



## 2022年1月8日青海门源 $M_S$ 6.9级地震序列、地表破裂特征及其工程效应

殷翔, 绽蓓蕾, 姚生海, 余娜, 徐玮阳

The seismic sequence and coseismic surface rupture produced by the 2021  $M_S$  6.9 Menyuan earthquake and its engineering effect

YIN Xiang, ZHAN Beilei, YAO Shenghai, YU Na, and XU Weiyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-126>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 九寨沟漳扎镇 $M7.0$ 地震灾害分析

Analysis on  $M7.0$  earthquake disaster in Zhangzha town of Jiuzhaigou  
地震科学进展. 2018(6): 22–27

##### 2017年全球地震灾害概要

Overview of worldwide earthquake disasters in 2017  
地震科学进展. 2018(7): 23–28

##### 2019年全球地震灾害概要

Overview of worldwide earthquake disasters in 2019  
地震科学进展. 2020(9): 1–7

##### 2020年全球地震灾害概要

Overview of worldwide earthquake disasters in 2020  
地震科学进展. 2021(7): 289–296

##### 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

##### 2021年3月5日新西兰克马德克群岛 $M7.8$ 面波震级测定差异分析

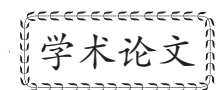
Difference in determination of surface wave magnitude of the  $M7.8$  Kermadec Island earthquake on March 5, 2021 in New Zealand  
地震科学进展. 2021(9): 395–399



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

殷翔, 绽蓓蕾, 姚生海, 等. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_S6.9$  地震序列、地表破裂特征及其工程效应 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 57-64. doi:10.19987/j.dzxxjz.2023-126

Yin X, Zhan B L, Yao S H, et al. The earthquake sequence, surface rupture characteristics and engineering effects of the  $M_S6.9$  Qinghai Menyuan earthquake on January 8, 2022[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 57-64. doi:10.19987/j.dzxxjz.2023-126



## 2022 年 1 月 8 日青海门源 $M_S6.9$ 地震序列、 地表破裂特征及其工程效应

殷 翔\* 绽蓓蕾 姚生海 余 娜 徐玮阳

(青海省地震局, 青海西宁 810001)

**摘要** 2022 年 1 月 8 日 01 时 45 分, 青海省海北藏族自治州门源县发生  $M_S6.9$  地震。为深入了解此次地震的活动特征, 以地震灾害损失调查为基础, 结合无人机低空摄影测量以及余震数据分析等多种手段, 对硫磺沟内的地表破裂带及交通系统的震害进行了初步调查分析, 此次同震地表破裂以左旋走滑变形为主, 伴有一定的逆冲分量, 最大左旋位移量为 3.1 m。地震还造成兰新高铁硫磺沟大桥、大梁隧道遭受严重破坏, 主要表现为主梁侧翻滑移, 轨道扭曲变形, 隧道内部结构出现错位变形等现象。最后, 对该地区今后桥梁的抗震设防措施提出建议。

**关键词** 门源地震; 同震地表破裂; 左旋走滑; 地震灾害

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)01-0057-08

doi: 10.19987/j.dzxxjz.2023-126

## The earthquake sequence, surface rupture characteristics and engineering effects of the $M_S6.9$ Qinghai Menyuan earthquake on January 8, 2022

Yin Xiang, Zhan Beilei, Yao Shenghai, Yu Na, Xu Weiyang

(Qinghai Earthquake Agency, Qinghai Xining 810001, China)

**Abstract** At 01:45 on January 8, 2022, an  $M_S6.9$  earthquake occurred in Menyuan County, Haibei Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province. In order to gain a deeper understanding of the activity characteristics of this earthquake, the author conducted a preliminary investigation and analysis of the surface rupture zone and traffic system damage in the Liuhuanggou based on the investigation of earthquake disaster losses, combined with various methods such as drone low altitude photogrammetry and aftershock data analysis. The fault activity was mainly characterized by left-lateral strike-slip motion, accompanied by a certain thrust component, with a maximum left lateral displacement of 3.1 m. At the same time, the earthquake caused serious damage to the Liuhuanggou bridge and the Daliang tunnel of the Lanxin

收稿日期: 2023-09-10; 采用日期: 2023-12-18。

基金项目: 中国地震局星火计划项目(XH21038Y)资助。

\* 通信作者: 殷翔(1989-), 男, 工程师, 主要从事地震应急、地震构造等研究。E-mail: 544261740@qq.com。



high-speed railway, mainly manifested as beam overturning and sliding, track distortion and deformation, and internal structure displacement and deformation of the tunnel. Finally, this article provides opinions and suggestions on the seismic fortification measures for bridges in the region.

**Keywords** Menyuan earthquake; coseismic surface rupture; left-lateral strike-slip; earthquake disaster

## 0 引言

据中国地震台网正式测定, 2022 年 1 月 8 日 01 时 45 分, 我国青海省门源县发生了  $M_s6.9$  地震, 震源深度约为 10 km, 震中极震区烈度为 IX 度<sup>[1-2]</sup>。根据初步反演的震源机制解<sup>[3-5]</sup>(表 1), 此次地震的地表破裂带呈近东西向, 走向为  $112^\circ$ , 倾角为  $88^\circ$ <sup>[6]</sup>, 破裂带主要以左旋走滑运动为主<sup>[7]</sup>, 形成了多种形式的雁行状地表破裂带, 如张裂缝、挤压鼓包等, 主要分布在冷龙岭断裂与托莱山断裂的交汇处。

此次门源  $M_s6.9$  地震是继 1986 年和 2016 年的两次门源  $M_s6.4$  地震之后, 又一次引起广泛关注的大震。因此, 对此次地震的活动特征进行及时研究, 有

助于我们正确认识青藏高原东北缘活动构造体系及发震构造的活动特性<sup>[8]</sup>, 并为区域防震减灾规划提供重要战略参考。

地震发生后, 笔者随青海省地震局现场工作队第一时间赶赴震区, 开展烈度调查和地表破裂带考察。在现场调查的基础上, 结合无人机低空摄影测量技术, 重点获取了硫磺沟的同震破裂资料。同时, 沿着破裂带向两侧追踪, 发现了此次地震破裂带的活动特性。本文主要基于这一调查结果, 结合余震分布特征, 对同震地表破裂的发育特点以及断层效应产生的地震灾害进行特征分析, 期望这些研究结果能为该区域的抗震设防和地震易发区的判定提供坚实的基础资料。

表 1 震源机制解

Table 1 Source mechanism solution

序号	震中位置		深度/km	节面 I			节面 II			震级 ( $M_w$ )	数据来源
	北纬/ $^\circ$	东经/ $^\circ$		走向/ $^\circ$	倾向/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾向/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$		
1	37.815	101.278	11.5	104	88	13	13	75	178	6.6	USGS <sup>①</sup>
2	37.80	101.31	14.8	104	82	1	14	89	172	6.7	GCMT <sup>②</sup>
3	37.81	101.34	15.0	285	82	16	193	74	172	6.6	GFZ <sup>③</sup>
4	37.77	101.258	7.8	290	81	16	197	74	171	6.6	文献[3]

注: ① <https://www.usgs.gov/>; ② <https://www.globalcmt.org/CMT.search.html>; ③ <http://geofon.gfz.potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2022amie>

## 1 区域构造背景

本次地震发生于祁连山构造带内。祁连山构造带形成于古生代加里东期, 其主要由北祁连造山带、中祁连地块和南祁连造山带等构成<sup>[9]</sup>。祁连造山带历经多期造山运动, 现今活动构造是在原有构造基础上, 伴随青藏高原的隆起和扩展而形成, 主要由逆冲推覆构造和走滑断裂组成。其中, 逆冲推覆构造引发山体隆升, 而走滑断裂则调控高原扩展。阿尔金断裂带和祁连—海原断裂带是该区主要的走滑断裂, 前者控制了高原向北扩展, 后者则调节了高原向东扩展。祁连山构造带是青藏高原与阿拉善块体的交界地带, 其特征为斜向逆冲活动。这些逆冲断裂受深部滑脱面的控制, 经历了多期构造演化。祁连山内部的

逆冲断裂主要沿袭先存断裂不同程度的活动, 而祁连山北缘则形成了新的逆冲断裂带(图 1)。

冷龙岭断裂位于青藏高原东北缘的核心枢纽部位, 与托莱山断裂一同构成祁连—海原断裂带在青海省境内的关键部分。作为全新世活动断裂, 其运动特征表现为左旋走滑与逆冲并存。冷龙岭断裂紧随祁连山山系蜿蜒, 全长约 120 km, 其几何分布特征显著。断裂的总体走向为  $N110^\circ\sim115^\circ E$ , 其通过之处塑造了典型的断错地貌, 如水系的左旋位错和山脊扭曲变形<sup>[10-11]</sup>。

托莱山断裂是祁连—海原断裂带的重要组成部分, 其总体走向为  $290^\circ\sim300^\circ$ , 倾向南西, 倾角在  $40^\circ\sim60^\circ$  之间<sup>[12]</sup>, 该断裂全长约 300 km, 与冷龙岭断裂的转换关系为左阶斜裂<sup>[13]</sup>。值得注意的是, 托莱山

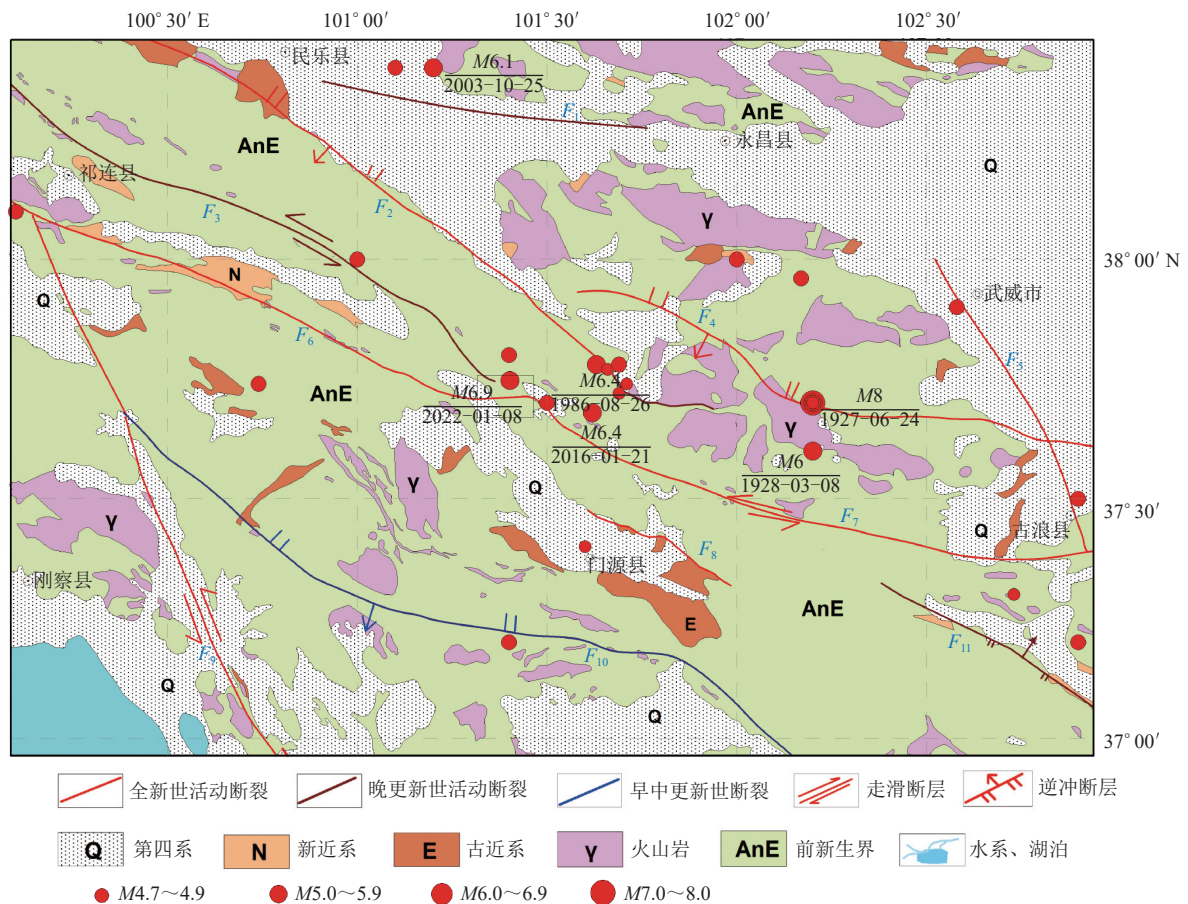


图1 研究区主要活动断裂和历史地震分布图

Fig. 1 Distribution map of main active faults and historical earthquake in the research area

断裂通过处的断错地貌特征显著, 遥感影像显示多处山脊被左旋断错<sup>[14]</sup>。德令哈活断层探测项目对托莱山断裂的研究发现, 该断裂在全新世时期有过活动。通过对探槽揭露的地层层序复位分析, 杨丽屏和苏旭<sup>[15]</sup>得出了断裂的复发周期约为 2000~3000 a。

## 2 地震活动序列

截至 2022 年 12 月 31 日 24 时共记录到  $M > 3.0$  余震 50 次, 其中 5.0~5.9 级地震 1 次, 4.0~4.9 级地震 14 次, 3.0~3.9 级地震 35 次, 最大余震为 5 月 22 日 10 时 29 分发生的 5.2 级地震。余震主要呈北西西向分布, 震源深度集中在 5~17 km。

为了更加准确的反映地震活动特性, 对此次地震的主震及余震进行了精定位。图 2a 为重定位前门源地震序列震中分布图, 图 2b 为重定位后震中分布。重定位前后地震展布形态没有发生明显变化, 但主震位置向西侧偏移, 即更加靠近冷龙岭断裂, 重定

位后主震震中位置为 (37.770°N, 101.270°E), 震源深度为 9.94 km。震中分布显示, 门源地震序列分为东、西两段, 西段呈 NWW 向分布, 长约 19 km, 宽约 7 km, 与冷龙岭断裂的走向一致; 东段呈 EW 向分布, 长约 15 km, 宽约 8 km, 沿托莱山断裂展布。 $M_{\text{s}}6.9$  主震位于序列西段的东南部,  $M_{\text{s}}6.9$  主震西侧余震密集, 展布较宽;  $M_{\text{s}}6.9$  主震东侧余震较稀疏, 展布宽度仅有 4 km。1 月 12 日  $M_{\text{s}}5.2$  余震发生在序列东段, 1 月 10 日前余震主要集中在东段的中西部, 在  $M_{\text{s}}5.2$  地震发生后该区域地震活动较为活跃<sup>[16]</sup>。

## 3 同震地表破裂带特征

根据现场调查, 此次地震产生了一系列挤压鼓包、张剪裂缝等多种类型的复合破裂带<sup>[17]</sup>。本研究对硫磺沟内的地表破裂带进行了无人机低空摄影测量<sup>[18]</sup>, 结果显示地表破裂带呈 NW 向 SE 方向分布 (图 3)。在硫磺沟公路两侧, 我们可以清楚地看到地表破裂



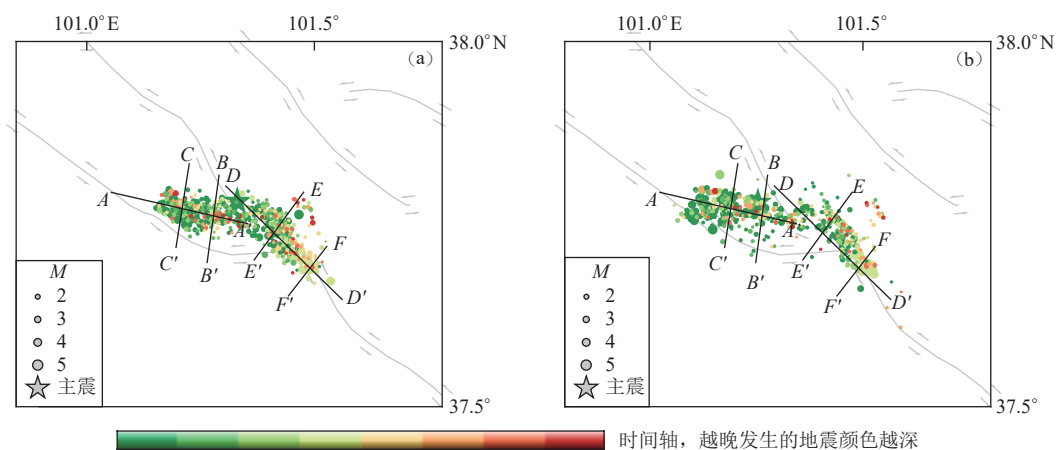


图2 门源地震余震精定位分布图

Fig. 2 Distribution map of precise positioning of aftershocks from the Menyuan earthquake

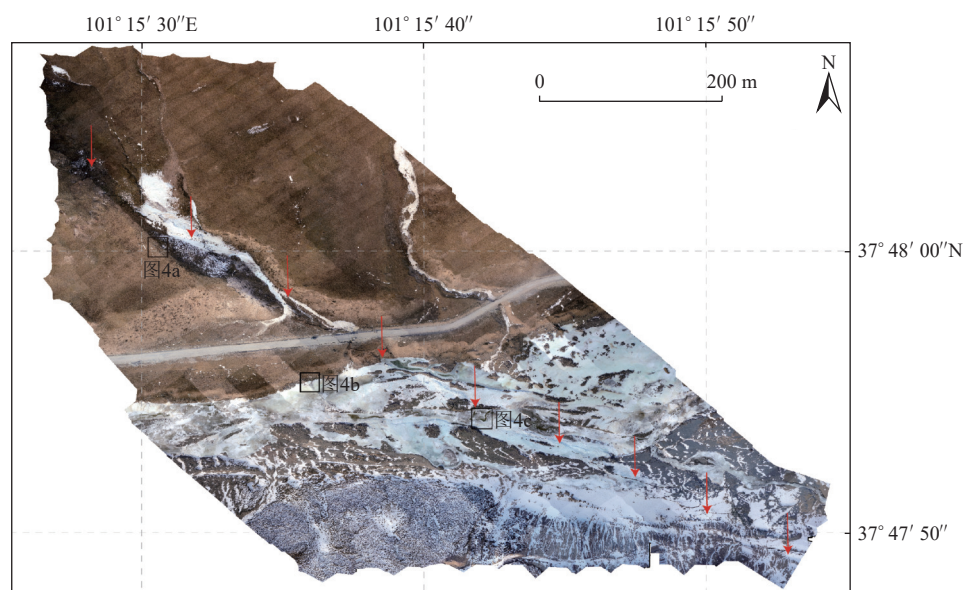


图3 硫磺沟地表破裂带的正射影像图

Fig. 3 Orthophoto map of surface rupture zone in Liuhuanggou

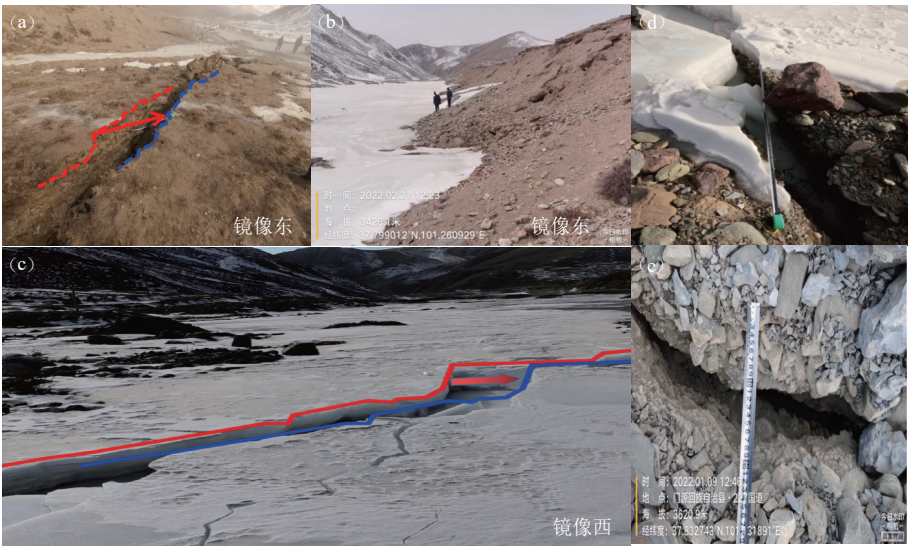
(图4a), 挤压鼓包高度约为1.5 m, 水平位错为1.6 m。当破裂带穿过硫磺沟时, 河流北岸的左旋位错量达到了3.1 m(图4b), 结合其他学者的综合研究<sup>[19-20]</sup>, 发现此处位错是本次地震同震水平位移最大值。同时, 由于地震发生时温度较低, 冰面上出现了明显的破裂, 局部破碎严重(图4c), 测量结果显示冰面的左旋位错量为1.6 m(图4d)。继续向东追踪至硫磺沟大桥以东, 地表破裂逐渐减弱, 局部地段出现了约0.1~0.2 m的左旋位错和低矮的挤压逆冲断层陡坎(高约0.1~0.3 m)<sup>[12]</sup>。在本次地表破裂的最西端, 地表破裂的左旋位移量也已减弱至约0.2 m(图4e)。同时, 我们发现了一处天然剖面(图5), 标志层形成了约0.6 m的断距。

#### 4 断层效应

本次地震的地表破裂带主要位于冷龙岭断裂与托莱山断裂共同作用形成的拉分盆地内, 因此地震对交通系统的破坏尤为严重, 特别是硫磺沟大桥和大梁隧道受到了严重影响。地震导致大梁隧道内部局部塌方并出现漏水现象, 铁轨地基发生抬升; 硫磺沟大桥的桥面出现倾斜错位(图6), 铁轨发生扭曲变形, 甚至有一段上行线的铁轨发生扭曲断裂。这些情况导致兰新高铁门源段暂停运营, 对交通工程以及当地的经济产生了重大影响<sup>[21]</sup>。

##### 4.1 硫磺沟大桥

此次地震对兰新高铁硫磺沟大桥造成了严重损



图中红色及蓝色线为地表破裂带的边界，红色箭头为走滑的方向  
图 4 地表破裂带示意图

Fig. 4 Schematic diagram of surface fracture zone

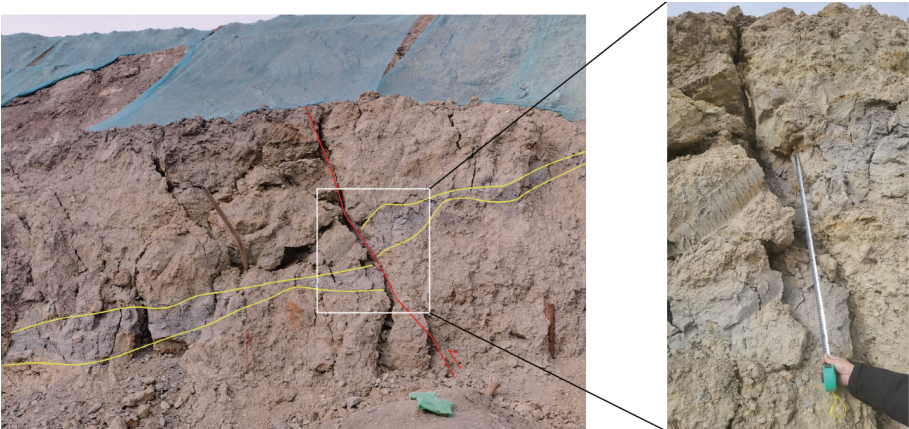


图 5 断裂逆冲变形特征示意图(镜像西)

Fig. 5 Schematic diagram of fault thrust deformation characteristics

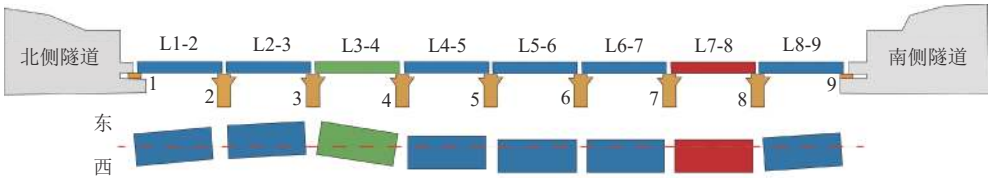


图 6 硫磺沟大桥破坏示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the destruction in Liuhuanguo bridge

害。主要破坏有：主梁发生侧翻滑移，最大倾滑角达到  $37^\circ$ ；支座和挡块遭受不同程度的破损；轨道发生扭曲变形，甚至有一根轨道断裂；地震还导致线路发生平面位移，使线路高程抬升。此外，硫磺沟大桥 8 孔简支箱梁顶板均出现纵向裂缝和斜向裂缝。同时，位于大桥北侧的通信机房，其南北向围墙完全倒

塌，而东西向的围墙仅出现裂缝，这一现象也说明此次走滑断层在两盘相对平行的滑动过程中，主动盘沿着 EW 断层面不断释放剪切应力，导致南北向的围墙超出了承载极限值而倒塌；而东西向的围墙与断裂活动方向一致，仅整体摇动，因此东西向围墙基本完好<sup>[22-23]</sup>。

## 4.2 大梁隧道

本次地震的发震构造直接影响了大梁隧道,导致隧道结构出现错位、断裂和挤压变形,局部甚至出现顶面坍塌。隧道内的支护系统分为3层:初期支护层、减震消能层以及二次衬砌层。本文重点关注初期支护层。根据中铁二局集团对隧道内位移的测量可知,在破坏严重的段落中,初期支护层的受损长度约

为350 m。其中,在K1971+498.7里程处,隧道向东偏移了145.4 cm;而在K1971+425里程处,隧道向西偏移了43.6 cm。综合来看,此次断裂活动导致隧道整体左旋位移量达到了189 cm(图7)。此外,隧道内多处出现轨道间的隆起开裂,轨道板受到扭曲、竖墙错开、钢筋压弯,以及隧道拱顶出现混凝土掉块等现象。

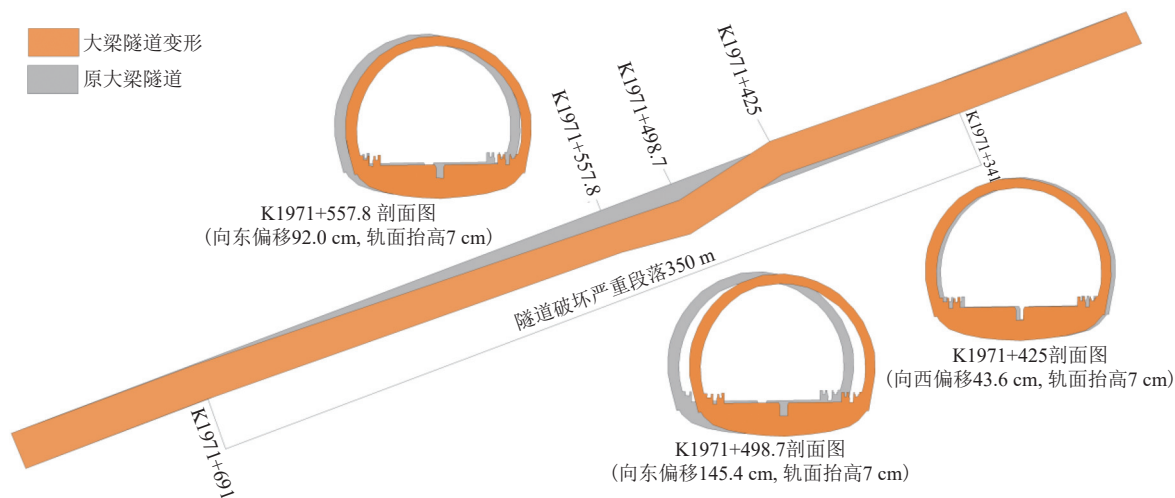


图7 大梁隧道破坏示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the destruction in Daliang tunnel

## 5 结论

2022年1月8日,我国青海省门源县发生了6.9级地震,这是自1986年和2016年两次6.4级地震以来,该地区再次遭受强震袭击。此次地震震级更高,影响范围更广。通过现场调查、分析,我们得出以下结论:

(1) 地震的发震断层走向为N59°W,地表破裂带全长约30 km,具有左旋走滑兼逆冲的运动特性,最大左旋位移量为3.1 m。地表破裂带由多种类型的破裂形式组合而成,包括张剪裂隙、挤压变形扭曲等,形成了复合同震地表变形带。

(2) 地震精定位结果显示,此次地震序列分为东、西两段。西段呈NWW分布,长约19 km,宽约7 km;东段呈SE向分布,长约15 km,宽约8 km。主震 $M_s6.9$ 位于序列西段的东南部,其西侧余震密集且展布较宽,东侧余震较稀疏,展布宽度仅有4 km。

(3) 对比2021年玛多7.4级地震,我们发现两次地震中,跨断层、近断层的交通工程都遭受了严重震

害。我国铁路桥梁主要采用多跨简支梁结构,震害较为严重,而其他类型的桥梁损伤较小。此外,大桥的震害程度明显高于中小桥。因此,我们建议在高烈度区内多采用中小桥、中短隧道的形式,并针对性地采取抗震措施。同时,根据实际情况,适当加设减隔震装置、连梁及柔性限位装置,以降低地震对桥梁造成的损失。

(4) 此次地震的地表破裂带主要出露在冷龙岭断裂与托莱山断裂的构造交汇处。因此,进一步研究断裂间的深部构造转换关系有助于我们正确认识青藏高原东北缘活动构造体系及发震构造的活动特性,为相关领域的研究提供宝贵的基础资料。

## 致谢

感谢中国地震局工程力学研究所林旭川研究员在本项研究中给予的帮助;同时,感谢审稿人对本文提出的宝贵修改意见。



## 参考文献

- [1] 中国地震局. 中国地震局发布青海门源 6.9 级地震烈度图 [EB/OL]. (2022-01-11)[2023-10-11]. <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/fzjzyw/5646200/index.html>  
China Earthquake Administration. China Earthquake Administration issued earthquake intensity map of Qinghai Menyuan  $M_s6.9$  earthquake[EB/OL]. (2022-01-11)[2023-10-11]. <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/fzjzyw/5646200/index.html>
- [2] 陆东华, 陈鲲, 席楠. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M6.9$  地震的地震动强度图 [J]. 地震科学进展, 2022, 52(2): 57-59  
Lu D H, Chen K, Xi N. Earthquake ground motion intensity map of the Menyuan, Qinghai  $M6.9$  earthquake on 8 January 2022[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(2): 57-59
- [3] 许英才, 郭祥云, 冯丽丽. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_s6.9$  地震序列重定位和震源机制解研究 [J]. 地震学报, 2022, 44(2): 195-210  
Xu Y C, Guo X Y, Feng L L. Relocation and focal mechanism solutions of the  $M_s6.9$  Menyuan earthquake sequence on January 8, 2022 in Qinghai Province[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(2): 195-210
- [4] 韩立波. 2022 年青海门源  $M_s6.9$  地震震源机制解 [J]. 地震科学进展, 2022, 52(2): 49-54  
Han L B. Focal mechanism of 2022 Menyuan  $M_s6.9$  earthquake in Qinghai Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(2): 49-54
- [5] 郭祥云, 汪贞杰. 2022 年青海门源  $M6.9$  地震矩心矩张量解 [J]. 地震科学进展, 2022, 52(2): 55-56  
Guo X Y, Wang Z J. The centroid moment tensor solution of 2022 Menyuan  $M6.9$  earthquake in Qinghai Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(2): 55-56
- [6] 王辽, 谢虹, 袁道阳, 等. 结合野外考察的 2022 年门源  $M_s6.9$  地震地表破裂带的高分七号影像特征 [J]. 地震地质, 2023, 45(2): 401-421  
Wang L, Xie H, Yuan D Y, et al. The surface rupture characteristics based on the GF-7 images interpretation and the field investigation of the 2022 Menyuan  $M_s6.9$  earthquake[J]. Seismology and Geology, 2023, 45(2): 401-421
- [7] 王锦涵, 石许华, 陈汉林, 等. “V”型共轭走滑断裂: 特征、形成机制及其对青藏高原东南缘晚新生代变形的启示 [J]. 地球科学, 2023, 48(4): 1421-1440  
Wang J H, Shi X H, Chen H L, et al. V-shaped conjugate strike-slip faults: Characteristics, formation mechanisms and implications for the late Cenozoic deformation in the southeastern Tibetan Plateau[J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1421-1440
- [8] 刘兴旺, 吴赵, 梁明剑, 等. 嘉峪关断裂古地震活动特征及其强震危险性影响 [J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3796-3806  
Liu X W, Wu Z, Liang M J, et al. Paleoequake characteristics of Jiayuguan fault and its seismic risk[J]. Earth Science, 2021, 46(10): 3796-3806
- [9] 陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 等. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化 [J]. 中国地质, 2019, 46(5): 995-1020  
Chen X H, Shao Z G, Xiong X S, et al. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic belt, Northwest China[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 995-1020
- [10] 何文贵, 刘百箴, 袁道阳, 等. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究 [J]. 西北地震学报, 2000, 22(1): 90-97  
He W G, Liu B C, Yuan D Y, et al. Research on slip rates of the Lenglongling active fault zone[J]. Northwestern Seismological Journal, 2000, 22(1): 90-97
- [11] 郭鹏, 韩竹军, 姜文亮, 等. 青藏高原东北缘冷龙岭断裂全新世左旋滑动速率 [J]. 地震地质, 2017, 39(2): 323-341  
Guo P, Han Z J, Jiang W L, et al. Holocene left-lateral slip rate of the Lenglongling fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(2): 323-341
- [12] 袁道阳, 谢虹, 苏瑞欢, 等. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_s6.9$  地震地表破裂带特征与发震机制 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(1): 229-244  
Yuan D Y, Xie H, Su R H, et al. Characteristics of co-seismic surface rupture zone of Menyuan  $M_s6.9$  earthquake in Qinghai Province on January 8, 2022 and seismogenic mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 229-244
- [13] 李强, 江在森, 武艳强, 等. 海原—六盘山断裂带现今构造变形特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 18-22  
Li Q, Jiang Z S, Wu Y Q, et al. Present-day tectonic deformation characteristics of Haiyuan-Liupanshan fault zone[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(2): 18-22
- [14] 梁宽, 何仲太, 姜文亮, 等. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_s6.9$  地震的同震地表破裂特征 [J]. 地震地质, 2022, 44(1): 256-278  
Liang K, He Z T, Jiang W L, et al. Surface rupture characteristics of the Menyuan  $M_s6.9$  earthquake on January 8, 2022, Qinghai



- Province[J]. *Seismology and Geology*, 2022, 44(1): 256-278
- [15] 李智敏, 盖海龙, 李鑫, 等. 2022 年青海门源  $M_{\text{s}}6.9$  地震发震构造和地表破裂初步调查 [J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 330-335
- Li Z M, Gai H L, Li X, et al. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Menyuan  $M_{\text{s}}6.9$  earthquake in Qinghai, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 330-335
- [16] 杨丽萍, 苏旭. 德令哈市地震小区划 [M]. 北京: 地震出版社, 2017
- Yang L P, Su X. Seismic microzonation of Delingha[M]. Beijing: Seismological Press, 2017
- [17] 余娜, 张晓清, 胡维云. 2022 年门源  $M_{\text{s}}6.9$  地震序列特征及强余震判定 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2022, 43(4): 15-22
- Yu N, Zhang X Q, Hu W Y. Characteristics of the 2022 Menyuan  $M_{\text{s}}6.9$  earthquake sequence and prediction of its strong aftershocks[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2022, 43(4): 15-22
- [18] 殷翔, 刘炜, 姚生海, 等. 基于无人机测量的微地貌提取——以昆中断裂(巴隆—温泉段)为例 [J]. *震灾防御技术*, 2022, 17(4): 701-709
- Yin X, Liu W, Yao S H, et al. Micro landform extraction based on UAV photography technology: Taking Kunzhong fault (Balong Wenquan Section) as an example[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2022, 17(4): 701-709
- [19] 盖海龙, 李智敏, 姚生海, 等. 2022 年青海门源  $M_{\text{s}}6.9$  地震地表破裂特征的初步调查研究 [J]. *地震地质*, 2022, 44(1): 238-255
- Gai H L, Li Z M, Yao S H, et al. Preliminary investigation and research on surface rupture characteristics of the 2022 Qinghai Menyuan  $M_{\text{s}}6.9$  earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2022, 44(1): 238-255
- [20] 潘家伟, 李海兵, Chevalier M L, 等. 2022 年青海门源  $M_{\text{s}}6.9$  地震地表破裂带及发震构造研究 [J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 215-231
- Pan J W, Li H B, Chevalier M L, et al. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2022  $M_{\text{s}}6.9$  Menyuan earthquake, Qinghai Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 215-231
- [21] 刘也, 任叶飞, 王大任, 等. 2022 年青海门源地震引起的兰新高铁硫磺沟大桥地表同震位移研究 [J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(5): 42-50
- Liu Y, Ren Y F, Wang D R, et al. Research on co-seismic displacement of ground surface at Liuhuanggou bridge of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway caused by the 2022 Menyuan earthquake in Qinghai Province[J]. *China Railway Science*, 2022, 43(5): 42-50
- [22] 李鑫, 李智敏, 盖海龙, 等. 青海门源  $M_{\text{s}}6.9$  地震极震区震害调查与防灾建议 [J]. *震灾防御技术*, 2022, 17(1): 84-94
- Li X, Li Z M, Gai H L, et al. Investigation and prevention suggestion of earthquake disaster in the extreme earthquake area of  $M_{\text{s}}6.9$  earthquake in Menyuan County, Qinghai Province[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2022, 17(1): 84-94
- [23] 马小平, 杨里臣, 朱瑞, 等. 青海门源  $M6.9$  地震应急响应及灾情调查 [J]. *地震科学进展*, 2022, 52(8): 367-372
- Ma X P, Yang L C, Zhu R, et al. Emergency response and disaster investigation of Menyuan  $M6.9$  earthquake in Qinghai Province[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2022, 52(8): 367-373