冷龙岭断裂系活动性与2016年门源6.4级地震构造研究

郭鹏¹, 韩竹军^{1*}, 安艳芬¹, 姜文亮^{1,2}, 毛泽斌^{1,3}, 冯蔚^{4,5}

1. 中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室, 北京 100029;

2. 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;

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

4. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

5. 中国地震台网中心, 北京 100045

* 通讯作者, E-mail: zjhan0904@163.com

收稿日期: 2016-11-21; 接受日期: 2017-01-23; 网络版发表日期: 2017-03-13

地震行业科研专项项目(编号: 201408023)和中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项项目(编号: ZDJ2015-16)资助

摘要 2016年1月21日门源 $M_s6.4$ 级地震发生在祁连-海原断裂带冷龙岭断裂北侧。此次地震邻近冷龙岭断裂发生,震中距祁连山北缘断裂带民乐-大马营断裂和皇城-双塔断裂较远,地震破裂面近北西向,与两条断裂的走向呈一定角度相交。震源机制解显示此次地震为逆冲型地震,与冷龙岭断裂逆-走滑运动性质略有差异。在野外地质填图的基础上,采用构造地貌分析、探槽开挖和 ^{14}C 定年技术等研究方法,揭示冷龙岭断裂全新世活动明显,可能表现为特征滑动行为,地震震级为 $M_w7.3\sim7.5$;断裂倾角较陡,倾向北北东,构造样式上表现为花状构造;最新一次地震事件的形成时间晚于1815~1065a BP。冷龙岭北侧断裂是冷龙岭断裂西北端一条伴生断裂,受到冷龙岭断裂左旋剪切在端部持续的构造推挤作用,相应发生弯曲,产生向外的构造旋转作用,偏离优势破裂方位,活动性相应减弱,在地表表现为一条晚第四纪变形不明显的逆断裂,与断裂整体呈北东向微突出的弧形形态和晚第四纪以来没有断错地表的地质地貌迹象相协调,但此类断裂在深部仍可能发生破裂,产生中强地震。断裂几何学特征和运动性质与震源机制解揭示的断层节面2产状和运动性质以及余震和地震烈度的分布特征较为吻合。冷龙岭北侧断裂作为门源 $M_s6.4$ 级地震发震构造较为恰当。冷龙岭北侧断裂此次的逆冲运动也为冷龙岭断裂下一次的运动腾出空间。在冷龙岭北侧断裂历史演化过程中,冷龙岭断裂和冷龙岭北侧断裂对局部地形地貌产生构造抬升作用。

关键词 门源 $M_s6.4$ 级地震, 发震构造, 构造环境, 冷龙岭断裂, 冷龙岭北侧断裂

中文引用格式: 郭鹏, 韩竹军, 安艳芬, 姜文亮, 毛泽斌, 冯蔚. 2017. 冷龙岭断裂系活动性与2016年门源6.4级地震构造研究. 中国科学: 地球科学, 47: 617-630, doi: [10.1360/N072016-00172](https://doi.org/10.1360/N072016-00172)

英文引用格式: Guo P, Han Z J, An Y F, Jiang W L, Mao Z B, Feng W. 2017. Activity of the Lenglongling fault system and seismotectonics of the 2016 $M_s6.4$ Menyuan earthquake. Science China Earth Sciences, 60: 929-942, doi: [10.1007/s11430-016-9007-2](https://doi.org/10.1007/s11430-016-9007-2)

1 引言

2016年1月21日青海省海北州门源县发生 $M_s6.4$ 级地震(简称门源 $M_s6.4$ 级地震, 图1), 这是继1986年8月26日门源 $M_s6.4$ 级地震之后该地区发生的又一中强地震. 据重定位后的地震目录(由中国地震局地球物理研究所房立华博士提供), 门源 $M_s6.4$ 级地震震源深度11.6km, 震中位于 37.662°N , 101.622°E . 此次地震灾区极震区烈度为VIII度, 等震线长轴总体呈北西走向, VI度区及以上总面积约 14660km^2 . 地震发生在高海拔北祁连山冷龙岭地区, 该地区经受着强烈的地壳缩短和左旋剪切(张培震等, 2003), 构造较为复杂. 认识此类中强地震发生的构造环境特征, 对于评价冷龙岭地区未来地震危险性以及未来防震减灾重点地区判定等具有重要的理论和实际意义(付碧宏等, 2009; Han等, 2012; 韩竹军等, 2013; 徐锡伟等, 2014).

门源 $M_s6.4$ 级地震震中位于祁连-海原断裂带冷龙岭断裂北侧, 与祁连山北缘断裂带民乐-大马营断裂

和皇城-双塔断裂距离较远, 地震破裂面近北西向, 与两条断裂的走向呈一定角度相交. 冷龙岭断裂晚第四纪时期主要表现为左旋走滑运动, 局部兼具倾滑分量(Gaudemer等, 1995; 何文贵等, 2000, 2010; Lasserre等, 2002). 震源机制解显示此次地震为逆冲型地震, 与冷龙岭断裂逆-走滑运动性质有所差异. 胡朝忠等(2016)对门源 $M_s6.4$ 级地震的发震构造进行了初步研究, 推测发震断裂是冷龙岭北侧一条南盘下降、北盘上升, 并将冲沟左旋错断的北倾活动断裂. 该断裂的存在还缺乏证据, 推测断裂的逆-走滑力学性质除了与实际的地形地貌差异矛盾外, 还与震源破裂性质不符. 胡朝忠等(2016)在卫星遥感影像上对冷龙岭断裂在讨论柴陵地区断错地貌现象的解译结果以及获得的冲沟位移量与Lasserre等(2002)和Zheng等(2013a)的研究结果也存在较大的差异. 中强地震的发生并不一定与地表的活动断裂有直接的关系(邓起东等, 1992a; Han等, 2012).

基于2014年以来在冷龙岭断裂开展1:50000活动断裂填图中获得的一些基础资料, 通过对下面3个问

图1 门源 $M_s6.4$ 级地震区域地震构造及地震烈度图

断裂位置与性质据邓起东等(2002)、地质部青海省地质局(1968)和(<http://www.cq-igl.ac.cn/upload/images/2016/1/219011690.jpg>); 等震线据(<http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/549/20160124110847685405462/index.html>). NLLLF, 冷龙岭北侧断裂; LLLF, 冷龙岭断裂; ML-DMYF, 民乐-大马营断裂; HC-STF, 皇城-双塔断裂; SN-QLF, 肃南-祁连断裂; TLSF, 托莱山断裂; JQHF, 金强河断裂; MMSF, 毛毛山断裂; LHSF, 老虎山断裂; HYF, 海原断裂; GLF, 古浪断裂; TJS-XS, 天景山-香山断裂; KNQF, 康宁桥断裂; FLF, 丰乐断裂; YMSF, 榆木山断裂; LSSF, 龙首山断裂; RYSE, 日月山断裂; LJSF, 拉脊山断裂; MXSF, 马衙山断裂; ZLHF, 庄浪河断裂

题的研究, 有助于更好地认识门源 $M_s6.4$ 级地震的发震构造和构造环境. (1) 冷龙岭断裂全新世活动性与发震能力如何? (2) 1:20万门源幅地质图(地质部青海省地质局, 1968. 门源幅1:200000地质图与说明书)以及高分辨率遥感卫星影像上显示震区存在一条从冷龙岭断裂分出的近北西向逆断裂, 暂定名为冷龙岭北侧断裂, 断裂活动性如何, 是否可以作为发生中强地震的发震断裂? (3) 冷龙岭北侧断裂是如何产生演化的, 与冷龙岭断裂在构造上具有怎样的关系? 围绕着上述问题, 本文在野外地质调查工作的基础上, 结合高分辨率遥感卫星影像, 在冷龙岭断裂上发现了长约80km的地表破裂带, 揭示出断裂具有发生 $M_w7.3\sim7.5$ 级地震的能力; 冷龙岭北侧断裂晚第四纪以来没有断错地表的地质地貌迹象, 但可以发生中强地震; 根据断裂活动性的综合研究结果, 并结合此次地震的震源机制解、地震烈度长轴方位和极震区分布范围以及余震序列分布特征等, 判定冷龙岭北侧断裂作为门源 $M_s6.4$ 级地震发震构造较为恰当; 从断裂构造演化与动力学关系上探讨了此次地震发生在冷龙岭断裂端部构造推挤的压性环境中.

2 区域地震构造背景

区域构造位置上, 门源 $M_s6.4$ 级地震发生在青藏高原东北缘与戈壁-阿拉善地块之间隆起区的北祁连褶皱带内(国家地震局地质研究所等, 1993), 祁连-海原断裂带中西段, 祁连山北缘断裂带南侧. 震中位于冷龙岭断裂与断裂西北端的冷龙岭北侧断裂之间, 距冷龙岭北侧断裂较近(图1). 祁连-海原断裂带是青藏高原东北缘一条重要的活动断裂带(Tapponnier和Molnar, 1977; Peltzer和Tapponnier, 1988), 以左旋走滑为主, 由西向东可分为托莱山断裂、冷龙岭断裂、金强河断裂、毛毛山断裂、老虎山断裂和海原断裂(Zheng等, 2013a), 并在 102.2°E 处向东分出近东西向延伸的古浪断裂(图1). 断裂带晚第四纪滑动速率和GPS速率分布呈现出较好的弧形分布, 从西段 $0\sim2\text{mm a}^{-1}$ 向中段增加到 $4\sim5\text{mm a}^{-1}$, 随后向东到达东端减小至 $0\sim2\text{mm a}^{-1}$ (Duvall和Clark, 2010; Zheng等, 2013a). 1920年海原断裂发生 $M_s8.5$ 级地震, 地表破裂带长约237km(Zhang等, 1987). Gaudemer等(1995)提出冷龙岭、金强河、毛毛山、老虎山断裂所在区段是祁连-海原断裂带的一

个地震空区, 具有潜在发生大地震的可能. 冷龙岭断裂长约120km, 线性特征明显, 沿着东祁连山脉分水岭分布, 穿越冷龙岭两主峰, 断裂总体走向 $N110^\circ\sim115^\circ\text{E}$, 1986年8月26日门源 $M_s6.4$ 级地震发生在断裂北侧. 冷龙岭断裂西北端发育一条伴生逆断裂——冷龙岭北侧断裂, 冷龙岭北侧断裂在 $101^\circ45'\text{E}$ 处从冷龙岭断裂向西北分出, 在 $101^\circ20'\text{E}$ 处近东西向汇入冷龙岭断裂, 整体呈北东向微突出的弧形形态, 倾向南西, 断裂长约47km(图2). 在现今构造运动中, 近地表的冷龙岭北侧断裂与冷龙岭断裂北盘地区一起发生隆起(图1).

震中地区北侧为民乐-大马营断裂和皇城-双塔断裂, 这两条断裂是祁连山北缘断裂带的重要组成部分. 民乐-大马营断裂东端距震中 $\sim17\text{km}$, 断裂走向为 $N50^\circ\sim60^\circ\text{W}$, 倾向南西, 倾角各处不一, 一般为 $60^\circ\sim70^\circ$. 民乐-大马营断裂是一条以挤压逆冲为主、略具左旋走滑性质的晚第四纪活动、但全新世以来处于相对稳定的晚更新世断裂(国家地震局地质研究所等, 1993; 陈文彬, 2003). 皇城-双塔断裂西段距震中 $\sim25\text{km}$, 断裂总体呈北西西近东西向延伸. 断裂东段的冬青顶断裂段为逆倾滑性质, 属全新世活动段, 垂直滑动速率为 $0.54\sim0.8\text{mm a}^{-1}$ (陈文彬, 2003), 中段全新世以来有过明显活动, 西段自晚更新世晚期以来活动已不明显, 与民乐-大马营断裂呈左阶斜列(侯康明, 1998). 1927年古浪 $M_s8.0$ 级地震震中位于冷龙岭断裂东北边的冬青顶山下, 地震发震断层存在争议(Gaudemer等, 1995; Xu等, 2010).

3 震中及邻近地区断裂活动性与发震能力

根据1:20万门源幅地质图及前人研究成果(Lasserre等, 2002; Zheng等, 2013a), 在震中区及其邻近地区分布的主要断裂为北西西向冷龙岭断裂, 与其西北侧的冷龙岭北侧断裂(图2).

3.1 冷龙岭断裂

遥感卫星影像上, 冷龙岭断裂线性特征明显(图3). 何文贵等(2001)在他里花沟柴陵-假墙丫豁一带发现一条长约20km的地震破裂带. 我们在野外调查发现, 最新一次地震事件的地表破裂带向西可延伸到老虎沟一带, 向东可延伸到牛头沟-楚马源一带, 地震同震位移现象在断裂不同地区均得到记录. 在讨拉沟柴

图2 门源 $M_s6.4$ 级地震震中地区地质构造及余震序列分布图

Qh, 全新统地层; Qp^{3-4} , 上更新统-全新统地层; N, 新近系地层; T, 三叠系地层; P, 二叠系地层; C, 石炭系地层; D, 泥盆系地层; S_1 , 下志留统地层; O, 奥陶系地层; γ , 花岗岩; v, 辉长岩

图3 冷龙岭断裂与冷龙岭北侧断裂Landsat卫星影像及研究点位置

陇冲沟大拐弯处开挖剥离一个探槽剖面, 揭示断裂地质上的活动特征.

3.1.1 地貌断错特征

老虎沟地区: 老虎沟西岔北侧, 断裂从山脊地带穿

过. 该地区可见三条北东向延伸的山脊R1、R2、R3, 两条冰水冲沟G1、G2沿山谷顺坡向流动(图4a和b). 依据对冰碛物相对高度、分布范围以及表面特征的分析, 冰川谷中可识别出两期冰碛物. 一期冰碛物M1较新, 为新冰期冰碛物(2~3ka; 伍光和, 1984; Lasserre

图4 老虎沟西盆北侧断错地貌及冲沟同步左旋位移特征

(a) 卫星影像来自Google Earth; (b) 断错地貌解译图; (c) 冲沟野外照片; (d) 冲沟位移量实地测量图

等, 2002), 相对二期冰碛物M2高度相对较低, 表面较为粗糙, 发育冰碛垄. 宽缓的冰碛垭在冰川融化后发育一些顺坡向的小型冰水冲沟, 这些小冲沟除了地势较为低洼外, 还以残留的粗大冰碛砾石与周围的冰碛垭相区别, 因此小冲沟的形态和位置较为容易辨别(图4c). 二期冰碛物M2表面较为平坦, 有冰雪覆盖.

该地区断裂表现为大型的断层槽谷. 山脊R1、R2、R3被同步左旋位移, 断裂北侧相应保存山脊R1'、R2'和R3'. 冲沟G1、G2在穿越断裂时被同步左旋扭曲. 断裂的左旋滑动使断裂下游沟谷左岸的二期冰碛物M2错离沟谷, 受到上游地质体的保护得以保存. 野外调查发现, 宽缓冰碛垭上发育的1条顺坡向小冲沟与断裂下游的2条断头沟在形态与规模上对应性较好, 该地点还发育北高南低的断层陡坎, 因此可以认为小冲沟被断裂左旋位移两次(图4c和d). 野外测得最新一次事件同震位移量为 $(2.9 \pm 0.3)\text{m}$, 累计位移量为 $(5.7 \pm 0.5)\text{m}$, 冲沟累计位移量约为同震位移量的两倍, 断裂表现出特征滑动行为.

讨拉沟地区: 讨拉沟到讨拉沟柴陵一带断裂线性特征明显(Lasserre等, 2002; Zheng等, 2013a; 胡朝忠等, 2016). 靠近讨拉沟东侧(图3), 断裂从朝南侧的山体斜坡上穿过, 形成线状延伸的断层反向陡坎和断层凹槽(图5a). 斜坡上发育一期小型冲积扇, 扇体上未见地表破裂迹象, 表明该期扇体形成之后未发生断层作用

(图5b). 扇体东侧山坡上发育一系列小冲沟, 冲沟在穿越断裂时表现出不同程度的左旋位移现象, 呈现出冲沟规模大, 位移量也大的趋势(图5b和c). 在高分辨率卫星影像上对小冲沟进行位移量恢复测量(Fu等, 2005; Klinger等, 2011; Li等, 2012), 当位移量为 $(7.1 \pm 0.7)\text{m}$ 时, 断裂上坡冲沟1~4分别与断裂下坡冲沟A~D对应性较好(图5d), 该位移量为最新一次事件同震位移量; 当位移量为 $(14.1 \pm 0.9)\text{m}$ 时, 断裂上坡冲沟1、4和5分别与断裂下坡冲沟B、E和F具有较好的对应性(图5e). 两次恢复测量中得到的累计位移量与同震位移量具有较好的倍数关系, 断裂表现出较好的特征位移现象.

他里花沟柴陵地区: 他里花沟柴陵地区地震破裂带清晰(图6a、c、e和f). 该地区发育两条大致由北向南流动的冲沟G1和G2(图6a), 其中东侧冲沟G2以较大角度穿过断裂, 断裂上游冲沟两沟壁邻近基岩山体出口, 冲沟以下切作用为主, 侧蚀作用弱, 只发育一级阶地, 且分布不连续(图6d). 依据对阶地陡坎、阶地面保存程度、阶地相对高度的分析, 断裂下游左岸可分出4级由老到新的冲洪积阶地T4、T3、T2和T1(图6c、d和f).

柴陵地区冲沟G2下切形成的一系列阶地被断裂依次左旋位错. 由于断裂的左旋滑动使断裂下游的右岸阶地错入沟道, 阶地受流水的长期冲刷侵蚀未被保存; 相反, 断裂下游的左岸阶地被错离沟道, 靠近断裂

图5 讨拉沟东侧冲沟位移量恢复测量

(a) 讨拉沟东侧山体斜坡上断错地貌的野外照片; (b) 遥感卫星影像来自Wordview02卫星, 分辨率0.5m; (c) 断裂两侧的冲沟解译图; (d) 一次恢复测量得到位移量 $(7.1 \pm 0.7)\text{m}$; (e) 二次恢复测量得到位移量 $(14.1 \pm 0.9)\text{m}$

的陡坎受到上游地貌、地质体的保护未受明显侵蚀而保存相对较好。冲沟东侧山坡上发育冲积扇F, 扇体跨过断裂但未见断裂错断迹象, 表明冲积扇形成于最新一次事件之后。西侧冲沟G1的现代沟床以及冲沟G2的现代沟床与高漫滩显示出同步左旋位移现象(图6a)。在高分辨率遥感卫星影像上对两条冲沟的位移量进行恢复测量, 当位移量为 $(7.9 \pm 1.1)\text{m}$ 时, 冲沟G2现代沟床和高漫滩对应性较好, 冲沟G1沟壁对应性稍差(图6b), 该位移量为断裂最新一次事件活动的结果。

牛头沟地区: 牛头沟地区东侧断裂地表迹线清晰, 可见断层陡坎、断层凹槽等地貌现象。有两条相邻冲

沟的现代沟床在断裂通过的区段表现出明显的同步左旋位移现象(图7a)。在卫星影像上对两条冲沟的沟床进行位移量恢复测量, 当位移量为 $(5.7 \pm 0.6)\text{m}$ 时, 冲沟G1沟床和冲沟G2两侧沟壁具有较好的对应性(图7b), 该位移量为断裂最新一次事件的同震位移量。

楚马源地区: 楚马源地区位于冷龙岭断裂东端(图3), 断裂从朝向南侧的山体斜坡上穿过。可见6条顺坡向冲沟依次穿越断裂, 最终汇聚到一起成为楚马源一条支流(图8a和b)。该地区发育两期冲积扇, 最新一期扇体F1分布在冲沟沟尾, 二期扇体F2沿冲沟两侧分布并向上游延伸(图8b)。断裂沿线发育大量崩塌滑坡(图

图6 他里花沟柴陇地区地震地表破裂带及冲沟位移量恢复测量

(a) 遥感卫星影像来自Wordview02卫星, 分辨率0.5m; (b) 冲沟G1、G2位移恢复测量图; (c) 遥感卫星影像来自Google Earth@2013; (d) 断错地貌解译图; (e) 地表破裂带野外照片; (f) 冲沟G2阶地位移特征

图7 牛头沟地区东侧地震地表破裂带及冲沟位移量恢复测量

(a) 遥感卫星影像来自Wordview02卫星, 分辨率0.5m; (b) 相邻两条冲沟位移恢复测量图

8a~c).

高分辨率遥感卫星影像及其野外调查发现, 断裂表现为一条新鲜的地震破裂带, 线状特征明显, 可见断层反向陡坎和断层凹槽(图8a和e), 顺坡向流动的冲沟以及两侧发育的冲积扇在穿越断裂时被不同程度的左旋位移(图8d和f). 冲沟G3及两侧冲积扇F2和冲沟G4左旋位移特征较为典型(图8d和f). 在高分辨率遥感卫星上对冲沟G4沟壁进行位移量恢复测量, 当位移量为 $(2.5 \pm 0.5)\text{m}$ 时, 断裂两侧的沟壁具有较好的对应性(图8g和h), 该位移量为断裂最新一次事件的同震位移量.

3.1.2 地质断错特征

在讨拉沟柴陇冲沟大拐弯处的断裂通过位置上, 利用冲沟的切割作用, 在冲沟沟壁上剥离开挖了一个长约8m、深2.0~2.2m的垂直剖面(图9). 为了研究断裂在近地表的断错关系, 对图9中左上角区段又进行了

进一步剥离, 结果如图10所示.

垂直剖面上显示断裂迹象清晰, 整体表现为地层的错断、掀斜和褶曲变形, 还在砾石层中表现为砾石的定向排列, 黏土层中表现为线性特征以及与两侧明显的颜色差异. 断裂倾角较陡, 倾向北北东, 垂直运动分量较小; 构造样式上, 表现为走滑断裂特征性的花状构造(图9).

在探槽剖面上, 大致可以分出6套地层, U6为最新一套地层, 其中U6-2为灰褐色土壤层, 可见黄褐色斑点, 近现代堆积; U6-1为灰黑色、黑色黏土及淤泥层. 图10显示断裂错断U6-1, 被U6-2覆盖, 表明自U6-1形成以来断裂发生过活动. 在U6-1层位上采取3个 ^{14}C 样品(图9), 测试结果显示该层位形成年代为1815~1065 a BP(表1), 那么可以得到断裂最新一次事件的形成时间晚于1815~1065a BP.

综上所述, 冷龙岭断裂线性特征清晰, 表现为一条

图 8 冷龙岭断裂东端楚马源地区线状影像特征及冲沟沟壁位移量恢复测量

(a) 遥感卫星影像来自Wordview03卫星, 分辨率0.4m; (b) 断层地貌解译图; (c) 崩塌、滑坡野外照片; (d) 冲沟G3位移特征; (e) 线状延伸的断层反向陡坎和断层凹槽; (f) 冲沟G4位移特征; (g) 冲沟G4遥感影像特征; (h) 冲沟G4位移恢复测量图

图9 讨拉沟柴陇冲沟拐弯处探槽地质剖面图

(a) 探槽剖面野外照片拼图及采样位置; (b) 探槽剖面地质解译图及 ^{14}C 定年结果

贯通的、单一的断裂构造,几何结构上较为连续,不存在规模较大的弯曲、阶区等不连续构造,仅在局部

地区存在阶距<400m的阶区, 但该规模的阶区应不足以阻止破裂的传播(Wesnousky, 2008); 从对现今沟床

图 10 冷龙岭断裂近地表断错特征
(a) 进一步剥离的探槽剖面野外照片; (b) 地质解译图

表 1 讨拉沟柴陇冲沟拐弯处探槽¹⁴C样品测试结果^{a)}

实验室编号	样品号	取样位置	测年物质	常规放射性碳年代(a BP)	树轮校正2σ(Cal a BP)
Beta-420034	TC1-A1	U6-1	泥炭	1780±30	1815~1615
Beta-423215	TC1-A2	U6-1	木头	1230±30	1265~1065
Beta-420036	TC1-A18	U6-1	泥炭	1760±30	1730~1605

a) 样品由美国Beta Analytic Inc.处理分析测试

断错的同步性以及地表破裂带的新鲜程度也可以推断, 冲沟最新位错量应为同震位错, 断裂最新一次事件长度至少在80km以上. 在野外以及高分辨率遥感影像上测得上述5个地区小冲沟的同震位移量依次为(2.9±0.3)、(7.1±0.7)、(7.9±1.1)、(5.7±0.6)和(2.5±0.5)m. 在老虎沟地区和讨拉沟地区测得小冲沟累计位移量分别为(5.7±0.5)和(14.1±0.9)m, 两地区累计位移量与同震位移量均呈现较好的倍数关系, 断裂可能表现为特征滑动行为. 根据走滑断裂发生地震震级与地震断层位移量、破裂带长度之间的经验关系式(表2), 估算冷龙岭断裂最新一次地震事件震级为 M_w 7.3~7.5. 前期工作中我们在他里花沟柴陇地区和牛头沟地区获得冷龙

岭断裂全新世左旋滑动速率为(6.6±0.3)和(6.4±0.7)mm a⁻¹(郭鹏等, 2017¹⁾), 与两地区同震位移量(7.9±1.1)m和(5.7±0.6)m可估算断裂平均地震复发间隔为900~1200a. 断裂倾向较陡, 倾向北北东, 构造样式上表现为花状构造. 断裂最新一次事件的形成时间晚于1815~1065 a BP.

3.2 冷龙岭北侧断裂

冷龙岭北侧断裂发育于老地层中, 表现为西南盘奥陶系、志留系地层逆冲到东北盘紫红色泥盆系地层之上(图2). 遥感卫星影像上, 冷龙岭北侧断裂表现

表 2 冷龙岭断裂最新一次地震事件震级估算

编号	计算参数 ^{a)}	经验公式	震级估算	
1	$D=7.9\text{m}$	$M=7.13+0.68\lg D$	$M\approx 7.7$	邓起东等(1992b)
2	$D=7.9\text{m}, L=80\text{km}$	$M=6.34+0.49\lg LD$	$M\approx 7.7$	邓起东等(1992b)
3	$D=7.9\text{m}, L=80\text{km}$	$M=6.22+0.58\lg L+0.42\lg D$	$M\approx 7.7$	邓起东等(1992b)
4	$MD=7.9\text{m}$	$M_w=6.81+0.78\log(MD)$	$M_w\approx 7.5$	Wells和Coppersmith(1994)
5	$SRL=80\text{km}$	$M_w=5.16+1.12\log(SRL)$	$M_w\approx 7.3$	Wells和Coppersmith(1994)

a) D为同震位移量最大值; L为破裂带长度; MD为同震位移量最大值; SRL为破裂带长度

1) 郭鹏, 韩竹军, 姜文亮, 毛泽斌. 2017. 青藏高原东北缘冷龙岭断裂全新世左旋滑动速率. 地震地质, 39. 已接收

出较为明显的颜色差异(图3)。但在地貌上, 冲沟G1、G2、G5、G6和G7穿越断裂时没有表现出同步左旋位移或扭曲现象, 规模较小的冲沟G1、G2和G7线性特征较为典型; 冲沟G3和G4上游发育的支流在断裂附近交汇, 冲沟与断裂的关系不很明确, 但总体上断裂沿线的水系没有表现出水平断错特征(图11a)。断裂沿线的山脊R1、R2、R3、R4、R5、R7和R8延伸方向上没有突然的地形起伏, 地势上平稳过渡, 山脊R3和R5在断裂通过处没有垂直的地形差异, 但表现出右旋扭动的迹象(图11b), 这与整体近北东东向挤压的动力学环境相悖, 可能是山脊两侧差异性侵蚀造成的。冷龙岭地区冰川谷发育, 谷中堆积的冰碛物和两谷之间的山脊保存完整, 断裂通过位置上未发现冰碛物和山脊被错断的迹象, 其中有一处发育两个相邻的冰川谷, 冰川谷两侧的山脊R6-1、R6-2和R6-3呈线状延伸(图11a), 山脊R6-2线性特征最为典型, 断裂通过处未见山脊R6-2有水平和垂直的地形差异(图11c)。因此, 冷龙

岭北侧断裂在地表表现为一条晚第四纪没有地形地貌显示的逆断裂。

邓起东等(1992a)认为, 中国大陆地区震级为 $6\frac{3}{4}$ 级以上的地震, 才可以产生不同规模的地震地表破裂带和不同大小的位移。对于大部分潜在发震能力在6~6.5级左右的发震构造, 在地表或近地表一般没有晚更新世以来明显断错活动的显示(周本刚和沈得秀, 2006)。冷龙岭北侧断裂晚第四纪以来没有断错地表的地质地貌迹象, 但在深部仍可能发生破裂活动, 导致中强地震发生, 这与一些晚第四纪地表上没有活动表现的断裂, 但可以发生中强地震的认识相协调。发震构造的一种表现形式是仅有地震显示, 尽管可能存在第四纪以来有构造活动显示, 但没有晚更新世以来地表或近地表断错活动的地质、地貌显示, 这种情况下其震源深度较深或地震震级较小, 一般为中强地震(周本刚和沈得秀, 2006)。因此, 冷龙岭北侧断裂可以作为中强地震的发震构造。

图 11 冷龙岭北侧断裂沿线的水系和山脊分布特征及遥感卫星影像特征

(a) 冷龙岭北侧断裂沿线的水系、山脊解译图; (b) 山脊R5和冲沟G5地形地貌特征, 遥感影像来自Google Earth; (c) 冰川谷之间山脊的线状延伸特征, 遥感影像来自Google Earth

4 门源 $M_s6.4$ 级地震发震构造讨论

4.1 发震构造

4.1.1 地震数据资料反映的发震断裂

根据地震数据反演得到的震源机制解参数(表3), 2016年1月26日门源 $M_s6.4$ 级地震为逆冲型地震, 与冷龙岭断裂逆-走滑运动性质有所差异. 断层节面1表现为走向北北西, 倾向北东东, 倾角近 50° , 略具右旋运动分量, 与震区周缘断裂的产状和运动性质相差较大; 节面2表现为走向南东, 倾向南西, 倾角近 40° , 略具左旋运动分量, 与南东东向的民乐-大马营断裂和皇城-双塔断裂呈一定角度相交, 而与冷龙岭北侧断裂近南东向走向和以逆冲作用为主的运动性质较为一致.

此次地震主、余震的空间分布显示, 主、余震平面上呈北西向密集条带分布, 优势方位为 $N42^\circ W$, 与冷龙岭北侧断裂走向相近; 主震和大部分余震位于冷龙岭断裂与冷龙岭北侧断裂所围限的区域, 靠冷龙岭北侧断裂较近, 反映了冷龙岭北侧断裂对主震和余震的控制作用(图2). 切过主震震中, 垂直冷龙岭断裂与冷龙岭北侧断裂截取震源深度剖面A-A'(图2和12a), 结

果显示大部分余震震源深度在5~15km左右, 位于主震南南西侧和上部, 北北东向一侧余震密集分布, 指示着倾向南西的发震断层断层面从余震下部穿过, 断层面倾角可能较陡.

此次地震的地震烈度长轴方位与冷龙岭北侧断裂的延伸方向较为吻合(图1). 鄯家全和贾素娟(1996)指出中等地震的震源体有限, 破坏范围也有限, 并不引起整条断裂的破裂. 冷龙岭北侧断裂长约47km, 极震区分布在断裂两侧, 长约24km, 这与中强地震极震区长度通常比断裂延伸长度要小的认识相符.

4.1.2 冷龙岭北侧断裂构造演化

冷龙岭地区现今处于青藏高原东北缘与戈壁-阿拉善地块之间近北东东向的挤压作用下(张培震等, 2003, 2013; 袁道阳等, 2004; Zhang等, 2004; Liang等, 2013). 北西西向的冷龙岭断裂作为剪裂面, 与最大主压应力方向的交角符合库伦-纳维叶断裂准则中的剪裂角大小(曾佐勋和樊光明, 2008), 断裂处于优势破裂方位, 易于积累剪切应力(图13), 这与冷龙岭断裂以走滑运动为主, 全新世活动明显的活动特征相吻合. 依

表 3 2016年1月21日门源 $M_s6.4$ 级地震震源机制解^{a)}

序号	时间	震级	震源深度(km)	节面1	节面2	来源
				走向/倾角/滑动角	走向/倾角/滑动角	
1	2016-01-21	$M_s6.4$	11.6	$335^\circ/53^\circ/98^\circ$	$141^\circ/38^\circ/79^\circ$	IGCEA
2	2016-01-21	$M_w5.9$	9.0	$342^\circ/55^\circ/101^\circ$	$144^\circ/36^\circ/75^\circ$	USGS
3	2016-01-21	$M_w5.9$	13.9	$343^\circ/51^\circ/109^\circ$	$134^\circ/43^\circ/68^\circ$	GCMT

a) IGCEA, 中国地震局地球物理研究所; USGS, 美国地质调查局; GCMT, 全球重心矩张量解

图 12 门源 $M_s6.4$ 级地震主余震震源深度剖面图

(a) 切过主震震中、垂直断裂的余震深度剖面图; (b) 切过主震震中、沿余震条带状长轴方向的深度剖面图; 图件由GMT软件绘制

图13 冷龙岭北侧断裂与冷龙岭断裂构造演化与动力学关系模式图

(a) 冷龙岭北侧断裂起初最有可能是冷龙岭断裂西北端的一条伴生压剪性断裂, 活动性较高; (b) 冷龙岭北侧断裂受到冷龙岭断裂端部的构造推挤作用, 现今演化为一逆断裂, 活动性相应减弱

据冷龙岭北侧断裂与冷龙岭断裂的交切关系以及构造位置, 冷龙岭北侧断裂起初最有可能是冷龙岭断裂西北端一条伴生压剪性断裂(P剪破裂, Sylvester, 1988), 与冷龙岭断裂呈小角度相交, 处于优势破裂方位(图13a); 然而, 冷龙岭北侧断裂位于靠近冷龙岭断裂端部的位置, 属于走滑断裂四象限挤压应力区(邓起东等, 2014), 受到冷龙岭断裂左旋剪切的构造推挤作用, 相应发生弯曲, 产生向外的构造旋转作用, 逐渐偏离冷龙岭断裂, 与冷龙岭断裂的交角增大, 运动性质逐渐演化为逆断裂(图13b)。另一方面, 冷龙岭北侧断裂偏离了最大主压应力在地壳中的剪切作用方向, 不再处于优势破裂方位, 积累的应力不足以产生明显破裂地表的地震, 活动性相应减弱, 但此类断裂在深部仍可能发生破裂, 产生中强地震。1991年10月1日门源 $M_{5.2}$ 级地震和2013年9月20日门源 $M_{5.3}$ 级地震同样发生在靠近冷龙岭北侧断裂的地区, 这从一方面说明该地区虽不足以产生明显破裂地表的大地震, 但具备产生中强地震的构造条件。

4.2 冷龙岭断裂与冷龙岭北侧断裂构造作用

冷龙岭断裂东侧跨祁连-海原断裂带高分辨率地震反射剖面显示祁连-海原断裂带是地壳规模的高陡倾角深大断裂带, 近地表表现为逆冲走滑性质, 断层面随深度增加而变缓(王海燕等, 2012; Gao等, 2013); 探槽剖面中揭示冷龙岭断裂在地表倾角较陡, 倾向北北东; 此次地震震源机制解显示震源地区冷龙岭北侧断裂断面倾角 $\sim 40^\circ$ 。在冷龙岭断裂地质填图和冷龙岭北侧断裂高分辨率遥感卫星影像解译的基础上, 结合上述断裂深浅部几何资料以及Zheng等(2013b)在冷

龙岭断裂西侧提出的青藏高原东北缘祁连山构造变形模型, 构建2016年1月21日门源 $M_{6.4}$ 级地震发震构造模式(图14)。冷龙岭北侧断裂在地壳深部收敛合并到冷龙岭断裂上, 与冷龙岭断裂相向倾斜, 深部结构上可能表现为正花状构造(图14)。剖面上主震位于冷龙岭北侧断裂上, 断裂上盘余震分布较为密集, 下盘分布较少, 符合逆冲型地震余震分布特征(Xu等, 2009; 徐锡伟等, 2013)。冷龙岭北侧断裂此次的逆冲运动也为冷龙岭断裂下一次的运动腾出空间。在冷龙岭北侧断裂构造演化过程中, 受到冷龙岭断裂强烈左旋剪切的构造推挤作用, 断裂南北两侧近区域范围内相应被抬升, 形成高地形。冷龙岭北侧断裂周缘地区相对东侧和北侧地区海拔相对较高(图14); 高达5254m的冷

图14 门源 $M_{6.4}$ 级地震发震构造模式示意图

龙岭主峰-岗什卡雪峰位于冷龙岭北侧断裂近区域范围内, 这些特征性的地貌现象反映历史时期冷龙岭断裂和冷龙岭北侧断裂对局部地形地貌产生了显著的构造抬升作用(图14).

5 结论

在区域地震构造分析的基础上, 通过冷龙岭断裂和冷龙岭北侧断裂活动性和发震能力的分析, 并结合此次地震的震源机制解、地震烈度长轴方位和极震区分布范围以及余震序列分布特征等, 可以获得如下一些初步认识.

(1) 冷龙岭断裂全新世活动明显, 可能表现为特征滑动行为. 断裂最新一次事件的地表破裂带长度至少在80km以上, 沿断裂不同地区由西向东获得断裂最新一次事件同震位移量为 (2.9 ± 0.3) 、 (7.1 ± 0.7) 、 (7.9 ± 1.1) 、 (5.7 ± 0.6) 和 (2.5 ± 0.5) m, 震级为 $M_w 7.3 \sim 7.5$; 断裂最新一次事件同震位移量与全新世滑动速率揭示断裂平均地震复发间隔为900~1200a. 断裂倾角较陡, 倾向北北东, 构造样式上表现为花状构造. 最新一次地震事件的形成时间晚于1815~1065a BP.

(2) 冷龙岭北侧断裂是冷龙岭断裂西北端一条伴生断裂, 受到冷龙岭断裂左旋剪切在端部的构造推挤作用, 相应发生弯曲, 产生向外的构造旋转作用, 偏离优势破裂方位, 活动性相应减弱, 在地表表现为一条晚第四纪变形不明显的逆断裂, 与断裂整体呈北东向微突出的弧形形态和晚第四纪以来没有断错地表的地质地貌迹象相协调, 但此类断裂在深部仍可能发生破裂, 产生中强地震. 断裂几何学特征和运动性质与震源机制解揭示的断层节面2产状和运动性质以及余震和地震烈度的分布特征较为吻合. 冷龙岭北侧断裂作为门源 $M_s 6.4$ 级地震发震构造较为恰当. 此次地震发生在冷龙岭断裂端部构造推挤的压性环境中.

致谢 审稿专家对于本文提出了宝贵意见, 本文所使用的地震序列重定位结果由中国地震局地球物理研究所房立华博士提供, 在此一并致谢.

参考文献

陈文彬. 2003. 河西走廊及邻近地区最新构造变形基本特征及构造成因分析. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所. 52-54

- 邓起东, 刘白麓, 张培震, 袁道阳. 1992a. 活动断裂工程安全评价和位错量的定量评估. 见: 邓起东, 主编. 活动断裂研究(2). 北京: 地震出版社. 236-244
- 邓起东, 于贵华, 叶文华. 1992b. 地震地表破裂参数与震级关系的研究. 见: 邓起东, 主编. 活动断裂研究(2). 北京: 地震出版社. 247-264
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学D辑: 地球科学, 32: 1020-1030
- 邓起东, 朱艾澜, 高翔. 2014. 再议走滑断裂与地震孕育和发生条件. 地震地质, 36: 562-573
- 付碧宏, 时丕龙, 王萍, 李琦, 孔屏, 郑国东. 2009. 2008年汶川地震断层北川段的几何学与运动学特征及地震地质灾害效应. 地球物理学报, 52: 485-495
- 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 1993. 祁连山-河西走廊活动断裂系. 北京: 地震出版社
- 韩竹军, 任治坤, 王虎, 王明明. 2013. 芦山县龙门乡芦山“4·20”7.0级强烈地震地表破裂迹象与讨论. 地震地质, 35: 388-397
- 何文贵, 刘百麓, 袁道阳, 杨朋. 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究. 西北地震学报, 22: 90-97
- 何文贵, 刘白麓, 袁道阳. 2001. 冷龙岭断裂古地震初步研究. 见: 汪一鹏, 主编. 活动断裂研究(8). 北京: 地震出版社. 64-74
- 何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 罗浩. 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. 地震, 30: 131-137
- 侯康明. 1998. 皇城-双塔断裂带的几何分段及运动学特征. 华南地震, 18: 28-34
- 胡朝忠, 杨攀新, 李智敏, 黄帅堂, 赵妍, 陈丹, 熊仁伟, 陈庆宇. 2016. 2016年1月21日青海门源6.4级地震的发震机制探讨. 地球物理学报, 59: 1637-1646
- 王海燕, 高锐, 尹安, 熊小松, 匡朝阳, 李文辉, 黄薇漪. 2012. 深地震反射剖面揭示的海原断裂带深部几何形态与地壳形变. 地球物理学报, 55: 3902-3909
- 伍光和. 1984. 祁连山新冰期冰碛的初步考察. 冰川冻土, 6: 53-60
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 程佳, 谭锡斌, 朱艾澜, 闻学泽. 2013. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论. 地学前缘, 20: 11-20
- 徐锡伟, 江国焰, 于贵华, 吴熙彦, 张建国, 李西. 2014. 鲁甸6.5级地震发震断层判定及其构造属性讨论. 地球物理学报, 57: 3060-3068
- 郗家全, 贾素娟. 1996. 我国东北和华北地区中强地震潜在震源区的划分原则和方法. 中国地震, 12: 173-194
- 袁道阳, 张培震, 刘白麓, 甘卫军, 毛凤英, 王志才, 郑文俊, 郭华. 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. 地质学报, 78: 270-278
- 曾佐勋, 樊光明. 2008. 构造地质学. 武汉: 中国地质大学出版社. 62
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学D辑: 地球科学, 33(增刊): 12-20
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 李海兵. 2013. 中国大陆的活动断裂、地

- 震灾害及其动力过程. 中国科学: 地球科学, 43: 1607–1620
- 周本刚, 沈得秀. 2006. 地震安全性评价中若干地震地质问题探讨. 震灾防御技术, 1: 113–120
- Duvall A R, Clark M K. 2010. Dissipation of fast strike-slip faulting within and beyond northeastern Tibet. *Geology*, 38: 223–226
- Fu B H, Awata Y, Du J G, He W G. 2005. Late Quaternary systematic stream offsets caused by repeated large seismic events along the Kunlun fault, northern Tibet. *Geomorphology*, 71: 278–292
- Gao R, Wang H Y, Yin A, Dong S W, Kuang Z Y, Zuza A V, Li W H, Xiong X S. 2013. Tectonic development of the northeastern Tibetan Plateau as constrained by high-resolution deep seismic-reflection data. *Lithosphere*, 5: 555–574
- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, Peltzer G, Guo S M, Chen Z T, Dai H G, Cifuentes I. 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the “Tianzhu gap”, on the western Haiyuan Fault, Gansu (China). *Geophys J Int*, 120: 599–645
- Han Z J, Lu F S, Ji F J, Zeng X F, An Y F. 2012. Seismotectonics of the 26 November 2005 Jiujiang-Ruichang, Jiangxi, *M*, 5.7 Earthquake. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 86: 497–509
- Klinger Y, Etchebes M, Tapponnier P, Narteau C. 2011. Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China. *Nat Geosci*, 4: 389–392
- Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, Mériaux A S, Van der Woerd J, Daoyang Y, Ryerson F J, Finkel R C, Caffee M W. 2002. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China. *J Geophys Res*, 107: ETG 4-1–ETG 4-15
- Li H B, Van der Woerd J, Sun Z M, Si J L, Tapponnier P, Pan J, Liu D, Chevalier M L. 2012. Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet. *Gondwana Res*, 21: 64–87
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, Xiao G R, Liu J, Chen W T, Ding X G, Zhou D M. 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 5722–5732
- Peltzer G, Tapponnier P. 1988. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia Collision: An experimental approach. *J Geophys Res*, 93: 15085–15117
- Sylvester A. 1988. Strike-slip faults. *Geol Soc Am Bull*, 100: 1666–1703
- Tapponnier P, Molnar P. 1977. Active faulting and tectonics in China. *J Geophys Res*, 82: 2905–2930
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc Amer*, 84: 974–1002
- Wesnousky S G. 2008. Displacement and geometrical characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture. *Bull Seismol Soc Amer*, 98: 1609–1632
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, Chen G, Klinger Y, Hubbard J, Shaw J. 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 37: 515–518
- Xu X W, Yeats R S, Yu G H. 2010. Five short historical earthquake surface ruptures near the Silk Road, Gansu Province, China. *Bull Seismol Soc Amer*, 100: 541–561
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, Gan W, Bürgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu Z, Sun J, Wu J, Hanrong S, Xinzhaoy Y. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32: 809
- Zhang W Q, Jiao D C, Zhang P Z, Molnar P, Burchfiel B C, Deng Q D, Wang Y P, Song F M. 1987. Displacement along the Haiyuan fault associated with the great 1920 Haiyuan, China, earthquake. *Bull Seismol Soc Amer*, 77: 117–131
- Zheng W J, Zhang P Z, He W G, Yuan D Y, Shao Y X, Zheng D W, Ge W P, Min W. 2013a. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults. *Tectonophysics*, 584: 267–280
- Zheng W J, Zhang P Z, Ge W P, Molnar P, Zhang H P, Yuan D Y, Liu J H. 2013b. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 32: 271–293