



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308228

引用格式:郑礼洋,万永革.广西及邻区构造应力场分区研究[J].科学技术与工程,2025,25(6):2227-2236.

Zheng Liyang, Wan Yongge. Tectonic stress field in Guangxi and surrounding areas[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2227-2236.

天文学、地球科学

广西及邻区构造应力场分区研究

郑礼洋^{1,2,3}, 万永革^{1,2*}

(1. 防灾科技学院地球科学学院, 三河 065201; 2. 河北省地震动力学重点实验室, 三河 065201;
3. 成都理工大学地球物理学院, 成都 610059)

摘 要 广西位于构造相对稳定的华南地块,仪器观测的地震活动相对较弱,观测资料少导致该地区的地壳应力场等相关研究较为薄弱。2019 年该区发生了北流 5.2 级地震序列,积累了相当的震源机制资料,改善了该地区的震源机制资料较少的现状,本文研究搜集该地震的震源机制资料并整理了前人的相关资料,对广西及邻区的震源机制类型进行统计,并采用网格搜索法反演了该区域应力场总场和分区应力场。结果表明:该地区的震源机制解以走滑型为主,从 NW 往 ES 方向的分布看,逆断型震源机制解逐渐增多,正断型震源机制解逐渐减少;总体应力场的主压应力轴 NW-SE 向,主张应力轴为 NE-SW 向,且两轴接近水平,整体应力场为走滑型;西部地区主压应力轴方向为近 N-E 向,往东部主压应力轴方向逐渐向 NW-SE 方向变化,使得各分区主压应力方向在整体区域上呈扇形分布特征;根据各分区应力场结果得出:a 区域内最易产生 NE-SW 向和 NW-SE 向的断裂,断裂类型以走滑型为主;b 区域最易产生 NNE-SSW 向和 NWW-SEE 向断裂,其中 NNE-SSW 向断裂更偏向于逆走滑型,NWW-SEE 向断裂更偏向于走滑型;c 区域最易产生正 N-S 向和正 E-W 向断裂,受周围区域断裂延伸影响,该区域的主要断层并未体现这一特征,断裂类型以逆走滑型和逆断型为主;d 区域最易产生 NW-SE 向和 NE-SW 向断裂,其中 NW-SE 向断裂更偏向于逆断型,NE-SW 向断裂更偏向于走滑型。

关键词 广西北流地震;震源机制解;构造应力场;主压应力;主张应力

中图法分类号 P315.2;

文献标志码 A

Tectonic Stress Field in Guangxi and Surrounding Areas

ZHENG Li-yang^{1,2,3}, WAN Yong-ge^{1,2*}

(1. College of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;
2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, China;
3. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

[Abstract] Guangxi is located in the South China block, its structure is relatively stable, the seismic activity observed by the instrument is relatively weak. The little observation data leads to weak research on the crustal stress field in the area. In 2019, the Beiliu earthquake sequence occurrence in this area leads to the accumulation of considerable focal mechanism data. The focal mechanism data were collected in Guangxi and its adjacent areas. Using the grid search algorithm, the stress field in overall region and subregions were inverted. The results show as follows. The statistics of the focal mechanism in this area is mainly strike-slip type, and from the distribution of NW to ES, the focal mechanism of the reverse type gradually increases, and the focal mechanism of the normal fault type gradually decreases. The principal compressive stress axis of the overall stress field is NW-SE direction, the principal extensional stress axis is NE-SW direction, both of them are close to horizontal, which representing strike-slip type. The direction of the principal compressive stress axis in the western region is close to the N-E direction, and that in the east gradually changes to the direction of NW-SE, which makes the pattern of the compressive stress direction present a fan-shaped in the overall area. Based on the stress field analysis of subregions: NE-SW and NW-SE faults are easily generated in region-a by primarily of strike-slip type. NNE-SSW and NWW-SEE faults are easily generated in region-b, with NNE-SSW faults more towards reverse strike-slip type and NWW-SEE faults tending towards strike-slip type. Pure azimuth N-S and E-W faults are easily generated in region-c, but its main fault properties are not reflected due to the influence of surrounding fault extensions, with faults mainly of reverse strike-slip and reverse fault types.

收稿日期: 2023-10-23; 修订日期: 2024-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(42174074,41674055,42364005);河北省教育厅科学研究项目(ZC2021213)

第一作者: 郑礼洋(2000—),男,汉族,重庆人,硕士研究生。研究方向:区域地球物理反演及应用。E-mail:zly66078@163.com。

*通信作者: 万永革(1967—),男,汉族,河北馆陶人,博士,研究员。研究方向:地震学和地球动力学。E-mail:wanyg217217@vip.sina.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

NW-SE and NE-SW faults are easily generated in region-d, with NW-SE faults more towards reverse fault and NE-SW faults tending towards strike-slip.

[**Keywords**] the Guangxi Beiliu earthquake sequence; focal mechanism; tectonic stress field; principal compressive stress; principal extensional stress

广西位于华南地块,该地块曾经历加里东期、印支期和燕山期 3 个时期的地块运动^[1]。与华北和西部地区相比,华南地块的构造较为稳定,其地震活动性也相对较低,然而由于桂东南地区受灵山东地震带影响,地震频率和强度较高,曾在 1936 年于当地灵山县发生过广西有史以来最大的 6 $\frac{3}{4}$ 级地震,因此对广西地区的构造应力场进行计算对于在该区域的地震活动、矿产资源分布以及动力学研究都有着十分重要的意义。

关于目前的地壳应力场的求解大致分为以下 3 类。第一类是根据实地测量地质断层的擦痕数据获得构造应力场的方向,例如,张杰等^[2]运用该方法获取的数据具有较高的精度,但断层滑动产生的擦痕地质年代跨度大,发生时间难以确认,在用于研究现今的地壳应力场中不算最合适的选择。第二类则在研究区域内布置测点进行实时的应力测量,例如,马广庆等^[3]和乔二伟等^[4]运用该类方法能够直接测量出当今的地壳应力场方向,且在传统测量方法中(如钻孔崩落法、水压致裂法等)还能得到应力张量的具体大小,但只能局限于获取地壳浅部的应力数据,无法得到深部的地壳应力场,对深部应力的情况还需结合当地的震源机制解数据进行解释^[3]。第三类是利用震源机制解数据求解应力场。由于地壳应力场与当地地震的孕育和破裂模式都密切相关,地震数据都来源于现代地震监测技术,其得到的震源机制解的节面中蕴含着地震破裂时断层的滑动信息,能够较好地反映现今地壳应力场特征。早期 Michael^[5-6]就提出利用震源机制解数据反演出应力张量的大小和方向,以及后续在此类方法上不断改进的应力场反演方法^[7-8]。

本文研究采用的上述的第三类方法得到研究区域的应力场结果。相较于传统的将非线性问题转化为线性问题反演应力张量的算法,本文研究采用网格搜索法^[9-11]反演得到研究区域的构造应力张量方向和相对大小。该方法避免了最小二乘法对初始解的依赖问题,同时在反演过程中可以根据每个震源机制解数据的可靠程度赋予不同的权重,使得反演结果更加精确。2019 年 10 月 12 日在北流区域发生 5.2 级地震,由于该区域布置了短周期密集台阵,黄强强等^[12]通过地震波数据得到了大量震源机制,为该地区的震源机制和应力场研究提供了

大量新资料。本文研究整理了广西及邻区的震源机制的全部资料,相较于文献[13]中采用单一机构的震源机制数据,本文研究利用震源机制中心解,对同一地震出现多个机构得出的震源机制解的情况求取一个中心解作为最终应力场反演所使用的震源机制数据,提升了初始震源机制解的数据的可靠性。对震源机制的分类统计采用震源机制水平应变花的面应变为标准进行分类的方法^[14]。以面应变的物理机制进行震源机制的划分,相较于传统“Zoback”^[15]通过 3 个应力主轴的倾伏角范围进行震源类型划分的方法,避免了在分类中会出现不确定型的问题。震源机制解的分类为后续应力场反演中剔除难拟合数据提供了便利。

由于广西及邻区地震活动相对较弱,地震台网在广西地区较疏,导致该地区的震源机制资料较少,限制了对广西及邻区地壳应力场的精细研究。由于这些客观的因素,使得目前该区域的应力场研究十分的稀少,且研究成果年代较久,用于当今的相关研究缺乏一定的参考性,在前人有限的相关研究中,蒋维强等^[16]利用 $\bar{S}$ 、 $\bar{P}$ 最大振幅比法、P 波初动法、格点尝试法得到的一系列震源机制解结果的优势方向得出广西地区的构造应力场的主压应力轴方向为 NW-SE 向。李细光等^[17]通过分析该地的震源机制和地壳地幔活动得出广西地区桂西、北方向为 NW 向,桂东及沿海为 EW 向,北部湾和雷琼地区为 SN 向,可见该区域的构造应力相对复杂,其应力场特征具有一定的分区性,在前人研究中都是采用震源机制解直接进行应力场的分析研究,并未使用震源机制解进行进一步的反演工作。本文研究反演得到该研究区域的整体应力场,再进行分区域反演,得到最新的非均匀应力场特征,补充了该区域研究的空白,并分析研究区域的应力变化趋势及对研究区域的断层性质进行分析。

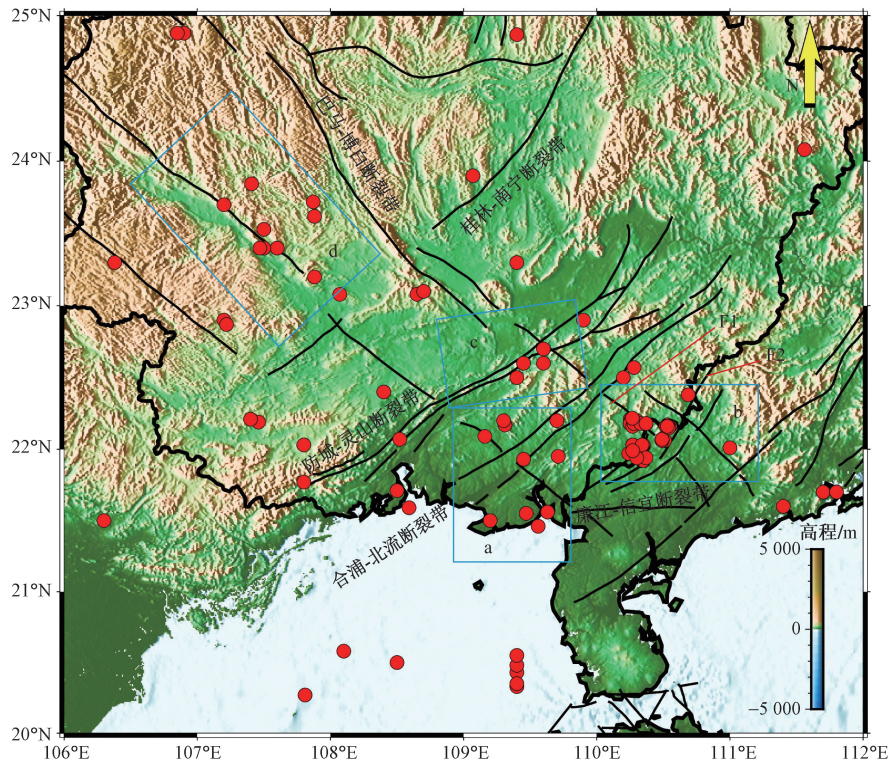
1 地质构造背景

本文研究区域范围为 20°N ~ 26°N、106°E ~ 112°E。研究区内大量 NE 向逆冲褶皱在中生代晚期形成,华南地区在该时期受到左旋挤压,来源于太平洋对欧亚板块的 NNW 向俯冲,从而形成压扭剪切性质的 NE 向左旋走滑大断裂^[1],如桂林-南宁断裂带、防城灵山断裂和合浦-北流断裂带,其中防城-灵山断裂带和合浦-北流断裂带是研究区十分重要的两

条 NE 向的断裂带。中生代早期,由于库拉板块向北俯冲,受到 SN 向的挤压,使区内的 NE 向断裂得以进一步发展^[18]。并有一系列相互平行的 NW 向断裂在晚期垂直于防城-灵山、合浦-北流两条 NE 向主干断裂范围内发育。防城-灵山断裂带是一条显著的地震构造带,横跨桂东南地区,具有较强的地震活动性。这条断裂带被进一步细分为防城段、平吉盆地段、灵山段和石南段^[19]。NW 向断裂则有百色-合浦断裂带、巴马-博白断裂带,这些断裂带在历史上都曾发生过多次六级以上的强震,这两个方向的断裂共同构成了广西 X 形的活动性断裂格局^[20]。北流地区及其周边地带,地质构造复杂,分布着多组断裂带,这些断裂带为应变能的积聚提供了有利条件,使得该区域成为中小地震频发的地带^[21],如图 1 所示。根据研究区域地震数据集中程度、断层交汇应力应变聚集的部位等,可以将研究区域划分为 4 个子区域进行更细致的研究这些子区域的地质构造情况如图 1 所示。

a 区上发育有合浦-北流断裂带,其总体走向为 40°~60°,倾角为 70°~85°。该断层在不同区段正逆性不同,但具有长期走滑的特点^[1],该断层以博

白为界,分为东支的陆川-岑溪断裂和西支的合浦-博白断裂,该研究区域则是以西支为主,西支倾向 NW,倾角约为 70°,该断裂最后一次较强的错动发生在早更新世中晚期,之后断裂活动性减弱^[22];广西地区有多个共轭走滑断裂发育,b 区位于这种构造系统的东南端,这里穿越了两组主要的大断裂带:一组是 NE-SW 走向的廉江-信宜断裂带,另一组是 NW-SE 走向的巴马-博白断裂带。这两条断裂带在 b 区内交汇,断裂带交汇处易发生应力集中和断层的闭锁,故地震多发^[12]。北流发生的 5.2 级地震位于一个具有多条断裂带的区域,这些断裂带主要分为 NE 和 NW 两个方向。其中,石窝断裂(作为巴马-博白断裂的分支)沿 NW 方向延伸,而新丰断裂则沿 NE 方向分布^[23];c 区为 1936 年灵山 M6 $\frac{3}{4}$ 强震的发震区域,极震区呈 NE 展布^[24]。研究区中防城-灵山断裂带的北东段可分为灵山段(东支)和石塘段(西支),两支之间发育有多条 NW 向断裂^[25],其中灵山段自南向北东延伸,止于寨圩被 NE 向寨圩断层错断。灵山段以佛子镇向北段具有晚更新世以来的活动痕迹^[19],防城—灵山断裂带和巴马—博白断裂带交汇于灵山区域,构造运动强烈,形成



边界线数据来源于 2024 版国家地理信息公共服务平台,审图号为 GS(2024)0650 号;a 区位于百色-合浦断裂带;b 区位于巴马-博白断裂带最南端和信宜-廉江断裂带交汇处;c 区位于防城-灵山断裂带东部和巴马-博白断裂带南部交汇处;d 区被百色-合浦断裂带中部穿过;红点为本研究用地震数据的震中位置;F1 为石窝断裂;F2 为新丰断裂

图 1 广西及周围区域活动断层和震中位置的分布

Fig. 1 The active faults and epicenters in Guangxi and surrounding areas

强震构造区;d 区有百色-合浦断裂带穿过,该断层活动性较强,在第三纪呈左旋剪切运动形成串珠状拉分型或尾张型盆地,在第四纪仍有活动^[26],该地区在近 100 年来发生过多起 4~5 级地震。

2 震源机制解数据

本文研究搜集整理广西地区的震源机制资料如下。蒋维强等^[16]在灵山及邻区通过 $\bar{S}$ 最大振幅比法、 $\bar{P}$ 最大振幅比法以及利用 P 波初动得出的地震震源机制解;李细光等^[17]得到的灵山 6 $\frac{3}{4}$ 地震后中强地震震源机制解;林纪曾等^[27]的东南沿海地区震源机制解;钟新基^[28]分析早期地震仪器记录得出的震源机制;赵毅^[29]得出的 1977 年平果县 5.0 级地震震源机制解;覃修婷^[30]在研究该区域中使用的震源机制解;王小娜等^[31]得到的北流 5.2 级主震和 4.2 级前震震源机制;黄强强等^[12]北流 5.2 级地震序列的震源机制。由于以上文献中的某些震源机制缺少地壳应力场求解所需的滑动角,本文研究利用原数据给出的压缩轴(P 轴)和拉张轴(T 轴)的走向和倾伏角计算得到对应震源机制解节面的走向、倾角和滑动角^[32],并与原数据节面的走向、倾角进行对比,剔除掉与原数据差距 $\geq 20^\circ$ 的数据结果。得到地震的震源机制解后,对于同一地震有多篇文献给出不同震源机制结果的情况,通过万永革^[13]的同一地震不同震源机制中心解的方法进行处理。最终得到 148 个震源机制结果,其地震事件的震中在研究区域的具体分布如图 1 所示。

在对 148 个震源机制进行分类时,依据震源机制水平应变花的分类方法^[14],将其分为以下 5 类:①正断型地震占比较低,为 9 个,约占总体的 6.08%;②正走滑型地震略多于正断层地震,为 10 个,占比 6.76%;③走滑型地震数量最多,达到 96 个,占比 64.86%;④逆走滑型地震有 17 个,占比 11.49%;⑤逆断型地震有 16 个,占比 10.81%。得出研究区域的震源机制分类结果(图 2),震源机制类型的空间分布(图 5)。对各区域内的震源机制解类型统计(表 1)

可以看出整个区域的震源机制中,走滑类型的震源机制解占比最高,整个区域的总体震源机制类

型以走滑型为主。在分区统计结果上看,d 区具有逆断性质的断层共有 4 个(约占 36.36%),不含有正断性质的断层;b 区具有逆断性质的断层共有 15 个(约占 19.48%),正断性质共有 11 个(约占 14.28%);a 区具有逆断性质的断层共有 2 个(约占 20%),正断性质共有 2 个(约占 20%)可以初步看出该研究区域的逆断性质的震源机制从 NW 到 SE 向有逐渐减少的趋势,而正断层有逐渐增长的趋势。

3 应力场反演及方法

3.1 应力场反演方法

本文研究采用网格搜索法^[9-11],即在设定的网格空间中,计算出其切应力方向与各个震源机制解的节面滑动方向的差值最小的理论应力模型,最终综合所有实际震源机制数据得到一个平均残差最小的应力模型。搜索网格大小为 $1^\circ \times 1^\circ \times 1^\circ \times 0.01$,搜索范围为 $0 \leq \Phi \leq 360^\circ, 0 \leq \delta \leq 90^\circ, 0 \leq \psi \leq 360^\circ$ 和 $0 \leq R \leq 1$;其中 Φ, δ, ψ 为 3 个旋转角参数,

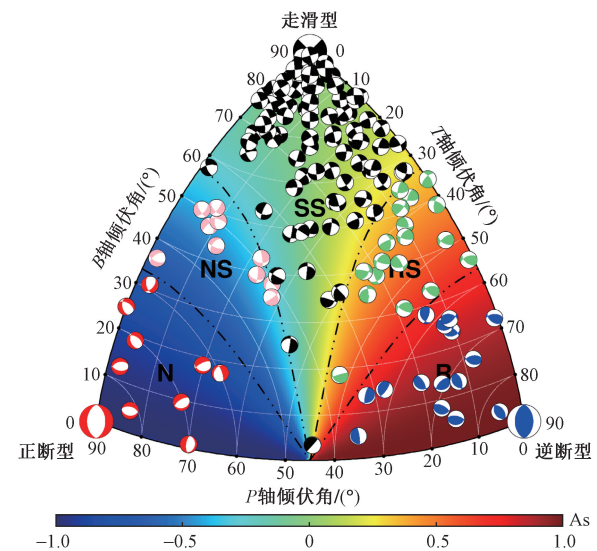


图 2 研究区域的震源机制分类在球面三角形中的表示

Fig. 2 Representation of the focal mechanism classification of the study area in a spherical triangle

表 1 分区震源机制解类型统计

Table 1 The statistics of focal mechanism type in subregions

分区	震源机制解总数	震源机制解类型数量				
		正断型	正走滑断型	走滑断型	逆走滑断型	逆断型
a	10	0	2(20%)	6(60%)	0	2(20%)
b	77	7(9.09%)	4(5.19%)	51(66.23%)	7(9.09%)	8(10.39%)
c	5	0	0	5(100%)	0	0
d	11	0	0	7(63.64%)	2(18.18%)	2(18.18%)

注:括号内数值为占比。

用于表达3个主应力轴的方向, R 为应力形因子(或应力比),用于表示3个主应力的相对大小关系。由于该反演要求得以上4个参数,所以需要至少使用4个地震震源机制资料进行反演。

由于大震所得到的震源数据约束性较好,小震的数据精度较低,为保证结果的准确性,本文研究将以式(1)的方法来分配某研究区域内不同震级的震源机制的权重,即

$$\omega = e^{r/D^2}$$

(1)

$$r = M - M_{\min}$$

(2)

式中: ω 为权重,计算某区域的应力场时,该区域震级最小的地震权重设为1,震级最大的地震权重设为10; r 为相对震级大小,即为加权地震震级与该区最小地震震级的差值; D 为震级衰减系数,可以通过该区震级最大值和最小值求得的 r 来解出 D 的值。

由于黄强强等^[12]的北流5.2级地震序列没有给出震级,本文研究统一将其权重设为1。

本文研究通过Wan等^[11]所编制的程序进行应力场的计算,得到张轴、中间轴、压轴的走向、倾伏角、应力比 R ,并给出其95%的置信范围以及剪应力最大的两个节面的走向、倾角、滑动角。

$$R = \frac{S_2 - S_3}{S_1 - S_3}$$

(3)

式(3)中: S_1 、 S_2 、 S_3 分别为应力张量的3个本征值,且还有两个约束条件: $S_1 + S_2 + S_3 = 0$ 即只考虑偏应力张量; $J_2 = -(S_1S_2 + S_2S_3 + S_1S_3) = 1$,表示应力张量的第二不变量 J_2 为常数。

由式(3)可得到

$$S_1 = \sqrt{\frac{(2-R)^2}{3(R^2-R+1)}}$$

(4)

$$S_2 = \frac{2R-1}{2-R}S_1$$

(5)

$$S_3 = \frac{-(1+R)}{2-R}S_1$$

(6)

由上述关系式(3)~式(6)得知,当 $R=0.5$ 时,中间轴应力的 S_2 为0, R 自0.5逐渐增大到1的过程中,中间轴应力的 S_2 值逐渐接近于张轴应力的 S_1 ,即 R 越接近1,中间轴也越体现出张应力的性质;同理当 R 从0.5逐渐向0减小,中间轴就会越表现出压应力的性质。因此,当 R 十分接近0或1时,可以看作该应力模型除了受到两个主压张应力轴方向的应力,还受到一个方向与中间轴一致的压应力或张应力。

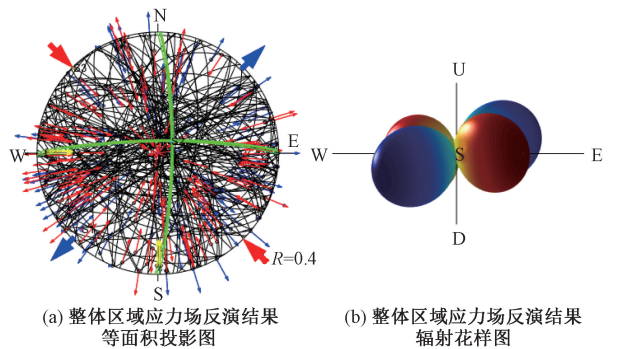
3.2 应力场反演结果

为分析广西地区分区应力场相对于整体应力场的差别,首先根据3.1节的方法,使用研究区域所有的震源机制解数据对研究区域的整体进行了应

力场反演(图3),得到整体区域的主压应力轴走向315.09°,倾伏角0.83°;中间轴的走向49°,倾伏角78°;主张应力轴的走向224.91°,倾伏角11.97°,其各参数的不确定度范围如下:主压轴的不确定范围为走向314.09°~316.09°,倾伏角0.62°~1.04°;中间轴走向48°~50°,倾伏角76°~78.5°;主张应力轴走向223.91°~225.91°,倾伏角9.97°~12.47°。

该地区的总体应力场的主压应力方向为NW-SE向,主张应力方向为NE-SW向,与许忠淮等^[33]采用其他方法和资料得到的结果大体一致,表现了青藏高原在受到印度板块的北向推挤而向东向逃逸的过程中,受到华南地块的阻挡,被迫向东南方向转向,在广西地区表现东南-西北方向的挤压,并且该地区的主压和主张应力轴几乎水平,导致这里发生的地震具有总体表现为走滑的震源机制类型。

根据图1的区域划分,对各分区的应力场进行反演,图4为根据4个分区内的震源机制资料对各区分区进行应力场反演的结果,得到的各区域主压张轴在地图上的水平投影方向绘于图5。应力场的详细参数如表2和表3所示。



在图3(a)中,绿色弧线表示的是在95%置信度下反演得到的应力模型最大剪应力的两个节面;黄色小箭头标示了这两个节面的滑动方向;蓝色小箭头和红色小箭头分别代表了观测数据和模型预测的滑动方向;大箭头中,红色标识主压应力的方向,蓝色标识主张应力的方向;四周给出了东南西北(ESWN)4个方向,右下角给出了应力比 R 的值;在图3(b)中,红色和蓝色部分分别表示压应力和张应力的大小和方向,以及东南西北上下(ESWNUD)的6个方向轴

图3 整体构造应力场反演结果
Fig. 3 Inversion result of the overall tectonic stress field

表2 分区应力张量的最大剪应力节面
Table 2 The maximum shear stress nodal plane for the stress tensor in subregions

区号	节面Ⅰ/(°)			节面Ⅱ/(°)		
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
a区	211.7	89.0	-29.0	302.3	61.0	-178.9
b区	11.9	88.3	56.0	279.4	34.1	177.0
c区	91.1	87.2	-177.1	0.9	87.1	-2.8
d区	304.8	87.2	135.1	37.6	45.1	4.0

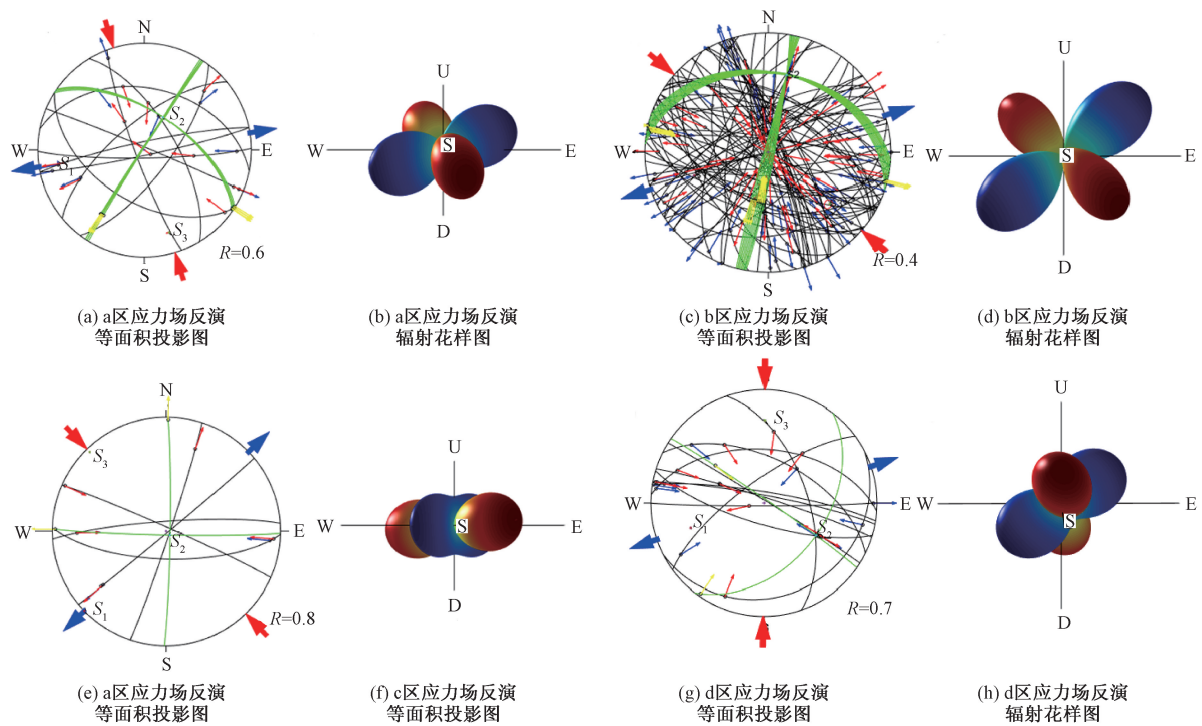
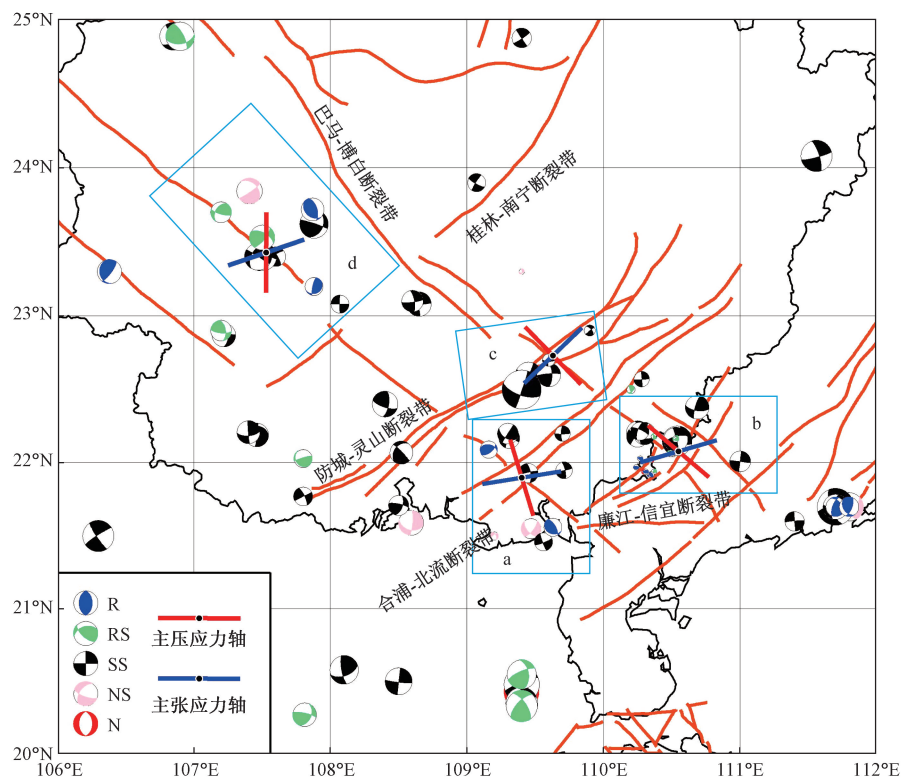


图4 各区域构造应力场反演结果

Fig.4 Inversion results of the tectonic stress fields in subregions



边界线数据来源于 2024 版国家地理信息公共服务平台,审图号为 GS(2024)0650 号;R 为逆断型;RS 为逆走滑型;SS 为走滑型;NS 为正走滑型;N 为正断型;红色长棒表示主压应力轴的方向;蓝色长棒表示主张应力轴的方向

图5 震源机制分布以及各分区主压应力及主张应力的方向

Fig.5 The distribution of focal mechanism and the direction of principal compressive stress and extensional stress in subregions

表 3 分区应力张量的各轴参数
Table 3 Parameters of principal stress axis for stress tensors in subregions

区号	主压轴		中间轴		主张轴		R
	走向/(°)	倾伏角/(°)	走向/(°)	倾伏角/(°)	走向/(°)	倾伏角/(°)	
a 区	163. 17 (162. 67 ~ 165. 18)	20. 77 (20. 27 ~ 21. 46)	30. 00 (29. 50 ~ 32. 00)	61. 00 (60. 50 ~ 61. 50)	260. 80 (260. 30 ~ 262. 80)	19. 31 (18. 81 ~ 19. 81)	0. 6
b 区	130. 54 (128. 14 ~ 134. 84)	34. 43 (32. 20 ~ 38. 03)	13. 00 (12. 50 ~ 13. 50)	34. 00 (33. 00 ~ 34. 50)	252. 05 (251. 55 ~ 252. 55)	37. 32 (36. 32 ~ 37. 82)	0. 4
c 区	316. 00 (315. 50 ~ 316. 50)	4. 00 (3. 50 ~ 4. 50)	135. 00 (134. 50 ~ 135. 50)	86. 00 (85. 50 ~ 86. 50)	226. 00 (225. 50 ~ 226. 50)	0. 07 (- 0. 43 ~ 0. 57)	0. 8
d 区	0. 42 (- 0. 08 ~ 0. 92)	27. 64 (27. 14 ~ 28. 14)	122. 00 (121. 50 ~ 122. 50)	45. 00 (44. 50 ~ 45. 50)	251. 13 (250. 63 ~ 251. 63)	32. 25 (31. 75 ~ 32. 75)	0. 7

注:括号内数值为不确定范围。

从得到的整体应力场和分区应力场的结果上看,c 区与整体的应力场结果最一致,也是位于整个研究区域相对中心的位置。位置偏西的 a 区和 d 区主压应力轴方向逐渐向北偏转,与整体应力场得到的结果差距逐渐增大,在 d 区主压应力轴几乎变化为正 N 向。而位置偏东南的 b 区的主压应力方向相较于整体则是向东偏移。由此可以看出,整个区域由西向东主压应力轴方从 N 向逐渐往 E 向变化。

4 动力学分析

上述结果表明,a 区主压应力方向为 NNW-SSE 向,该区靠近东南沿海区域,存在热点轨迹火山岩及地幔柱^[34],其应力场有可能是由于受到海南地幔柱及南海扩张的影响,形成的 NS 向的挤压^[35-36],再叠加该地区的总体应力场,使该地区呈现了主压应力轴和主张应力轴分别在 NNW-SSE 方向和 NEE-SWW 方向。根据应力场的结果,可以得到走向分别为 SW 向和 NW 向的最大剪应力节面(表 2),由于主压和主张应力轴的倾伏角接近水平,使得两个节面性质均为走滑型,该应力结果得到的最大剪应力节面 I 和节面 II 产状分别符合该区域合穿过的合浦-北流断裂(走向 40°~60°,倾角 70°~85°)和百色-合浦断裂(走向为 NW 向,倾角 60°~70°)具有长期走滑活动的特点^[1]。

b 区主压应力方向为近 NW-SE 向,与李细光等^[17]得到的现代构造应力场主压轴方向基本一致。主压应力轴和主张应力轴具有一定的倾伏角,表 2 得到最优节面 I 的滑动角为 56°,使得走向为 NNE 向的节面 I 为斜滑逆断层。而与石窝断裂相交汇的新丰断裂(图 1)根据李冰溯等^[37]对其第四纪晚期断裂面上的擦痕进行观察认为其活动性为逆断,该断层走向 NNE 近正 N 向,倾向 SE 向,这与节面 I 的结果相符合;同理得到节面 II 为 NWW 走向的右旋走滑断层。这与该区域 NW 走向的石窝断裂在最新一期具有走滑性质的运动相符合。

c 区主压应力方向为近 NW-SE 向;主张应力轴方向 SEE-NWW 向,两个主轴的方向与蒋维强等^[16]在此处所做的结果相差不大;唐永等^[38]通过断层面法和擦痕同样得出的灵山区域最大主应力向为 NW 向的结论,其最大剪应力的两个节面走向为正 N-S 向和正 E-W 向,这与当地两条交汇的 NW 向和 NE 向的主要断裂构造特征不太相符,其原因可能是该区域位于广西内部,其防城-灵山断裂带和巴马-博白断裂以周围区域发育向 c 区延伸,从而影响了 c 区的断裂构造格局,这或许也是当地应变能容易积聚,形成强震区的原因。其应力比值(R)为 0.8,可以看出除主张应力轴以外,近垂直向的中间轴方向(走向 135°,倾伏角 86°)也表现出一定的拉张分量,如图 4(f)所示,因此该区应力场表现为逆走滑型,这与当地灵山断裂带早期发生北西向的逆冲推覆,后又受到东部云开地体 SE-NW 向挤压构造应力的作用使灵山周围地区进一步抬升的地质概况吻合。

d 区主压应力方向为近 N-S 向;主张力轴方向 NEE-SWW 向,这与蒋维强等^[39]在该区通过统计小震震源机制得到的应力场方向特征相一致。R = 0.7 表明中间轴有一定的拉张性质[图 5(h)],主压张轴倾伏角均为 30°左右,且主压应力轴略小于主张应力轴,使得最大剪应力节面 I 为右旋斜滑逆断层,在该区域内有实际的百色-合浦断裂相对应,该断层为走向 NW,倾角 60°~70°的逆冲大断裂^[27],同时该节面右旋走滑的性质与徐文龙等^[40]在该区通过观测微断层位移得到走向 NW315°的微断层通常为右旋位错,微断层大多数性质呈压扭性的结果是一致的。

5 结论

通过上述方法得出整个研究区域主压应力方向为近 NW-SE 向;主张应力轴主张应力方向为近 NE-SW 向;整个区域的 R 为 0.4,说明该区域的中间轴没有明显的压张性,主张和主压轴都趋于水平,

与前人许忠淮等^[33]在该区域得到的应力场主轴方向特征相一致,表明本次计算结果是可靠的。该结果为大范围的应力场结果,从板块运动的角度分析,其东南沿海地区构造应力来源于太平洋板块的向西挤压和印度洋板块向北和北东的挤压,且该地区位于两大板块联合作用的过渡地带,以 110°E (也是本次研究的中心区域)做为两个板块对东南沿海地区影响主次的分界线,其东部主要受太平洋板块影响,西部则主要受印度洋板块的影响,因此该结果总体上符合该地区的地质构造情况^[39]。通过分析得到以下结论。

(1)从震源机制解分类结果来看,整体区域的走滑类型的震源机制解占比最高,整个区域的总体震源机制以走滑型为主,局部变化上,该研究区域的逆断型的震源机制从NW到SE向有逐渐减少的趋势,符合该地北西向活动断层系统多为逆断层,南宁盆地是地堑式构造的地质特征,断层力学性质以张性为主兼有扭性。而正断层则在该方向变化上有逐渐增长的趋势。

(2)从整体区域的构造应力场可看出,整个区域受到NW向的最大压应力,和NE向的最大张应力,主压张轴倾伏角都接近于水平, $R=0.4$,中间轴基本不具有压张性,整体应力场为走滑型。

(3)从各分区应力场的变化可以得到,桂西地区主压应力方向为近N-S向,往东南方向的北部湾地区受到NNW-SSE向的主压应力,在灵山区域(c区)主压应力过渡为NW-SE向,在北流区域(b区)继续向东西方向偏。各分区应力场主压应力方向呈扇形分布特征。

(4)从各分区应力场结果来看。a区的压张轴方向组成了走滑应力体系, R 为0.6接近 $R=0.5$,说明中间轴没有明显的挤压或拉张性质,且剪应力在压张轴的夹角平分线上达到最值,因此a区域内最易产生NE-SW向和NW-SE向的断裂,断裂类型以走滑型为主;b区的压张轴方向组成了逆走滑应力体系, R 为0.4,同理,说明中间轴没有明显的挤压或拉张性质,通过最大剪应力方向判断出b区域最易产生NNE-SSW向和NWW-SEE向断裂,断裂类型以走滑和逆走滑型为主,根据其最大剪应力节面的滑动角能看出,其中NNE-SSW向断裂更偏向于逆走滑型,NWW-SEE向断裂更偏向于走滑型;c区的压张轴方向组成了走滑应力体系, R 为0.8接近 $R=1$,说明中间轴具有明显的拉张性质,因此该区域容易产生的断裂以逆走滑型为主,甚至产生逆断型断裂。其最大剪应力方向为正N-S向和正E-W向,由于c区受到周围区域的断裂延伸影响,其性质

并未体现在当地主要断裂特征上;d区的压张轴方向组成了逆走滑应力体系, $R=0.7$,接近 $R=1$,说明中间轴具有一定的拉张性质,通过最大剪应力方向判断出d区域最易产生NW-SE向和NE-SW向断裂,断裂类型以逆走滑型和逆断型为主,根据其最大剪应力节面的滑动角能看出,其中NW-SE向断裂更偏向于逆断型,NE-SW向断裂更偏向于走滑型。

参 考 文 献

- [1] 马云,李三忠,刘鑫,等. 华南北部湾盆地的形成机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1727-1736.
Ma Yun, Li Sanzhong, Liu Xin, et al. Formation mechanism of the Beibuwan Basin, South China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2014, 44(6): 1727-1736.
- [2] 张杰,陈革,任清军,等. 昭通-鲁甸褶皱带南段构造变形序列与应力分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(6): 47-56.
Zhang Jie, Chen Ge, Ren Qingjun, et al. Tectonic deformation sequences and stress analysis in the southern segment of the Zhaotong-Ludian fault folding zone[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(6): 47-56.
- [3] 马广庆,王晓山,冯向东,等. 张渤地震带现今形变特征研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 12814-12821.
Ma Guangqing, Wang Xiaoshan, Feng Xiangdong, et al. Deformation characteristics of Zhangjiakou-Bohai seismic belt[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30): 12814-12821.
- [4] 乔二伟,马秀敏,彭华,等. 长白山天池火山西南麓水压致裂法地应力测量及其实测数据在断裂稳定性分析中的应用[J]. 地球物理学报, 2023, 66(4): 1545-1557.
Qiao Erwei, Ma Xiumin, Peng Hua, et al. Hydraulic fracturing tests for stress measurements and analysis of stability for frictional sliding of faults at the Southwest foot area of Tianchi volcano in Changbaishan Mountains [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(4): 1545-1557.
- [5] Michael A J. Determination of stress from slip data: faults and folds [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89 (B13): 11517-11526.
- [6] Michael A J. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(B1): 357-368.
- [7] 雷啸宇,刘兆才,赵鹏毕,等. 2020年1月19日新疆伽师Ms6.4地震震源及邻区震后构造应力场特征[J]. 内陆地震, 2023, 37(1): 99-105.
Lei Xiaoyu, Liu Zhao Cai, Zhao Pengbi, et al. Characteristics of source and its neighborhood post-earthquake tectonic stress field of Jiashi Ms6.4 earthquake in Xinjiang on January 19, 2020[J]. Inland Earthquake, 2023, 37(1): 99-105.
- [8] 樊文杰. 2021年5月21日漾濞Ms6.4地震及周边的构造应力场特征和动力学意义[J]. 地震地质, 2023, 45(1): 208-230.
Fan Wenjie. Characteristics of tectonic stress field around the Yangbi Ms6.4 earthquake and its surrounding areas on May 21, 2021 and its geodynamic implication [J]. Seismology and Geology, 2023, 45(1): 208-230.
- [9] 万永革. 联合采用定性和定量断层资料的应力张量反演方法及在乌鲁木齐地区的应用[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9):

- 3145-3156.
- Wan Yongge. A grid search method for determination of tectonic stress tensor using qualitative and quantitative data of active faults and its application to the Urumqi area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3145-3156.
- [10] Wan Y G. Contemporary tectonic stress field in China[J]. Earthquake Science, 2010, 23(4): 377-386.
- [11] Wan Y G, Sheng S Z, Huang J C, et al. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the Boundary zone of China, Vietnam and Laos[J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(5): 777-785.
- [12] 黄强强, 沈旭章, 王文天, 等. 广西北流地震震源区短周期密集台阵背景噪声成像[J]. 地球物理学报, 2022, 65(8): 2917-2930.
- Huang Qiangqiang, Shen Xuzhang, Wang Wentian, et al. Seismic image of ambient noise beneath the focal area of the Guangxi Beiliu earthquake from dense short-period array[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(8): 2917-2930.
- [13] 万永革. 同一地震多个震源机制中心解的确定[J]. 地球物理学报, 2019, 62(12): 4718-4728.
- Wan Yongge. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(12): 4718-4728.
- [14] 万永革. 震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析[J]. 地球科学, 2024, 49(7): 2675-2684.
- Wan Yongge. Focal mechanism classification based on areal strain of the horizontal strain rosette of focal mechanism and characteristic analysis of overall focal mechanism of the earthquake sequence[J]. Earth Science, 2024, 49(7): 2675-2684.
- [15] Zoback M L. First and second order patterns of stress in the lithosphere; the World Stress Map project[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(B8): 11703-11720.
- [16] 蒋维强, 任镇寰. 灵山地区地震活动性及构造应力场[J]. 华南地震, 1990, 10(2): 36-41.
- Jiang Weiqiang, Ren Zhenhuan. A study on the seismic activity and tectonic stress field in Lingshan area[J]. South China Journal of Seismological, 1990, 10(2): 36-41.
- [17] 李细光, 史水平, 黄洋, 等. 广西及其邻区现今构造应力场研究[J]. 地震研究, 2007, 30(3): 236-240.
- Li Xiguang, Shi Shuiping, Huang Yang, et al. Current tectonic stress field in Guangxi and vicinity[J]. Journal of Seismological Research, 2007, 30(3): 236-240.
- [18] 黄玉昆, 邓海田, 张珂. 桂东南地区灵山和合浦两断裂带活动性的初步研究[J]. 中山大学学报论丛, 1992(1): 53-63.
- Huang Yukun, Deng Haitian, Zhang Ke. Preliminary research on Lingshan fault zone and Hepu fault zone in southeast Guangxi Zhuang autonomous region[J]. Supplement to the Journal of Sun Yat-Sen University, 1992(1): 53-63.
- [19] 周本刚, 杨晓平, 杜龙. 广西防城-灵山断裂带活动性分段与潜在震源区划分研究[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(1): 8-9.
- Zhou Bengang, Yang Xiaoping, Du Long. Discussion on the segmentation of Fangcheng Lingshan fault, Guangxi Province and determination of related potential seismic sources[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(1): 8-9.
- [20] 龙政强, 周斌, 阎春恒, 等. 广西主要断裂带中小地震震源参数研究[J]. 内陆地震, 2015, 29(4): 309-316.
- Long Zhengqiang, Zhou Bin, Yan Chunheng, et al. Research on source parameters of small medium earthquakes in main faults regions, Guangxi[J]. Inland Earthquake, 2015, 29(4): 309-316.
- [21] 潘建雄, 黄日恒, 张玉岫. 广西北流地区的地震构造与地震活动[J]. 华南地震, 1996, 16(2): 65-68.
- Pan Jianxiong, Huang Riheng, Zhang Yuxiu. Seismotectonics and seismicity of Beiliu Area in Guangxi[J]. South China Journal of Seismology, 1996, 16(2): 65-68.
- [22] 王明明, 周本刚, 计凤桔, 等. 合浦-北流断裂带西支合浦盆地段断裂活动性研究[J]. 地震地质, 2009, 31(3): 470-487.
- Wang Mingming, Zhou Bengang, Ji Fengju, et al. Fault activity on the HePu basin section of the Hepu-Beiliu fault[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(3): 470-487.
- [23] 郭培兰, 谢夜玉, 苏珊. 广西北流 Ms5.2 地震发震构造研究[J]. 高原地震, 2022, 34(1): 8-14.
- Guo Peilan, Xie Yeyu, Su Shan. Study on the seismogenic structure of the Beiliu Ms5.2 earthquake in Guangxi[J]. Plateau Earthquake Research, 2022, 34(1): 8-14.
- [24] 李冰溯, 李细光, 潘黎黎. 1936 年广西灵山 M6 $\frac{3}{4}$ 地震参数讨论[J]. 地震学报, 2018, 40(2): 132-142.
- Li Bingsu, Li Xiguang, Pan Lili. Discussion on source parameters of the M6 $\frac{3}{4}$ Lingshan, Guangxi, earthquake occurred in 1936[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(2): 132-142.
- [25] 何军, 刘怀庆, 黎清华, 等. 广西防城-灵山断裂带北东支灵山段活动性初探[J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(1): 71-78.
- He Jun, Liu Huaqing, Li Qinghua, et al. Activity of the north-eastern branch of Fangcheng-Lingshan fault zone in Lingshan, Guangxi, China[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2012, 28(1): 71-78.
- [26] 郭培兰, 史水平, 阎春恒, 等. 2013 年 2 月 20 日广西平果 4.5 级地震震害及地震前兆异常特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(2): 6-14.
- Guo Peilan, Shi Shuiping, Yan Chunheng, et al. Characteristic analysis about earthquake damage and earthquake precursory anomaly of Pingguo M4.5 earthquake in Guangxi area on February 20, 2013[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(2): 6-14.
- [27] 林纪曾, 梁国昭, 赵毅, 等. 东南沿海地区的震源机制与构造应力场[J]. 地震学报, 1980, 2(3): 245-257.
- Lin Jizeng, Liang Guozhao, Zhao Yi, et al. Focal mechanism and tectonic stress field of coastal southeast China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1980, 2(3): 245-257.
- [28] 钟新基. 广西新构造运动的主要表现及构造应力场的分析[J]. 华南地震, 1981(1): 60-71.
- Zhong Xinji. The main manifestations of the new tectonic movement in Guangxi and analysis of tectonic stress fields[J]. South China Journal of Seismology, 1981(1): 60-71.
- [29] 赵毅. 1977 年 10 月 19 日平果 5.0 级地震的震源机制[J]. 华南地震, 1983(S1): 78-80.
- Zhao Yi. The focal mechanism of the 5.0 magnitude earthquake in Pingguo on October 19, 1977[J]. South China Journal of Seismology, 1983(S1): 78-80.
- [30] 覃修婷. 灵山地区地震活动性及构造应力场[D]. 三河: 防灾科技学院, 2015.
- Qin Xiuting. A study on the seismic activity and tectonic stress

- field in Lingshan Area[D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention, 2015.
- [31] 王小娜, 邓志辉, 王力伟, 等. 广西北流—广东化州 Ms5.2 级地震发震构造探讨[J]. 华南地震, 2020, 40(2): 19-25.
Wang Xiaona, Deng Zhihui, Wang Liwei, et al. Discussion on the seismogenic structure of the Beiliu-Huazhou Ms5.2 earthquake in the junction of Guangxi and Guangdong[J]. South China Journal of Seismology, 2020, 40(2): 19-25.
- [32] 万永革. 地震学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Wan Yongge. Introduction to seismology[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [33] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, 1989, 32(6): 637-647.
Xu Zhonghuai, Wang Suyun, Huang Yurui, et al. The tectonic stress field of Chinese continent deduced from a great number of earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1989, 32(6): 637-647.
- [34] 赵海玲, 狄永军, 刘振文, 等. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 782-788.
Zhao Hailing, Di Yongjun, Liu Zhenwen, et al. Cenozoic volcanism and mantle plume along southeast coast of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6): 782-788.
- [35] 张虎男, 赵希涛. 雷琼地区新构造运动的特征[J]. 地质科学, 1984(3): 277-287.
Zhang Hunan, Zhao Xitao. Characteristics of the new tectonic movement in the Hainan Island and Leizhou peninsula area[J]. Scientia Geologica Sinica, 1984(3): 277-287.
- [36] Lei J, Zhao D, Steinberger B, et al. New seismic constraints on the upper mantle structure of the Hainan plume[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2009, 173(1/2): 33-35.
- [37] 李冰溯, 李细光, 聂冠军, 等. 广西北流 Ms5.2 地震发震构造[J]. 华北地震科学, 2019, 37(S1): 17-23.
Li Bingsu, Li Xiguang, Nie Guanjin, et al. Seismogenic structure of the Beiliu Ms5.2 earthquake in Guangxi[J]. North China Earthquake Sciences, 2019, 37(S1): 17-23.
- [38] 唐永, 刘怀庆, 黎清华, 等. 广西灵山断裂带构造应力场地质分析及活动预测[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(1): 62-75.
Tang Yong, Liu Huaqing, Li Qinghua, et al. Analysis of tectonic stress field and potential activities in Lingshan Fault Zone, Guangxi[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(1): 62-75.
- [39] 蒋维强, 林纪曾, 赵毅, 等. 华南地区的小震震源机制与构造应力场[J]. 中国地震, 1992, 8(1): 38-44.
Jiang Weiqiang, Lin Jizeng, Zhao Yi, et al. Focal mechanism of small earthquakes and characteristics of tectonic stress field in South China[J]. Earthquake Research in China, 1992, 8(1): 38-44.
- [40] 徐文龙, 文江泉. 广西百色盆地第三系膨胀岩边坡稳定性与构造环境关系的研究[C]//四川省岩石力学与工程学会首届学术会议论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 1994: 116-123.
Xu Wenlong, Wen Jiangquan. Study on the relationship between slope stability and tectonic environment of tertiary expansive rocks in Baise Basin, Guangxi[C]//Proceedings of the First Academic Conference of Sichuan Society of Rock Mechanics and Engineering. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1994: 116-123.