

2016年青海门源 M_s 6.4 地震发震构造遥感解译探讨*

李智敏¹, 黄帅堂², 胡朝忠³, 杨攀新³

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 利用高分1号遥感影像和 Googleearth 影像数据, 对2016年1月21日青海门源 M_s 6.4 地震的发震构造(冷龙岭断裂系)相关的微地貌(水系、冲洪积扇、山脊等)开展遥感解译研究工作。研究表明: 冷龙岭断裂具有典型的左旋走滑特征, 晚更新世以来断裂发生过4期断层活动, 从老至新位错量分别为45~65 m, 22~52 m, 13~27 m 及 7~10 m, 说明该断裂具有较强的水平活动特性, 但从位错量可以看出断层活动幅度逐渐减弱; 结合本次地震的余震分布和震源机制解, 初步判定冷龙岭断裂是本次地震的控震构造, 但发震构造可能为冷龙岭北侧的次级逆冲断层。

关键词: 遥感影像; 冷龙岭断裂带; 断错地貌; 发震构造; 门源地震

中图分类号: P316.01

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)增刊1-0020-08

0 引言

据中国地震台网测定, 2016年1月21日1时13分, 青海省海北州门源县西北(101.6°E, 37.7°N)发生 M_s 6.4 地震, 震源深度10 km。据中国地震台网中心数据, 截至2016年1月27日8时33分23秒, 共监测到1 235次余震, 余震最大震级为 M_s 4.1。地震发生后, 青海省地震局、中国地震局地球物理研究所、地震预测研究所及湖北省地震局等多家单位联合开展了地震灾害损失评估和地震应急科考。中国地震局地球物理研究所(2016)利用CAP方法得出的矩张量反演结果, 本次地震为逆冲型, 震中附近影响烈度为Ⅷ度, 可能的受灾范围近11 000 km²^{①②}。该地震震中距1986年青海门源北(101.63°E, 37.78°N) M_s 6.5 地震震中约11 km, 发震构造是冷龙岭北麓断裂^②; 距2013年9月20日甘肃肃南—青海门源交界(37.7°N, 101.5°E) M_s 5.1 地震震中约9 km, 说明本次地震震中附近现代地震比较活跃。

笔者在地震当日即赶赴地震现场进行震后灾

害调查评估、应急科考工作。目前, 由于科考工作没有发现该地震形成的裂缝或地表破裂带, 对发震构造的判定认识不一, 中国地震局地质研究所推测发震断裂为民乐一大马营断裂东南段, 或者为冷龙岭断裂与民乐一大马营断裂之间的一条逆断层; 中国地震局地壳应力研究所反演的最大主应力方向为北偏东30°~50°; 冷龙岭断裂可能为本次地震的控震断裂, 发震断裂可能为冷龙岭断裂北侧的一条次级断裂(胡朝忠等, 2016); 祁连山—海原断裂带上异常场地的空间分布表现出由祁连山断裂带中部集中向东迁移至中东部集中的特征(李媛等, 2016)。本文拟通过对发震断裂进行遥感影像解译和分析, 结合余震分布及现有的资料, 对地震的发震构造获得一些认识。

1 区域地质概况

2016年1月21日门源 M_s 6.4 地震发生在青藏高原隆起区的东北缘。青藏高原东北缘地区是由北东东向左旋走滑的阿尔金断裂带、北西西向的

* 收稿日期: 2016-08-23.

基金项目: 中国地震行业专项《中国地震活断层探索——南北地震带北段》日月山断裂1:5万活断层填图项目(201408023)资助.

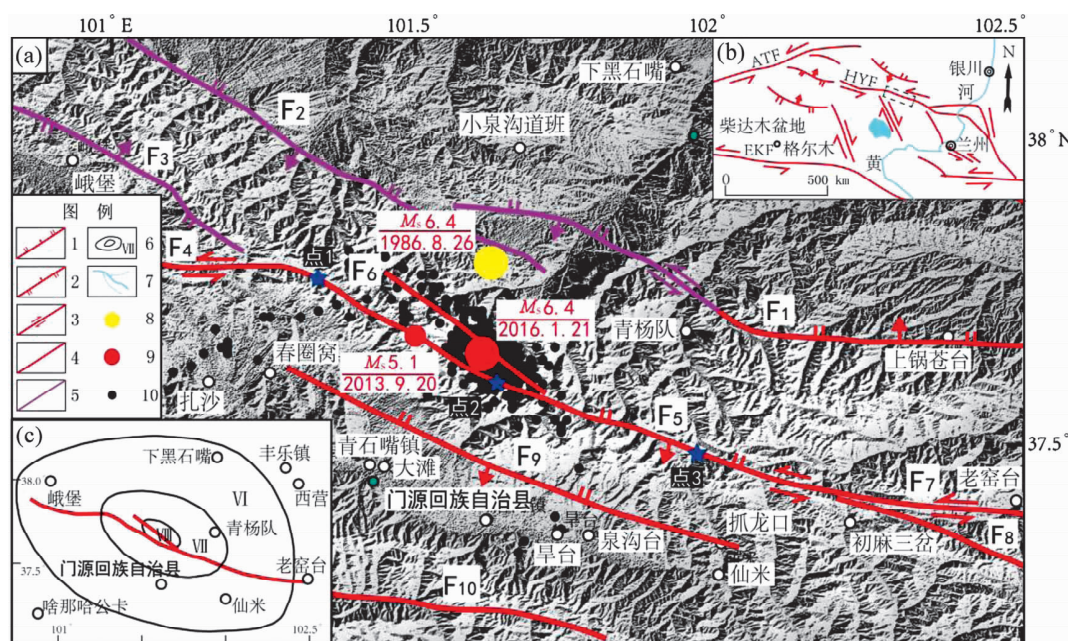
① 青海省地震局. 2016. 2016年门源6.4级地震灾害损失评估报告.

② 青海省地震局. 1986. 1986年门源6.4级地震科考报告.

祁连山—海原断裂带和近东西向左旋走滑的东昆仑断裂带 3 条巨型左旋走滑断裂所围限的一个相对独立的活动地壳块体，称为柴达木—祁连活动地块（图 1b）。该地区是高原向大陆内部扩展的前缘部位，也是青藏高原最新和正在形成的重要组成部分（袁道阳等，2004）。其北侧、东侧受刚性的戈壁—阿拉善地块和鄂尔多斯地块阻挡，构造应力场极其复杂。现今地壳运动 GPS 速度场显示，青藏高原东北缘由西向东 GPS 速度矢量方向由北东向逐渐转为北东东向，最后转为南东东向（Zhang *et al*, 2004; Liang *et al*, 2013）。由于高原整体不断隆升和向北东侧向挤压，在块体内部也形成了一些性质不同、规模不等的晚第四纪活动断裂。在这些断裂之间，其构造变形以挤压为主，形成隆凹相间的构造格局，发育了柴达木盆地、青海湖盆地、西宁盆地、共和盆地、贵德盆地、门源盆地等中生代盆地。盆地边界的北西西—

近东西向断裂和北北西向断裂是主要控震断裂，其中北西西—近东西向断裂以左旋挤压活动为主，北北西向断裂以右旋挤压活动为主。这些断裂一般切割盆地内褶皱或构成盆地的北西向边界，如柴北缘断裂、党河南山断裂、冷龙岭断裂、日月山断裂和鄂拉山断裂等。

本次地震震中位于冷龙岭断裂北侧，距该次地震最近的区域性断裂也是冷龙岭断裂，距离约 3 km，其次为北侧民乐—大马营断裂，距离约 20 km。50 km 以内的其他主要断裂包括皇城—双塔断裂、肃南—祁连断裂（峨堡段）、托勒山北缘断裂、门源断裂及天桥沟—黄羊川断裂等（图 1b）。这些断裂均属于北祁连山活动断裂带，在大地构造上位于北祁连褶皱带内，表现为晚第四纪以来有过活动，多数控制新近纪以来盆地的边界，具备发生中强地震的构造条件。冷龙岭地区地壳运动方向为近北东东向，与该地区地震震源



ATF: 阿尔金断裂, HYF: 海原断裂, EKF: 东昆仑断裂; 1. 正断层, 2. 逆断层, 3. 走滑断层, 4. 全新世断层, 5. 晚更新世断层, 6. 地震破坏程度等值线及破坏等级, 7. 水系, 8. 1986 年门源 $M_s6.4$ 地震震中, 9. 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震震中, 10. 余震分布; F₁: 皇城—双塔断裂, F₂: 民乐—大马营断裂, F₃: 肃南—祁连断裂 (峨堡段), F₄: 托勒山北缘断裂, F₅: 冷龙岭断裂, F₆: 冷龙岭北缘断裂, F₇: 天桥沟—黄羊川断裂, F₈: 金强河断裂, F₉: 门源断裂, F₁₀: 达坂山断裂

图 1 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震发震构造图

(a) 区域构造位置图; (b) 门源 $M_s6.4$ 地震震中及余震分布;

(c) 门源 $M_s6.4$ 地震影响烈度图

Fig. 1 Structural map of Menyuan $M_s6.4$ earthquakes in 2016

(a) location map of regional tectonic; (b) distribution of epicenter and aftershocks of Menyuan $M_s6.4$ earthquake;

(c) seismic intensity chart of Menyuan $M_s6.4$ earthquake

机制解揭示的主压应力方向基本一致,说明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。距离震中最近的冷龙岭断裂西起俄博,东经金瑶岭、冷龙岭主峰(5 254 m)南侧,长约 120 km。总体走向 $290^{\circ} \sim 300^{\circ}$,早期为逆断层,后期以走滑—拉张性质为特征,最新活动段倾向北东,倾角 65° 。西与祁连断裂相连,东与毛毛山断裂相接。调查认为该断裂由一组近平行的次级断裂组成,断裂宽度 1 ~ 3 km。根据不同段落的形态、走向、结构和连续性,并考虑断裂活动性质和地貌特征变化,可将冷龙岭断裂划分为 3 段;双龙煤矿—假墙丫豁段(东段)、假墙丫豁—硫磺沟口段(中段)和硫磺沟口—八道班段(西段)(何文贵等, 2000)。沿断裂带形成了一系列断错地貌,如断错水系、山脊、冰碛物等。中更新世、晚更新世、全新世水平滑动速率分别为 2.14 ~ 4.64 mm/a、2.86 ~ 4.07 mm/a、3.35 ~ 4.62 mm/a;全新世以来的垂直滑

动速率为 0.3 mm/a (何文贵等, 2001, 2010);冷龙岭断裂的走滑速率达 (19 ± 5) mm/a (Lasserre *et al*, 2002)。

2 余震及震源机制解特征

地震发生后,不同机构给出了震源机制解(表 1),显示断层均为近纯逆冲运动性质,节面 I、II 都较相近,节面 I 走向 $134^{\circ} \sim 143^{\circ}$ 左右,倾角 $35^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 左右;节面 II 走向 $335^{\circ} \sim 343^{\circ}$ 左右,倾角 $51^{\circ} \sim 56^{\circ}$ 。从震源机制解的角度推测,震源机制解的 2 个节面中其中一个与发震断裂的产状应一致,因此发震断裂为走向约 140° 或 340° 的断裂。据中国地震台网中心数据,截至 2016 年 1 月 27 日 8 时 33 分 23 秒,共监测到 1 235 (震级下限 0.5) 次余震(图 1),本次地震为主—余震型地震。在平面分布上,主震、余震分布总体上长轴走向约为 137° 。

表 1 2016 门源 $M_s 6.4$ 地震震源机制解

Tab. 1 Focal mechanism solutions of Menyuan $M_s 6.4$ earthquake in 2016

资料来源	节面 I			节面 II			震中位置	震源深度/km	震级
	走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$	走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$			
CENC	143	35	80	335	56	97	(37.68°N, 101.62°E)	10	$M_6.4$
IGP-CEA	141	38	79	335	53	98	(37.70°N, 101.60°E)	7	$M_s 6.4$
Harvard	134	43	68	343	51	109	(37.65°N, 101.76°E)	13.9	$M_w 5.9$

3 断裂微地貌遥感解译特征

在遥感影像上断裂的识别和解译要以断裂的空间结构信息为主,结合影像波谱特征和地学知识进行综合分析。对于色调不明显的区域性断裂,需要综合断裂构造直接标志与间接标志分析、影像色调、色相结构异常界面、地质—地貌综合分析、地表水系结构异常分析等方法进行识别及信息提取。结合断裂断错地貌,如冲沟、阶地、拉分盆地、冲洪积扇、山脊、断层崖等变形标志(张之武等, 2008; 罗国文等, 2012; 马丹等, 2014; 李天龙等, 2014)。走滑活动断裂中,常见的地貌标志有地层、山脊错动、拉分盆地、水系、阶地的同步转折、冲沟错动及断头断尾沟以及冲洪积扇的形态变化(马丹等, 2014)。笔者利用高

分 1 号遥感影像和 googleearth 影像数据,选择冷龙岭断裂上距离震中较近断错线性地貌较明显的 3 个点进行了遥感解译工作。

3.1 春圈窝东北解译点 1

在春圈窝东北约 8.5 km 处的解译点 1,山峰陡峻,沟谷深切,山前广泛发育晚更新世及全新世以来形成的冲洪积台地,断裂带南侧约 300 m 处,硫磺沟近东西向发育,宽 150 ~ 200 m;山前发育 4 条不同规模的小冲沟,冲沟多自北向南流动切割冲洪积台地,最终汇于山前硫磺沟中。在冲沟形成后,冷龙岭断裂带持续活动,明显断错山前发育的微地貌,主要表现为断裂左旋错断了冲沟和冲洪积台地,并在扇体上保留了多期断层断错形成的断头沟(图 2)。

从东往西统计分析地貌的左旋累计位错量可以看出,最西侧的冲沟位错与新的冲洪积扇位错近一

致，分别为 31 m 和 35 m；第二条沟断错地貌现象最完整，保留了二期断层活动遗迹，形成了 1 条断头沟，最大位错量为 135 m，最新冲沟位错为 50 m；

最东侧冲沟处，断层断错冲沟和冲洪积扇扇体，冲洪积扇位错量为 22 m 和 36 m，扇体右岸受侵蚀较严重，以左岸位错量为准，冲沟位错为 65 m。



图 2 春圈窝东北断裂断错地貌解译

Fig. 2 Fault offset landforms interpretation in northeast of Chunjuanwo Village

3.2 青石嘴镇东北解译点 2

在靠近震中附近的青石嘴镇东北约 10 km 的解译点 2，地貌发育较为简单，通过影响色调差异，解译出了断裂带附近的基岩山脉及两个冲洪积扇体，扇体同时形成，并被由北往南发育的新生性冲沟所切割，扇体前缘宽 300 ~ 400 m。在该解译点冷龙岭断裂线性特征明显，断裂左旋断错冲沟和冲洪积扇体，断层上、下盘呈现不同的色调。通过影像解译（图 3），可以获得解译点冲沟累计位错分别为 80 m 和 111 m，扇体左旋位移量为 59.5 m 和 80 m，说明冲沟与冲洪积扇形成后断层活动，位错量一致。

3.3 抓龙口西北解译点 3

在冷龙岭断裂东端抓龙口村西北约 5 km 处的

解译点 3，解译点主要为山前冲洪积地貌，出山口处发育 2 个规模不同的冲洪积扇，最大扇体前缘宽度达 500 m，跨断层发育 6 条小冲沟，部分冲沟在构造和气候的作用下切割扇体，而后断裂的进一步活动断错扇体和冲沟。主要表现为断裂左旋错断了冲沟和山脊，并且断层断错形成多条断头沟和断尾沟（图 4），从西向东统计分析地貌的累计左旋位错量可以看出，最西侧的冲沟位错量很小，一般在 10 m 左右，通过解译测量获得其水平位错量分别为 10 m、8.5 m 和 7 m；东侧山脊被断层左旋断错，水平位移量为 75 m；再向东约 100 m，山脊左旋位错，位移量 28 m；最东侧冲沟处，断层断错冲沟并形成二期断尾沟，累计位错量分别为 115 m 和 55 m，最新冲沟无位错。

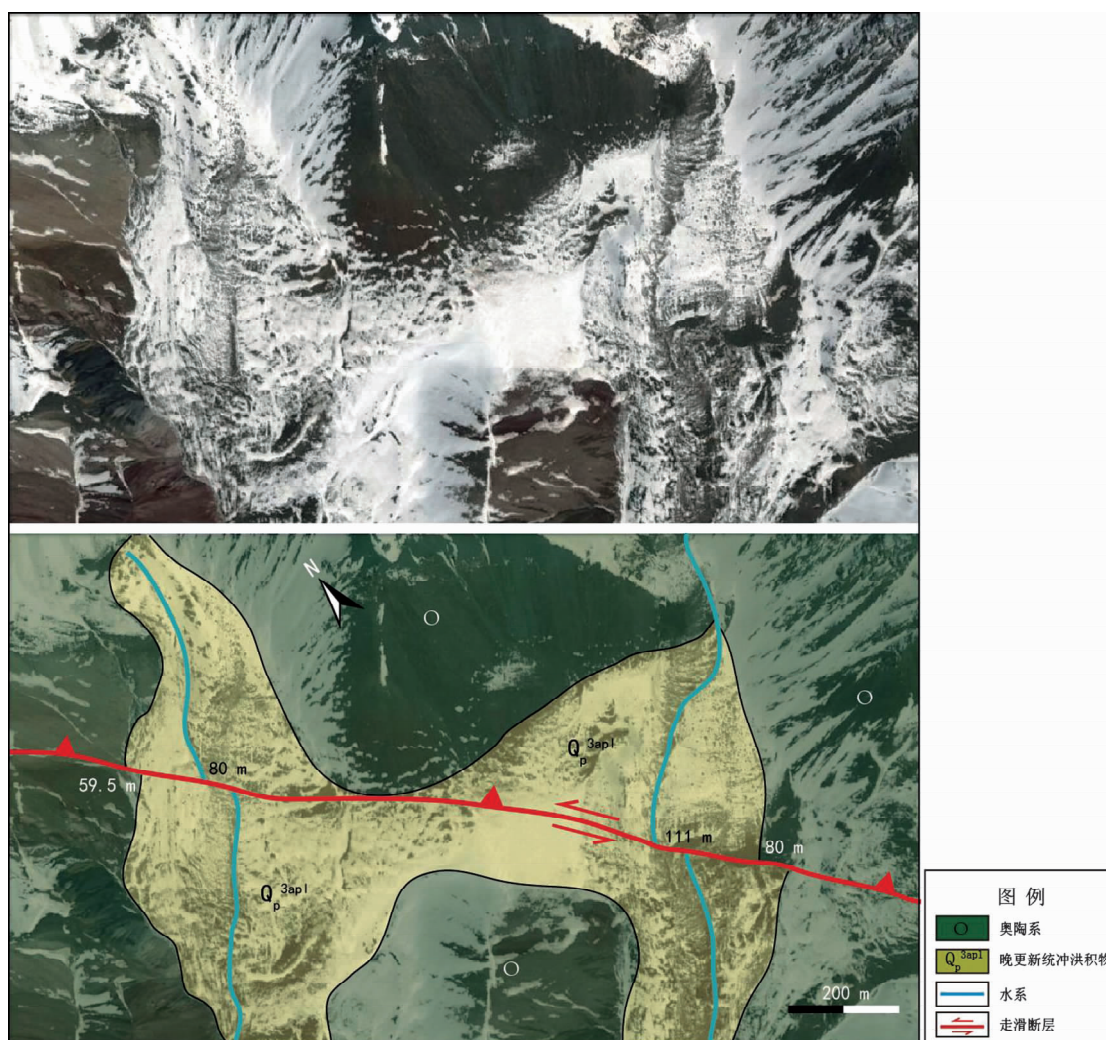


图3 青石嘴镇东北断裂断错地貌解译

Fig. 3 Fault offset landforms interpretation in northeast of Qingshizui Town

3.4 断裂微地貌遥感解译特征

前人野外实际调查认为沿断裂断错水系十分发育,最大左旋错动达3.25 km,最小仅7 m。山脊错动也很明显,位错量110~280 m。冰碛台地左旋错动达135 m(何文贵等,2000)。

本次遥感解译工作显示,冷龙岭断裂带水系的断错和拐弯,以及其他线性标志的断错现象也非常明显。自北向南发育的冲沟被断层系统地断错或拐弯,通常在单条上游河道有2~3条断错形成的断头沟或断尾沟,说明断层的左旋位错量在不断累积。解译点1附近地貌累计水平位错量从老至新分别为135 m、50~65 m和31~36 m;解译点2附近地貌累计水平位错量从老至新断错量分别为111 m和59.5~80 m;解译点3附近地貌累计水平位错量从老至新断错量分别为115 m、55~75

m、28 m和7~10 m。解译结果与前人野外实际调查的部分结果较为一致,说明本次遥感解译工作可信度较高。通过不同地段的遥感解译资料更为细致地划分出了断层多期的活动。

综合分析冲沟的系统位错表明了冷龙岭断裂水平位移的活动期次(图5a),其中R1-R3代表记录的两条废弃的下游河道的位错可能代表至少一次的地震断层活动;R3为现代河道的断错量,可能是由最近一次的地震事件形成;R1-R3的位移量的总和代表河道从断层位移开始至今的总位移量。通过影像解译认为,距离本次地震震中较近的冷龙岭断裂具有典型的左旋走滑特征,垂向运动分量小,晚更新世以来有过4期水平位错活动(图5b),从老至新其位错量逐渐变小,分别为45~65 m,22~52 m,13~27 m及7~10 m(图5c)。

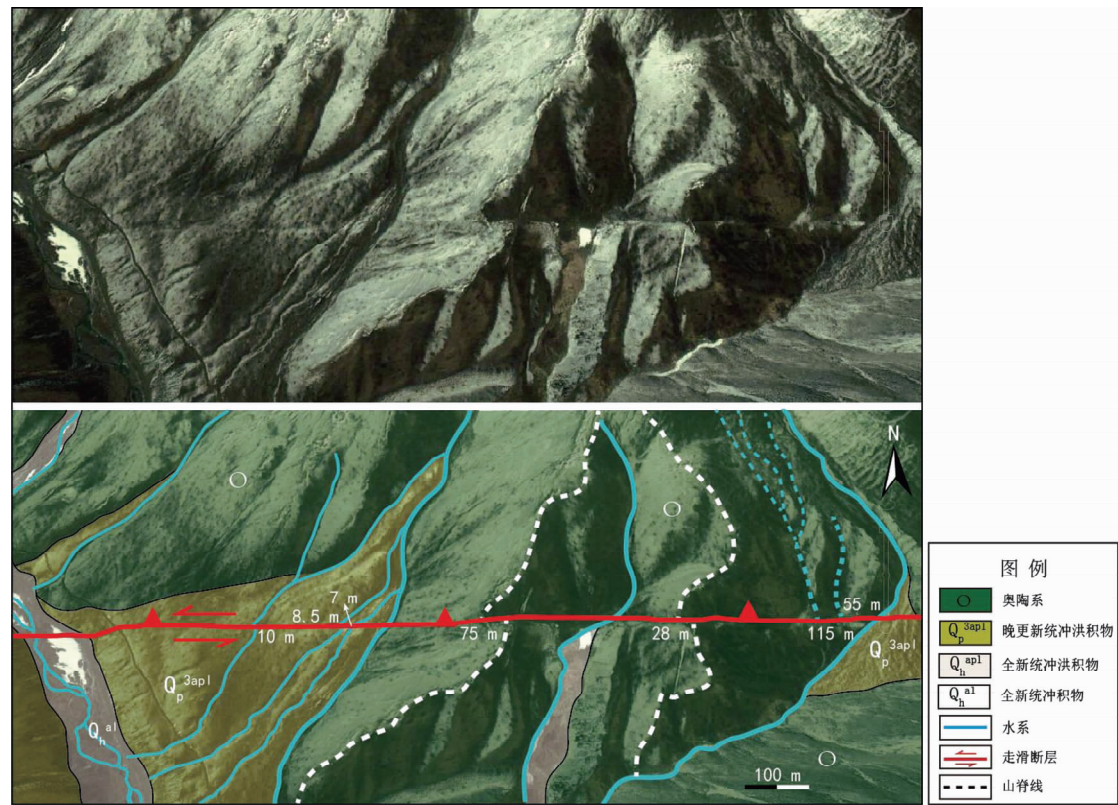


图 4 抓龙口村西北断裂断错地貌解译

Fig. 4 Fault offset landforms interpretation in northwest of Zhualongkou Village

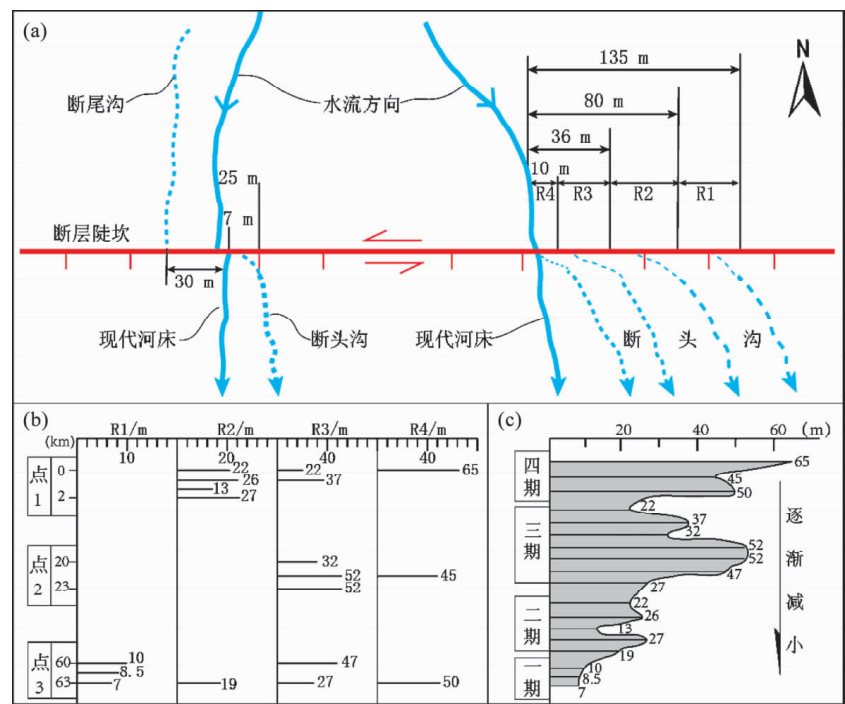


图 5 冷龙岭断裂解译点冲沟位错量 (据林爱明等 (2003) 修改)

(a) 冷龙岭断裂左旋断错水系示意图; (b) 解译点处水系解译及位移分布图; (c) 各单期次位移分布图

Fig. 5 Dislocation of gully of interpretation point of Lenglongling Fault (modified based on Lin *et al* (2003))

(a) the diagram of drainage levorotatory offsets of Lenglongling Fault; (b) distribution of the drainage interpretation and displacement; (c) distribution of the single phase displacement

前人在讨拉柴陇至假墙丫豁的 20 km 地段内, 揭露出全新世有 3 次古地震事件, 距今分别为 5 926 a、3 885 a 和公元 1 540 a (何文贵等, 2001)。断层上古地震事件与遥感解译确定的四期水平位错活动之间的关系, 有待今后的测年工作进一步确定。

4 结论与讨论

本文遥感解译工作揭示, 距离门源地震震中较近的冷龙岭断裂具有典型的左旋走滑特征, 垂向运动分量小, 晚更新世以来断裂发生过 4 期水平位错活动, 从老至新其位错量逐渐变小, 分别为 45 ~ 65 m, 22 ~ 52 m, 13 ~ 27 m 及 7 ~ 10 m, 反映出了冷龙岭断裂具有较强水平活动特性, 但断层活动幅度逐渐减弱, 可能为本次中强地震的控震断裂。

从震源机制解的角度推测发震断裂为走向约 140°或约 340°的断裂, 本次地震为主—余震型地震, 为纯逆冲性质。在平面分布上, 主震、余震分布总体上长轴方向走向为约 137°方向; 区域内距离震中最近的冷龙岭断裂 (走向 125°)、民乐—大马营断裂 (走向 123°), 与震源机制解推测的断裂走向相差约 15°, 且断层性质以左旋走滑为主, 显然, 本次地震的发震断裂应不是这两条主断裂, 而极可能是其他次级断裂。冷龙岭断裂西北端发育一条伴生断裂——冷龙岭北侧断裂 (图 1b), 遥感影像上为一条晚第四纪以来没有明显活动地貌迹象的逆断裂, 此类断裂具备发生中强地震的能力。该断裂靠近震中区段近南东走向和以逆冲作用为主的运动性质与震源机制解揭示的断层运动性质较为一致, 且断裂的展布与主、余震分布特征和地震烈度长轴方向与极震区分布范围也较为吻合 (图 1c)。因此, 冷龙岭北侧断裂很可能是门源 $M_s 6.4$ 地震的发震构造。这与发震构造有可能是冷龙岭断裂北侧的一条次级逆冲断层 (胡朝忠等, 2016) 相一致。同样, 1986 年门源 6.4 级地震的发震构造也值得考究。

依据断层横切的水系位错大概划分出了断层

活动的期次, 位错量均偏大, 可能还是断层累积位错的结果, 不能代表断层同震位移的大小。更细致的断层同震位错期次的划分, 有待今后的调查研究工作进一步确定。

参考文献:

- 何文贵, 刘百箴, 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, 刘百箴, 袁道阳等. 2001. 冷龙岭断裂古地震初步研究 [C]//中国地震局地质所. 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.
- 胡朝忠, 杨攀新, 李智敏等. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震的发震机制探讨 [J]. 地球物理学报, 59(5): 1637–1646.
- 李天龙, 张世民, 丁锐等. 2014. 基于 P5 立体像对和高分辨率 Google Earth 影像的丽江—小金河断裂错断地貌解译 [J]. 震灾防御技术, 9(1): 40–52.
- 李媛, 刘侠, 刘西康等. 2016. 2016 年门源 6.4 级地震前祁连山周边断层活动分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 4(36): 288–293.
- 林爱明, 付碧宏, 狩野谦一等. 2003. 焉省盆地活动断层的晚第四纪右行走滑 [J]. 新疆地质, 21(1): 103–115.
- 罗国文, 阴志宏, 杨树文. 2012. 断裂构造遥感识别和提取方法的现状与方法 [J]. 山东国土资源, 28(2): 31–35.
- 马丹, 吴中海, 李家存等. 2014. 川西理塘断裂带的空间展布与第四纪左旋走滑活动的遥感影像标志 [J]. 地质学报, 88(8): 1417–1435.
- 袁道阳, 张培震, 刘百箴等. 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.
- 张之武, 付碧宏, Yasuo A. 2008. 新疆阿尔泰山南部富蕴右旋走滑断裂带晚第四纪错断水系的遥感分析研究 [J]. 第四纪研究, 28(2): 273–279.
- 中国地震局地球物理研究所. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海海北州门源县 $M_s 6.4$ 地震 [EB/OL]. (2016–01–21) [2016–08–23]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/273560.shtml>.
- Lasserre C, Gaudmer Y, Tapponnier P, et al. 2002. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China [J]. Journal of Geophysical Research, 107(B11): 1–15.
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, et al. 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(10): 5722–5732. doi:10.1002/2013jb010503.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M. et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. Geology, 32(9): 809. doi:10.1130/g20554.1.

Discussion on the Seismogenic Structure Remote Sensing Interpretation of the Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

LI Zhimin¹, HUANG Shuaitang², HU Chaozhong³, YANG Panxin³

(1. Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

(2. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

(3. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract

Using high score No. 1 remote sensing image and Googleearth image data, we carried out the interpretation of remote sensing work of the micro – topography (river, alluvial fan, ridges etc.) of Lenglongling Fault which is the seismogenic tectonics of Menyuan $M_s6.4$ earthquake on Jan. 21, 2016. The study results have shown that the Lenglongling Fault has characteristics of typical left – lateral and strike – slip. The fault occurred 4 periods of fault activity since the late Pleistocene, and their displacement are 4 565 m, 2 252 m, 1 327 m and 710 m from the old to the new, which reflects the activity of fault is strong, but the amplitude of fault activity gradually decreases. Combined with aftershocks distribution and focal mechanism solutions, we judge that the Lenglongling Fault is the control structure of this earthquake, however, the seismogenic tectonics may be the secondary thrust north fault of Lenglongling Fault.

Key words: remote sensing; Lenglongling Fault; offset landforms; seismogenic structure; Menyuan earthquake