doi: 10.12097/gbc.2022.06.032

青海门源 M6.9 级地震地表破裂特征及区域地震 活动趋势分析

姚生海^{1,2}, 盖海龙^{1,2}, 殷翔^{1,2}, 李鑫^{1,2}, 刘炜^{1,2} YAO Shenghai^{1,2}, GAI Hailong^{1,2}, YIN Xiang^{1,2}, LI Xin^{1,2}, LIU Wei^{1,2}

1. 青海省地震局, 青海 西宁 810010;

2. 青海格尔木青藏高原内部地球动力学野外科学观测研究站, 青海格尔木 816000

1. Qinghai Earthquake Agency, Xi'ning 810010, Qinghai, China;

2. Qinghai Golmud National Field Scientific Observation and Research Station of Geodynamics Inside the Qinghai-Tibet Plateau, Golmud 816000, Qinghai, China

摘要:据中国地震台网正式测定,2022年1月8日1时45分青海海北州门源县发生6.9级地震,震源深度10km。此次地震是2016年门源 M6.4级地震之后冷龙岭地区再次发生强震活动。此次地震的宏观震中位于距门源县城浩门镇西北50km的冷龙 岭硫磺沟地区,并在硫磺沟—大西沟一带形成规模大且连续性较好的地表破裂。地表调查显示,同震地表破裂的总长度约为23 km,整体走向 N40°~85°W,地表破裂主要由雁列的地震鼓包、张裂缝、剪切裂缝等形式组合而成,而且地表伴生了较多规模不等 的滑坡、崩塌等次生地质灾害。根据地表破裂的规模、走向及破裂特点等,可将其分为3段:东段(硫磺沟段),长约10km,走 向 N40°~60°W,破裂规模较小,以伴有重力作用的拉张裂缝为主;中段(道沟段),长约9km,走向 N70°W,破裂规模较大,以发 育规模较大的地震鼓包和剪切裂缝为主,而且左旋位移较大;西段(大西沟段),长约9km,走向 N85°W,此段规模最小,以雁 列的拉张裂缝为主。其中—东段一起组成了该破裂带的东支,而西段构成了西支,两者都具有明显的左旋走滑特征,并自东向西 破裂整体呈左阶展布,在 G227 国道以东形成了具有拉张特征的左阶阶区。综合分析表明,此次,地震发生在祁连山块体的祁 连-海原活动构造带,发震断裂应为海原左旋走滑断裂带的冷龙岭-托莱山断裂段。结合对祁连-海原构造带 1900年以来强地 震序列及托莱山断裂的初步研究认为,该构造带的历史地震活动整体具有不断向西发展的趋势,但在哈拉湖和托莱山之间存在 较明显的地震空区,因而推断托莱山断裂未来的强震危险性有增强的可能。

关键词:门源;M6.9 级地震;同震地表破裂;祁连块体;海原断裂带;托莱山断裂;地震危险性 中图分类号:P315.2⁺1 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2024)02/03-0340-10

Yao S H, Gai H L, Yin X, Li X, Liu W. Analysis on the characteristics of surface rupture and regional seismicity trend of Mengyuan *M*6.9 earthquake in Qinghai Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 340–349

Abstract: The National Seismological Network officially determined that an earthquake of magnitude 6.9 occurred in Menyuan County, Haibei Prefecture, Qinghai, at 01:45 on January 8, 2022, with a focal depth of 10 km. This earthquake is another strong earthquake activity in the Lenglongling area after the 2016 Menyuan *M*6.4 earthquake. The macro-epicenter of the earthquake was located in the Liuhuanggou area of Lenglongling, more than 50 kilometers northwest of Chenghaomen Town, Menyuan County, and a large-scale and well-continued surface rupture was formed in the area of Liuhuanggou–Daxigou. Surface surveys show that the total length of coseismic surface ruptures is about 23 km, and the overall trend is N40°~85°W. Surface rupture is mainly composed of echelon earthquake bulge, tensile crack and shear crack, and there are many secondary geological disasters such as landslides and collapses on the surface. According to the scale, strike and fracture characteristics of the surface rupture, it can be divided into three

收稿日期: 2022-06-23;修订日期: 2024-01-24

资助项目:青海省第一次地震灾害风险普查基金及门源 6.9 级地震科考基金

作者简介:姚生海(1980-),男,高级工程师,从事活动构造和古地震等研究。E-mail: shenghaiyao@sina.com

hazard

sections: the eastern section (Liuhuanggou section), about 10 km long, strikes N40°~60°W, the scale of the rupture is small, and it is accompanied by gravity. The middle section (Daogou section), about 9 km long, strikes N70°W, with a large scale of rupture, mainly developed large-scale seismic bulges and shear fractures, and large left-handed displacement; The western section (Daxigou section) is about 4 km long and strikes N85°W. This section is the smallest in scale and is dominated by extensional fractures in the geese. The middle and eastern sections together form the eastern branch of the fracture zone, while the western section forms the western branch, both of which have obvious left lateral strike slip characteristics, and it ruptures from east to west, showing a left step distribution as a whole, forming a left step area with tensile characteristics east of G227 National Highway. To the east, a left-order region with extensional features is formed. Comprehensive analysis shows that the earthquake occurred in the Qilian–Haiyuan active tectonic belt of the Qilian Mountains block, and the seismogenic fault should be the Lenglongling–Tuolaishan fault section of the Haiyuan left-lateral strike-slip fault belt. Combined with the preliminary research on the strong earthquake sequence of the Qilian–Haiyuan tectonic belt since 1900 and the Tuolaishan fault, it is believed that the historical seismicity of the tectonic belt as a whole has a trend of continuous westward development, but there is an existing trend between the Hala Lake and the Tuolaishan Mountain. There is a more obvious seismic gap, so it is inferred that the future strong earthquake risk of the Tuoleishan Mountain fault is likely to increase. **Key words:** Menyuan; *M*6.9 earthquake; coseismic surface rupture; Qilian block; Haiyuan fault zone; Tuolaishan fault; earthquake

中国地震台网正式测定,2022年1月8日1时 45分,青海省海北州门源县发生6.9级地震,震源深 度10km。截止到1月17日08时,共记录了*M*3以 上余震20次,其中4.0~4.9级地震5次,5级以上地 震2次,最大为1月12日18时20分发生的5.2级 地震。此次地震震中距门源县皇城乡驻地17km,距 门源县城56km,距西宁市135km,距甘肃省民乐县 83km、永昌县83km。此次地震是继2016年1月 21日门源6.4级地震以后该区又一次发生的强震。 地震发生时,门源县城、西宁市震感强烈,银川、兰州 等多地均有震感。同时,此次地震造成"一带一路" 重要铁路交通枢纽线兰新客运专线大梁隧道和硫磺 沟大桥受损严重,直接停运。

地震发生后,笔者第一时间到达地震现场开展 了地表调查工作。通过数日的野外地质考察,初步 查明了此次地震的同震破裂长度、破裂变形特点、分 段特征等。调查结果表明,此次地震形成了一系列 由张裂隙、剪裂隙、挤压鼓包等多种类型变形形迹组 合而成的左旋走滑同震地表破裂带,局部兼逆冲。 破裂带总体可分为东段、中段、西段,其中的中—东 段组成了此次破裂的东支,西段为破裂的西支,两支 之间存在长约 2.5 km 的左阶阶区。

地震发生后,很多学者对此次地震形成的地表 破裂进行了科学考察。例如,韩帅等(2022)从深部 构造的角度认为,冷龙岭断裂在硫磺沟段可能由 2支活动断层组成,并向深部汇聚成一条主断裂,形 成南侧正花状构造和北侧负花状构造并存的结构特 征。盖海龙等(2022)则根据破裂带的面状分布讨论 了破裂带具有典型的左旋走滑形成拉分盆地的 特征。

本文主要通过介绍此次野外考察获得的地震地 表破裂带基本特征,并结合托莱山断裂的初步调查 及地震活动等资料,探讨祁连-海原断裂带托莱山段 未来是否具有强震活动的危险性,这对于研究该地 区地震活动规律、工程设防具有指导作用。

1 区域地震构造环境

青藏高原东北缘属柴达木-祁连活动地块(张培 震等,2003),是高原向大陆内部扩展的前缘部位,也 是其最新和正在形成的重要组成部分(袁道阳等, 2004)。在印度板块向欧亚板块 NNE 向持续的构造 推挤作用中,青藏高原东北缘受北侧戈壁-阿拉善地 块和东侧鄂尔多斯块体的阻挡,处于 NE 向挤压作用 下,晚新生代以来的构造变形十分强烈,并通过地壳 缩短增厚、断块的顺时针旋转、SEE 向的挤出等多种 变形方式吸收调节青藏高原东北缘的 NE 向挤压缩 短变形,因而第四纪发育了遍布全区的逆冲断裂、褶 皱、走滑断裂等多类型的活动构造形迹(邓起东等, 2002),主要包括 NWW 向以逆冲和左旋走滑为主的 祁连山北缘断裂带、祁连-海原断裂带、肃南-祁连断裂、门源盆地北缘断裂、达坂山断裂等,以及 NNW 向右旋走滑的日月山断裂(图1)。

祁连山北缘断裂系由佛洞庙-红崖子断裂(刘兴 旺等,2012)、榆木山断裂(郑文俊等,2009)、民乐-大马营断裂(雷惊昊等,2017)、皇城-双塔断裂(侯康 明,1998)等组成。该断裂系活动性强,曾发生过

1927年古浪8.0级地震和1932年昌马7.6级地震 (周俊喜等, 1981; 国家地震局震害防御司, 1995; 罗 浩等,2016)。祁连-海原断裂带是青藏高原东北缘 发育在祁连山内部的一条重要的活动断裂,长约 1200 km, 主要表现为左旋走滑特征, 根据其走向变 化和阶区特征分为8段,从西向东依次为:哈拉湖断 裂、托莱山断裂、冷龙岭断裂(何文贵等,2000,2010; Guo et al., 2017)、金强河断裂(刘百篪等, 2013)、毛 毛山断裂(刘百篪等,2013)、老虎山断裂(刘百篪等, 2013)、海原断裂(邓起东等, 1989)和六盘山断裂(邓 起东等,1989)。沿该断裂带发生过1920年海原 8.5级地震、1986年门源 6.4级和 2016年门源 6.4 级强震,并发现多期全新世古地震事件(Guo et al., 2017)。此次门源地震的微观震中位于该断裂带的 冷龙岭断裂和托莱山断裂结合部位(盖海龙等,2022; 韩帅等, 2022)。门源盆地北缘断裂全长约 40 km, 以 逆冲为主,兼左旋走滑,是门源盆地的控盆断裂,但 晚第四纪活动性相对区域上其他大型走滑断裂较弱 (马保起等,2008)。而日月山断裂是位于青海湖东 部的一条 NNW 向右旋走滑断裂,该断裂上虽然缺乏 历史强震事件,但全新世活动性显著,应是一条调节 该区域构造变形的重要活动断裂(袁道阳等,2003)。

2 地表破裂分段特征

地震地表破裂调查表明,门源地震形成了一系列由张裂隙、剪裂隙、挤压鼓包、左旋走滑断层等多种类型的同震地表破裂带,断裂性质以左旋走滑为主,局部兼逆冲。破裂带总体可分为东段、中段、西段,其中东段和中段组成了门源地震破裂的北支,西段为破裂的南支,南、北2支形成了2.5 km 左右的 左旋左阶阶区。

综合地表破裂的规模、走向、破裂特征等的差 异,可将此次同震地表破裂带分为东、西2支。其中 东支东起棵树沟(东经101.361°、北纬37.763°),向 西经硫磺沟大桥(东经101.309°、北纬37.787°)、道 沟(东经101.228°、北纬37.807°),终止于下大圈沟 附近(东经101.173°、北纬37.818°),破裂带长度约 19 km,该支包含了整个破裂的东段和中段。东段长 约10 km,走向由 N40°W转为 N60°W,位于冷龙岭 硫磺沟永定河南侧山腰。中段长约9 km,走向 N70°W,位于硫磺沟北侧的道沟—下大圈沟一带。 西支由破裂的西段组成,该段东起 G227 国道狮子沟 以西(东经101.162°、北纬37.794°),沿大西沟向 西展布,终止于大西沟内(东经101.121°、北纬 37.796°),长约4km,走向N85°W(图2)。

2.1 东段(硫磺沟段)

东起棵树沟东南的河谷北侧,向NWW沿硫磺 沟南侧的山脚—山腰部位延伸,走向从 N40°W 逐渐 转为 N60°W,长度大于 10 km。该段破裂规模较大, 单段破裂上可见雁列的拉张裂缝、地震鼓包、剪切裂 缝等变形组合。该段破裂在棵树沟以西主要展布在 冷龙岭的山脚及山腰部位,而且局部段落在重力作 用下拉张裂缝十分发育,裂缝时宽时窄。在较平缓 的山前台地裂缝一般宽 5~40 cm(图版 I-a~c),但 在较高的山腰部位,在地震引起的振动和重力共同 作用下,山体表面地层形成"山扒皮"的现象,局部可 见裂缝宽度达1~2m(图版 I-d)。在永定河的二级 阶地及小冲沟内,发育一段长约 600 m 的断层陡坎 (图版 I-f, 东经 101.338°、北纬 37.773°), 陡坎高约 1 m,发现破裂带具有明显的逆冲特征,在重力和逆 冲的共同作用下, 地表的草皮最大滑动量达 1.9 m, 倾向 SW(图版 I-e, 东经 37.772°、北纬 101.330°)。 在山前冲积扇上, 地震在地表形成长约 200 m、高 1.2 m 左右的断层陡坎(图版 I-f, 东经 101.333°、北 纬 37.771°)。在垂直于永定河的小冲沟内,可见最新 的河床砾石层明显被断错,形成高约1.3m的挤压鼓 包(图版 I-g, 东经 101.339°、北纬 37.772°), 而且由 于逆冲作用,在河道上形成南高北低、约30 cm 的高 断坎。

2.2 中段(道沟段)

东起永定河南岸(东经101.263°、北纬 37.797°),横穿永定河后向NWW延伸到道沟,终止 于下大圈沟以西(东经101.173°、北纬37.818°)附 近,此段走向与东段有明显的偏转,整体走向N70°W, 破裂长约9km。该处破裂带规模较大且连续性好, 以发育较大规模的地震鼓包和剪切裂缝为主,而且 左旋位错现象相对显著。沿线可见整体走向NE、高 达1.4m、长约3m的地震挤压鼓包(图版II-a,东 经101.253°、北纬37.802°),与破裂带整体走向形成 70°~80°的夹角,显示了左旋走滑破裂带上的局部挤 压特征。该段局部还发育较典型的逆冲特征,在一 处山腰部位,地层在逆冲和重力的共同作用下,山坡 高处的表层土层逆冲形成高达2.4m的陡坎,倾向 NE(图版II-b,东经101.257°,北纬37.801°)。另在



图 1 研究区活动构造简图

Fig. 1 Sketch map of active structure in the study area





山间谷地,可见连续发育的雁列地震鼓包,长约几米 到几十米不等,高 50 cm 左右(图版 II -c);该段还发 育大量的张剪裂缝和拉张裂缝,其中张剪裂缝与破 裂带的整体走向基本一致,裂缝最宽可达 1.1 m(图 版 II -d),而拉张裂缝与破裂带整体走向呈 30°左右 的夹角,指示了破裂的左旋走滑性质,最大宽度 0.5 m 左右。 中段可见多处发育典型的左旋断错现象,包括 在东经101.243°、北纬37.805°处见牧场围栏位移 2.1 m(图版Ⅱ-e),在东经101.258°、北纬37.800°处 见河岸边坡左旋位移1.9 m(图版Ⅱ-f)。同时,在一 些部位可发现走滑形成的近似水平的擦痕,产状为 倾向 NW、倾角10°(图版Ⅱ-g),以及局部逆冲作用 形成的倾向 NE、倾角为50°的擦痕(图版Ⅱ-h)。



a~g.东段(硫磺沟段)地震地表破裂特征。a~c.地表裂缝;d.形成的"山扒皮";e.地表地层向下滑动; f.此次地震形成的断层陡坎;g.地震鼓包

2.3 西段(大西沟段)

东起宁张公路(227 国道)狮子沟附近(东经 101.162°、北纬 37.794°),向西沿大西沟北侧的山前 洪积扇近 EW 向延伸,终止于大西沟中部(东经 101.121°、北纬 37.796°),全长约4km。该段破裂主 要分布在山前洪积扇上,由于该段破裂带的末端,相 对于中、东段规模较小,主要发育较小规模的张裂 缝、张剪裂缝和地震鼓包。该段的水平位错量也普 遍较小,其中在一条小的冲沟,地震使得冲沟左旋走 滑,最大走滑量 1.0 m 左右(图版Ⅲ-a)。该段发育的地 震鼓包普遍规模较小,高度多在 20 cm 以下(图版Ⅲb, c)。地表破裂中的裂缝多以拉张或张剪裂缝为 主,规模较小,单条长数米至数十米不等,而宽度多 在 20 cm 以下(图版Ⅲ-d, e)。

3 发震断裂及其特征

冷龙岭断裂位于祁连-海原断裂带中西段,断裂 西端与托莱山断裂呈左阶斜列分布,断裂长约 120 km,



a~h.中段(道沟段)地震地表破裂特征。a~c.地震鼓包;d.剪切裂缝;e,f.左旋走滑(图 e 由兰州大学袁道阳教授提供); g,h.地层中形成的擦痕

线性特征明显,总体走向 N110°~115°E,西起硫磺沟 西侧的大圈窝地区,沿东祁连山山脉分水岭向东延 伸,经岗什卡主峰南侧、抓石旦达阪、宁缠垭豁、讨 拉柴陇、他里花沟柴陇、羊盘场、红窑岘,东止于双 龙沟拐弯处的火烧台地区。断裂早期活动以挤压逆 冲为主,自中更新世以来,断裂活动性质以左旋走滑 为主,兼正断层分量(何文贵等,2002)。晚第四纪断 裂活动强烈,主要表现为左旋走滑运动(Guo et al., 2017),沿断裂形成了一系列显著的断错地貌,如水 系、冲洪积阶地、冰川谷、冰碛垄,以及山脊的同步



a~e.西段(大西沟段)地震地表破裂特征。a.左旋位移; b,c.地震鼓包; d,e.地表裂缝



a~d. 托莱山影像显示的线性特征及陡坎。a.瓦翁沟附近影像线性特征;b.瓦翁沟附近陡坎照片; c.天棚河附近影像线性特征;d.天棚河附近陡坎照片

左旋位错现象(何文贵等,2002,2010;Guo et al., 2017)。

作为祁连-海原断裂系的断裂分段,前人对托莱 山断裂的地震活动性研究较少。笔者在遥感解译时 发现,在阿柔乡以南的托莱山有2段长约2.3 km、 2.5 km 的线性特征,初步判断是断裂活动的迹象。 经野外初步调查发现,在瓦翁沟附近的山腰部位,发 育平行的2段反向陡坎,形成断层凹槽,最大深度 1.5 m 左右,且水系有明显的左旋走滑特征,总体走 向 N80°W 左右, 长约 2 km(图版 Ⅳ-a, b); 同样在天 棚河附近的山腰部位,发育陡坎,总体走向 N70°W, 长约 1.5 km(图版IV-c, d)。分析认为,该陡坎可能 是断裂早期活动形成的。托莱山断裂在晚更新世晚 期—全新世早期可能有所活动,全新世以来活动有 所减弱。韩竹军等(2022)在托莱山东段大西沟附近 进行了探槽开挖,显示断裂近千年以来未发生过破 裂。遥感线性影像和初步考察及其他学者探槽开挖 的结果显示,托莱山断裂全新世晚期以来活动性较 弱,未发现断裂活动的证据。

4 区域未来地震活动趋势分析

从祁连-海原断裂系 100 多年来的地震活动趋 势看,该断裂系发生过 1920 年海原地震 8.5 级、1927 年古浪 8.0 级、1986 年门源 6.4 级、2016 年门源 6.4 级等强烈地震(国家地震局震害防御司,1995) (图 3)。在 20 世纪 90 年代,很多专家根据甘肃省天 祝县一带形成的"地震空区"(Gaudemer et al., 1995; Lasserre et al., 2002), 认为金强河-毛毛山-老虎山断 裂未来强震发生的危险性增高(郑文俊等,2004;崔 笃信等, 2009; 甘卫军等, 2022)。2016年门源 6.4级 地震和 2022 年门源 6.9 级地震以来,李彦宝等 (2017)、潘家伟等(2022)也认为金强河-毛毛山-老 虎山断裂未来强震发生的危险性增高,但是自天祝 "地震空区"提出以来,区内未发生任何强烈地震,而 在祁连-海原断裂系的冷龙岭断裂分别发生了 2016 年、2022年6.4级和6.9级地震,尤其是2022年 6.9级地震形成的地表破裂向西延伸至托莱山段,时 隔不久,2022年1月23日在祁连-海原断裂系西段 的哈拉湖段发生了德令哈 5.8 级地震,同年 3 月 26 日德令哈随再次发生 6.0 级地震及多次余震。综合 祁连-海原断裂系近百年的地震活动趋势及托莱山 断裂局部断错地貌特征,笔者认为祁连-海原断裂系 地震活动有向西发展的趋势,在哈拉湖-冷龙岭之间 的托莱山段形成了"地震空区",托莱山断裂可能处 于一个能量即将释放的阶段,研究托莱山断裂的基 本特征,有助于了解、掌握地震趋势的发展和规律。

5 讨 论

5.1 余震分布特点

许英才等(2022)利用多阶段定位方法对门源 M6.9级地震序列早期地震进行了重新定位,结果显示,地震的震中主要沿着冷龙岭断裂西段呈 NWW— SEE 向展布,优势长轴长约 30 km,宽约 5 km,大体



图 3 青藏高原东北缘主要活动断裂及强震分布图

Fig. 3 Distribution map of main active faults and strong earthquakes in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

呈现双侧破裂的特征。余震的震源机制类型主要为 走滑型, P 轴走向从余震区西段到东段之间大体呈现 由 NE 向到 EW 向的变化, 并在 EW 向呈现明显的 分区特征, 表明余震区东、西部构造变形模式存在较 显著的差异。

通过余震精定位结果发现,余震在棵树沟主要 分布在硫磺沟北侧;在棵树沟以西,主要分布在硫磺 沟南侧。但是,在地震地表破裂最显著的中段(道沟 段)小震不发育。从野外地表破裂调查分析可知,破 裂带在道沟(中段)比东段、西段规模大,同震地表破 裂走向与小震精定位结果不完全一致,是小震精定 位结果有误差,还是有破裂未发现?亦或是断层深 部产状变化的结果,值得进一步深入研究。

5.2 构造意义

2001年昆仑山口西 8.1级地震(陈杰等,2001)、 2010年玉树 7.1级地震(吴中海等,2014)与 2021年 玛多 7.4级(盖海龙等,2021;姚生海等,2021)地震 等,其发震构造都为左旋走滑,表现为左阶左旋走 滑,并且有多个破裂分段,形成了较大的破裂阶区。 本次门源 6.9级地震同样是左阶左旋走滑,产生了 近 4 km 的阶区。另外,此次门源地震不仅形成了较 大的左旋走滑,而且在硫磺沟段形成倾向 SW 的逆 冲面,在道沟段又形成倾向 NE 的逆冲面,构成典型 的花状构造特征,与韩帅等(2022)提出的南侧正花 状构造和北侧负花状构造并存的结构特征对应,断 裂控制了硫磺沟的发育及走向。

5.3 未来地震危险性

此次门源 6.9 级地震是继 1986 年门源 6.4 级、 2016 年门源 6.4 级地震后该地区的又一次强地震。 关于该地区未来的地震危险性,李彦宝等 (2017)、潘 家伟等 (2022) 认为,金强河-毛毛山-老虎山断裂未 来强震发生的危险性增高。韩帅等 (2022) 认为,该 区域的日月山断裂、门源盆地北缘断裂和民乐断裂 的强震危险性存在增大的可能。朱琳等 (2022) 认 为,祁连-海原断裂带西段的木里-江仓断裂和托莱 山断裂及中段的金强河-老虎山断裂未来地震危险 性高。

笔者通过对托莱山断裂的初步调查认为,托莱 山断裂可能存在较明显的全新世活动性,但全新世 晚期以来处于闭锁阶段。结合对 1900 年祁连-海原 地震构造带上历史与仪器记录的地震活动分布发 现,沿该构造带的地震活动有向西发展的趋势,并在 哈拉湖和托莱山之间存在较显著的"地震空区",托 莱山断裂可能处于一个能量即将释放的阶段,暗示 托莱山断裂带上的未来地震危险性有增强的可能。

6 结 论

(1)根据现场调查,此次门源 6.9 级地震地表破 裂带全长约 23 km,整体走向 N40°~85°W,破裂形式 主要由雁列的张裂缝、张剪裂缝、挤压鼓包等多类型 破裂组合而成,总体表现为左旋走滑运动性质为主 兼逆冲。

(2)该破裂可分为东、西2支,其中东支中段(道 沟段)长度长、规模大,左旋走滑变形特征最显著,最 大左旋位移约2.1m,而东支东段兼明显的逆冲分 量,垂直位移量约1.0m;西支破裂长度较短,规模较 小,最大左旋位移约1.0m。通过对比不同破裂分段 的破裂规模、长度等,认为此次地震的宏观震中位于 中段道沟一带。

(3)通过对海原断裂带地震活动分布及此次地 震破裂的特征认为,未来海原断裂托莱山段地震危 险性有所增强。

参考文献

- Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. 2002. Fast Late Pleistocene Slip Rate on the Lenglongling Segment of the Haiyuan Fault, Qinghai, China[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth(1978–2012), 107(B11): 2276.
- Guo P, Han Z J, An Y F, et al. 2017. Activity of the Lenglongling fault system and seismotectonics of the 2016 MS6.4 Menyuan earthquake[J]. Science China Earth Sciences, 60(5): 929–942.
- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, et al. 1995. Partitioning of Crustal Slip bet ween Linked, Active Faults in the East–ern Qilian Shan, and Evidence for a Major Seismic Gap, the"Tianzhu Gap', on the Western Haiyuan Fault, Gansu(China)[J]. Geophysical Journal International, 120(3): 599–645.
- 崔笃信, 王庆良, 胡亚轩, 等. 2009. 用 GPS 数据反演海原断裂带断层 滑动速率和闭锁深度[J]. 地震学报, 31(5): 516-525.
- 陈杰,陈宇坤,丁国瑜,等.2001.年昆仑山口西 8.1级地震地表破裂带[J].第四纪研究,23(6):629-639.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等.2002.中国活动构造特征[J].中国科学(D辑),32(17):1020-1030.
- 邓起东,张维岐,张培震,等. 1989.海原走滑断裂带及其尾端挤压构 造[J].地震地质,11(1):1-14.
- 甘卫军, 刘百篪. 2022. 景泰-天祝断裂单元与多重特征地震的危险性 概率评估[J]. 地震地质, 24(1): 45-58.
- 盖海龙,姚生海,杨丽萍,等. 2021. 青海玛多"5-22" Ms7.4 级地震的同 震地表破裂特征、成因及意义[J]. 地质力学学报, 27(6): 899-912.

- 盖海龙, 李智敏, 姚生海, 等. 2022. 2022 年青海门源 Ms6.9 地震地表 破裂特征的初步调查研究[J]. 地震地质, 44(1): 238-255.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录[M]. 北京: 地震出版社: 1-514.
- 何文贵, 刘百篪, 袁道阳, 等. 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报, 22(1): 90-97.
- 何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 2010. 祁连山活动断裂带中东段冷龙岭断 裂滑动速率的精确厘定[J]. 地震, 30(1): 131-137.
- 韩帅,吴中海,高扬,等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 Ms6.9 地震 地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危 险性的启示[J].地质力学学报, 28(2): 155–168.
- 韩竹军,牛鹏飞,李科长,等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 6.9 级地 震的一些初步认识[EB/OL].https://www.eq-igl.ac.cn/zhxw/info/2022/ 36632.html.
- 侯康明. 1998. 皇城-双塔断裂带的几何分段及运动学特征[J]. 华南地 震, 18(3): 28-34.
- 刘兴旺, 袁道阳, 郑文俊, 等. 2012. 祁连山北缘佛洞庙-红崖子断裂晚 第四纪滑动速率研究[J]. 地质科学, 47(1): 51-61.
- 雷惊昊, 李有利, 胡秀, 等. 2017. 东大河阶地陡坎对民乐-大马营断裂 垂直滑动速率的指示[J]. 地震地质, 39(6): 1256-1266.
- 刘百篪, 吕太乙, 袁道阳, 等. 2013. 祁连山活动断裂东段 (老虎山毛毛山和金强河断裂) 地质图[M]. 北京: 地震出版社.
- 李彦宝, 甘卫军, 王阅兵, 等. 2017. 2016 年门源 Ms6.4 强震的发震构 造及其对"天祝地震空区"的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 37(8): 792-796.
- 罗浩,何文贵,袁道阳,等. 2016.昌马断裂带古地震活动特征的新认识[J].

地震工程学报, 38(4): 632-637,668.

- 马保起,李德文.2008. 祁连山中段门源盆地新构造运动的阶段划 分[J]. 地质力学学报,14(3):201-211.
- 潘家伟,李海兵, Marie-Luce Chevalier,等. 2022. 2022 年青海门源
 Ms6.9 地震地表破裂带及发震构造研究[J]. 地质学报, 96(1):
 215-231.
- 吴中海,周春景,冯卉,等. 2014. 青海玉树地区活动断裂与地震[J]. 地 质通报, 33(4): 419-469.
- 许英才,郭祥云,冯丽丽. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 MS6.9 地震 序列重定位和震源机制研究[J]. 地震学报, 44(2): 195-210.
- 袁道阳, 刘小龙, 张培震, 等. 2003. 青海热水-日月山断裂带的新活动 特征[J]. 地震地质, 25(1): 155-165.
- 袁道阳,张培震,刘百娆,等.2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造 的几何图像与构造转换[J]. 地质学报,78(2):270-278.
- 姚生海, 盖海龙, 殷翔, 等. 2021. 青海玛多 Ms7.4 地震地表破裂带的基本特征和典型现象[J]. 地震地质, 43(5): 1060-1072.
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003.中国大陆强震活动与活动地块[J]. 中国科学 (D 辑), 33(S1): 12-20.
- 郑文俊,袁道阳,何文贵,等.2004. 祁连山中东段强震复发概率模型及 未来强震地点预测[J]. 西北地震学报,26(3):228-233.
- 郑文俊,张培震,袁道阳,等.2009.GPS 观测及断裂晚第四纪滑动速率 所反映的青藏高原北部变形[J].地球物理学报,5(10):2491-2508.
- 周後喜,张生源, 1981. 1932年昌马 7.5 级地震形变带及其构造背景的 初步分析[J].西北地震学报, 3(1): 92-100.
- 朱琳,戴勇,石富强,等. 2022. 祁连-海原断裂带库仑应力演化及地震 危险性[J]. 地震学报, 44(2): 223-236.