

## 2023年12月18日甘肃省积石山6.2级地震的控震构造及特征

陆诗铭, 吴中海, 李智超

### Seismic Structure Characteristics of the 18 December 2023 $M_w$ 6.2 Jishishan earthquake Gansu province

Lu Shiming, Wu Zhonghai, and Li Zhichao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-007>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 第八届青藏高原东部构造与地球物理研讨会 (WTGTP2020) 反映的新进展

Advancement in geophysics and continental dynamics of the Tibetan Plateau: Review of the WTGTP2020

地震科学进展. 2021(12): 529–546

#### 吴忠—灵武地区地震活动性与强震危险性分析

The earthquake activity and strong earthquake risk analysis of Wuzhong–Lingwu region

地震科学进展. 2020(10): 1–12

#### 青藏高原东北缘及邻区近震S波分裂研究

Crustal seismic anisotropy of Northeastern Tibetan plateau and adjacent area from shear–wave splitting measurements

地震科学进展. 2019(8): 21–21

#### 华蓥山断裂带地震活动特征分析

Analysis on seismicity characteristics of Huayingshan fault zone

地震科学进展. 2021(10): 461–466

#### 2019年四川荣县 $M_s$ 4.9地震序列监测与活动特征研究

Research on the monitoring and seismicity characteristics of the  $M_s$ 4.9 earthquake sequence in Rong County, Sichuan Province, 2019

地震科学进展. 2021(8): 362–370

#### 基于希尔伯特–黄变换的九寨沟 $M7.0$ 地震加速度记录时频分析

Time–frequency analysis of Jiuzhaigou  $M7.0$  seismic acceleration record based on Hilbert–Huang transform

地震科学进展. 2019(7): 9–16



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陆诗铭, 吴中海, 李智超. 2023 年 12 月 18 日甘肃省积石山 6.2 级地震的控震构造及特征 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 86-93. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-007

Lu S M, Wu Z H, Li Z C. Seismic structure characteristics of the 18 December 2023 M6.2 Jishishan earthquake, Gansu Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 86-93. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-007

积石山地震专题

## 2023 年 12 月 18 日甘肃省积石山 6.2 级地震的控震构造及特征

陆诗铭<sup>1)</sup> 吴中海<sup>1,2)\*</sup> 李智超<sup>1,3)</sup>

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

2) 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081

3) 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

**摘要** 2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分在甘肃省临夏州积石山县发生 6.2 级地震, 造成了严重人员伤亡, 及时了解此次地震的发震构造及其特征, 对于分析区域未来强震危险性具有重要意义。综合区域地震构造、地质、震源机制、地震烈度和余震重定位等资料, 对此次地震的控震构造及特征进行综合分析后认为, 此次强震是发生在西宁—兰州断块内部的一次北北西向逆冲断层作用事件, 距震中最近的拉脊山逆冲断裂带构成了此次地震的控震构造。该断裂带处于北西向日月山右旋走滑断层与北西西向西秦岭北缘左旋走滑断层交汇部位, 整体呈北西至北北西向弧形展布, 包含了南缘与北缘两条倾向相反的分支断裂带。震中位置、余震及烈度分布等数据指示此次地震的具体发震断层为拉脊山北缘逆冲断裂带南段的东支断层带, 余震分布和极震区范围等符合逆断层型地震的上盘效应特征, 但是否引起同震地表变形, 还需进一步的现场调查确定。综合研究认为, 此次积石山地震是在印度与欧亚板块持续陆陆碰撞作用下, 青藏高原东北缘的西宁—兰州断块沿海原左旋走滑断裂向东侧向滑移过程中, 在北东向挤压构造应力场下, 引发日月山断层与西秦岭北缘断层构成的区域共扼走滑断裂系交汇挤压部位发生逆断层活动的结果。此次强震进一步指示青藏高原东缘的向东挤出构造体系仍是近年来我国陆内强震活动的主要控震构造, 并警示应重视活断层相对发育的断块内部城镇密集区的强震灾害风险。

**关键词** 甘肃积石山地震; 发震构造; 青藏高原东北缘; 拉脊山北缘断裂带; 西宁—兰州断块

**中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2024)01-0086-08

**doi:** 10.19987/j.dzcxjz.2024-007

## Seismic structure characteristics of the 18 December 2023 M6.2 Jishishan earthquake, Gansu Province

Lu Shiming<sup>1)</sup>, Wu Zhonghai<sup>1,2)\*</sup>, Li Zhichao<sup>1,3)</sup>

收稿日期: 2024-01-04; 采用日期: 2024-01-09。

基金项目: 中国地质调查项目(DD20221644), 国家自然科学基金云南联合基金项目(U2002211), 西藏自治区第 1 次全国自然灾害综合风险普查项目(2022 年地震灾害部分)(XZLX-BMC-2022-053)共同资助。

第一作者: 陆诗铭(1996-), 女, 博士研究生, 主要从事青藏高原活动构造。E-mail: lushiming0901@163.com。

\* 通信作者: 吴中海(1974-), 男, 研究员, 从事新构造与活动构造方面的研究工作。E-mail: wuzhonghai8848@foxmail.com。



- 1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
- 2) Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China
- 3) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** On 18 December 2023, at Beijing time, a  $M6.2$  earthquake struck Jishishan in Gansu Province. A thorough analysis of the earthquake structure and characteristics was conducted by combining information on regional seismic tectonics, geology, seismic source mechanism, seismic intensity, and aftershock relocation. The earthquake was a reverse fault event trending north-northwest within the Xining-Lanzhou fault block. The earthquake-controlling tectonics of the earthquake is the Lajishan reverse fault zone, which is closest to the epicentre of the earthquake. The fault zone is situated at the intersection of the northwest-trending Riyueshan dextral strike-slip fault and the east-west-trending Western Qinling North Rim left-trending strike-slip fault. It has an overall northwest-to-north-northwest striking angle and comprises two branch fault zones with opposite trends in the southern and northern rims. The earthquake's epicentre location, aftershock distribution, and intensity distribution data suggest that the specific fault responsible for this earthquake is the east branch fault of the southern section of the reverse fault zone at the northern rim of Lajishan. This is consistent with the characteristics of the upward disc effect of reverse fault-type earthquakes. Further detailed field investigations are required to determine the deformation of the earth's surface. The Jishishan earthquake is thought to have been caused by reverse fault activity at the intersection of the Riyueshan strike-slip fault and the northern edge of the Western Qinling fault. This was triggered by the eastward lateral slip along the original left-hand strike-slip fault along the Xining-Lanzhou fault block on the northeastern margin of the Tibetan Plateau. This occurred under the northeast-directed extrusion tectonic stress field resulting from the ongoing land-land collision between the Indian and Eurasian plates. This earthquake suggests that the extrusion tectonic system at the eastern margin of the Tibetan Plateau remains the primary structure controlling strong seismic activity in China in recent years. Further attention should be paid to the risk of strong earthquakes within the fault block.

**Keywords** Jishishan earthquake in Gansu; seismogenic structures; northeastern margin of the Tibetan Plateau; the north margin fault of Lajishan; Xining-Lanzhou fault block

## 0 引言

据中国地震台网正式测定,北京时间 2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分甘肃省临夏州积石山县发生 6.2 级地震,震源深度 10 km,震中位于(35.7°N, 102.79°E) (<https://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/409064/index.html>)。此次地震震中位置海拔平均 3800 m,高寒偏远,伴生次生灾害较多,如滑坡、砂涌等。截止 2023 年 12 月 31 日,共造成 151 人遇难,上千人受伤,给当地人民群众造成了严重的生命和财产损失。

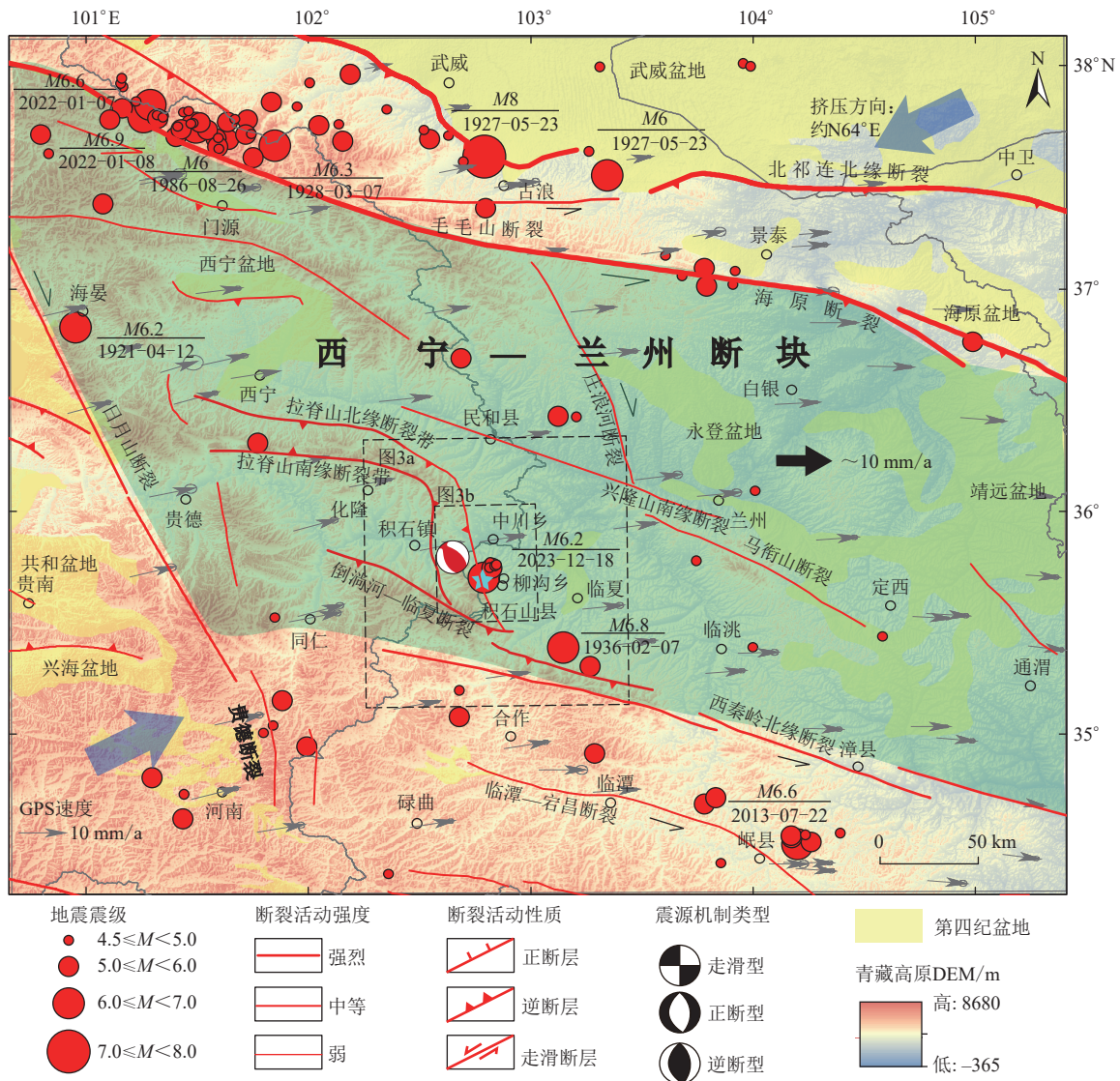
本文主要结合区域构造背景及地震相关数据,深入分析和探讨此次地震的发震构造特征与成因,从而更好地指导该区的灾后选址重建,并为区域地震危险性评价提供科学依据。

## 1 区域构造背景

研究区主要位于青藏高原东北缘由北西向西

秦岭北缘断裂带、北北西向日月山断裂及北西西向海原断裂带围限的西宁—兰州断块西南部,是青藏块体向北东挤压扩展的前缘地区,区内最大挤压力方向为约  $N64^{\circ}E$ ,发育了一系列第四纪和晚第四纪仍在活动的断裂带(图 1),已知的主要活动断裂包括海原断裂、日月山断裂、临潭—宕昌断裂、贵德断裂、西秦岭北缘断裂、拉脊山断裂带(包含了北缘断裂和南缘断裂)、庄浪河断裂、兴隆山南缘断裂、马衔山断裂、倒淌河—临夏断裂等,沿主要断裂带还发育了多个典型的新近纪—第四纪断陷盆地,如共和盆地、临夏盆地、靖远盆地和海原盆地等<sup>[1-3]</sup>。

研究区出露的最老地层为前震旦系尕让群,分布于积石山两侧。白垩系、新近系和第四系在区内广泛分布(图 2)。区内新近系主要为上新统临夏组(N2),主要分布于断陷盆地内,岩性总的向上变细,并具有盐类夹层。区内的第四系广泛发育,主要有中-下更



活动断裂数据源自文献 [4]; 地震数据与震源机制解数据源自 USGS;

GPS 数据为欧亚板块参考框架下的相对值, 源自文献 [5]

Active fault data derived from reference [4]; Seismic data and source mechanism solutions from USGS;

GPS data of stable Eurasia reference frame, derived from reference [5]

图1 研究区地震构造简图

Fig. 1 Seismic tectonic map of the study area

新统砂泥层沉积; 上更新统主要为沿河谷分布的灰色厚层-块状砂砾石层夹厚度不稳定的砂、泥层, 以及构成黄土塬的乌兰黄土层。全新统主要是疏松黄土夹砂砾石层, 主要分布于河流两侧、冲沟及盆地内<sup>[2]</sup>。

区域内距离此次地震震中最近的是拉脊山断裂带。拉脊山断裂带在大地构造上属于祁连山造山带的中祁连地块南缘构造带, 西起日月山, 东至民和, 沿拉脊山两侧山前展布, 总长约 230 km。由拉脊山北缘断裂带和拉脊山南缘断裂带两条倾向相反的分支断裂带组成, 自西向东, 其走向由 NWW 向转为 EW、NNW 向, 整体呈弧形分隔了循化盆地、西宁盆

地和临夏盆地。其中拉脊山北缘断裂带由西支 ( $F_{1-1}$ )、东支 ( $F_{1-2}$ ) 及伴生的反向断层 ( $F_{1-3}$ ) 组成, 拉脊山南缘断裂带则由南支 ( $F_{2-1}$ ) 和北支 ( $F_{2-2}$ ) 组成 (图 2)。从活动构造体系角度, 该断裂带可看做是北西向日月山右旋走滑断层与北西西向西秦岭北缘左旋走滑断层构成的共轭走滑系交汇部位的挤压区构造<sup>[6-9]</sup>。GPS 和水准资料表明, 跨断层带的拉脊山断裂带目前在水平方向处于挤压缩短状态, 垂直运动速率为 1 mm/a<sup>[10]</sup>。研究认为<sup>[3,7]</sup>, 拉脊山断裂带主体为晚更新世活动断裂, 局部可能存在全新世活动, 活动性质逆冲为主, 兼具左旋走滑, 是西宁—民和盆地



震位于拉脊山北缘断裂带上。结合震源机制解数据(图1),本次地震为 $N64^{\circ}E$ 水平挤压应力作用下,北北西向逆冲断层活动的结果,其中断层节面I:走向 $333^{\circ}$ 、倾向北东、倾角 $62^{\circ}$ 、滑动角 $88^{\circ}$ ;节面II:走向 $156^{\circ}$ 、倾向南西、倾角 $28^{\circ}$ 、滑动角 $93^{\circ}$ (震源机制解数据源自USGS)。综合分析可知,整体倾向南西、呈北北西走向的拉脊山北缘逆冲断裂最符合此次地震的震源机制特征。

拉脊山北缘断裂带西起日月山垭口山沟村,向东沿拉脊山北缘经积石山县至临夏大河家,全长约230 km,由北向南,走向从NW向转为NNW向,是一条弧形的逆冲断裂带<sup>[6-9]</sup>。跨拉脊山北缘断裂带,地形由西到东,海拔从4000 m降至2200 m左右,地貌高差约1800 m,形成了分割临夏盆地与拉脊山脉的天然屏障,也反应沿断裂存在明显的垂直运动。前人研究认为,拉脊山北缘断裂带东段的线性特征较差,但在红崖子、峡门一带有较明显的活动特征,如陡坎、断错地层等<sup>[6-10]</sup>。地震反射剖面显示,拉脊山北缘断裂带由主断裂及一系列伴生断裂构成上宽下窄的叠瓦扇逆冲构造形态<sup>[12]</sup>。通过遥感影像分析可知,拉脊山北缘断裂带实际上由拉脊山北缘断裂带西支和拉脊山北缘断裂带东支构成,两者在深部应为叠瓦式构造。综合震中位置、震源机制和拉脊山断裂带的构造特点等,可以推断此次地震的发震断层可能为拉脊山北缘逆冲断裂带南段的东支断层。

## 2.2 余震和烈度分布指示的发震断层信息

根据收集到的514次余震重定位数据(图3),此次地震的余震最大不超过4.5级,但小震密集,整体呈北北西走向,与拉脊山断裂带北缘断裂的南段一致。其中 $AA'$ 剖面显示了余震序列沿发震断层的分布特点<sup>[13]</sup>,余震主要出现在拉脊山北缘断裂带的东、西两条分支断裂之间,根据逆断层作用的上盘效应可知,余震应出现在发震断层上盘侧,因而发震断层应为拉脊山北缘断裂带东支( $F_{1-2}$ ),其中拉脊山北缘断裂带西支( $F_{1-1}$ )为逆冲上盘分支断层,两者构成了叠瓦状构造,并指示断裂活动可能存在由西向东迁移的发展趋势。而从余震主要集中在震中北西侧可知,此次地震的震源破裂过程应该是由南东向北西方向扩展的。 $BB'$ 则展示了垂直于发震构造的分布特点,地震密集区的深度主要集中在6~14 km之间,整体较浅,这应该是此次地震震害相对严重的主要原因之一。而余震活动主要集中区的宽度指示此次地震造成的震源破裂面长度约为10 km。

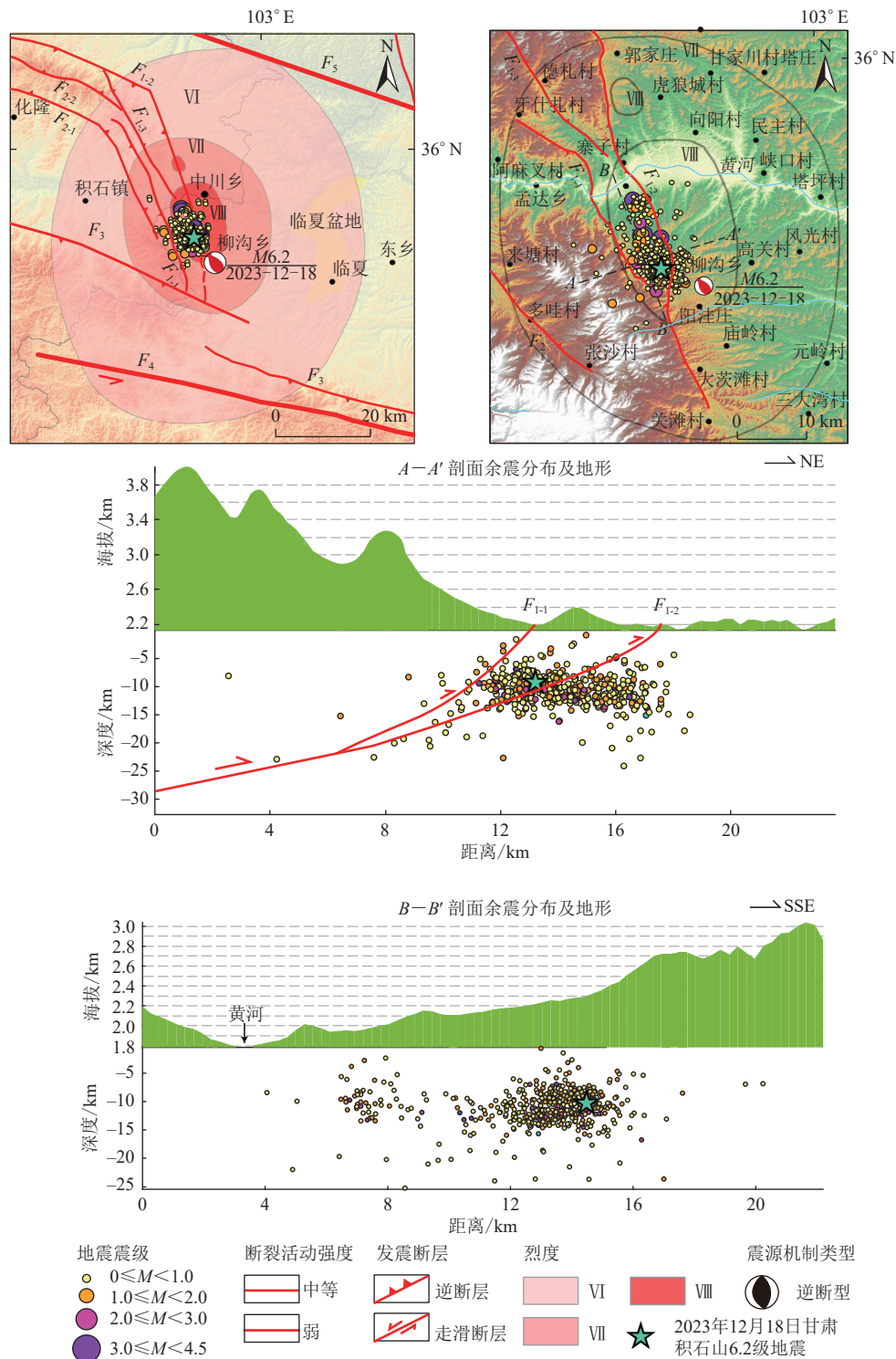
此次地震的最大烈度为Ⅷ度(8度),其中的Ⅵ度(6度)区及以上面积8364 km<sup>2</sup>,受灾范围较广、受灾程度较严重(图3)。其中Ⅷ度区主要位于拉脊山北缘与临夏一民和盆地过渡地带,包含了两部分。一部分主要包含甘肃省临夏回族自治州积石山县柳沟乡、中川乡等,短轴长约13 km,走向NEE向;长轴约25 km,走向NNW向,震感强烈,多数房屋倒塌,受损严重。另一部分主要为青海民和县甘沟乡西南侧,短轴长约3 km,长轴约5 km,走向分别为NEE向及NNW向,整体呈上窄下宽的葫芦状,主要灾害表现为砂涌,房屋开裂或倒塌,受灾严重<sup>[14-20]</sup>。极震区距离喇家遗址较近,李智敏等<sup>[6]</sup>研究发现,青海官亭盆地喇家遗址周边砂土液化造成的砂管现象明显,推断 $(3136 \pm 51)$  a BP前后沿拉脊山断裂带曾发生古地震事件,并导致黄河上游形成堰塞湖,进而推测其后的决堤洪水与喇家文化毁灭存在密切联系。Ⅶ度区主要包含甘肃省永靖县、临夏县等,青海省循化县、化隆县等,短轴长约40 km,走向NEE向;长轴约58 km,走向NNW向;房屋破坏程度一般,出现滑坡等次生灾害。Ⅵ度区受灾程度一般,多数房屋基本完好,短轴长约84 km,走向NEE向;长轴约120 km,走向NNW向,面积约6500 km<sup>2</sup>。

烈度图极震区的位置与范围以及长轴走向等可反映发震断层位置,依据逆断层型地震的上盘效应特征,在逆断层作用下,极震区(最大烈度区)一般位于发震断层及其上盘侧,根据烈度分布图显示,极震区主要位于拉脊山东侧临夏一民和盆地,长轴走向为NNW向,与拉脊山北缘断裂带东支走向及位置基本一致,指示本次地震发震断层应为拉脊山北缘逆冲断裂带南段的东支断层。

综上,研究区主要受北北东向挤压应力,综合区域地质构造、震源机制解、余震序列分布以及地震烈度等,可以推断2023年12月18日甘肃积石山地震的发震断层应为拉脊山北缘逆冲断裂带南段的东支断层,余震分布和极震区范围等都符合逆断层型地震的上盘效应特征。但此次地震是否可引起同震地表变形及其展布,还需进一步的现场调查确定。

## 3 讨论

综合活断层研究、GPS观测和震源机制解等资料可知,拉脊山地区主要处于北东向挤压环境,在北东-南西水平挤压应力作用下,北西西及近东西向断层必然表现为左旋走滑兼逆冲性质,而北北西向断



$F_1$ : 拉脊山北缘断裂带;  $F_2$ : 拉脊山南缘断裂带;  $F_3$ : 倒淌河—临夏断裂;  $F_4$ : 西秦岭北缘断裂带;  $F_5$ : 兴隆山南缘断裂;  $F_{1-1}$ : 拉脊山北缘断裂带西支;  $F_{1-2}$ : 拉脊山北缘断裂带东支;  $F_{1-3}$ : 拉脊山北缘断裂带东支反向断层;  $F_{2-1}$ : 拉脊山南缘断裂带南支;  $F_{2-2}$ : 拉脊山南缘断裂带北支

地震烈度数据源自应急管理部中国地震局 (<https://www.mem.gov.cn/>); 余震数据源自文献 [20]

Seismic intensity data from Ministry of Emergency Management, CEA (<https://www.mem.gov.cn/>);

Aftershock data derived from reference [20]

图 3 甘肃积石山地震烈度图及余震分布图

Fig. 3 Intensity map and aftershock distribution of the Jishishan earthquake

层多为右旋走滑兼逆冲特点, 类似拉脊山断裂的北 西向断裂, 主要呈逆冲兼走滑性质。很显然, 此次积

石山地震就是在印度与欧亚板块持续陆陆碰撞作用下,青藏高原东北缘的西宁—兰州断块沿海原左旋走滑断裂向东侧向滑移过程中,在北东向挤压构造应力场下,引发日月山走滑断层与西秦岭北缘断层共扼走滑断裂系交汇挤压部位逆断层活动的结果。青藏高原及邻区1900年以来的 $M \geq 6.0$ 强震活动及其发震构造特征显示,本次地震发生在青藏高原多层次挤出—旋转活动构造体系向东挤出构造系统中,是柴达木挤出构造单元中西宁—兰州次级断块内部地震。而且自1990年以来,青藏高原强震发生率和地震释放能开始显示逐步增高趋势<sup>[21]</sup>。区内1990年以来由逆冲断层引起的最大强震为青海共和 $M_w 6.5$ 地震,其发震构造为共和盆地南部的隐伏北西西向左旋逆冲断裂,同样属柴达木断块内部强震事件。考虑到青藏高原东北缘地区断块内部常发育数量较多和较为复杂的次级活动断裂系统,而且一些断块内部常常是城镇相对密集区,因而需进一步重视对断块内部活动断裂带的强震灾害风险的研究和评价。

#### 4 结论

(1)拉脊山逆冲断裂带构成了甘肃积石山地震的控震构造,该断裂带处于北西向日月山右旋走滑断

层与北西西向西秦岭北缘左旋走滑断层交汇挤压部位,包含了南缘与北缘两条倾向相反的分支断裂带。综合重定位后的主震震中位置与余震序列分布、震源机制解和地震烈度分布等,推断发震断层是该断裂带中拉脊山北缘逆冲断裂带的东支,这符合逆断层型地震的上盘效应特征,但是否引起同震地表变形,还需详细的现场调查确定。

(2)此次积石山地震是在印度与欧亚板块持续陆陆碰撞作用下,青藏高原东北缘的西宁—兰州断块沿海原左旋走滑断裂向东侧向滑移过程中,在北东向挤压构造应力场下,引发日月山走滑断层与西秦岭北缘断层共扼走滑断裂系交汇挤压部位发生逆断层活动的结果。此次强震指示青藏高原东缘的挤出构造体系仍是近年来我国陆内强震活动的主要控震构造,并警示应进一步重视断块内部的强震灾害风险。

#### 致谢

感谢中国地震局地球物理研究所房立华研究员提供的地震重定位数据。同时,衷心感谢审稿专家提供的宝贵修改意见和建议。

#### 参考文献

- [1] 张波. 西秦岭NWW向断裂系的几何图像与变形分配[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2020  
Zhang B. Fault geometry and deformation partition of WNW-trending faults in the West Qinling mountain[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2020
- [2] 张波. 西秦岭北缘断裂西段与拉脊山断裂新活动特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2012  
Zhang B. The study of new activities on western segment of northern margin of Western Qinling fault and Lajishan fault[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2012
- [3] 袁道阳. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003  
Yuan D Y. Tectonic deformation features and space-time evolution in northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau since the Late Cenozoic time[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003
- [4] 吴中海, 周春景. 中国及毗邻海区活动断裂分布图(1:500万)[M]/郝爱兵, 李瑞敏. 中国地质环境图系(图件编号: 00-01-05). 北京: 地质出版社, 2018  
Wu Z H, Zhou C J. Distribution map of active faults in China and its adjacent sea area (1:5000000)[M]/Hao A B, Li R M. Atlas sets of geological environment of China (map number: 00-01-05). Beijing: Geology Press, 2018
- [5] Wang M, Shen Z K. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(2): e2019JB018774
- [6] 李智敏, 李延京, 田勤俭, 等. 拉脊山断裂古地震与喇家遗址灾变事件关系研究[J]. 地震研究, 2014, 37(增刊1): 109-115  
Li Z M, Li Y J, Tian Q J, et al. Study on the relationship between paleoseismic on Laji mountain fault and catastrophic event on Lajishan site[J]. *Journal of Seismological Research*, 2014, 37(S1): 109-115
- [7] 袁道阳, 张培震, 雷中生, 等. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究[J]. *中国地震*, 2005, 21(1): 93-102  
Yuan D Y, Zhang P Z, Lei Z S, et al. A preliminary study on the new activity features of the Lajishan mountain fault zone in Qinghai

- Province[J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(1): 93-102
- [ 8 ] 李智敏, 田勤俭, 屠泓为. 拉脊山断裂带遥感特征研究[J]. *高原地震*, 2009, 21(1): 26-31  
Li Z M, Tian Q J, Tu H W. Remote sensing characteristics of Lajishan fault[J]. *Plateau Earthquake Research*, 2009, 21(1): 26-31
- [ 9 ] 袁道阳, 张培震, 方小敏, 等. 青藏高原东北缘临夏盆地晚新生代构造变形及过程[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 243-250  
Yuan D Y, Zhang P Z, Fang X M, et al. Late Cenozoic tectonic deformation of the Linxia basin, northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 243-250
- [ 10 ] 周琳, 王庆良, 李长军, 等. 基于 GPS 和水准资料的拉脊山断裂带西段地壳形变研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2016, 36(12): 1056-1059  
Zhou L, Wang Q L, Li C J, et al. The study of crustal deformation on western end of Lajishan fault based on GPS and leveling data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(12): 1056-1059
- [ 11 ] 潘桂棠. 青藏高原及邻区 1/150 万地质图说明书[Z]. 成都: 成都地质矿产研究所, 2005  
Pan G T. Instructions of 1/1.5 million geological map of Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas[Z]. Chengdu: Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, 2005
- [ 12 ] 杨中轩. 南祁连拉脊山北缘逆冲推覆构造带[J]. *石油实验地质*, 1993, 15(2): 138-145  
Yang Z X. On the overthrust zone in the north margin of the Lajishan, the southern Qilian Mountains[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1993, 15(2): 138-145
- [ 13 ] 张致伟, 龙锋, 石富强, 等. 2022 年 6 月 1 日四川芦山  $M_S6.1$  地震的发震构造与力学机制探讨[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(10): 4095-4110  
Zhang Z W, Long F, Shi F Q, et al. Discussion on seismogenic structure and mechanical mechanism of the 1 June 2022  $M_S6.1$  Sichuan Lushan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(10): 4095-4110
- [ 14 ] 本报记者. 应急管理部发布甘肃积石山 6.2 级地震烈度图[N]. 中国应急管理报, 2023-12-23; 1  
Reporter from this Newspaper. The Ministry of Emergency Management releases intensity map of  $M6.2$  earthquake in Jishishan, Gansu[N]. *China Emergency Management Daily*, 2023-12-23: 1
- [ 15 ] 周栋, 张成军, 严武建, 等. 2022 年青海门源 6.9 级地震发震构造及甘肃灾区震害特征研究[J]. *世界地震工程*, 2023, 39(1): 20-27  
Zhou D, Zhang C J, Yan W J, et al. Study on the seismogenic mechanism of the 2022 Menyuan  $M_S6.9$  and the seismic damage characteristics in Gansu Province[J]. *World Earthquake Engineering*, 2023, 39(1): 20-27
- [ 16 ] 马小平, 孙艳萍, 陈文凯, 等. 甘肃夏河  $M_S5.7$  地震烈度评定及震害特征分析[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(3): 777-783  
Ma X P, Sun Y P, Chen W K, et al. Seismic intensity evaluation and damage characteristics of Xiahe, Gansu  $M_S5.7$  earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2020, 42(3): 777-783
- [ 17 ] 徐钦, 田秀丰, 王维欢, 等. 2013 年甘肃岷县—漳县 6.6 级地震仪器烈度与宏观调查烈度比较分析[J]. *地震工程学报*, 2018, 40(1): 124-129  
Xu Q, Tian X F, Wang W H, et al. A comparison and analysis of instrumental intensity and macroseismic survey intensity of the 2013 Minxian-Zhangxian  $M_S6.6$  earthquake in Gansu Province[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2018, 40(1): 124-129
- [ 18 ] 郑韵. 震源机制和余震序列在地震应急烈度快速判定中的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2015  
Zheng Y. The application of focal mechanism and aftershock sequence in fast judgement of earthquake emergency intensity[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2015
- [ 19 ] 熊伟, 黄小龙, 吴中海, 等. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞  $M_S6.4$  地震震害特征及成因[J]. *地质通报*, 2022, 41(8): 1462-1472  
Xiong W, Huang X L, Wu Z H, et al. Damage characteristics and cause of  $M_S6.4$  earthquake in Yangbi, Yunnan Province on May 21, 2021[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(8): 1462-1472
- [ 20 ] 郭祥云, 韩立波, 张旭, 等. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源参数和破裂特征[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 75-85  
Guo X Y, Han L B, Zhang X, et al. Source parameters and rupture characteristics of the  $M6.2$  Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 75-85
- [ 21 ] 吴中海. 青藏高原 1990 年以来的  $M_W \geq 6.5$  强震事件及活动构造体系控震效应[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 10-24  
Wu Z H. The  $M_W \geq 6.5$  strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 10-24