

文章编号:1672-6561(2013)02-0099-08

四川芦山地震区域构造环境与构造应力场特征

张红艳, 谢富仁, 崔效锋

(中国地震局地壳应力研究所 地壳动力学重点实验室, 北京 100085)

摘要:2013 年 4 月 20 日四川省雅安市芦山县发生 $M_s 7.0$ 级地震, 这是继汶川地震后发生在龙门山断裂带上的又一次强震。在介绍芦山地震的基本特征及发震构造环境基础上, 利用区域内 172 个震源机制解资料对区域构造应力场进行了计算, 特别对龙门山应力区内各类应力数据的最大主应力方向进行了分析。结果表明: 龙门山应力区目前处于近东西向的挤压构造应力环境中; 区域最大主应力方向在横向上从巴颜喀拉块体的北东—南西向到龙门山块体的近东西向, 再到华南块体的北西西—南东东向, 表现为顺时针方向的旋转; 区域最大主应力在纵向上从柴达木—秦岭块体的北东东—南西西向到龙门山块体的近东西向, 再到川滇块体的北西—南东向, 亦表现为顺时针方向的旋转; 应力方向在不同块体间的转变, 反映了青藏高原东缘巴颜喀拉块体在进行南东向水平运动挤压龙门山地块时, 由于受到华南地块特别是四川盆地的强烈阻挡, 导致龙门山推覆构造带表现为明显的地壳缩短和山体隆升。

关键词:芦山地震; 龙门山断裂带; 震源机制解; 最大主应力; 构造应力场; 应力转向; 构造环境

中图分类号:P694; P315.2

文献标志码:A

Regional Characteristics of Tectonic Stress Field and Tectonic Setting of Lushan Earthquake in Sichuan

ZHANG Hong-yan, XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng

(Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: In April 20, 2013, a $M_s 7.0$ earthquake hit Lushan county of Ya'an city, Sichuan province, which was another strong earthquake on Longmenshan foreland thrust zone after Wenchuan earthquake. Basic characteristics and seismogenic tectonic setting of Lushan earthquake were introduced, and regional tectonic stress field was calculated by 172 focal mechanism solutions, especially the directions of maximum principal stress were analyzed based on five different kinds of stress data in Longmenshan stress region. The results indicate that the direction of maximum principal stress in Longmenshan stress region is nearly in EW-direction compressional tectonic setting at present; the direction of maximum principal stress is from NE-SW-direction in Bayan Har block to nearly EW-direction in Longmenshan block, and then to NWW-SEE-direction in South China block, showing clockwise rotation from west to east in spatial distribution; the direction of maximum principal stress is from NEE-SWW-direction in Qaidam-Qinling block to nearly EW-direction in Longmenshan block, and then to NW-SE-direction in Chuandian block, also showing clockwise rotation from south to north in spatial

收稿日期: 2013-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40904024); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项项目(ZDJ2013-20);

“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK19B03-4); 国土资源部深部探测技术与实验研究专项项目(SinoProbe-06-04)

作者简介: 张红艳(1980-), 女, 江苏海门人, 助理研究员, 理学博士研究生, E-mail: zhy0720@126.com。

distribution. Transition of stress direction among different blocks indicates that Bayan Har block in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau moves to the south-east and pushes the Longmenshan block because of the strong stop of Sichuan Basin in South China block, and results in obvious crustal shortening and mountain uplift of Longmenshan foreland thrust zone.

Key words: Lushan earthquake; Longmenshan fault zone; focal mechanism solution; maximum principal stress; tectonic stress field; stress transition; tectonic setting

0 引言

2013 年 4 月 20 日 8 时 2 分,四川省雅安市芦山县(30.3°N , 103.0°E)发生 $M_s 7.0$ 级强震(M_s 为面波震级)。该地震位于龙门山前缘构造带南段,距离 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 级特大地震震中约 70 km。重庆、云南、贵州、陕西以及甘肃等周边城市均有较强震感。初步调查结果显示,芦山地震造成雅安、成都、绵阳、广元、阿坝、甘孜和凉山等 19 个市(州) 115 个县不同程度的受灾,受灾人口约 199 万,受灾面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,震中芦山县龙门乡大部分房屋垮塌,极震区最大烈度可达 IX 度以上。截至 4 月 24 日 14 时,据中国地震局和国家民政部的综合统计结果,芦山地震已导致 196 人死亡,25 人失踪,12 211 人受伤,造成了严重的人员伤亡和巨大的经济损失。笔者首先介绍四川芦山 $M_s 7.0$ 级地震的基本特征与区域构造环境,再利用震源机制解反演计算芦山地震的区域构造应力场,最后结合区域内不同类别应力资料,分析区域构造应力场的基本特征。

1 芦山地震基本特征

芦山地震发生后,多个科研机构给出了该次地震的震级、震源深度、相应的震源机制解以及地震破裂过程等相关参数。中国地震台网中心(CENC)公布的芦山地震震级为 $M_s 7.0$ 级,震源深度为 13 km;美国地质调查局(USGS)给出的地震矩震级 M_w 为 6.6 级,震源深度为 14 km。中国科学院青藏高原研究所王卫民副研究员与中国科学院地质与地球物理研究所姚振兴院士的科研小组,选用 IRIS 数据中心 31 个远场 P 波波形数据进行点源模型的震源机制解反演,计算得到的地震矩为 $1.54 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$,矩震级 M_w 为 6.7 级;震源机制解显示为逆冲性质,2 组节面分别为:走向 26.5° 、倾角 51.5° 、滑动角 91.2° 和走向 205° 、倾角 38.5° 、滑动角 88.8° ,震源深度为 10.2 km^[1]。中国地震局地球物理研究所陈运泰院士研究组利用全球台网 39 个台站的波形资料计算得到的地震矩张量解结果显示,芦山地震的标量地

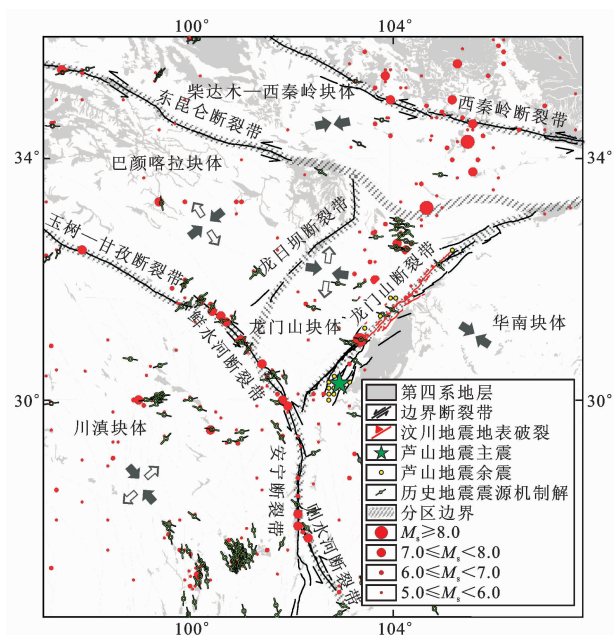
震矩为 $1.6 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$,对应的矩震级 M_w 也为 6.8 级;震源机制解表现为逆冲性质,2 组节面分别为:走向 34° 、倾角 55° 、滑动角 87° 和走向 220° 、倾角 35° 、滑动角 95° ;P 轴方位 126° 、倾角 10° ,B 轴方位 36° 、倾角 3° ,T 轴方位 292° 、倾角 79° ;震源深度为 15 km。该研究组的地震破裂过程反演结果显示:震源深度为 12 km,断层的破裂面走向为 219° 、倾角 33° ;在 13 km 深度处具有最大滑移量,约为 1.5 m;断层破裂主要集中在震源两侧沿走向 20 km 的范围内;地震持续时间约为 20 s,地震主要能量释放于震后 10 s 内,在 20 s 左右又出现一次小的能量释放,可能为地震的破裂释放,也可能属于一个强余震^[2]。上述科研机构给出的芦山地震震级、震源深度、震源机制解的性质以及地震破裂过程等结果大致相同。

另外,芦山地震产生了丰富的余震序列。截至 2013 年 5 月 30 日 6 时,共发生 2.9 级以上余震 147 个,其中 5.0~5.9 级共 4 次,4.0~4.9 级共 25 次,3.0~3.9 级共 112 次,其余 6 次为 2.9 级。中国地震局地球物理研究所房立华等使用双差定位方法对最初的 202 个余震进行了重新定位,结果显示 202 个余震主要集中在双石一大川断裂两侧,呈北东向线性分布,震源深度优势分布在地下 10~20 km。横跨余震北东向密集带的北西向剖面显示,余震在 20~15 km 范围内出现一个缓倾角密集带,与震源机制解给出的 35° 左右的发震断层一致。

2 地震构造环境

芦山地震发生在龙门山推覆构造带上。该推覆构造带是青藏高原东部巴颜喀拉地块与华南地块的边界,2008 年 5 月 12 日汶川特大地震就发生在该断裂带上。龙门山断裂带西接鲜水河—安宁河断裂带,南临四川盆地,北部为龙门山区,东部与秦岭南缘相接,是中国大陆南北地震构造带中段的重要组成部分。北东向的龙门山断裂带以及区域内与之平行的北东向龙日坝断裂带、与之相交的北西向 3 条重要的左旋走滑断裂带(鲜水河断裂带、东昆仑断裂

带和西秦岭断裂带)一起将青藏高原东缘划分成5个构造块体,它们分别是龙门山块体、川滇块体、华南块体、巴颜喀拉块体和柴达木—西秦岭块体(图1)。



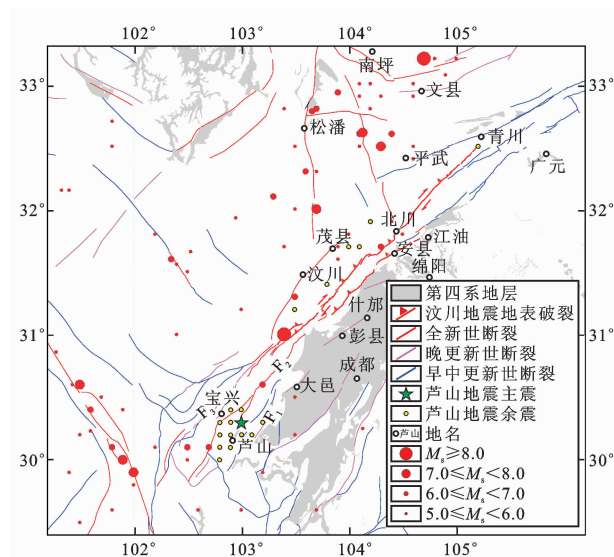
黑色粗体实心箭头代表挤压方向;粗体空心箭头代表拉张方向

图1 区域地震构造与历史地震分布

Fig. 1 Regional Seismo-tectonics and Distribution of Historical Earthquakes

野外地质地貌调查发现,龙门山推覆构造带长约500 km,宽40~50 km,南起泸定、天全,向东北方向延伸经宝兴、灌县、江油、广元进入陕西勉县一带,由走向北东45°、倾向北西、倾角50°~75°的4条逆断裂叠瓦状组合而成。从横向来看,自北西向往南东向,分别为龙门山后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂^[3-7]。从纵向来看,龙门山断裂带具有明显的分段性,自北东向往南西向依次分为北段、中段与南段。其中:北段包括青川断裂、茶坝—林庵寺断裂、江油—广元断裂;中段包括汶川—茂汶断裂、北川—映秀断裂、灌县—江油断裂;南段包括耿达—陇东断裂、盐井—五龙断裂与双石—大川断裂。芦山地震就发生在龙门山断裂带南段,震区涉及耿达—陇东断裂、盐井—五龙断裂、双石—大川断裂和大邑断裂等4条断裂带。耿达—陇东断裂南起泸定以东,向北经陇东、红路至耿达,总体走向北东40°~45°,倾向北西,全长约170 km。盐井—五龙断裂,北起映秀镇南侧三江附近,向南经九里岗、盐井、五龙、明礼、庙子岗至泸定以东,总体走向40°,倾向北西,在雅安市内长约130 km,全长170 km。双石—大川断裂分布在天全至都江堰之间,北起大邑双河

一带,向南经西岭在芦山大川小河村北一带延入雅安,经大川、太平、双石直至天全西南一带,走向北东43°,倾向北西,倾角45°~65°,雅安市境内长约85 km^[4,8]。大邑断裂是龙门山山前断裂南段的组成部分,分布在成都盆地的西北部,走向40°~60°,性质为逆断层,大部分呈隐伏状态(图2)。



F₁—大邑断裂;F₂—双石—大川断裂;F₃—盐井—五龙断裂

图2 龙门山断裂带展布

Fig. 2 Distribution of Longmenshan Fault Zone

中国地震局地震应急野外科考表明:此次地震没有造成典型的地震地表破裂现象,但喷水冒沙、张裂缝、滑坡体等现象较为常见;仅在芦山县龙门乡发现地震地表破裂带的迹象,其延伸长度为2~3 km,最大缩短量为8 cm,属逆断层性质,显示块体运动方向由西北推向东南。因此,推测此次地震可能属于盲逆断层地震^[9]。

3 利用震源机制解反演区域构造应力场

3.1 数据资料

龙门山推覆构造带所在的青藏高原东缘是中国构造活动异常强烈、强震频繁发生的区域。通过对“中国大陆地壳应力环境基础数据库”^[10]的查询,收集到区域范围(97.3°~105.48°E,26.40°~36.01°N)内4.7级以上的中强震震源机制解数据172个。其中,8.0级地震1个,为汶川8.0级特大地震;7.0~7.9级地震10个,6.0~6.9级地震35个,5.0~5.9级地震92个,4.7~4.9级地震34个。地震的发震时间为1933~2008年,这些震源机制解主要来自于哈佛大学的CMT矩张量解和国内相关文献^[11-19],具体震中分布见图1。

3.2 计算方法

许多学者利用多个地震的震源机制解结果或多个断面滑动方向来反演地震分布区域的构造应力场^[20-27]。笔者利用格点尝试法^[23]求出多个地震的平均节面相应的 P、B、T 轴,来推断某一地区的平均构造应力场方向。格点尝试法的前提条件是:所求范围内的构造应力场是均匀的;多个地震的错动面产状是随机的。为了满足所求范围内构造应力场的均匀性要求,综合考虑了区域内重要活动构造(尤其是北东、北西向相互交切的 2 组大型活动断裂的空间展布、运动方式、断裂性质)以及地震震中分布等情况,并通过试计算将整个区域分为龙门山应力区、川滇应力区、华南应力区、巴颜喀拉应力区和柴达木—西秦岭应力区共 5 个区域,使得每一分区内的构造应力场尽可能一致。对于后一个条件,通过增加地震的数目,尽量选取离散分布的地震使之得到满足。

格点尝试法^[23]是通过求解与多个地震的平均节面解相应的 P、B、T 轴来推断某一地区平均构造应力场的方向。笔者采用此法的具体步骤为:把所求区域内每个地震震源机制解的 P、T 轴分别当成

向下和向上的初动符号,对所有可能解的三维参数空间以步长 $5^{\circ} \times 5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 进行扫描,求出使矛盾符号比(φ)达到最小值(φ_{\min})的最佳解;给出 φ 介于极小值 φ_{\min} 和 $(\varphi_{\min} + 5\%)$ 之间所有可能的 P、B、T 轴,并称这些轴的分布范围为解的离散区;把这些解的平均值作为该区的构造应力主轴方向。

3.3 计算结果及其分析

通过格点尝试法,综合各区内所有的震源机制解数据,得到区域内各应力分区在数据所覆盖的时间段内的构造应力场图像(表 1、图 1)。由表 1 与图 3 可以看出:在柴达木—西秦岭应力区尽管参与计算的震源机制解数据仅有 11 个,但其矛盾符号比较小,为 0.14,可能的 P、B、T 轴的离散区较为集中;龙门山应力区、华南应力区、巴颜喀拉应力区等 3 个区的矛盾符号比为 0.11~0.17,表明计算结果的可信度较好;川滇应力区的矛盾符号比稍大一些,为 0.30,但参与计算的震源机制解数目较多,且其解的离散区也呈较好的对称分布。因此,5 个区的平均主应力轴均有较好的约束,可以反映区域内各应力分区的应力方向特征。

表 1 各应力分区平均构造应力场计算结果

Tab. 1 Average Calculated Results of Tectonic Stress Field in Each Sub-stress Region

应力区名称	节面 I			节面 II			P 轴		B 轴		T 轴		地震数量	矛盾符号比
	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)		
龙门山	232	87	179	322	89	3	97	2	336	86	187	3	31	0.11
川滇	4	89	6	274	84	179	139	4	9	83	229	5	77	0.30
华南	71	76	153	168	64	15	122	8	27	29	226	60	35	0.13
巴颜喀拉	276	77	—28	13	63	—165	232	29	72	59	327	9	18	0.17
柴达木—西秦岭	134	52	36	20	62	136	79	6	174	40	342	50	11	0.14

由图 3 可见:在龙门山应力区最大、最小主应力方向分别为 97° 和 187° ,倾角分别为 2° 和 3° ,近水平;中间主应力倾角为 86° ,近直立,反映了该区近东西向挤压、近北南向拉张的走滑型应力结构。川滇应力区最大和最小主应力倾角均为近水平,中间主应力倾角近直立,也表现为走滑型的应力结构,但挤压和拉张的应力方向分别为北西—南东向和北东—南西向。华南应力区最大主应力倾角为 8° ,近水平;最小主应力倾角 60° ,近直立,表现为逆冲型应力结构,挤压方向为北西西—南东东向。巴颜喀拉应力区最大和最小主应力倾角较缓,中间主应力倾角较大,为 59° ,表现为北东东—南西西向挤压、北北西—南南东向拉张的走滑型应力结构。柴达木—西秦岭应力区最大和最小主应力方向分别为 79° 和 342° ,倾角分别为 6° 和 50° ,

反映了近东西向挤压的逆断型应力结构。由图 1 可见,区域构造应力场方向在横向上从巴颜喀拉块体到龙门山块体,再到华南块体,最大主压应力方向从北东—南西向到近东西向,再到北西西—南东东向,表现为顺时针旋转;在纵向上,无论是巴颜喀拉块体—川滇块体,还是龙门山块体—川滇块体,最大主压应力方向由北东—南西向(或近东西向)转变为北西西—南东东向,亦表现为顺时针旋转的现象。

龙门山区域构造应力场最大主应力在不同块体之间发生转向,与汶川 $M_{\text{s}}8.0$ 级地震地表破裂带在龙门山推覆构造带上引起 11 m 地壳缩短量和 9~10 m 龙门山区隆升^[8] 的现象均表明位于青藏高原东缘巴颜喀拉块体和四川盆地之间的龙门山断裂受到了强烈的挤压。

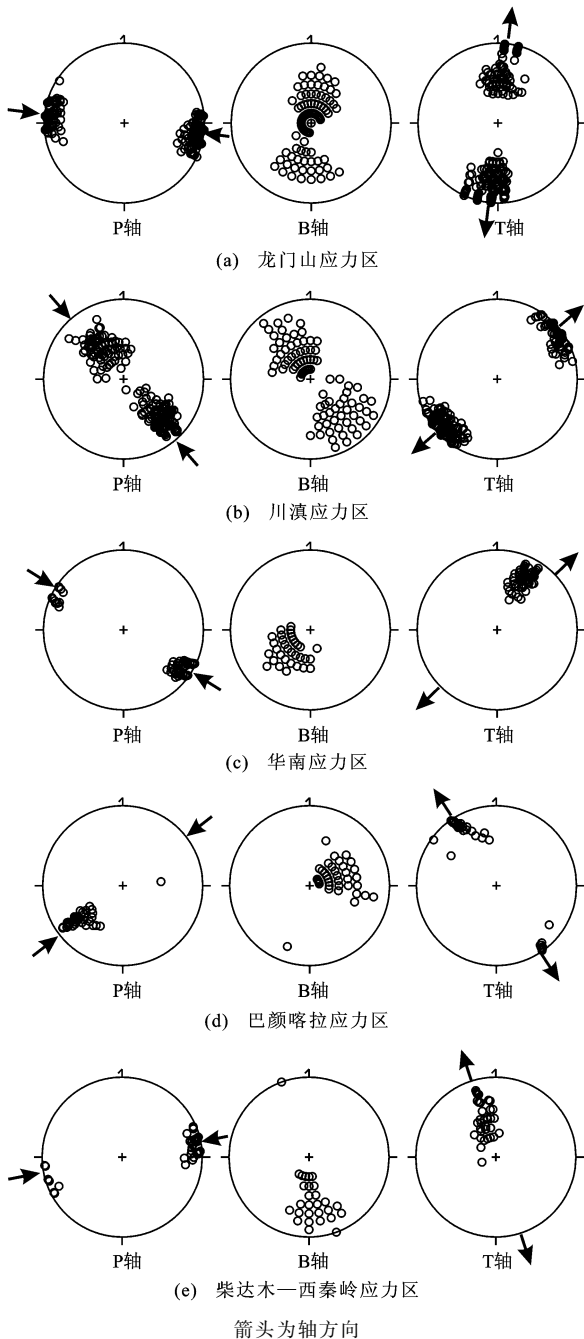


图3 各应力分区3个平均主应力轴(等面积投影)

Fig. 3 Average Axes of Three Principal Stresses in Each Sub-stress Region (Equal-area Projections)

4 龙门山应力区构造应力场方向特征

为进一步了解龙门山应力区的现代构造应力场的特征,笔者收集了该区其他类型的应力资料,对该区的现代构造应力场进行分析。

4.1 数据资料

通过对“中国大陆地壳应力环境基础数据库”的查询,在龙门山应力区覆盖的范围内得到5类地应力数据,数据的分布情况见图4。其中,震源机制解数

据31个, M_s 范围为4.7~8.0,发震时间为1933~2008年。断层滑动资料23个,这些资料是运用地质学方法给出的水平最大主应力方位。具体方法有2种:①利用地震形变带上的构造组合确定构造主应力方位;②由断层产状和断层运动性状确定构造主应力方位。钻孔崩落数据9个,测量深度为1985~3405 m。虽然钻孔崩落是二维应力测量,只能给出水平最大主应力方位和最小主应力方位,但由于测量深度较深,在一定程度上反映了地壳上部的应力方向状况。水压致裂法数据17个,测量深度为165~574 m,一般以竖直钻孔确定水平应力,在岩体工程、石油钻探和地震研究领域应用比较广泛,所给出的水平最大主应力方位反映的是地壳浅层的应力状态。应力解除数据6个,均为通过二维压磁方法得到的平面应力测量数据;测量深度较浅,位于7~19 m,通过平面应力测量给出了水平最大主应力的方位。

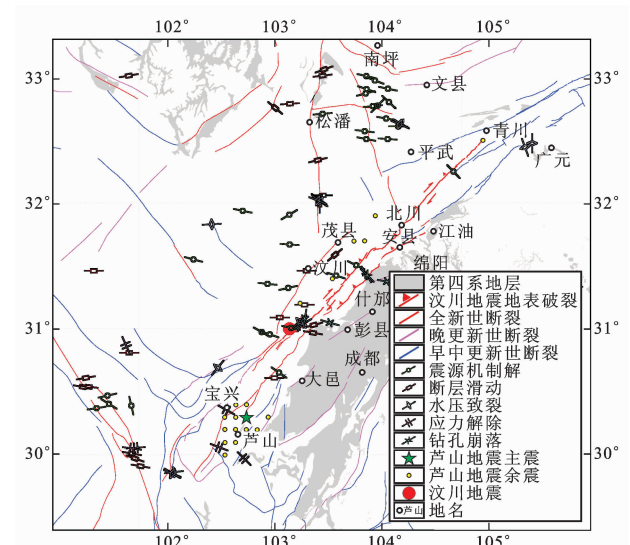


图4 龙门山应力区5类地应力数据分布

Fig. 4 Distribution of Five Kinds of Stress Data in Longmenshan Stress Region

4.2 水平最大主应力的方向特征

震源机制解反映了地壳深部应力信息;断层滑动资料在一定空间范围和时间阶段提供地壳上部造成岩石脆性变形的构造应力作用特征;钻孔崩落原地应力测量获得的主要是地壳浅部的实时地应力状态;而水压致裂法和应力解除的测量深度较浅,反映地表附近的应力状态。5类地应力数据资料,除震源机制解外,都只给出了地应力一个方向特征参数——水平最大主应力方位,而没有给出应力结构等其他参数。利用5类地应力数据对龙门山应力区构造应力场水平方向特征进行统计分析过程中,为

为了使统计的方向参数一致,震源机制解没有使用 P 轴方位统计,而是对震源机制解所反映的水平最大主应力方位进行统计。震源机制解水平最大主应力方位是根据震源机制解类型和 P、B、T 轴空间取向给定的^[28]。

为进一步了解区域内主应力方向特征,对 5 类地应力数据给出的水平最大主应力方位进行了统计分析。结果表明:震源机制解和断层滑动资料给出的水平最大主应力分布的优势方位为近东西向[图 5(a)、(b)];钻孔崩落资料显示的水平最大主应力存在 2 个优势方位,分别为北西西向和北北西向[图 5(c)];水压致裂法和应力解除 2 类资料的最大主压应力方向尽管在别的方向上有零星分布,但主要集中在北西西向[图 5(d)、(e)]。总的来看,由震源机制解和断层滑动反映的最大主应力方向较为一致,均为近东西向,但与由钻孔崩落、水压致裂法和应力解除资料反映的最大主应力在方向上稍有偏差,可能的原因是原地应力数据反映的是地壳较浅深度或是地表的应力状态所致。尽管 5 类地应力数据资料给出的水平最大主应力方位分布状况存在一定的差异,但其优势方位基本位于近东西向或北西西向,表明区域构造应力场在水平方向上主要呈现近东西向的挤压。

5 结 语

(1) 四川芦山地震是继汶川地震后发生在龙门山断裂带上的又一次强震。该地震发生在龙门山断裂带南段,震区涉及耿达—陇东断裂、盐井—五龙断裂、双石—大川断裂和大邑断裂 4 条断裂带。

(2) 波形数据反演结果显示芦山地震的震源机制解为逆冲性质,地震破裂过程反演结果表明地震震源深度为 12 km,断层的破裂面走向为 219° ,倾角 33° ;在深度 13 km 左右存在约 1.5 m 的最大滑移量。

(3) 利用区域历史震源机制解资料反演结果和其他应力资料统计的最大主应力方向结果,均表明龙门山应力区目前处于近东西向挤压的构造应力环境中,应力方向在不同块体间发生转向,反映了青藏高原东缘巴颜喀拉块体在进行南东向水平运动时,由于东南侧华南地块特别是四川盆地的阻挡,龙门山推覆构造带受到强烈挤压,表现为明显的地壳缩短和山体隆升。

许忠淮研究员提供了格点尝试法计算机源程序,在此表示谢忱!

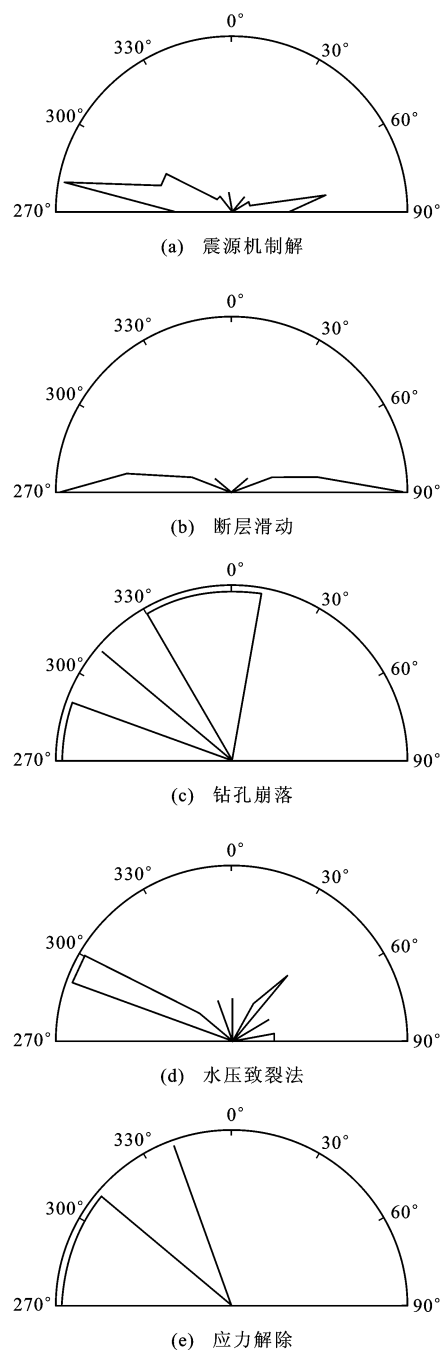


图 5 5 类地应力数据的水平最大主应力方位分布

Fig. 5 Distribution of the Directions of Maximum Horizontal Principal Stresses for Five Kinds of Stress Data

参考文献:

References:

- [1] 王卫民,郝金来,姚振兴. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1412-1417.
- WANG Wei-min, HAO Jin-lai, YAO Zhen-xing. Preliminary Result for Rupture Process of April 20, 2013, Lushan Earthquake, Sichuan, China[J]. Chinese

- Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1412-1417.
- [2] 张勇, 许力生, 陈运泰. 芦山4·20地震破裂过程及其致灾特征初步分析[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1408-1411.
ZHANG Yong, XU Li-sheng, CHEN Yun-tai, et al. Rupture Process of the Lushan 4·20 Earthquake and Preliminary Analysis on the Disaster-causing Mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1408-1411.
- [3] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 389-403.
DENG Qi-dong, CHEN She-fa, ZHAO Xiao-lin. Tectonics, Seismicity and Dynamics of Longmenshan Mountains and Its Adjacent Regions[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 389-403.
- [4] 杨晓平, 蒋溥, 宋方敏, 等. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据[J]. 地震地质, 1999, 21(4): 341-345.
YANG Xiao-ping, JIANG Pu, SONG Fang-min, et al. The Evidence of the South Longmenshan Fault Zones Cutting Late Quaternary Stratum[J]. Seismology and Geology, 1999, 21(4): 341-345.
- [5] 李勇, 周荣军, DENSMORE A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 40-51.
LI Yong, ZHOU Rong-jun, DENSMORE A L, et al. Geomorphic Evidence for the Late Cenozoic Strike-slipping and Thrusting in Longmen Mountain at the Eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 40-51.
- [6] 陈国光, 计凤桔, 周荣军, 等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 2007, 29(3): 657-673.
CHEN Guo-guang, JI Feng-ju, ZHOU Rong-jun, et al. Primary Research of Activity Segmentation of Longmenshan Fault Zone Since Late Quaternary[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(3): 657-673.
- [7] 贾秋鹏, 贾东, 朱艾澜, 等. 青藏高原东缘龙门山冲断带与四川盆地的现今构造表现: 数字地形和地震活动证据[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 31-44.
JIA Qiu-peng, JIA Dong, ZHU Ai-lan, et al. Active Tectonics in the Longmenshan Thrust Belt to the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau and Sichuan Basin: Evidence from Topography and Seismicity[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 31-44.
- [8] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川M_s8.0地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597-629.
XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, et al. The M_s8.0 Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 597-629.
- [9] 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 11-20.
XU Xi-wei, CHEN Gui-hua, YU Gui-hua, et al. Seismogenic Structure of Lushan Earthquake and Its Relationship with Wenchuan Earthquake[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 11-20.
- [10] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
XIE Fu-ren, CHEN Qun-ce, CUI Xiao-feng, et al. Research on Continental Crustal Stress Environment in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [11] 鄢家全, 时振梁, 环文林, 等. 强余震的断层面解特征[J]. 地震学报, 1980, 2(4): 395-403.
YAN Jia-quan, SHI Zhen-Liang, HUAN Wen-Lin, et al. The Characteristics of Fault Plane Solutions of Strong Aftershocks [J]. Acta Seismologica Sinica, 1980, 2(4): 395-403.
- [12] ZHOU H L, LIU H L, KANAMORI H. Source Processes of Large Earthquakes Along the Xianshuihe Fault in Southwestern China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(2): 537-551.
- [13] 许忠淮, 汪素云, 高阿甲, 等. 我国部分早期震源机制解答的重新测定[J]. 地震地磁观测与研究, 1994, 15(5): 1-9.
XU Zhong-huai, WANG Su-yun, GAO A-jia, et al. Redetermination of Some Early Focal Mechanism Solutions of Chinese Earthquakes[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1994, 15(5): 1-9.
- [14] 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 1977, 20(2): 96-109.
KAN Rong-ju, ZHANG Si-chang, YAN Feng-tong, et al. Present Tectonic Stress Field and Its Relation to the Characteristics of Recent Tectonic Activity in Southwestern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1977, 20(2): 96-109.
- [15] 阚荣举, 王绍晋, 黄岷, 等. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动[J]. 地震地质, 1983, 5(2): 79-90.
KAN Rong-ju, WANG Shao-jin, HUANG Kun, et al. Modern Tectonic Stress Field and Relative Motion of Intraplate Block in Southwestern China[J]. Seismology and Geology, 1983, 5(2): 79-90.
- [16] 成尔林. 四川及其邻区现代构造应力场和现代构造运动特征[J]. 地震学报, 1981, 3(3): 231-241.

- CHENG Er-lin. Recent Tectonic Stress Field and Tectonic Movement of the Sichuan Province and Its Vicinity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1981, 3(3): 231-241.
- [17] 程万正, 陈天长. 1989 年巴塘 6.7 级震群的复杂时空扩展和震源力学机制[J]. *地震学报*, 1994, 16(2): 153-159.
- CHENG Wan-zheng, CHEN Tian-chang. Complex Temporal and Spatial Extension and Focal Mechanism Solutions of 1989 Batang M_s 6.7 Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1994, 16(2): 153-159.
- [18] 程万正, 李桂芳, 乔惠珍, 等. 四川沐川 5.7 级震群子序列的震源参数变化[J]. *中国地震*, 2002, 18(2): 203-213.
- CHENG Wan-zheng, LI Gui-fang, QIAO Hui-zhen, et al. Changes in Hypocenter Parameters of Earthquake Swarm (M_s 5.7) Sequence in Muchuan, Sichuan[J]. *Earthquake Research in China*, 2002, 18(2): 203-213.
- [19] 程万正, 陈天长, 魏娅玲, 等. 2001 年四川雅江 6 级地震的前震与余震震源参数的变化[J]. *地震学报*, 2003, 25(4): 351-360.
- CHENG Wan-zheng, CHEN Tian-chang, WEI Ya-ling, et al. Changes in Source Parameters of Foreshocks and Aftershocks of the 2001 Yajiang M_s 6.0 Earthquake, Sichuan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2003, 25(4): 351-360.
- [20] AKI K. Earthquake Generating Stress in Japan for the Years 1961 to 1963 Obtained by Smoothing the First Motion Radiation Patterns[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 1966, 44(2): 447-471.
- [21] ELLSWORTH W L, XU Z H. Determination of the Stress Tensor from Focal Mechanism Data[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1980, 61(46): 1117.
- [22] MICHAEL A J. Use of Focal Mechanism to Determine Stress: A Control Study[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, 92(B1): 357-368.
- [23] 许忠淮, 阎明, 赵仲和. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. *地震学报*, 1983, 5(3): 268-279.
- XU Zhong-huai, YAN Ming, ZHAO Zhong-he. Evaluation of the Direction of Tectonic Stress in North China from Recorded Data of a Large Number of Small Earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1983, 5(3): 268-279.
- [24] 许向彤, 许忠淮, 张东宁. 求震源机制 P 波初动解的格点尝试概率法[J]. *地震地磁观测与研究*, 1995, 16(4): 34-42.
- XU Xiang-tong, XU Zhong-huai, ZHANG Dong-ning. A Probabilistic Grid Test Method of Determining Earthquake Focal Mechanisms Using P-wave Onset Polarity Data[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 1995, 16(4): 34-42.
- [25] 范俊喜, 马瑾, 刁桂苓. 由小震震源机制解得到的鄂尔多斯周边构造应力场[J]. *地震地质*, 2003, 25(1): 88-99.
- FAN Jun-xi, MA Jin, DIAO Gui-ling. Contemporary Tectonic Stress Field Around the Ordos Fault Block Inferred from Earthquake Focal Mechanisms[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(1): 88-99.
- [26] 刁桂苓, 王海涛, 高国英, 等. 伽师强震系列应力场的转向过程[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1062-1068.
- DIAO Gui-ling, WANG Hai-tao, GAO Guo-ying, et al. A Deflection Process for Stress Field of the Jiashi Strong Earthquake Sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1062-1068.
- [27] 张红艳, 谢富仁, 崔效锋, 等. 张渤带陆地段现代构造应力场的非均匀特征[J]. *中国地震*, 2009, 25(3): 314-324.
- ZHANG Hong-yan, XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng, et al. Research on Heterogeneity of the Present Tectonic Stress Field at the Overland Part of the Zhangjiakou-Bohai Fault Zone[J]. *Earthquake Research in China*, 2009, 25(3): 314-324.
- [28] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 654-662.
- XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng, ZHAO Jian-tao, et al. Regional Division of the Recent Tectonic Stress Field in China and Adjacent Areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 654-662.

“帕米尔高原现代地壳运动首期 GPS 观测及处理”一文的 补充说明

《地球科学与环境学报》2013 年第 35 卷第 1 期出版的潘正洋等的论文“帕米尔高原现代地壳运动首期 GPS 观测与处理”图 1 中 GPS 速率引自该文的参考文献[30], 特此说明!