的3处钻孔数据中,L206钻孔的数据较为理想。为了更加细致地分析华蓥山断裂带南段中部地区的现今地应力特征,把该钻孔的探测深度分为2段(3700~3805 m、3805~3925 m)进行分析,并画出这2段的钻孔诱发张裂缝的玫瑰图(图5)。L206钻孔的诱发张裂缝方位集中在NE50°—E90°范围内。随着深度由3700~3805 m段增加到3805~3925 m段,其优势方位基本

没有变化,为北东东—南西西向;平均方位角由68.6°(3700~3805 m)变化为81.5°(3805~3925 m)。该区域岩体地应力优势方位基本未随深度有明显变化。

3.2 华蓥山断裂带南段南部地应力特征

从华蓥山断裂带南段南部地区N203、N213、N215、N217和N224钻孔获得的测井成像中总共识别出钻孔诱发张裂缝478条,钻孔崩落36段(表2,

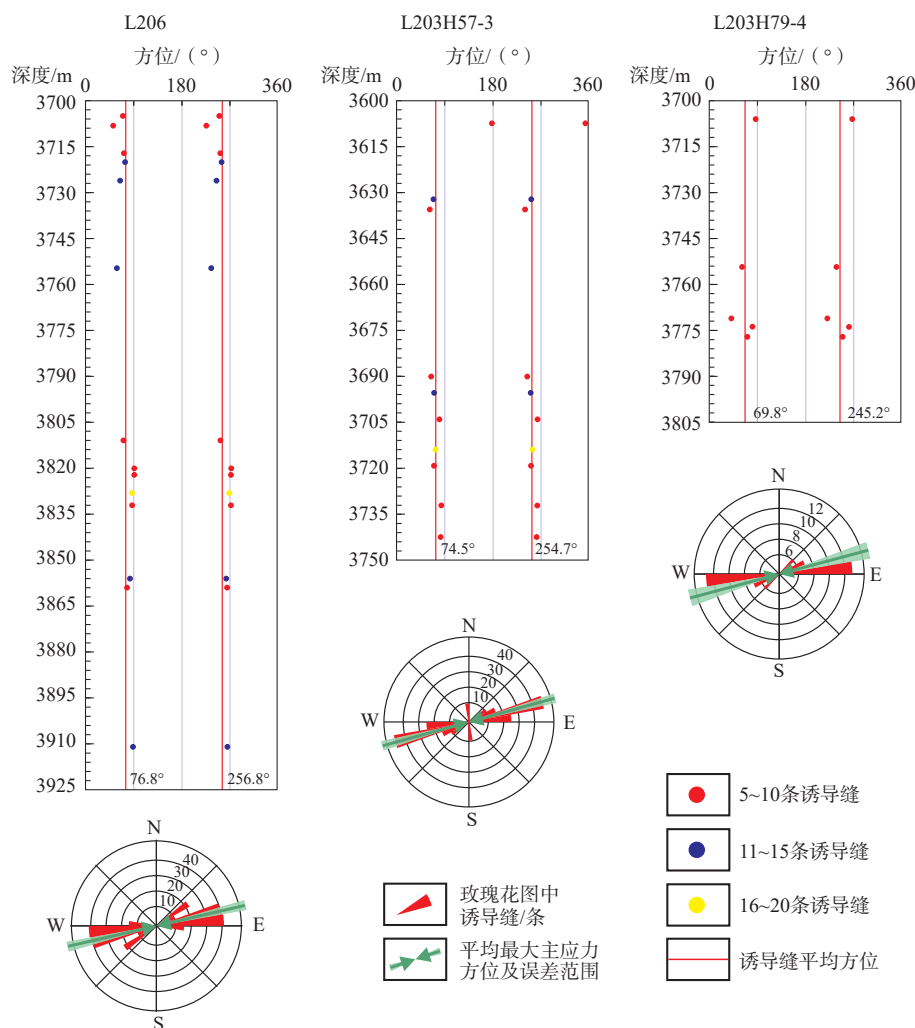
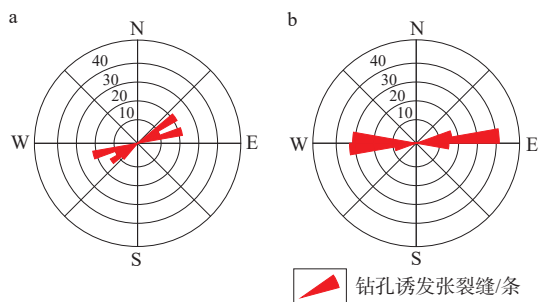


图 4 华蓥山断裂带南段中部地区钻孔的诱发张裂缝数量、方位与测量深度散点图

Fig. 4 The number, orientation, and measurement depth of drilling-induced tensile fractures in boreholes drilled in the central area of the southern section of the Huayingshan fault zone



a—3700~3805 m 深度段; b—3805~3925 m 深度段

图 5 L206 钻孔 2 个深度段的裂缝方位角玫瑰图

Fig. 5 Rose diagram of the azimuth at two depths in borehole L206
(a) 3700~3805 m depth; (b) 3805~3925 m depth

图 6)。根据 WSM 数据质量等级标准, N215 和 N217 钻孔的数据等级分别为 A 级和 B 级, 表明其数据结果可靠, 由此推断最大主应力方向为南东东—北西

西向。N203、N213 和 N224 钻孔中由于钻孔崩落和钻孔诱发张裂缝数量较少, 数据质量等级为 C 级或 D 级, 所得到的最大主应力方位可靠程度低于 N215 和 N217 钻孔。由南部地区 5 处钻孔数据的钻孔崩落散点图可以看出(图 6), 在统计的深度内 5 处钻孔存在的崩落均相隔 180°左右。其中 4 处钻孔产生的崩落方向均集中在北北东—南南西方向, 表明最小主应力方向为北北东—南南西, 由此推测最大主应力为南东东—北西西方向, 与钻孔诱发张裂缝推测出的最大主应力方向一致。但 N215 钻孔 (WSM 质量等级为 B) 显示的最大主应力方位为北东东—南西西向, 相比附近钻孔其方位发生了偏转。

此次测井成像中, 该地区轴向钻孔诱发张裂缝与横向钻孔诱发张裂缝均有出现, 而横向钻孔诱发张裂缝的形成对地应力条件较为苛刻。Nelson et al.

表2 四川盆地华蓥山断裂带南段南部地区钻孔测井成像数据分析的应力指标 (质量等级以钻孔诱发张裂缝为评判标准)

Table 2 Stress index form analysis of image log data from the southern part of the southern section of the Huayingshan fault zone in Sichuan Basin (The quality level was evaluated based on the drilling-induced tensile fractures)

钻孔编号	总深度/m	选取段/m	诱发张裂缝/条	崩落/段	DITF优势方位	BO优势方位	平均最大主应力方向	解释质量等级
N203	2314.5~2428.2	2351.6~2398.0	14	7	100°~110°/280°~290°	20°~30°/200°~210°	111°/291°	C
N213	2155.3~2617.1	2119~2190	—	3	—	10°~20°/190°~200°	112°/292°	D
N215	2133.9~2546.1	2134.2~2420.0	130	13	70°~80°/250°~260°	0°~10°/180°~190°	81°/261°	B
N217	2618.9~2984.9	2626.6~2866.0	307	8	100°~110°/280°~290°	20°~30°/200°~210°	97°/277°	A
N224	1925~2335	1957~2189	—	5	—	10°~20°/190°~200°	104°/284°	C

注: 平均方位角和质量排名是根据世界应力图(Heidbach et al., 2018)统计得出; 世界应力图质量分级系统分为A级—E级, A级数据质量表明最大水平主应力(S_{Hmax})方向的精确度在15°以内, B级表示其精确度在15°~20°, C级表示其精确度在20°~25°, D级表示其精确度在25°~40°, E级表示数据不完整、不可靠或精确度>40°; DITF—钻孔诱发张裂缝; BO—钻孔崩落

Notes: The average azimuth and quality ranking were calculated using the world stress map (Heidbach et al., 2018); The world stress map divides the data quality into A to E levels. Level A indicates an S_{Hmax} accuracy within 15°; Level B indicates an S_{Hmax} accuracy of 15°—20°; Level C indicates an S_{Hmax} accuracy of 20°—25°; Level D indicates an S_{Hmax} accuracy of 25°—40°; Level E indicates incomplete, unreliable, or accurate data of >40°; DITF—drilling-induced tensile fractures; BO—borehole breakouts.

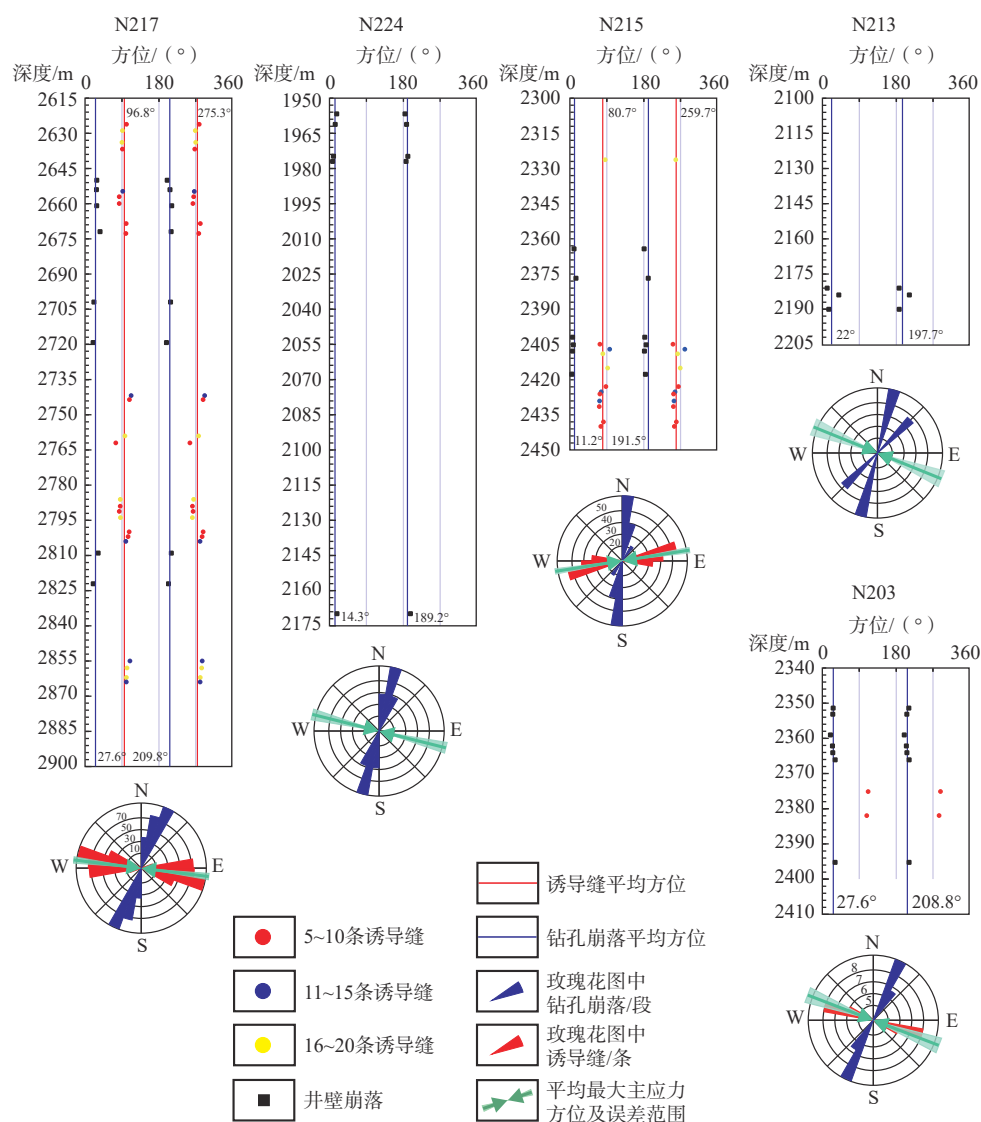


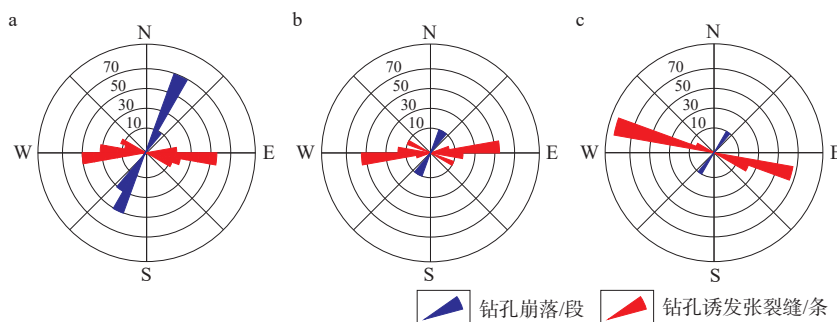
图6 华蓥山断裂带南段南部钻孔的诱发张裂缝方位、钻孔崩落方位与测量深度散点图

Fig. 6 The number, orientation, and measurement depth of drilling-induced tensile fractures in boreholes drilled in the southern area of the southern section of the Huayingshan fault zone

(2005)研究认为在成像测井上观察横向钻孔诱发张裂缝, 可以将应力场限制在走滑断裂和逆断裂边界上。易桂喜等(2019)利用川东南地区 2010 年以来 610 次 $M_L \geq 1.5$ 地震重新定位显示 0~5 km 深度的地震占绝大多数(约 88%), 并且以走滑断裂或逆冲断裂为主。这些断裂的形成可能导致该地区轴向钻孔诱发张裂缝与横向钻孔诱发张裂缝同时出现。

在华蓥山断裂带南段南部地区 5 处钻孔中,

N217 钻孔的数据较为理想。把该钻孔的探测深度进一步分为 3 段来分析(2615~2705 m、2705~2810 m、2810~2900 m; 图 7)。N217 钻孔的诱发张裂缝方位集中在(80°~120°与 260°~300°)范围内。随着深度增加, 平均方位角由 93.13°(2615~2705 m)变为 85.7°(2705~2810 m)再变为 102.4°(2810~2900 m)。该区域的裂缝优势方位基本未随深度有较大变化。



a—2615~2705 m 深度段; b—2705~2810 m 深度段; c—2810~2900 m 深度段

图 7 N217 钻孔 3 个深度的裂缝方位角玫瑰图

Fig. 7 Rose diagram of the azimuth at three depths in borehole L217

(a)2615~2705 m depth; (b)2705~2810 m depth; (c)2810~2900 m depth

4 分析与讨论

Hu et al.(2017)将中国应力数据库与世界应力数据库(WSM)整合, 进一步分析了中国及邻区的地壳应力模式: 中国现今最大水平主应力轴方位以青藏高原为中心呈扇形状分布, 自西向东顺时针旋转, 表明中国现代构造应力场明显受到来自周缘板块动力学的影响, 特别是印度板块作为主要力源, 其影响范围和作用强度大于菲律宾板块和太平洋板块的俯冲(谢富仁等, 2004; Hu et al., 2017)。四川盆地位于青藏高原东缘, 其区域最大水平主应力为近东西向, GPS 测量表明四川盆地中东部构造运动速率为 1~4 mm/yr, 运动方向大致为东西向(Gan et al., 2007; Yu et al., 2019)。由世界应力数据库中提取到的四川盆地及其邻近地区应力数据分布特征显示(图 8), 盆地内地应力数据分布不均, 相当多的数据点聚集在川西龙门山断裂带地区, 个别点分布在川中、川东地区。

4.1 南段最大水平主应力方位空间变化的控制因素

上述结果表明, 华蓥山断裂带南段南部地区的最大水平主应力(S_H)方向为 97°/277°±16°(质量等线

为 C—D 的数据方位在 111°/291°±7°)。与四川盆地现今最大水平主应力(S_H)方向几乎一致, 这意味着印度-欧亚板块的远场板块边界效应可能是华蓥山断裂带南段南部应力方向的主要影响因素。相比之下, 华蓥山断裂带南段中部地区的最大水平主应力(S_H)方向为 77°/257°±7°, 相对于四川盆地现今最大水平主应力(S_H)逆时针旋转约 30°(质量等级为 C 的数据方位为 70°/250°, 相当于逆时针旋转约 37°)。笔者推测在最大水平主应力(S_H)方向上观察到逆时针旋转 30°~37°可能是由以下两方面因素影响造成。

4.1.1 华蓥山断裂带的地壳密度差异和地形因素

上文提到华蓥山断裂带两侧的结晶基底的性质差别较大。西侧川中地区基底由一套基性—中性及较强磁性的火成岩组成, 具有高密度、强磁性特点; 东侧川东地区基底由一套巨厚的沉积变质碎屑岩夹碳酸盐岩与火山碎屑岩的复理石建造所组成, 属于低密度、弱至无磁性的塑性基底。地壳内部密度变化可能造成盆地内地力学的不均匀性, 产生的异常质量会增加附近的水平挤压应力和其上的拉张应力, 从而显著改变水平应力方向(Artushkov, 1973; Trešl, 1992; Elo and Pirttijärvi,

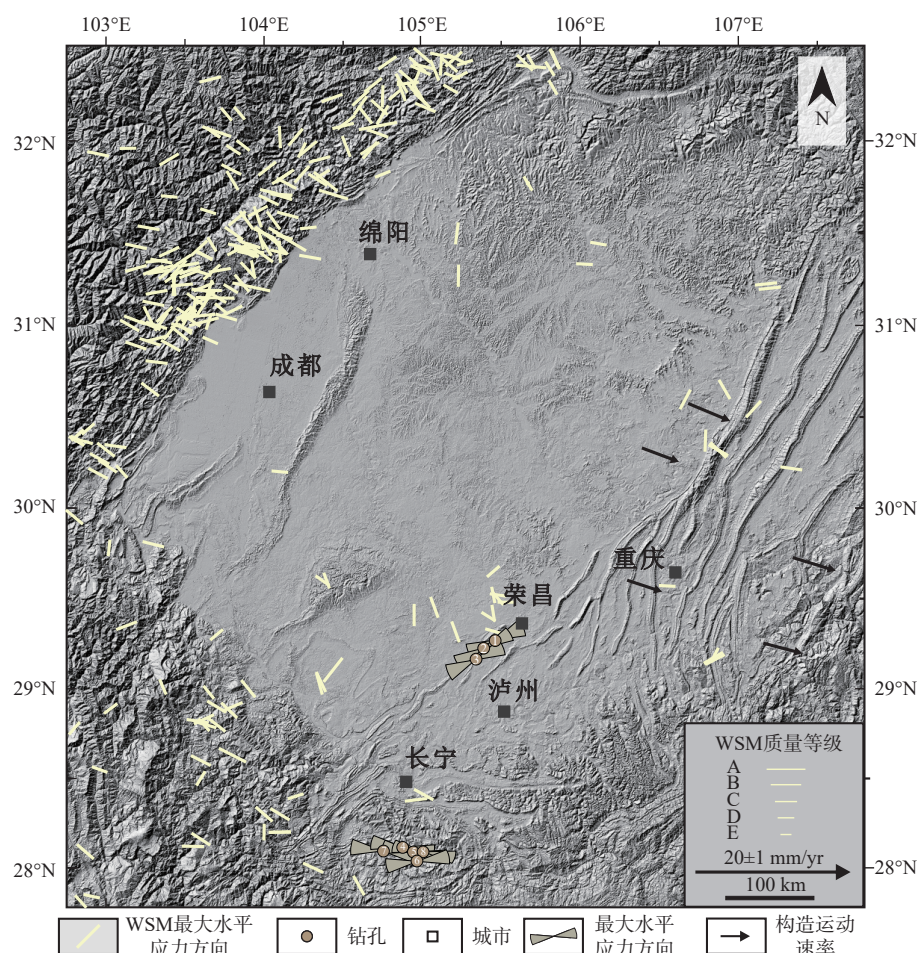


图8 四川盆地及其邻近地区的地应力数据分布图 (WSM最大水平主应力数据来自 Heidbach et al., 2018; GPS数据来源于中国地震台网中心国家地震科学数据中心 <http://data.earthquake.cn>)

Fig. 8 Crustal stress data distribution in the Sichuan Basin (The WSM maximum horizontal principal stress data are from Heidbach et al., 2018; The GPS dataset is provided by the China Earthquake Networks Center, National Earthquake Data Center (<http://data.earthquake.cn>))

2013; Bassett et al., 2022; Oliva et al., 2022), 其影响程度和密度变化程度相当。这可能会产生文中观察到的华蓥山断裂带南段中部地区最大水平主应力的旋转。Mandal(1999)对南印度地下应力场分析表明, 地形和地壳密度异质性与南印度板块内局部应力共同导致研究区最大主应力发生偏转。Oliva et al.(2022)利用数值模型模拟岩浆体下的岩石圈变形, 由于火山和地壳内岩浆会使上覆岩石的密度和热结构发生根本性改变, 研究认为局部应力场旋转可能是受地形载荷与岩浆体的共同影响, 地形载荷控制浅部地壳应力, 岩浆体或地壳增厚会强烈影响下部地壳应力的大小。

布格重力异常(重力场)是由地壳密度分布不均匀而导致重力值偏离正常值的异常响应, 可以直观地反映地质体分布、地壳密度结构、深层结构等信息。四川盆地的布格重力异常图表明(图9), 盆地内重力异常值总体呈现由西向东增大的趋势(熊

小松等, 2015), 华蓥山断裂带附近出现重力异常梯度带, 与以往描述的基底性质在此处产生的变化一致。文中华蓥山断裂带南段中部地区的3处钻孔便位于此处, 其最大水平主应力测量方向均发生逆时针偏移。南部地区5处钻孔距华蓥山断裂带较远, 密度变化程度弱, 水平应力偏转的影响较小, 最大水平主应力测量方向未发生明显偏移。

与基底性质变化相关的是地表地形以及岩石物质引起的地质力学非均匀性(朱焕春和陶振宇, 1994; Mandal, 1999; 谭成轩等, 2006), 这也会影响最大水平主应力方向。然而, 文中钻孔崩落与钻孔诱发张裂缝数据识别于埋深1950~3925 m处, 推断表面地形不是控制观察到的最大水平主应力旋转的主要因素。

4.1.2 区域性复杂地质构造因素

活动断裂上的近期滑动也能导致应力重新定

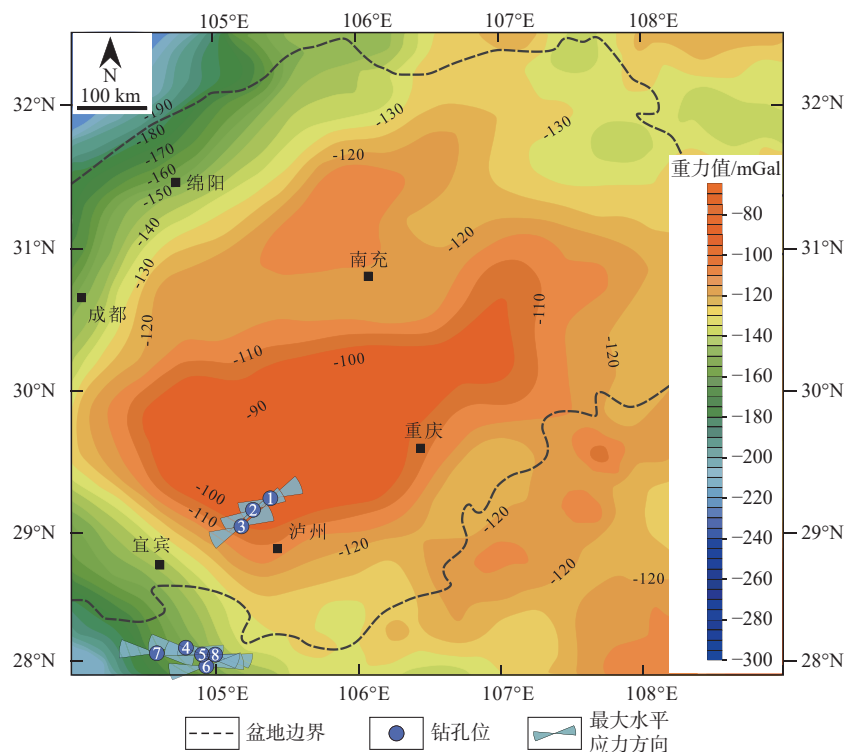


图9 四川盆地重力异常图(据熊小松等, 2015 修改)

Fig. 9 Gravity anomaly in the Sichuan Basin (modified from Xiong et al., 2015)

向,沿区域和深度方向产生最大水平主应力方向的变化。例如,Griffin(2019)认为在新西兰东海岸南部钻孔观察到的最大水平主应力发生旋转是由附近断裂活动导致的。华蓥山断裂带是四川盆地内规模最大的断裂,地壳运动积累的能量更倾向于沿该断裂释放(Wang et al., 2022),由此导致断裂附近局部应力呈现出的方位较为复杂,这种复杂程度越靠近断裂越明显。当远离断裂时,应力方向逐渐与区域应力方向一致(刘中春等, 2016; 李静等, 2021)。Rajabi et al.(2017)基于澳大利亚 Clarence-Morenton 盆地 27 处钻孔数据,分析认为在断裂、裂缝与岩性差异明显的部位,钻孔崩落具有显著扰动,但扰动的范围通常在几米内。Brooke-Barnett et al.(2015)发现 Surat 盆地的水平应力在各种尺度上的大小和方向都变化很大,其中 2 个主要影响因素为基底断裂的局部扰动与区域岩性变化。文中研究华蓥山断裂带南段钻孔最大水平主应力方向时发现,靠近华蓥山断裂带的 3 处钻孔均发生程度相似的逆时针偏转,相对远离华蓥山断裂带的 5 处钻孔则与区域应力方向一致。然而,限于研究区资料有限,笔者没有详细分析文中钻孔应力方向与附近断裂的具体关系,这是今后需要研究的重点。值得注意的是华蓥山南段中部地区 3 处钻孔与南部地区 5 处钻孔的

最大水平主应力分别与其附近褶皱走向基本一致(图 10)。Matias et al.(2021)通过分析安第斯山脉中部 1 处背斜褶皱核心区的岩床特征,并结合二维模型证明了褶皱构造可以导致局部应力场的改变。

综上所述,文章认为华蓥山断裂带南段中部的最大水平应力方向可能是受附近断裂构造与华蓥山断裂带基底密度突变共同影响,应力方向发生偏转;华蓥山断裂带南段南部的最大水平应力方向可能受到区域应力场与长宁背斜褶皱综合作用的影响。

4.2 华蓥山断裂带南段震源机制解分析

地震活动与地质构造息息相关,震源机制解能够直观地反应地震破裂的几何特征和运动学特征,还可以利用震源机制解进行区域应力场反演,对于分析区域地质构造活动具有重要意义。四川盆地主要活动断裂带分布在川西北的造山带和盆山过渡带,川东南地区断裂活动性并不强。从地震活动性来看,华蓥山断裂带南段的活动频率远大于中段和北段(何登发等, 2019)。文中收集了华蓥山断裂带南段部分地区的震源机制解数据(图 11; 易桂喜等, 2019; 冯梅等, 2019; 张岳桥, 2020; 胡幸平等, 2021; 李翠平等, 2022; 李欣蔚等, 2022; 刘慧敏等, 2022),其中逆断型占大多数。从震源机制解数据分析可知,华蓥山断裂带南段中部地区的最大水平

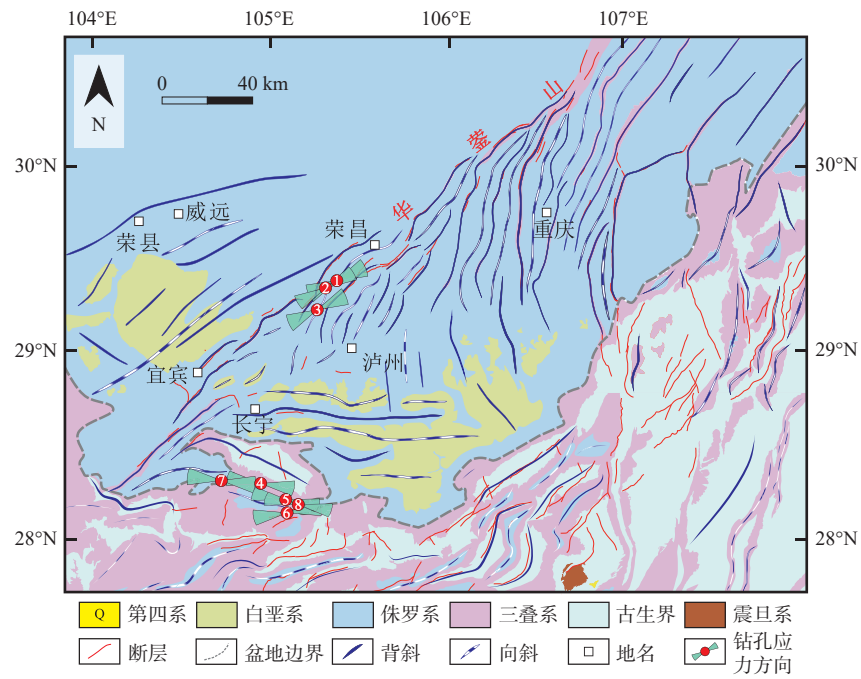


图 10 华莹山断裂带南段东侧构造背景图

Fig. 10 Tectonic background on the eastern side of the southern section of the Huayingshan fault zone

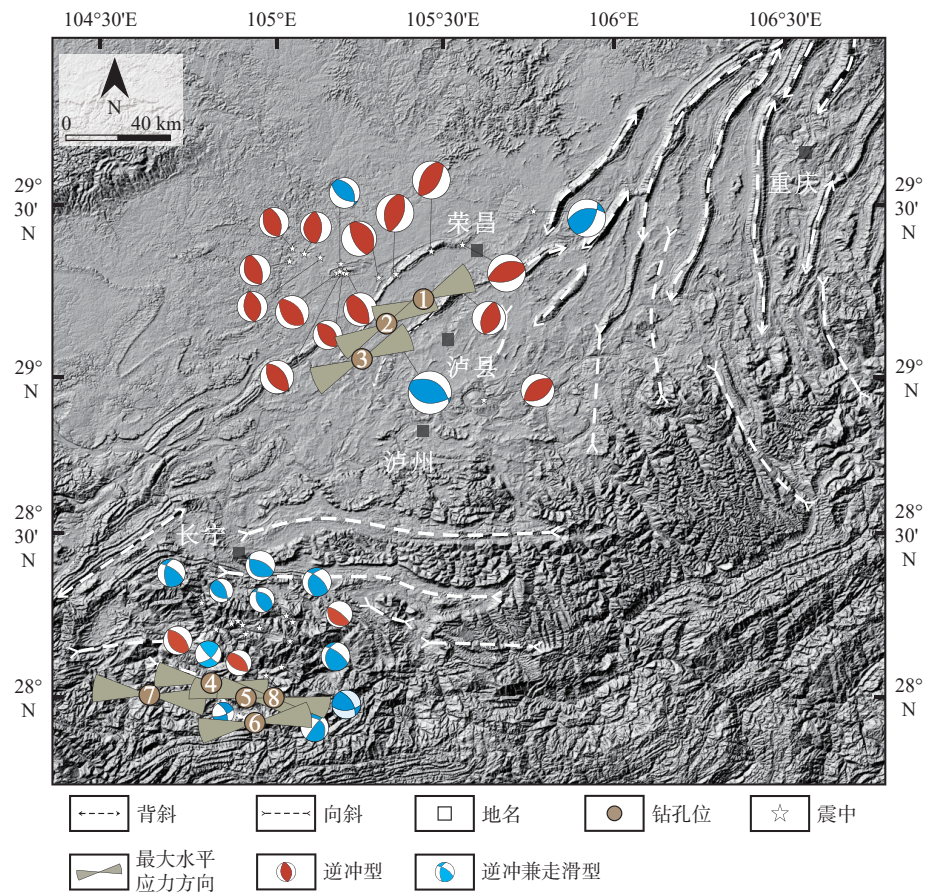


图 11 华莹山南段浅缘地震的震源机制解 (震源机制解数据来自易桂喜等, 2019; 胡幸平等, 2021; 李翠平等, 2022; 李欣蔚等, 2022)

Fig. 11 Focal mechanism solution of the southern section of the Huayingshan fault zone (The focal mechanism data are from Yi et al., 2019; Hu et al., 2021; Li et al., 2022; Li et al., 2022)

主应力方位为近东西向, 个别为北东东—南西西向; 南段南部地区的最大水平主应力方位为北西—南东向和北东—南西西向, 这意味着相隔较近的地震, 其震源机制解结果也可能相差较大(易桂喜等, 2020), 文中 N215 钻孔测得的最大水平主应力方向便与附近钻孔测得的应力方向有一定的差异。华蓥山断裂带南段南部地区的震源机制解 P 轴方向近水平, 反映该区域主压应力方向呈北东—南西向。四川盆地浅源地震研究表明, 地震空间分布明显受已有断裂的控制, 较大地震尤其是中强度地震为先存断裂活化, 并且多为隐伏断裂(李欣蔚等, 2022)。观察华蓥山南段地区的地震丛集发现, 地震事件主要分布在基底断裂断坡上下及向斜、背斜转折端等特殊部位(何登发等, 2019)。华蓥山断裂带也有部分地震事件在空间上靠近工业钻孔, 附近并无明显构造分布(王小龙等, 2011)。此类地震通常规模较小且震源深度主要分布在 2~3 km, 与工业注水深度相近。伴随着注水停止, 其周边地震也随之减少(朱航和何畅, 2014)。

目前, 国内外学者使用震源机制反演区域应力场(赵博等, 2013; Kapetanidis and Kassaras, 2019; 刘慧敏等, 2022; Nouri et al., 2023), 通过大量震源机制解资料便可以得到区域的主压应力方向。刘慧敏等(2022)通过区域应力张量阻尼反演方法得到四川盆地南缘的应力场空间分布, 结果表明四川盆地南缘应力场较为复杂, 华蓥山断裂带南段中部地区反演的最大主压应力存在近东西向、北西—南东向和北东—南西向, 南部地区最大主压应力方向与中部类似。华蓥山断裂带南段地震震源机制解反演的结果与此次研究获得最大水平主应力方向较为一致。Yang et al.(2022)利用长宁—兴文地区 2016—2021 年期间的 17 个站台地震数据测量了四川盆地东南缘地震的各向异性(数据从 0~10 km 深度范围生成), 将地震各向异性的快速方向与局部地质构造和应力场进行比较来确定各向异性的原因, 其中长宁地区(华蓥山断裂带南段南部)东南部的地壳各向异性快速方向为北东—南西向和北西—南东向, 结果与文中获得的最大水平主应力具有较好的一致性; 西北部的地壳各向异性快速方向主要为北东—南西向。长宁各地区地壳各向异性的快速方向并没有较好的一致性, 方向较为发散, 原因可归因于四川盆地东南缘复杂的构造背景, 表明该地区的地震剪切波分量受到台站附近的地质结构的影

响, 如褶皱、断裂等。

5 结论

(1) 华蓥山断裂带南段中部地区最大水平主应力方向呈北东东—南西西向, 与四川盆地南东—北西西向主应力存在一定差异。南段南部地区的最大水平主应力方向与该区域主应力方向较为一致, 仅 1 处钻孔的最大水平主应力呈北东—南西西向, 对比四川盆地应力场呈逆时针偏转。

(2) 华蓥山断裂带南段中部地区的最大水平主应力方向与盆地应力场并不一致, 其原因可能是华蓥山断裂带地壳密度突变产生的异常质量增加导致其上部附近地质力学不均, 从而改变了华蓥山断裂带南段中部地区 3 处钻孔的应力方向, 但这种影响程度的具体范围仍需要进一步研究。钻孔附近的构造也可能改变应力方向, 例如华蓥山断裂带南段中部和南部地区测得的最大水平主应力方向均与附近褶皱轴迹方向一致。

(3) 华蓥山断裂带南段地震的震源机制解表明, 即使地震震源的位置相近, 不同地震的应力方位也可能相差甚远。利用地震震源机制解反演四川盆地东南缘的应力场发现其应力方向较为发散, 这是由该区域复杂的局部构造和区域应力场综合作用的结果。今后研究的重点将是如何通过约束应力大小来实现华蓥山断裂带南段应力状态的深入解释。

References

- ARTYUSHKOV E V, 1973. Stresses in the lithosphere caused by crustal thickness inhomogeneities[J]. *Journal of Geophysical Research*, 78(32): 7675-7708.
- BASHMAGH N M, LIN W R, MURATA S, et al., 2022. Magnitudes and orientations of present-day in-situ stresses in the Kurdistan region of Iraq: Insights into combined strike-slip and reverse faulting stress regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 239: 105398.
- BASSETT D, ARNULF A, HENRYS S, et al., 2022. Crustal structure of the Hikurangi margin from SHIRE seismic data and the relationship between forearc structure and shallow megathrust slip behavior[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(2): e2021GL096960.
- BEHBOUDI E, MCNAMARA D D, LOKMER I, et al., 2022. Spatial variation of shallow stress orientation along the Hikurangi subduction margin: insights from in-situ borehole image logging[J]. *Journal of Geophysical Research*, 127(5): e2021JB023641.

- BELL J S, GOUGH D I, 1979. Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(2): 475-482.
- BROOKE-BARNETT S, FLOTTMANN T, PAUL P K, et al., 2015. Influence of basement structures on in situ stresses over the Surat Basin, south-east Queensland[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(7): 4946-4965.
- BRUDY M, ZOBACK M D, 1999. Drilling-induced tensile wall-fractures: implications for determination of *in-situ* stress orientation and magnitude[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(2): 191-215.
- CHATTERJEE S, MUKHERJEE S, 2023. Review on drilling-induced fractures in drill cores[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 151: 106089.
- CHEN N, WANG C H, CHEN P Z, et al., 2021. Re-analyzing the in-situ stress field in the right bank of the Baihetan hydroelectric power plant using the borehole breakout data[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 430-440. (in Chinese with English abstract)
- CHENG G X, JIANG B, LI M, et al., 2021. Structural evolution of southern Sichuan Basin (South China) and its control effects on tectonic fracture distribution in Longmaxi shale[J]. *Journal of Structural Geology*, 153: 104465.
- DENG B, LIU S G, LIU S, et al., 2009. Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6): 675-686. (in Chinese with English abstract)
- DENG K L, 1992. Formation and evolution of Sichuan basin and domains for oil and gas exploration[J]. *Atural Gas Industry*, 12(5): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- ELO S, PIRTTIJÄRVI M, 2013. The effect of lateral density variations on the state of stress in the uppermost crust in Finland[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 63: 131-137.
- FENG M, AN M J, WU Z H, et al., 2019. Focal mechanisms of earthquakes in Chongqing and geodynamical implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(2): 319-328. (in Chinese with English abstract)
- GAN W J, ZHANG P Z, SHEN Z K, et al., 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8): B08416.
- GAO Y, SHI Y T, CHEN A G, 2018. Crustal seismic anisotropy and compressive stress in the eastern margin of the Tibetan Plateau and the influence of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 63(19): 1934-1948. (in Chinese with English abstract)
- Griffin A G, 2019. Subsurface SHMAX determined from a borehole image log, onshore southern East Coast Basin, New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 62(2): 273-290
- GU Z D, WANG X, NUNNS A, et al., 2021. Structural styles and evolution of a thin-skinned fold-and-thrust belt with multiple detachments in the eastern Sichuan Basin, South China[J]. *Journal of Structural Geology*, 142: 104191.
- GUAN S W, LIANG H, JIANG H, et al., 2022. Characteristics and evolution of the main strike-slip fault belts of the central Sichuan Basin, southwestern China, and associated structures[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 252-264. (in Chinese with English abstract)
- HE D F, LU R Q, HUANG H Y, et al., 2019. Tectonic and geological background of the earthquake hazards in Changning shale gas development zone, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 993-1006. (in Chinese with English abstract).
- HEIDBACH O, RAJABI M, CUI X F, et al., 2018. The World Stress Map database release 2016: crustal stress pattern across scales[J]. *Tectonophysics*, 744: 484-498.
- HU X P, ZANG A, HEIDBACH O, et al., 2017. Crustal stress pattern in China and its adjacent areas[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 149: 20-28.
- HU X P, CUI X F, ZHANG G W, et al., 2021. Analysis on the mechanical causes of the complex seismicity in Changning area, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(1): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- HUANG H Y, HE D F, LI Y Q, et al., 2019. Determination and formation mechanism of the Luzhou paleo-uplift in the southeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 102-120. (in Chinese with English abstract)
- KANG H P, JIANG T M, ZHANG X, et al., 2009. Research on in-situ stress field in Jincheng mining area and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- KAPETANIDIS V, KASSARAS I, 2019. Contemporary crustal stress of the Greek region deduced from earthquake focal mechanisms[J]. *Journal of Geodynamics*, 123: 55-82.
- KRUSZEWSKI M, MONTEGROSSI G, PARISIO F, et al., 2022. Borehole observation-based in situ stress state estimation of the Los Humeros geothermal field (Mexico)[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 32: 100392.
- LI C P, TANG M Y, GUO W Y, et al., 2022. A preliminary study on 3D velocity structure of Rongchang and its adjacent area[J]. *Seismology and Geology*, 44(1): 205-219. (in Chinese with English abstract)
- LI J, LIU C, LIU H M, et al., 2021. Distribution and influencing factors of in-situ stress in complex fault tectonic region[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 50(1): 123-137. (in Chinese with English abstract)
- LI P W, CUI J W, WANG L J, et al., 2005. The determination of in-situ stress from wellbore breakouts in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 421-426. (in Chinese with English abstract)
- LI X W, ZHANG G W, XIE Z J, et al., 2022. Seismogenic mechanism of the 2021 $M_6.0$ Luxian earthquake and seismicity spatio-temporal characteristics around the source region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(11): 4284-4298. (in Chinese with English abstract)
- LI Z Q, RAN L H, CHEN G S, et al., 2002. Genetic geologic model and gas-bearing analysis of high and steep structures in East Sichuan[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(6): 605-609. (in Chinese with English abstract)
- LIN H, KANG W H, OH J, et al., 2020. Numerical simulation on borehole breakout and borehole size effect using discrete element method[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(5): 623-633.
- LIU H M, XIE Z J, LI H, et al., 2022. Source properties and characteristics of tectonic stress field before the September 16, 2021, Luxian M_s 6.0 earth-

- quake in the Sichuan Basin[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 42(11): 1138-1142, 1155. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z C, LYU X R, LI Y K, et al., 2016. Mechanism of faults acting on in-situ stress field direction[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(3): 387-393. (in Chinese with English abstract)
- LJUNGGREN C, CHANG Y T, JANSON T, et al., 2003. An overview of rock stress measurement methods[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8): 975-989.
- MANDAL P, 1999. Intraplate stress distribution induced by topography and crustal density heterogeneities beneath the south Indian shield, India[J]. *Tectonophysics*, 302(1-2): 159-172.
- MATIAS C, JOHN B, JOSE C, et al., 2021. Crustal folds alter local stress fields as demonstrated by magma sheet - Fold interactions in the Central Andes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 570: 117080.
- MEI L F, LIU Z Q, TANG J G, et al., 2010. Mesozoic intra-continental progressive deformation in western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan Provinces of China: evidence from apatite fission track and balanced cross-section[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 161-174. (in Chinese with English abstract)
- NELSON E J, MEYER J J, HILLIS R R, et al., 2005. Transverse drilling-induced tensile fractures in the West Tuna area, Gippsland Basin, Australia: implications for the in situ stress regime[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(3): 361-371.
- NIAN T, WANG G W, XIAO C W, et al., 2016. The in situ stress determination from borehole image logs in the Kuqa Depression[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34: 1077-1084.
- NOURI A, RAHIMI B, VAVRYČUK V, et al., 2023. Spatially varying crustal stress along the Zagros seismic belt inferred from earthquake focal mechanisms[J]. *Tectonophysics*, 846: 229653.
- OLIVA S J, EBINGER C J, RIVALTA E, et al., 2022. State of stress and stress rotations: quantifying the role of surface topography and subsurface density contrasts in magmatic rift zones (Eastern Rift, Africa)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 584: 117478.
- QIN Z P, LIU S G, DENG B, et al., 2013. Multiphase structural features and evolution of Southeast Sichuan tectonic belt in China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40(6): 703-711. (in Chinese with English abstract)
- RAJABI M, TINGAY M, KING R, et al., 2017. Present-day stress orientation in the Clarence-Moreton Basin of New South Wales, Australia: a new high density dataset reveals local stress rotations[J]. *Basin Research*, 29(S1): 622-640.
- SONG H B, LUO Z L, 1995. The study of the basement and deep geological structures of Sichuan basin, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2(3-4): 231-237. (in Chinese with English abstract)
- STRICKER K, SCHIMSCHAL S, MÜLLER B, et al., 2023. Importance of drilling-related processes on the origin of borehole breakouts-Insights from LWD observations[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 34: 100463.
- 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 S L, YAN D P, WANG C L, et al., 2011. Deformational Process from Thick-skinned to Thin-skinned Thrust in Xuefeng Mountain, South China: Evidence from Sangzhi-Anhua Tectonic Section[J]. *Geoscience*, 25(1): 22-30. (in Chinese with English abstract)
- TREŠL J, 1992. Stress field in the lithosphere caused by terrain topography and crustal density inhomogeneities[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 69(3-4): 294-298.
- WANG C H, 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. *Geological Review*, 60(5): 971-996. (in Chinese with English abstract)
- WANG X, JIANG W L, ZHANG J F, et al., 2022. Gravity anomaly and fine crustal structure in the middle segment of the Tan-Lu fault zone, eastern Chinese mainland[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 224: 105027.
- WANG X L, MA S L, LIE X L, 2011. Monitoring of injection-induced seismicity at Rongchang, Chongqing[J]. *Seismology and Geology*, 33(1): 151-156. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z J, WANG H C, DONG D, et al., 2018. Review of geophysical results of Huayingshan fault zone[J]. *Earthquake Research in Sichuan*(3): 6-12. (in Chinese with English abstract)
- WU X H, 2017. Application to in-situ stress evaluation based on cross-dipole logging data in southeast Sichuan block[D]. Qingdao: China University of Petroleum. (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)
- XIONG X S, GAO R, ZHANG J S, et al., 2015. Differences of structure in mid-lower crust between the eastern and western blocks of the Sichuan basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(7): 2413-2423. (in Chinese with English abstract)
- XU S R, XU J H, 1986. The new results of seismic exploration in Huayingshan fault zone[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 7(3): 39-48. (in Chinese with English abstract)
- YANG X, LI Y H, GE Z X, et al., 2022. Upper crustal anisotropy in the Southeastern Sichuan Basin, China from shear-wave splitting measurements[J]. *Tectonophysics*, 837: 229431.
- YI G X, LONG F, LIANG M J, et al., 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 M_{6.0} Sichuan Changning earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(09): 3432-3447. (in Chinese with English abstract)
- YI G X, ZHAO M, LONG F, et al., 2020. Geometry and tectonic deformation of seismogenic structures in the Rongxian-Weiyuan-Zizhong region, Sichuan Basin: insights from focal mechanism solutions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(09): 3275-3291. (in Chinese with English abstract)
- YU J S, TAN K, ZHANG C H, et al., 2019. Present-day crustal movement of the Chinese mainland based on Global Navigation Satellite System data from 1998 to 2018[J]. *Advances in Space Research*, 63(2): 840-856.
- ZHANG A, STEPHANSSON O, 2010. Crustal stress models[M]//ZANG A, STEPHANSSON O. Stress field of the earth's crust. Dordrecht: Springer.
- ZHANG Y Q, DONG S W, LI J H, et al., 2011. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan basin[J]. *Geology in China*, 38(2): 233-250. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, 2020. Seismogenic structures of the south Sichuan basin seis-

- mic zone and its neotectonic setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3161-3177. (in Chinese with English abstract).
- ZHAO B, GAO Y, HUANG Z B, et al., 2013. Double difference relocation, focal mechanism and stress inversion of Lushan $M_s7.0$ earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3385-3395. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO C J, 1984. On the characteristics, types and mechanism of vertical structural variations in Sichuan basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 5(2): 11-21. (in Chinese with English abstract)
- ZHU H C, TAO Z Y, 1994. A preliminary analysis on ground stress vs and topography morphology[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*(1): 29-34. (in Chinese with English abstract)
- ZHU H, HE C, 2014. Focal mechanism changing character of earthquake sequence induced by water injection: a case study of Changning Sequence, Sichuan Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(12): 1776-1782. (in Chinese with English abstract)
- ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M, et al., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8): 1049-1076.
- ### 附中文参考文献
- 陈念, 王成虎, 陈平志, 等, 2021. 利用钻孔崩落数据再认识白鹤滩右岸地应力场特征[J]. *地质力学学报*, 27(3): 430-440.
- 邓宾, 刘树根, 刘顺, 等, 2009. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(6): 675-686.
- 邓康龄, 1992. 四川盆地形成演化与油气勘探领域[J]. *天然气工业*, 12(5): 7-12.
- 冯梅, 安美建, 吴中海, 等, 2019. 重庆地区地震震源机制解及动力环境分析[J]. *地球学报*, 40(2): 319-328.
- 高原, 石玉涛, 陈安国, 2018. 青藏高原东缘地震各向异性、应力及汶川地震影响[J]. *科学通报*, 63(19): 1934-1948.
- 管树巍, 梁瀚, 姜华, 等, 2022. 四川盆地中部主干走滑断裂带及伴生构造特征与演化[J]. *地学前缘*, 29(6): 252-264.
- 何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等, 2019. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. *石油勘探与开发*, 46(5): 993-1006.
- 胡幸平, 崔效锋, 张广伟, 等, 2021. 长宁地区复杂地震活动的力学成因分析[J]. *地球物理学报*, 64(1): 1-17.
- 黄涵宇, 何登发, 李英强, 等, 2019. 四川盆地东南部泸州古隆起的厘定及其成因机制[J]. *地学前缘*, 26(1): 102-120.
- 康红普, 姜铁明, 张晓, 等, 2009. 晋城矿区地应力场研究及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 28(1): 1-8.
- 李翠平, 唐茂云, 郭卫英, 等, 2022. 荣昌及周边三维速度结构初步研究[J]. *地震地质*, 44(1): 205-219.
- 李静, 刘晨, 刘惠民, 等, 2021. 复杂断层构造区地应力分布规律及其影响因素[J]. *中国矿业大学学报*, 50(1): 123-137.
- 李朋武, 崔军文, 王连捷, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔钻孔崩落与现场应力状态的确定[J]. *岩石学报*, 21(2): 421-426.
- 李欣蔚, 张广伟, 谢卓娟, 等, 2022. 2021年四川泸县 $M6.0$ 地震发震机理及地震活动时空演化特征[J]. *地球物理学报*, 65(11): 4284-4298.
- 李忠权, 冉隆辉, 陈更生, 等, 2002. 川东高陡构造成因地质模式与含气性分析[J]. *成都理工学院学报*, 29(6): 605-609.
- 刘慧敏, 谢祖军, 李赫, 等, 2022. 2021年四川泸县 $M_s6.0$ 地震震源性质及震前区域应力场特征[J]. *大地测量与地球动力学*, 42(11): 1138-1142, 1155.
- 刘中春, 吕心瑞, 李玉坤, 等, 2016. 断层对地应力场方向的影响机理[J]. *石油与天然气地质*, 37(3): 387-393.
- 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等, 2010. 湘鄂西-川东中生代陆内递进扩展变形: 来自裂变径迹和平衡剖面的证据[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 35(2): 161-174.
- 覃作鹏, 刘树根, 邓宾, 等, 2013. 川东南构造带中生代多期构造特征及演化[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(6): 703-711.
- 宋鸿彪, 罗志立, 1995. 四川盆地基底及深部地质结构研究的进展[J]. *地学前缘*, 2(3-4): 231-237.
- 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.
- 汤双立, 颜丹平, 汪昌亮, 等, 2011. 华南雪峰山薄皮-厚皮构造转换过程: 来自桑植-安化剖面的证据[J]. *现代地质*, 25(01): 22-30.
- 王成虎, 2014. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. *地质论评*, 60(5): 971-996.
- 王小龙, 马胜利, 雷兴林, 等, 2011. 重庆荣昌地区注水诱发地震加密观测[J]. *地震地质*, 33(1): 151-156.
- 王赞军, 王宏超, 董娣, 等, 2018. 华蓥山断裂带的物探成果综述[J]. *四川地震*(3): 6-12.
- 武小何, 2017. 正交偶极测井资料在川东南区块地应力评价中的应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 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.
- 熊小松, 高锐, 张季生, 等, 2015. 四川盆地东西陆块中下地壳结构存在差异[J]. *地球物理学报*, 58(7): 2413-2423.
- 徐世荣, 徐锦华, 1986. 华蓥山断裂带地震勘探新成果[J]. *石油学报*, 7(3): 39-48.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等, 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_{s6.0}$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. *地球物理学报*, 62(09): 3432-3447.
- 易桂喜, 赵敏, 龙锋, 等, 2020. 四川盆地荣县-威远-资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示[J]. *地球物理学报*, 63(09): 3275-3291.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 等, 2011. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. *中国地质*, 38(2): 233-250.
- 张岳桥, 2020. 四川盆地南部地震区发震构造及其新构造背景[J]. *地质学报*, 94(11): 3161-3177.
- 赵博, 高原, 黄志斌, 等, 2013. 四川芦山 $M_s7.0$ 地震余震序列双差定位、震源机制及应力场反演[J]. *地球物理学报*, 56(10): 3385-3395.
- 赵从俊, 1984. 四川盆地构造垂向变异特征类型及其机理探讨[J]. *石油学报*, 5(2): 11-21.
- 朱航, 何畅, 2014. 注水诱发地震序列的震源机制变化特征: 以四川长宁序列为例[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 39(12): 1776-1782.
- 朱焕春, 陶振宇, 1994. 地形地貌与地应力分布的初步分析[J]. *水利水电技术*(1): 29-34.