

孙鑫喆,徐锡伟,陈立春等. 2010 年玉树地震地表破裂带典型破裂样式及其构造意义. 地球物理学报, 2012, 55(1): 155-170, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.015.

Sun X Z, Xu X W, Chen L C, et al. Surface rupture features of the 2010 Yushu earthquake and its tectonic implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(1): 155-170, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.015.

2010 年玉树地震地表破裂带典型破裂样式 及其构造意义

孙鑫喆¹, 徐锡伟^{1*}, 陈立春¹, 谭锡斌¹, 于贵华¹,
李智敏², 苏桂武¹, 王 继³, 张晓清²

1 中国地震局地质研究所国家地震活断层研究中心, 北京 100029

2 青海省地震局, 西宁 810001

3 中国地震灾害防御中心, 北京 100029

摘 要 野外调查表明, 青海玉树 $M_s 7.1$ 地震发生在青藏高原中部甘孜—玉树断裂的玉树段上, 在玉树县结古镇至隆宝镇之间产生了一系列包括剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性破裂及其不连续岩桥区出现的鼓包或陷落坑(拉分盆地)、高寒地区特有的冰裂缝等破裂单元, 它们斜列组合成整体走向约 300° 、长约 65 km、最大同震左旋位移 2.4 m 的地表破裂带, 具有变形局部化的基本特征。玉树地震地表破裂带整体上可划分为长约 15 km 的结隆次级地表破裂带和长约 31 km 的结古次级地表破裂带, 两者呈左阶羽列, 其间无地表破裂段长约 17 km, 对应于 $M_w 6.4$ 和 $M_w 6.9$ 两个次级地震事件。地表破裂类型、基本组合特征等显示出甘孜—玉树断裂两盘块体的运动方式以纯剪切的左旋走滑为主, 从一个方面反映了青藏高原物质存在着向东的逃逸和挤出现象。

关键词 玉树地震, 地震地表破裂带, 甘孜—玉树断裂, 逃逸构造, 青藏高原

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.015

中图分类号 P315, P541

收稿日期 2011-07-06, 2011-12-29 收修定稿

Surface rupture features of the 2010 Yushu earthquake and its tectonic implication

SUN Xin-Zhe¹, XU Xi-Wei^{1*}, CHEN Li-Chun¹, TAN Xi-Bin¹, YU Gui-Hua¹,
LI Zhi-Min², SU Gui-Wu¹, WANG Ji³, ZHANG Xiao-Qing²

1 National Center for Active Fault Studies, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, China

3 China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

Abstract Field investigations show that the Yushu, Qinghai Province, $M_s 7.1$ earthquake occurred on the Yushu segment of the Ganzê-Yushu fault in the Qinghai-Tibetan Plateau. Its surface rupture zone is distributed along the Yushu segment between Longbao Town and Jiegu Town and consists of shear cracks, transtensional cracks, transpressional cracks, tension cracks, mole tracks in right-stepovers or small pull-aparts in left-stepovers between en echelon cracks with left-lateral component. Those ruptures are en echelon to form an $\sim 300^\circ$ -striking earthquake

基金项目 国家自然科学基金(40821160550 和 40974057)和中国地震局玉树地震科学考察项目资助。

作者简介 孙鑫喆, 男, 1984 年生, 2008 年毕业于中国地质大学(武汉)地球科学学院, 中国地震局地质研究所在职博士。主要从事构造地质、活动构造等方面的研究。E-mail: sunxinzhe1023@gmail.com

* **通讯作者** 徐锡伟, 男, 1962 年生, 研究员, 主要从事活动构造学研究及其在减轻地震灾害中的应用。E-mail: xiweixu@vip.sina.com

surface rupture zone with a total length of about 65 km. The maximum co-seismic left-lateral displacement is 2.4 m. The width of the surface rupture zone is in general less than 30 m, showing a localized rupturing feature. The Yushu earthquake surface rupture zone can be divided into two relatively independent sections in left-step: the Jielong section ~ 15 km long with a maximum left-lateral slip of 0.66 m and Jiegu section ~ 31 km with a maximum left-lateral slip of 2.4 m, and between them is a 17 km-long-section where no surface ruptures occurred, which correspond to two subevents with $M_w 6.4$ and $M_w 6.9$, respectively. This kind of the surface rupture pattern shows that the Ganzê-Yushu fault, a seismogenic fault of the Yushu earthquake, is dominated by a pure left-lateral faulting and the eastward escape of the Qinghai-Tibetan Plateau exists.

Keywords Yushu Earthquake, Earthquake surface rupture zone, Ganzê-Yushu fault, Escape tectonics, Qinghai-Tibetan Plateau

1 引言

据中国地震台网测定,2010年4月14日在青海玉树藏族自治州玉树县结隆乡至结古镇之间发生了一次 $M_s 7.1$ 级地震,震中位于北纬 33.2° ,东经 96.6° (图1),震源深度 ~ 14 km^[1].从矩张量快速反演可知,发震断层走向 119° ,倾角 83° ,滑动角 -2° ,或走向 301° ,倾角 86° ,滑动角 32° ^[2],反映出北西向发震断层具有左旋走滑性质^[2];震源破裂过程的快速反演表明,地震主要有两次子事件组成,分别对应于震中附近及震中东南方向上滑动量集中的2段破裂区域,其中在震中东南方向上滑动集中的区域破裂贯穿到地表,最大滑动量可达 2.1 m,震源破裂自震中向东南单侧扩展^[2-3];通过主震及其附近很小范围内主震前小地震之间波形相似性分析,判定2010年4月14日玉树 $M_s 7.1$ 之前约 2 h 发生的一次 $M_s 4.7$ 级地震为玉树地震前震^[4].这些研究无疑深化了对玉树地震破裂过程的认识.迄今为止,除科学新闻式报道玉树地震构造背景、长约 31 km 地震地表破裂带、隆宝湖北侧震中附近存在 2 km 长的雁列式张剪切破裂带、地表最大 1.8 m 同震左旋位移量等资料证实甘孜—玉树断裂带玉树段为玉树 $M_w 6.9$ 级地震的发震断层和利用 D-InSAR 提取得到类似的地震地表破裂参数外^[5-7],对地震地表破裂带空间分布特征、地表破裂基本单元种类及其组合样式等缺乏系统论述,妨碍了对地震破裂过程的深入分析与讨论.本文基于震后航空照片(0.2 m 分辨率)和 World-view 高分辨率卫星影像(0.5 m 分辨率)的解译和野外实地考察、同震位移测量和对地表破裂基本单元及其组合方式的详细观测,对地震地

表破裂基本单元的分类和组合特征进行详细叙述,结合历史地震地表破裂的空间展布特征,讨论了玉树地震地表破裂的构造内涵,将有助于深化对青藏高原大型走滑断裂带地震破裂分段习性和现今运动状态的认识,对分析青藏高原大型走滑断裂带的左旋走滑及其与青藏高原东向挤出之间的相互关系也有非常重要的科学意义.

2 甘孜—玉树断裂与历史地震破裂

甘孜—玉树断裂是青藏高原中东部羌塘地块与巴颜喀拉地块之间的边界断裂,也是鲜水河断裂系西部组成部分(图1),西起青海省治多县那王草曲塘,经当江、玉树、邓柯、马尼干戈,至四川甘孜县城南与鲜水河断裂左阶斜列,成为青藏高原内部的一条大型左旋走滑断裂带(图1a),全长超过 500 km,整体呈北西向展布,仅在当江附近走向北西西,倾向以西南为主,倾角 $70^\circ \sim 85^\circ$.甘孜—玉树断裂是一条全新世左旋走滑断裂,基岩破碎带一般宽数十至百余米,局部地段达数百米,但晚更新世以来活动的新破裂面仅 2~3 条,局限在基岩破裂带内,宽度数十米,表现出最新破裂具有变形局部化的基本特征.断错地貌特征,如断层陡坎,坡中槽,断层谷等现象明显,据此可将甘孜—玉树断裂划分为 5 段^[8]:自北西向南东分别为当江段、玉树段、邓柯段、马尼干戈段和甘孜段(图1b).已有研究表明,甘孜—玉树断裂当江段和玉树段全新世左旋滑动速率为 7.3 ± 0.6 mm/a^[8],玉树以东邓柯段、马尼干戈段、甘孜段等左旋滑动速率约为 12 ± 2 mm/a^[9-10].当江段曾发生过 1738 年清代玉树西地震($M 6 \frac{1}{2}$ 级)^[11],最大同震左旋位移约 5 m,产生的地震地表破裂带长度

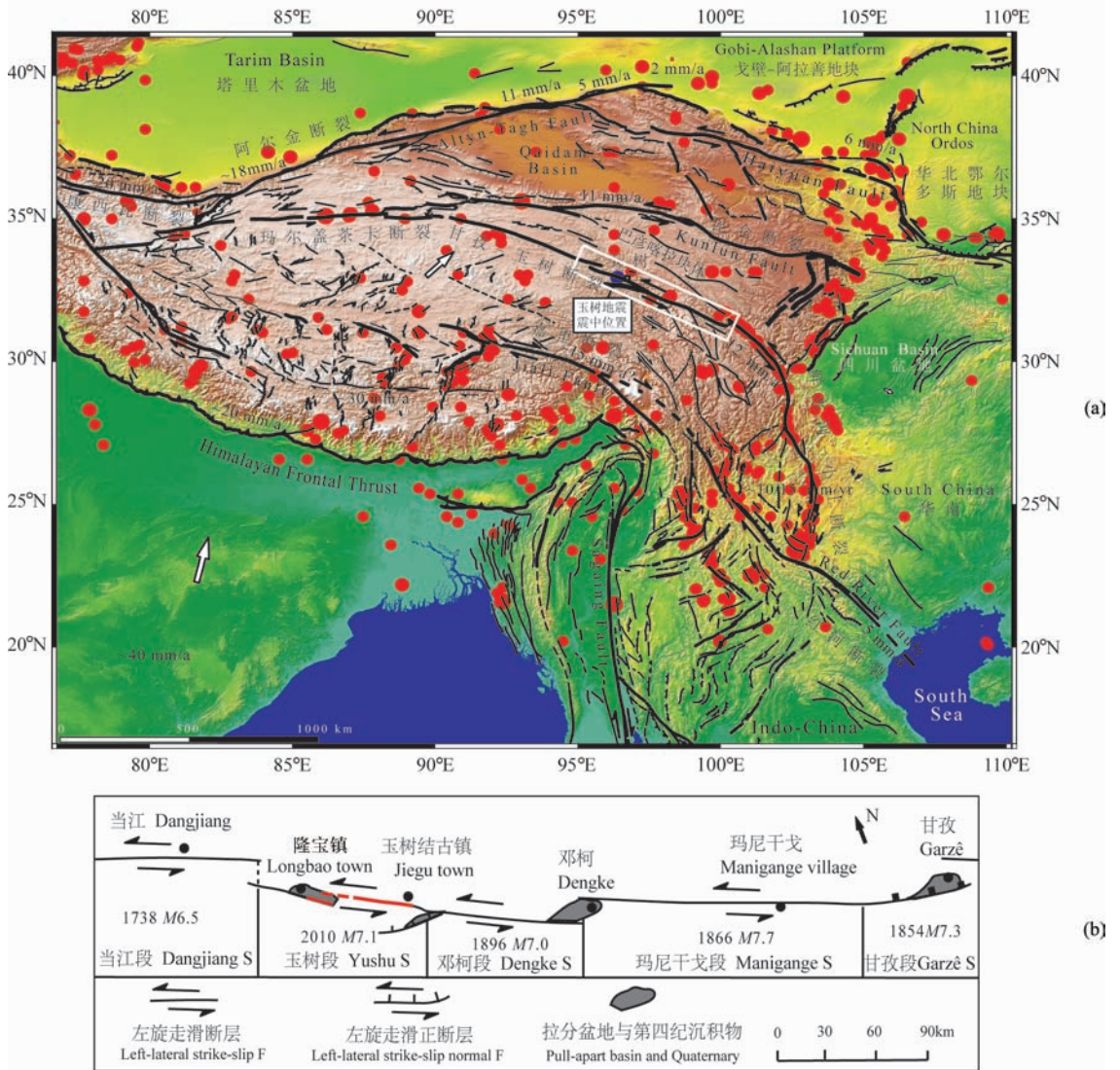


图 1 (a)玉树地震区域地震构造图(据参考文献[13,14]修改),红色圆圈代表历史地震震中,蓝色圆圈代表玉树地震震中;
 (b)甘孜—玉树断裂历史地震破裂分段与玉树地震破裂的填空作用,红色线条代表 2010 年 4 月 14 日 7.1 级地震地表破裂
 Fig.1 Regional seismotectonic map of the Yushu earthquake (a) and segmentation of the historical earthquake ruptures
 along the Ganzê-Yushu earthquake(b). Red dots in (a) are history epicenter, blue one is Yushu earthquake's epicenter.

Red lines in (b) are the surface rupture of the Yushu earthquake which happened on Apr 14th, 2010

大于 50 km,推测震级可达到 $M_w 7.5$ 级^[12];1979 年 3 月 29 日在玉树段与邓柯段之间青海玉树南东发生过一次 $M6.2$ 级地震^[10];邓柯段曾于 1896 年发生过邓柯地震 ($M7$)^[11],产生的地震地表破裂带长度至少达 70 km,以左旋走滑为主,最大同震左旋位移达 5 m,推测矩震级 $M_w = 7.3$ ^[9];沿马尼干戈段和甘孜段发现存在长度约 230 km 未知年代近代地表破裂带,根据破裂规模、延伸的连续性以及同震位移沿断裂走向的分布及递减规律等,可分为两个相对独立的震地表破裂段,分别展布在马尼干戈段和甘孜段上,前者地震地表破裂带长度约 180 km,最大同震左旋位移约 9 m,推测发生年代为公元 1854

年,矩震级估计为 $M_w 7.7$;后者地震地表破裂带长度约 65 km,最大同震左旋位移约 5.3 m,推测发生年代为公元 1866 年,矩震级估计为 $M_w 7.3$ ^[9].值得指出的是,2010 年玉树地震 ($M_w 6.9$) 发生在甘孜—玉树断裂带西部历史地震破裂空段—玉树段上,很好地反映出沿青藏高原中东部大型走滑断层地震破裂的填空作用(图 1b).

3 玉树地震地表破裂样式

地震地表破裂是地壳弹性应变转化为永久性构造变形的表现形式之一,具体的破裂样式包含着大

陆地壳变形方式、运动状态和地震破裂过程等基础信息,是理解地壳弹性应变转化为永久性构造变形的中间环节^[14-17].震后航空照片和高分辨率卫星影像等解译及野外考察表明,2010年4月14日发生在青海省玉树县的 $M_s7.1$ 级或 $M_w6.9$ 地震沿甘孜—玉树断裂结古镇至隆宝镇之间玉树段分布,西端部起自隆宝镇南扎西才仁家平房附近(96.43863°E, 33.22611°N),以雁行斜列和面状分布的 NE 向张性破裂为主;东止于结古镇南巴曲东岸禅古寺附近(97.04354°E, 32.94768°N),以压剪切破裂为主;地震地表破裂带整体走向约 300°,长度约 65 km(图 2),形成了丰富的地表破裂类型,包括剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性破裂、鼓包或陷落坑(拉分盆地)等在内的基本地表破裂单元.此外,还形成了高原高寒地区特有的冰裂缝现象.由于不同地点断层走向、基岩断层上覆第四纪沉积物类型和厚度、冻土分布特征等区域差异,这些地表破裂基本单元以不同的方式斜列组合,表现出明显的地震破裂分

段特性.

地震发生后,国家测绘局、中国科学院对地观测与数字地球科学中心等部门或单位在第一时间对玉树震区(主要在玉树结古镇及其西侧邻近地区)进行了航空摄影,航片分辨率可达 0.2 m;此外,为了及时掌握地震地表破裂带的空间展布,通过订购分辨率为 0.5 m 的 World-View 卫星影像和 2.5 m 分辨率的 SPOT 卫星影像,利用 Arcgis 平台将航片和卫星影像在统一的坐标系中进行了配准等处理后,可以在 World-View 卫星影像和航片上清晰地观察到沿发震断层断续雁列状分布的张剪切破裂、羽列状展布的剪切或压剪切破裂,以及介于这些破裂之间的鼓包或张开的陷落坑(拉分盆地)等地震地表破裂现象(图 3),据此勾画出详细的地震地表破裂带解译图(图 2a);在地表破裂切割线性较好的地貌标志线(冲沟、阶地分界陡坎)和人造标志线(路、田埂、围墙、地基)时,还可以测量到同震左旋走滑位移量(图 3),误差值一般为图像分辨率的 2 倍,在被错

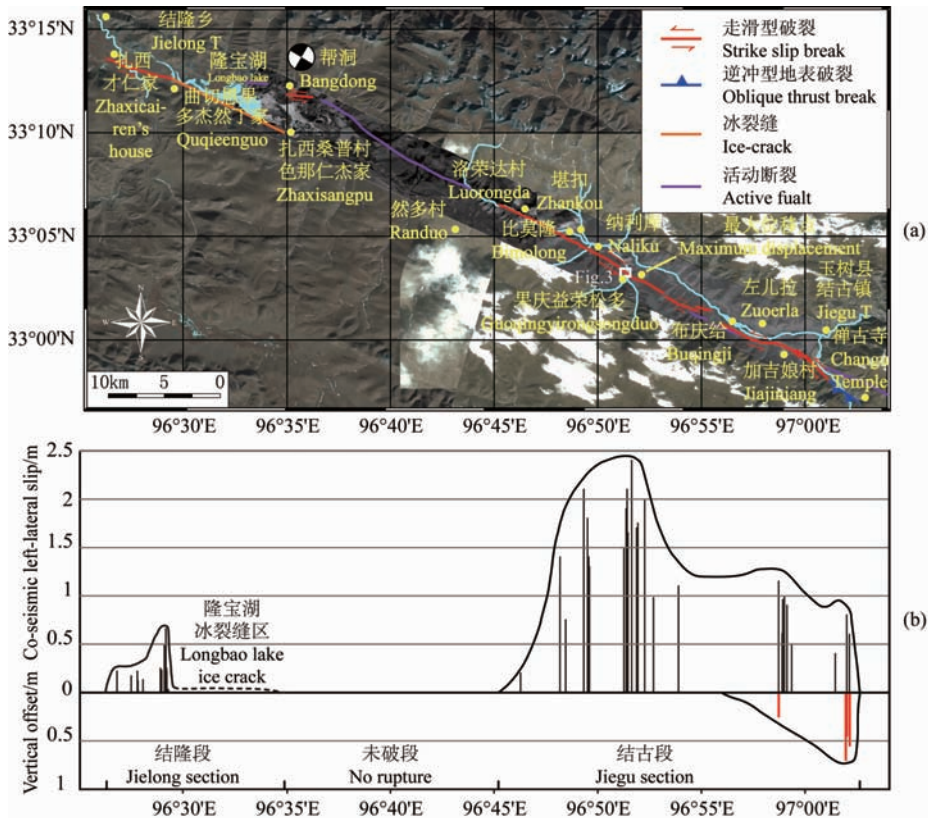


图 2 玉树 2010 年 4 月 14 日 7.1 级地震地表破裂分布(a)和同震位移分布(b)图. 黑色圈代表微观震中及其震源机制解;白色方框表示图 3 范围;底图为 0.5 m 分辨率 World-view 卫星影像,其他为 SPOT5 卫星影像
 Fig. 2 (a) Surface ruptures associated with 2010 Yushu $M_s7.1$ earthquake (red lines); (b) Strike-along co-seismic offset distribution. The beach ball is the location of the epicenter and the focal mechanism solution, the white rectangle shows the range of Fig. 3, background map is the World-view satellite imagery which resolution is 0.5m and other part is SPOT5 satellite imagery

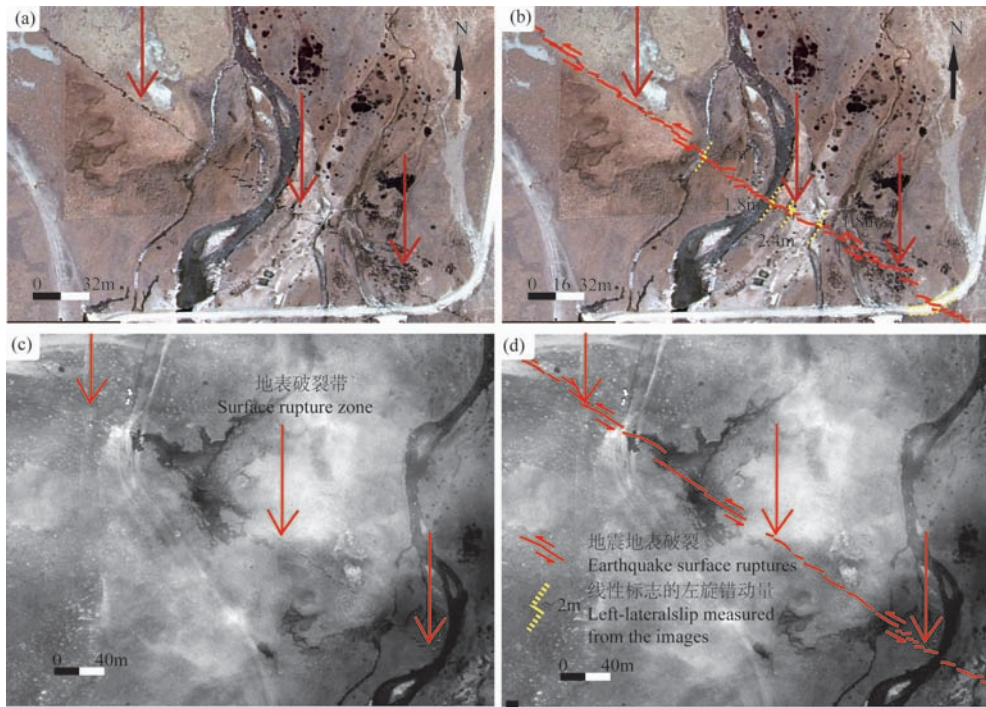


图3 果庆益荣松多玉树地震地表破裂的航卫片影像解译实例

(a) 航片影像展示的地震地表破裂;(b) 航片影像上地震地表破裂填图结果;(c) World-View 卫星影像展示的地震地表破裂;(d) 卫星影像上地震地表破裂填图结果。

Fig. 3 Examples of mapping ground ruptures with airphotos and high resolution satellite images at Guoqingyirongsongduo Village

(a) Airphoto shows the co-seismic surface rupture;(b) Co-seismic surface rupture mapping from the airphoto;(c) World-view satellite imagery shows the co-seismic surface rupture;(d) Co-seismic surface rupture mapping from the World-view satellite imagery.

标志线性特别好的条件下误差仅与分辨率相当。在利用震后高分辨率航片和卫星影像解译、勾画得到地震地表破裂带解译图的基础上,通过野外核实、进一步修改解译图最终得到了玉树地震地表破裂带分布图(图2a),同时利用差分GPS测量仪、钢卷尺等实地测量地表破裂带两侧的线性标志得到同震左旋走滑位移,测量面状标志得到同震垂直位移,获得了较为详细的同震位移分布(图2b)。

3.1 地震地表破裂基本单元特征

3.1.1 剪切破裂

野外考察可知,在玉树地震产生的地表破裂中,存在着一种仅见左旋走滑分量的地表破裂单元,其主要特征是破裂走向约 280° ,破裂面近于直立,两侧以同震左旋走滑位移为主,差异升降运动不明显,这些破裂呈羽状斜列,组成整体走向 $295^\circ \pm 5^\circ$ 的地震地表破裂带,单条剪切破裂与地表破裂带整体走向之间夹角 $\leq 15^\circ$ 。剪切破裂在结隆次级破裂带和结古次级破裂带均有发育,最典型的剪切破裂发育在结古镇南牧民安置点加吉娘村,单条剪切破裂长数米至十余米,走向约 295° ,呈左行右阶羽列,阶区发

育高约40 cm鼓包,它们组合成走向约 300° 的地表破裂带,单条剪切破裂与地表破裂带之间夹角仅 5° (图4a),宽度在数米范围,一般不超过10 m。在结隆次级破裂带上可见的剪切破裂走向约 290° ,长度约2 m,在其端部常出现走向 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、长度约1 m的张性破裂,靠近剪切破裂处地表拉开量介于10~50 cm(图4b)。

3.1.2 张剪切破裂

张剪切破裂是玉树地震地表破裂带最为发育的基本破裂单元,同时兼有左旋走滑分量和垂直于破裂走向的张开分量或正断倾滑分量。张剪切破裂走向 $80^\circ \pm 20^\circ$,长度可达数米,一般呈张开状,张开量 15 ± 10 cm,局部地段伴随有西南盘数厘米至数十厘米正断层状下降现象(图4c)。张剪切破裂常呈雁行或斜列状组合成整体走向 $295^\circ \pm 5^\circ$ 的地震地表破裂带,宽度介于10~20 m,可见张剪切破裂与地表破裂带之间存在着 $\leq 45^\circ$ 夹角,由于张剪切破裂常呈左行右阶斜列,其岩桥区一般发育高数十厘米鼓包(图4d),也可见到左行左阶斜列阶区及其相关的小拉分盆地或陷落坑(图4e)。另外,在孤立型张剪

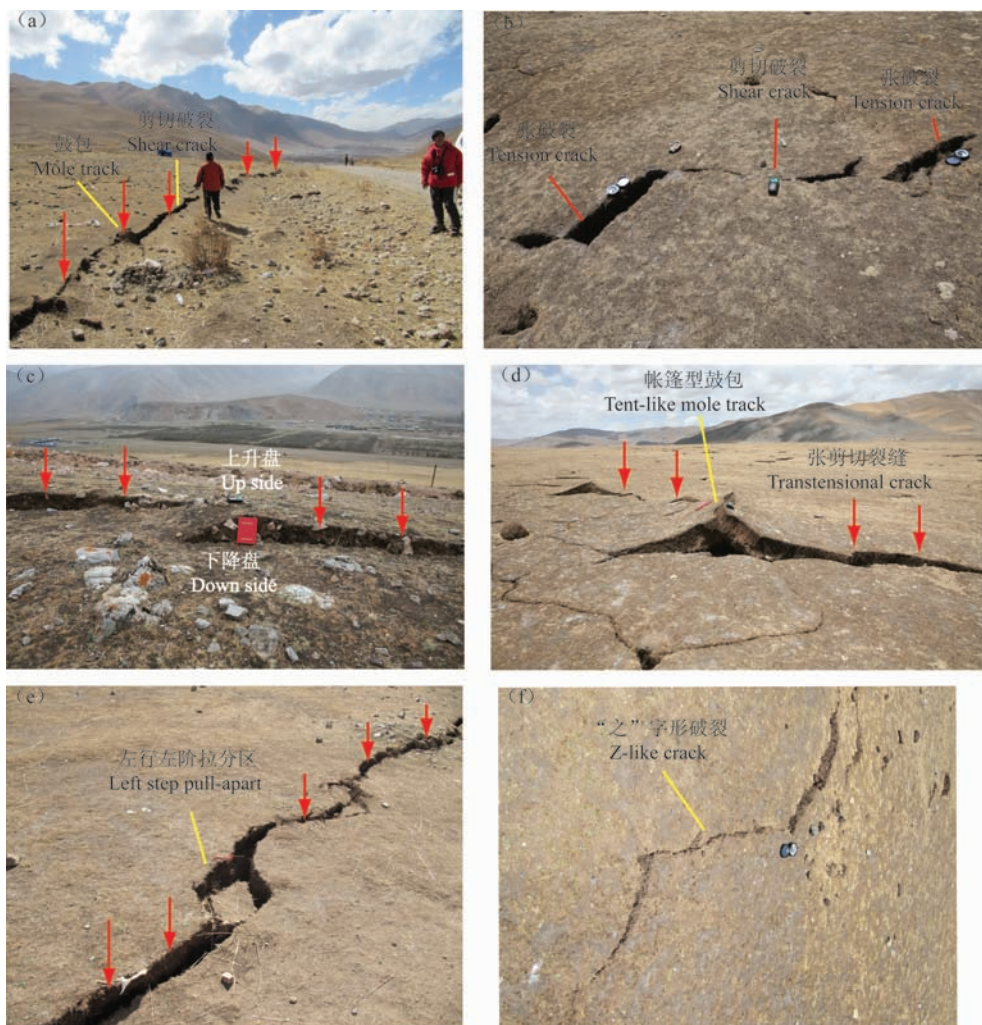


图 4 玉树地震典型剪切破裂与张剪切破裂实例

(a) 结古次级破裂带结古镇南牧民安置点加吉娘村羽列状剪切破裂与鼓包(96.98956°E; 32.99165°N); (b) 结隆次级破裂带南北向公路东剪切破裂及其端部张性破裂(96.48237°E; 32.21186°N); (c) 结古次级破裂带布庆给村羽列状张剪切破裂正断层倾滑(96.93267°E; 33.01282°N); (d) 结隆次级破裂带南北向公路西张剪切破裂与鼓包(96.46392°E; 33.21727°N); (e) 结古次级破裂带结古镇南牧民安置点加吉娘村张剪切破裂与小拉分盆地或陷落坑(96.98945°E; 32.99174°N); (f) 隆宝湖北“之”字形张剪切破裂(96.46945°E; 33.21542°N).

Fig. 4 Typical shear cracks and transtensional cracks for the Yushu earthquake

(a) Jiegu section Jiajiniang feather shear cracks and mole tracks(96.98956°E; 32.99165°N); (b) Jielong section north-south road east shear cracks and transtensional cracks of the end of the rupture(96.48237°E; 32.21186°N); (c) Jiegu section Buqingji feather transtensional cracks and normal fault slip(96.93267°E; 33.01282°N); (d) Jielong section north-south road west transtensional cracks and mole tracks (96.46392°E; 33.21727°N); (e) Jiegu section Jiajiniang transtensional cracks and small pull-apart(96.98945°E; 32.99174°N); (f) North of the Longbao lake “Z” like transtensional cracks(96.46945°E; 33.21542°N).

切破裂端部张性区常发育与之大角度相交的张性破裂构成“之”字型破裂样式(图 4f), 单条张剪切破裂长度在 3~5 m, 端部张性破裂宽 2~10 cm.

3.1.3 压剪切破裂

压剪切破裂主要分布在结古镇南部加吉娘村至禅古寺之间巴曲沿岸玉树地震地表破裂带东端部, 起因于整体走向向南偏转约 10° 成为带有明显挤压分量的压剪切地表破裂段(图 2), 同时构成玉树地震地表破裂带东尾端挤压构造, 宽度一般在 10 m

左右. 最典型的压剪切破裂出露于禅古寺西侧巴曲河附近, 压剪切破裂走向约 315°, 与地表破裂带整体走向 300° 间存在约 15° 夹角, 地表破裂斜切巴曲河谷形成了一个北东盘下降、西南盘抬升的跌水陡坎(图 5a), 据野外实地测量可知, 巴曲西岸长草河漫滩垂直抬升量约 45 cm, 河漫滩与河流分界线左旋错动 78 cm; 巴曲西岸禅古寺村附近, 在先存基岩断层陡坎基础上新形成了高约 70 cm、倾向 SW、倾角约 85° 的新鲜逆断层面(图 5b), 从被错断的车辙

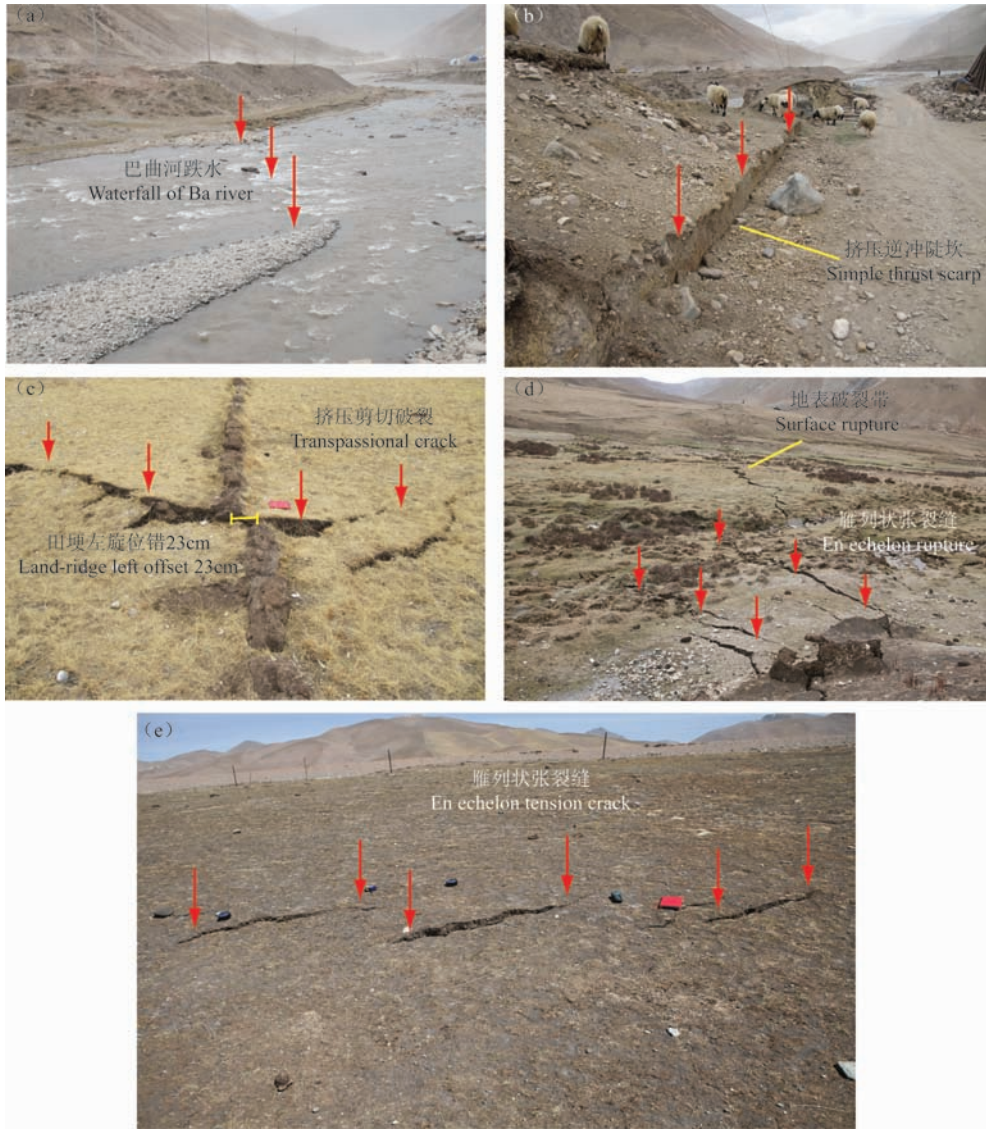


图5 玉树地震典型压剪切破裂与张性破裂实例

(a)结古次级破裂带结古镇南巴曲河高约45 cm 跌水陡坎(97.0338°E; 32.95548°N);(b)结古次级破裂带结古镇南巴曲河西岸高约70 cm 基岩逆断层陡坎(97.03453°E; 32.9548°N);(c)结隆次级破裂带南北向公路东压剪切破裂与鼓包(96.48217°E; 33.21727°N);(d)结古次级破裂带比莫隆村宽23 m雁列的张性破裂与整体地表破裂带(96.80628°E; 33.08278°N);(e)隆宝湖北岸雁列张性裂缝(96.58402°E; 33.19719°N).

Fig. 5 Typical transpressional cracks and tension cracks for the Yushu earthquake

(a) Jiegu section Ba-river waterfall,45cm height(97.0338°E; 32.95548°N);(b)Jiegu section simple thrust scarp in the bedrock at the bank of the Ba-river, 70 cm height (97.03453°E; 32.9548°N);(c)Jielong section north-south road east transpressional cracks and mole tracks (96.48217°E; 33.21727°N);(d) Jiegu section Bimolong en echelon transensional cracks, 23m width(96.80628°E; 33.08278°N);(e) En echelon transensional cracks at the north bank of the Longbao lake(96.58402°E; 33.19719°N).

测得该观测点的左旋走滑位移约 60 cm,显示出该段地震地表破裂同时兼有左旋走滑分量和逆冲抬升分量.

此外,在结古次级破裂带其他地段及结隆次级破裂带上也可见到压剪切破裂,走向较地震地表破裂带整体走向偏南 5°~15°,破裂呈闭合状态(图 5c).与张剪切破裂一样,孤立的压剪切破裂端部也常出现与其大角度相交的张性破裂,它们也常呈羽

状或雁状斜列,在不连续的岩桥区发育鼓包或拉分陷落坑等次级同震构造变形现象.

3.1.4 张性破裂

张性破裂也是玉树地震地表破裂带的重要组成部分,主要分布在地表破裂带尾端及单条剪切破裂、张剪切破裂和压剪切破裂两端,走向一般为 65°±5°,与地震地表破裂带整体延伸方向大角度相交,一般≥45°.张性破裂常呈张开状或出现一盘块体下降

现象(图 5(d, e)),与剪切破裂之间的差异在于张性破裂呈雁行斜列(图 5d),组成的地表破裂带宽度较剪切、张剪切或压剪切破裂要宽,宽度介于 10~30 m 范围内。

3.1.5 地震鼓包

地震鼓包指的是分布在羽列或雁列状剪切破裂、张剪切破裂或压剪切破裂左行右阶不连续岩桥区不同类型和构造特征的挤压隆起,是走滑型地震地表破裂带上典型而且常见的地震破裂基本类型之一。由于玉树处在高海拔高寒地区,地表至近地表多

发育有冻土层,野外调查发现挤压岩桥区的冻土层在受走滑错动形成的局部挤压应力作用下与下部正常地层脱离,在距地面深约 20 cm 附近出现一滑脱面,形成了许多形态独特的对称状鼓包和不对称状鼓包等两大类(图 6)。根据鼓包形态特征,对称状鼓包可分为尖顶帐篷状鼓包(图 6a)和圆弧状鼓包(图 6b);不对称鼓包包括两翼倾角有陡缓之分的尖顶帐篷状鼓包;一翼缓倾、另一翼陡倾的不对称圆弧状鼓包(图 6c);一翼缓倾、另一翼倒转的斜卧状鼓包(图 6d);以及一翼连续缓倾、另一翼出现逆断层切

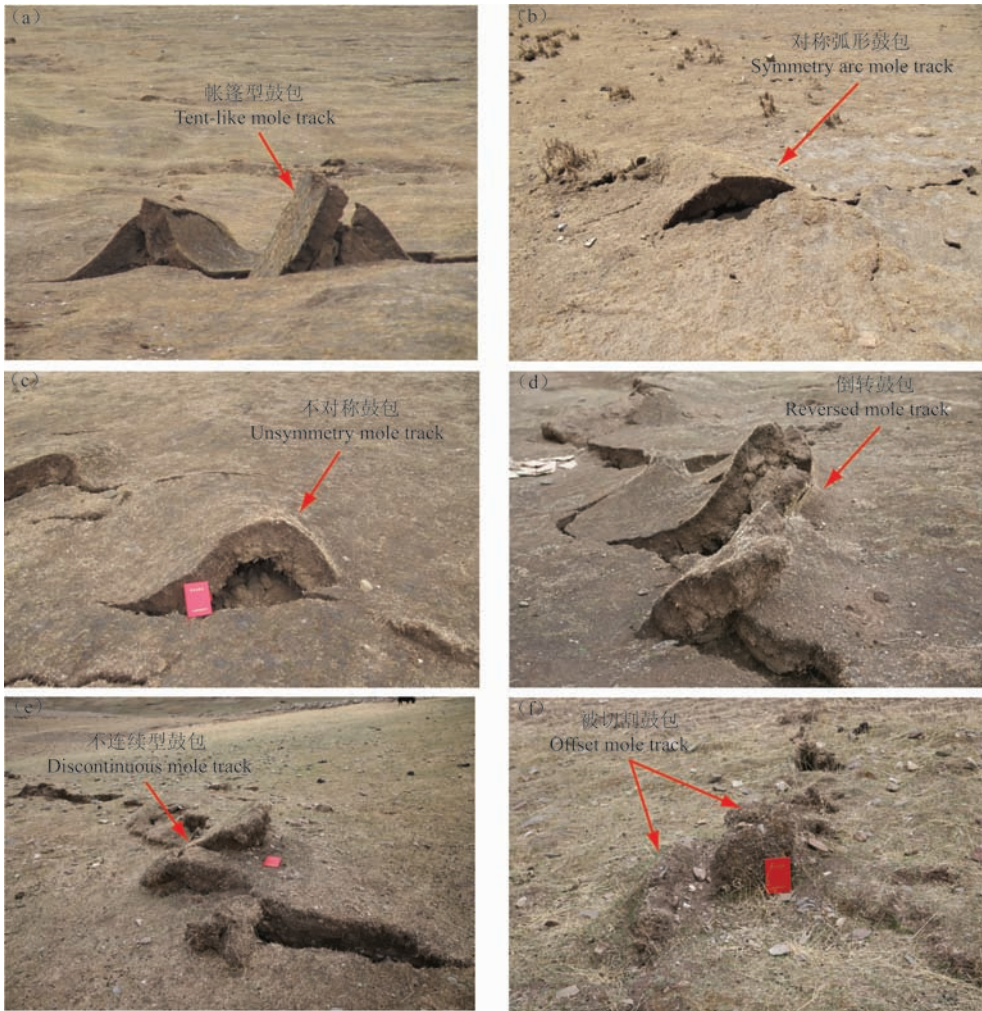


图 6 玉树地震地表破裂鼓包类型

- (a) 结隆次级破裂带南北向公路东多杰然丁家附近帐篷型鼓包(96.4879°E; 33.21106°N);
- (b) 结古次级破裂带纳利库圆弧状鼓包(96.82736°E; 33.07187°N);
- (c) 结隆次级破裂带南北向公路东多杰然丁家附近不对称圆弧状鼓包(96.48814°E; 33.21105°N);
- (d) 结古次级破裂带比莫隆村倒转型鼓包(96.80483°E; 33.08365°N);
- (e) 结古次级破裂带纳利库村附近不连续破裂型鼓包(96.82542°E; 33.07289°N);
- (f) 结古次级破裂带纳利库村附近被剪切破裂切割的鼓包(96.82576°E; 33.0727°N).

Fig. 6 Types of mole tracks for the Yushu earthquake

- (a) Jielong section north-south road east tent-like mole tracks near Duoqieranding's home(96.4879°E; 33.21106°N);
- (b) Jiegu section Naliku arc mole tracks (96.82736°E; 33.07187°N);
- (c) Jielong section north-south road east unsymmetry arc mole tracks near Duoqieranding's home (96.48814°E; 33.21105°N);
- (d) Jiegu section Bimolong reversed mole tracks (96.80483°E; 33.08365°N);
- (e) Jiegu section Naliku discontinuous mole tracks (96.82542°E; 33.07289°N);
- (f) Jiegu section Naliku offset mole tracks (96.82576°E; 33.0727°N).

割的不连续型鼓包(图 6e). 实际上,从对称状鼓包、不对称状鼓包,到斜卧状鼓包类型等反映出雁列或羽列状地震破裂基本单元上同震左旋走滑量逐渐增大及其挤压岩桥区近地表地壳缩短量增大的变化过程,即同震左旋走滑位移小的斜列地表破裂挤压岩桥区近地表地壳缩短量小,鼓包常呈对称状隆起;同震左旋走滑位移大的斜列地表破裂挤压岩桥区近地表地壳缩短量大,鼓包逐渐呈不对称状,甚至倒转成斜卧状;同震期间当变形量超过冻土层的破裂极限时,冻土层挤压缩短则表现为脆性破裂,在鼓包一侧出现逆断层型破裂,形成极端不对称状鼓包隆起. 在同震位移量 1.8 m 的纳利库村观测点附近,还发现存在被张剪切破裂左旋错动约 55 cm、高约 40 cm 的被切割鼓包(图 6f),说明挤压岩桥区鼓包能够调节的局部缩短量是有限的,当两侧走滑位移达到一定量值后,鼓包将被张剪切破裂或剪切破裂切割而破坏.

3.1.6 冰裂缝

由于玉树地震震区地处高原寒冷地区,地震期间隆宝湖及其周边水体处于冻结状态,下伏地震断层同震错动及其引起的近断层强地面运动等形成了一种冻土区特有的破裂形式:冰裂缝. 冰裂缝的展布方式和破裂样式受冰的脆性特征控制. 野外考察可知,隆宝湖南侧结隆次级破裂带向东延伸线附近出现两组走向直角相交(夹角 90°)的共轭冰裂缝. 走向 240° 的冰裂缝除北西盘下降的正断层倾滑分量外,还存在一定的右旋走滑分量;走向 330° 的冰裂缝除西南盘下降的正断层倾滑分量外,还存在一定的左旋走滑分量,且近于直立的破裂面平直光滑(图 7a),两组共轭冰裂缝组合成走向约 $310^\circ \pm 10^\circ$ 的地表冰裂缝带,在运动学性质上反映出冰裂缝带存在朝向湖盆的正断层倾滑运动和左旋走滑运动,结合分布在隆宝湖南侧边界断层上这一事实,可以认为这一冰裂缝带应作为一种特殊的地震地表破裂带. 此外,类似的冰裂缝在隆宝湖西端的沼泽地中也有发育,包括走向 340° 、 260° 、 200° 多组冰裂缝,它们均大角度相交,但在规模上远不如隆宝湖南侧冰裂缝带(图 7b),且呈面状分布,并有喷水冒砂现象存在. 这种冰裂缝在然多村($96^\circ 43' 40.3'' E$, $33^\circ 04' 53.8'' N$)有泉水出露的山坡沼泽地区也有分布,冰裂缝带长约 4 km,呈锯齿状近东西向延伸;其中走向 $80^\circ N \sim 110^\circ E$ 的冰裂缝呈张开状,张开量约 3 cm,北盘下降量约 3 cm,无明显走滑分量;走向 $N-130^\circ E$ 冰裂缝除呈张开状态外,还存在着约 4 cm 左旋位移量;走

向 $N-50^\circ E$ 冰裂缝则存在约 2 cm 右旋走滑位移量;这些冰裂缝组合反映出北盘块体有向沟底方向下滑现象,推测为近断层强地面运动作用下的冰裂现象. 从发育冰裂缝的冻土层或冰层的剖面可知,隆宝湖湖面季节冰层上部覆盖着厚约 10~20 cm 的冻土层,多表现为冻土区特有的冻胀丘地貌,在表层的冻胀丘之下是厚约 20 cm 的冰层,在冰层下是流动的湖水,为典型的表层季节冻土结构,从这个结构可以看出冰裂缝破裂面表现出的平直光滑、产状直立的特征,受冰的性质控制的,且冰裂缝的分布受季节冻土层的控制,在距离湖水越近的区域冰裂缝越发育,在远离湖水的区域冰裂缝不发育,在多数破裂处还可以见到喷砂冒水现象,可见这种冰裂缝破裂是由强烈的近断层强地面运动引起的.

3.2 地表破裂组合特征及其构造意义

3.2.1 地表破裂组合特征与同震位移分布

高分辨率遥感影像解译和野外考察表明,玉树地震地表破裂带是由剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性破裂、鼓包或陷落坑(拉分盆地)等基本破裂单元组合而成,在不同地段有不一样的组合方式:主体部分由左行右阶雁列或羽列剪切破裂、张剪切破裂及其不连续岩桥区出现的各种鼓包组合类型为主(图 4,5(c,d,e)和图 6),偶尔也可见左行左阶雁列或羽列张剪切破裂及其不连续岩桥区出现的陷落坑(拉分盆地)组合类型(图 4(b,e)). 上述地表破裂组合与其它典型的走滑型地震地表破裂带,例如 2001 年青海昆仑山地震^[18-19],1931 年新疆富蕴地震^[20],1976 年危地马拉 Motagua 地震^[21]等非常类似,也与走滑断层实验显示的破裂单元、破裂组合样式和走滑断层的几何结构演化过程一致^[22],表现出玉树地震地表破裂带是一条纯剪切左旋走滑破裂带,叠置在甘孜—玉树断裂玉树段两条左行左阶排列的先存发震断层(结古断层和结隆断层)上(图 2),在存在先存断层陡坎地段这一现象表现得更为明显(图 8),不仅反映出玉树地震是甘孜—玉树断裂玉树段再次突发性左旋错动的结果,而且还表现出玉树地震地表破裂带的明显分段性. 即整体长 ~ 65 km 的玉树地震地表破裂带可划分为结隆次级地表破裂带和结古次级地表破裂带(图 2):两条次级地表破裂带呈左行左阶羽列,整体走向 $295^\circ \pm 5^\circ$,羽列阶区宽约 3.5 km,主要被拉分盆地—隆宝湖占据,其间无地表破裂段长约 17 km,具有各自的地表破裂组合特征和同震位移分布特征.

结隆次级地表破裂带位于隆宝湖西南侧和结隆乡

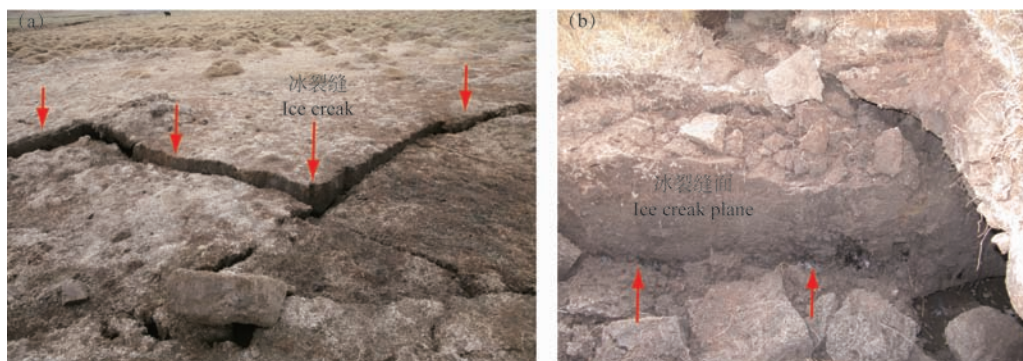


图7 玉树地震产生的冰裂缝特征

(a) 结隆次级破裂带东端隆宝湖南扎西普桑村北近于直角相交的冰裂缝(96.5804°E; 33.16703°N);

(b) 隆宝湖南侧平直光滑的冰裂缝面(96.50809°E, 33.20189°N).

Fig. 7 Ice-crack features produced during the Yushu earthquake

(a) Ice cracks almost vertical crossed located at the south of Longbao lake at the east end of the Jielong section(96.5804°E; 33.16703°N);

(b) Smooth ice crack surface at the south of the Longbao lake (96.50809°E, 33.20189°N).

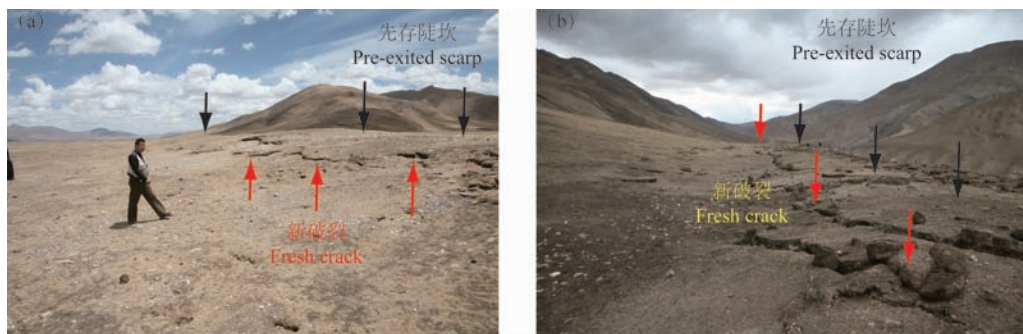


图8 新生地震地表破裂与先存断层陡坎关系图

(a) 结隆次级破裂带南北向公路西侧洪积扇顶部新破裂叠加在先存陡坎之上(96.47529°E; 33.21342°N);

(b) 结古次级破裂带比莫隆村高阶地顶部新破裂叠加在先存陡坎之上(96.80518°E; 33.08343°N).

Fig. 8 Photos showing the Yushu earthquake surface cracks overprinted on the pre-existing fault scarps

(a) Jielong section surface cracks overprinted on the pre-existing fault scarps at the top of the alluvial fan at the west of the north-south road

(96.47529°E; 33.21342°N); (b) Jiegu section surface cracks overprinted on the pre-existing fault scarps at the top of the high terrace at

Bimolong (96.80518°E; 33.08343°N).

南侧,整体走向约 290° ,西端起自结隆乡南登俄涌曲西岸扎西才仁家平房附近(96.43863°E, 33.22611°N),以雁行斜列的 NE 向张性破裂为主(图 9a),近 SEE 向东延伸切割登俄涌曲河谷及其两侧阶地和南山山前发育的二级洪积扇和近南北向土公路,使公路南侧抬升约 0.5 m(图 9b),附近洪积扇面上土公路西横跨地表破裂的单轮车辙同震左旋错动约 13 cm(96.46945°E, 33.21542°N),土公路东草地田埂同震左旋错动约 23 cm(图 5c);在二级阶地或较老一级洪积扇上新地表破裂叠加在先存自由面北倾断层陡坎上(图 8a),表现出隆宝湖盆地南侧山地随着单个地震隆起累积的造山作用;东端止于隆宝湖西南角湖岸曲切恩果多杰然丁家平房附近(96.49043°E, 33.21039°N),由走向约 60° 的张性破裂斜列而成,

且呈发散状,地表可见破裂长度约 5.2 km. 除东西两端雁列的 NE 向张性破裂外,次级地表破裂带主要由羽列或雁列张剪切破裂及其间鼓包或拉分陷落坑等组合而成,在左行右阶斜列区发育鼓包,在左行左阶斜列区发育拉分陷落坑,其中以张剪切破裂与鼓包组合为主,显示出地表破裂带以左旋走滑为主,带有少量倾向北的正断倾滑分量.

根据横跨地表破裂带线性地貌或人文标志的同震左旋错动测量可知,结隆次级地表破裂带同震左旋位移量较小,最大位于南北向土公路东羽列剪切破裂和鼓包组合而成的地表破裂带切割一车辙处,左旋错动量为 0.66 m(图 9c; 96.48670°E, 33.21107°N),其西侧附近(96.48557°E, 33.21121°N)还测量到一条小路被左旋切割了约 49 cm. 以车辙观测点为中

心同震左旋位移量向两侧衰减到 15~20 cm, 最终在两端点逐渐减小到零(图 2b)。

值得指出的是, 在曲切恩果多杰然丁家平房更东, 即上述地表破裂带延伸线上的隆宝湖南缘沼泽地至湖水结冰过渡的冻土地带, 存在整体上走向约 300°线状展布的冰裂缝带(图 7), 在单个观测点可见有两组走向夹角 90°相交的共轭冰裂缝, 它们均北倾或倾向隆宝湖, 以正断层性质为主, 兼有走滑分量, 其中走向 N—130°E 冰裂缝存在左旋走滑位移量; 走向 N—50°E 冰裂缝存在右旋走滑位移量, 反映出冰裂缝带以正断倾滑为主, 兼有北盘向西、南盘向东的左旋走滑运动, 推测应该为下部断层错动作用于上覆冰层和冻土层而出现的特殊地表破裂现象。因此, 结隆次级地表破裂带西起扎西才仁家(96.43863°E, 33.22611°N), 东止于隆宝湖东南侧色那仁杰家附近(96.58069°E, 33.16715°N), 长度约 15 km(图 2), 最大同震左旋位移值 0.66 m, 平均同震左旋位移值 0.28 m。

结古次级地表破裂带西起洛荣达村西(96.75491°E, 33.10842°N), 西端部以数厘米长不连续的左行右阶羽列状张剪切破裂组合为主, 整体呈 295°±5°延伸, 经甘达村南纳利库、策木德列、玛括隆、彭庆隆、布庆给、结古镇南加吉娘村后, 地表破裂带向南偏转并沿巴曲西岸延伸, 斜切巴曲河谷后, 东止于桑卡禅古寺附近(97.04354°E, 32.94768°N), 东端部以羽状排列的 NW 向压剪切破裂为主。结古次级地表破裂带是玉树地震现象最清晰、分布较连续的主体地表破裂带, 长度约 31 km(图 2), 主要由一系列左行右阶羽列状张剪切破裂、少量剪切破裂及其不连续阶区发育的鼓包等基本破裂单元斜列而成(图 5(d、e); 图 6(d、e、f)), 这些地表破裂呈斜列状沿山坡地带先存反向断层谷或先存基岩断层迹线延伸。在结古镇西侧布庆给—加吉娘村山前洪积扇和河谷冲积平原上地表破裂呈不连续状展布(图 2), 地表破裂以羽列状至雁列状张剪切破裂、张性破裂等基本破裂单元为主。此外, 在河谷地带无明显同震位移的地裂缝明显增多, 可能说明河谷地带先存发震断层处于被第四纪冲洪积沉积物覆盖的隐伏状态, 加上该段位移量相对较小, 同震破裂仅部分到达地表, 出现的地表破裂以斜列张性破裂和张剪切破裂为主, 与在小位移条件下隐伏走滑断层破裂扩展特征相似^[22]。但加吉娘村向东到禅古寺约 7 km 长的地表破裂走向向南偏转约 25°, 成为玉树地震破裂带东端部走向约 320°的压剪切地表破裂带, 同时

兼有左旋走滑和垂直逆冲分量(图 5(a、b)), 主要由一系列左行右阶羽列的压剪切破裂及其不连续阶区发育的低矮鼓包等基本破裂单元斜列组合成斜滑型地震地表破裂带, 由于存在挤压逆冲分量, 在禅古寺附近巴曲河东岸出现了类似于 2008 年汶川地震一样的、罕见的逆断层陡坎及其附近上盘垮塌型陡坎^[17、23], 其中切割河流一级宽谷阶地形成的基岩逆断层陡坎高约 70 cm, 显示出该观测点断层倾向 SW, 倾角 85°(图 5b); 由于阶地顶部为第四纪松散沉积物覆盖, 逆断层陡坎向东南延伸到一级阶地面内上盘块体发生垮塌堆积到下降盘上形成上盘垮塌型陡坎, 在切割河谷处出现跌水陡坎现象。

结古次级地表破裂带绝大部分地段主要沿切割基岩山坡的先存断层迹线分布, 野外可见先存断层和叠加在先存断层迹线之上的地震地表破裂带切割横跨的河流阶地等线性地貌和田埂等人文标志, 测量表明结古次级地表破裂带的同震左旋位移量较结隆次级地表破裂带的要大(表 1), 在堪扣至左尔拉两村南山大河沟东侧山坡位置(96.86097°E, 33.0650°N; 或表 1 序号 26)测量到小路、蒙古锈线菊和窄叶鲜卑花丛被左旋切割, 最大同震左旋位移量为 2.4 m±0.2 m, 伴随着 0.6 m 垂直位移(图 10); 在该观测点西侧大河沟内还测量到河岸、阶地等的同震错动, 量值在 1.9~2.1 m(表 1 序号 22、23)。加吉娘村附近可见地表破裂带切割村内排水水渠、房屋墙基等人工线性标志, 测量可知左旋位移量约为 1 m(表 1 序号 31-36), 并伴随有北西盘少量抬升。在南东段斜切河谷地带也测量到 0.6~0.8 m 同震左旋位移量, 反映西南盘抬升的垂直位移量约为 0.5~0.7 m(图 5(a、b))。因此, 结古次级破裂带长度约 31 km(图 2), 最大同震左旋位移值 2.4 m, 也是玉树地震地表破裂带上测量到的最大同震左旋位移值, 平均同震左旋位移值 1.3 m, 东南端存在明显的逆冲垂直分量, 最大垂直位移可达 0.7 m。

考虑到在两个次级地表破裂带之间存在约 17 km 的无破裂段, 玉树地震地表破裂带由结隆和结古两条次级地表破裂带左行右阶羽列而成, 除结古次级地表破裂带东南端由于走向局部偏南约 20°出现斜滑逆断层破裂外, 测量表明同震位移以左旋走滑为主, 沿走向出现 2 个位移峰值, 结隆次级地表破裂带同震左旋走滑位移最大值为 0.66 m, 平均值为 0.28 m; 结古次级破裂带同震左旋走滑位移最大值为 2.4 m, 平均值为 1.3 m(图 2b)。这一同震位移分布样式与 InSAR 推测和地震破裂过程快速反演得出的断层



图 9 结隆次级地表破裂带典型同震断错地貌

(a) 西端部雁列张性裂缝 (96.43863°E, 33.22611°N); (b) 隆宝湖西南向土公路旁张剪切破裂与南高北低断层陡坎 (96.47792°E, 33.21309°N); (c) 结隆次级地表破裂带最大同震左旋位移量 0.66 m (96.4867°E, 33.21107°N).

Fig. 9 Surface rupture features along the Jielong rupture zone

(a) Tension cracks at the west end of the surface rupture (96.43863°E, 33.22611°N); (b) Transtensional cracks and fault scarps near the north-south road at the west of the Longbao lake (96.47792°E, 33.21309°N); (c) Jielong section maximum co-seismic left lateral slip 0.66 m (96.4867°E, 33.21107°N).



图 10 玉树地震地表破裂带最大同震左旋位移断错现象 (地点: 96.86097°E, 33.0650°N)

Fig. 10 Offset mark showing maximum co-seismic left-lateral slip along the Yushu earthquake surface rupture zone (Location: 96.86097°E, 33.0650°N)

表 1 玉树地震地表破裂带实测同震位移量表
Table 1 Measured coseismic displacements of the $M_s 7.1$ Yushu earthquake

序号	纬度(N)	经度(E)	测量标志	左旋位移/m	垂直位移/m	宽度/m
结隆次级破裂带						
1	33°13'05.4"	96°27'32.0"	剪切裂缝	0.17		6
2	33°13'02.3"	96°27'49.5"	剪切裂缝	0.22		
3	33°13'01.7"	96°27'51.5"	剪尾端张开量	0.12	0.002	15
4	33°12'56.7"	96°28'06.0"	摩托车辙	0.13		7
5	33°12'56.4"	96°26'18.7"	张性裂缝拉开量	0.22		
6	33°12'42.7"	96°28'56.2"	小路	0.25		~3
7	33°12'39.7"	96°29'14.0"		0.25		4.2
8	33°12'41.9"	96°29'0.08"	草场中田埂	0.23		~3
9	33°12'40.4"	96°29'07.8"	土路	0.49		~3
10	33°12'39.9"	96°29'12.1"	车辙	0.66		~5
11	33°12'39.6"	96°29'14.9"	车辙	0.22		12
12	33°12'39.4"	96°29'19.1"	小路	0.03		~1
结古次级破裂带						
13	33°06'02.0"	96°46'18.0"	雁列裂缝,草甸位错	0.2		
14	33°05'04.3"	96°48'11.9"	人工垄脊位错	1.1		
15	33°05'04.4"	96°48'12.1"	垮塌围墙	1.4		11
16	33°04'54.6"	96°48'28.7"	山坡上小路	0.75		3
17	33°04'27.6"	96°49'21.2"	冲沟边缘	2.1?		
18	33°04'22.5"	96°49'31.9"	人工堆砌石墙	1.8		
19	33°04'20.1"	96°49'35.2"	田埂	1.4		12
20	33°04'19.1"	96°49'37.2"	铁丝围栏	1.3		
21	33°03'17.4"	96°51'17.0"	公路位错	1.5		
22	33°03'12.5"	96°51'23.7"	阶地错动	1.9		
23	33°03'12.1"	96°51'24.2"	草皮重叠量	1.9		11.3
24	33°03'11.1"	96°51'26.3"	小河沟岸错动	2.1		
25	33°03'09.1"	96°51'28.9"	基岩破裂	1.65		4.2
26	33°03'0.9"	96°51'39.5"	小路、蒙古锈线菊 <i>Spiraea mongolica</i> Maxim、窄叶鲜卑花 <i>Sibiraea angustata</i> (Rehd.) Hand.-Mazz. symb	2.4	0.6?	2
27	33°02'53.0"	96°51'57.6"	草皮	1.75		
28	33°02'54.8"	96°51'53.7"	裂缝两侧错动点	1.7	0.7?	0.5
29	33°02'46.8"	96°52'17.1"	小路	2.0		3
30	33°02'32.3"	96°52'42.5"	草皮缩短	0.98		
31	33°01'42.3"	96°53'55.0"	石砌墙基	1.1		
32	32°59'47.5"	96°58'44.8"	砖墙	1.15	0.2~0.3	
33	32°59'42.0"	96°58'54.9"	水泥排水沟	0.61		
34	32°59'41.2"	96°58'56.4"	水泥排水沟	0.96		10
35	32°59'39.8"	96°59'01.0"	冲沟	1.0		20
36	32°59'36.6"	96°59'08.7"	田埂	0.9		
37	32°59'29.9"	96°59'22.4"	田埂	0.5		
38	32°57'46.7"	97°01'28.5"	田埂	0.4		
39	32°57'19.3"	97°02'01.8"	巴曲西岸漫滩边缘	0.8	0.45	7
40	32°57'21.0"	97°01'58.8"	巴曲东岸阶地		0.70	3
41	32.95273°	97.03592°	禅古寺车辙、田地	0.6	0.55	5

上存在滑动集中区域或两个峰值结果基本一致^[2,22],进一步说明上述两个次级地表破裂带之间确实存在地表未破裂段。

3.2.2 同震破裂构造内涵讨论

玉树地震地表破裂带上述基本特征和同震位移分布等至少反映出玉树地震具有分段破裂过程和羌塘块体向东运动的双重指示意义。

玉树地震地表破裂带是由 NW 向结隆次级破裂带和结古次级破裂带等左行右阶羽列而成,羽列阶区的隆宝湖拉分盆地宽约 3.5 km(图 2),不足以有效地终止地震破裂的扩展^[24,25],但从地震地表破裂带在隆宝湖附近存在长约 17 km 无地表破裂段和相对独立的同震位移分布特征(图 2b)这一事实表明,隆宝湖所在的拉分盆地在一定程度上减缓了地震破裂扩展,具体体现在震源破裂过程反演给出的震中附近第一破裂段的最大滑动速率为 1.1 m/s,而远离震中(结古镇及其以西)第二破裂段最大滑动速率仅为 0.8 m/s(<http://www.cea-igp.ac.cn>),致使拉分盆地附近地震破裂无法到达地表,出现地表破裂不连续现象。因此,无地表破裂段将玉树地震地表破裂带划分为相对独立的结隆次级地表破裂段和结古次级地表破裂段,对应于 2 个次级地震事件。根据走滑断层的矩震级(M_w)与破裂长度经验关系式 $M_w = 5.02 + 1.19 \lg SRL$ 和矩震级(M_w)与最大位移值经验关系式 $M_w = 6.81 + 0.78 \lg MD$ 等可知^[26],玉树地震地表破裂带长约 65 km、最大同震左旋位移约为 2.4 m 等基本参数对应于一个矩震级为 7.1 级地震,与矩张量反演结果相差仅 0.1 量级^[2]。同样,结隆次级地表破裂段对应的次级地震事件矩震级 $M_w = 6.4 \pm 0.2$,结古次级地表破裂段对应的次级地震事件矩震级 $M_w = 6.9 \pm 0.1$ 。鉴于震中附近矩震级 $M_w 6.4$ 次级事件发生在隆宝盆地西南侧甘孜—玉树断裂玉树段结隆断层上,对应的地表破裂以左旋走滑为主,但带有一定正断层倾滑分量,发生在震中附近的 $M_w 6.4$ 次级事件应该为玉树地震的起始破裂事件,宽约 3 km 隆宝湖拉分盆地局部张应力减少了作用在结隆断层上的正应力而有利于玉树地震起始破裂的发生,类似于 2001 年发生在巴颜喀拉地块北边界东昆仑断裂带库塞湖段 $M_w 7.8$ 昆仑山地震,其起始破裂发生在库塞湖段西端太阳湖拉分盆地^[18]。如果这一推断正确的话,玉树地震的起始破裂应该为带有正断倾滑分量的左旋走滑破裂,玉树地震之前 2 h 左右发生的一次 $M_s 4.7$ 级前震^[4]也应该有相似的震源破裂性质。因

此,玉树地震破裂过程在时空上具有分段特性。

另外,玉树地震地表破裂带的带宽度一般均小于 30 m(表 1),显示出与 2001 年昆仑山地震一样的地表破裂局部化特征^[16,18],即地震破裂和滑动变形主要集中在甘孜—玉树断裂上,其南羌塘—川滇块体或北的巴颜喀拉块体等内部同震变形量很小,与同震位移量相比可以忽略不计,但玉树地震地表破裂带表现出的纯剪切左旋走滑性质,加上结古次级地表破裂带走向向南偏转约 25°的南东端出现的逆冲挤压分量,反映出玉树地震期间,羌塘—川滇块体存在着向东运动(图 1)。这一结果与考虑近十年来发生在巴颜喀拉块体和羌塘—川滇块体 NWW 向东昆仑断裂(2001 年昆仑山 $M_w 7.8$ 级地震)、甘孜—玉树断裂(鲜水河断裂系)及其西延玛盖茶卡断裂(1997 年玛尼 $M_w 7.5$ 级地震、2010 年玉树 $M_w 6.9$ 级地震)和块体东端部龙门山推覆构造带(2008 年汶川 $M_w 7.9$ 级地震)上的系列地震震源机制显示出的向东运动结论一致^[27],它们与青藏高原北缘阿尔金断裂和南部嘉黎断裂等一起构成了青藏高原向东滑移的逃逸构造系统(图 1)^[10,13,17,24,28-33]。

4 结 论

综上所述,2010 年 4 月 14 日玉树 $M_s 7.1$ 级地震发生在左旋走滑的甘孜—玉树断裂历史地震破裂空段,即玉树段上,地震地表破裂带西起自隆宝镇南扎西才仁家附近(96.43863°E, 33.22611°N),东止于结古镇南巴曲东岸禅古寺附近(97.04354°E, 32.94768°N),总体走向 300°,长度约 65 km,最大同震左旋位移 2.4 m。地震地表破裂带由剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性破裂、鼓包或陷落坑(拉分盆地)和高原高寒地区特有的冰裂缝等基本破裂单元组合而成,包括由左行右阶雁列至羽列剪切破裂、张剪切破裂及其不连续岩桥区出现的各种鼓包组合、张性破裂雁行斜列组合、左行左阶雁列至羽列张剪切破裂及其不连续岩桥区出现的陷落坑(拉分盆地)组合、羽列状斜列压剪切破裂及其不连续岩桥区出现的各种鼓包或陷落坑(拉分盆地)组合等类型。地震地表破裂基本单元性质、组合类型特征和同震错动运动学特征等反映出,地表破裂带为纯剪切左旋走滑破裂带,并可划分为结隆和结古两条次级地表破裂带,即玉树地震由 2 个次级地震事件组合而成;同时证实青藏高原块体存在着东向滑移现象。

致 谢 本次工作是依托中国地震局玉树地震现场

指挥部的地震应急科考和震后科考完成的,在论文修改过程中,陈桂华副研究员,安艳芬博士给予了大量的帮助,进行了有益的讨论,匿名评审专家也提出了很好的修改意见和建议,在此致以诚挚的谢意!

参考文献(References)

- [1] <http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/qhys7.1/index.html>[2010-09-24].
- [2] 刘超,许力生,陈运泰. 2010年4月14日青海玉树地震快速矩张量解. 地震学报, 2010, 32(3): 366-368.
Liu C, Xu L S, Chen Y T. Quick moment tensor solution for 14 April 2010 Yushu, Qinghai, earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2010, 32(3): 366-368.
- [3] 张勇,许力生,陈运泰. 2010年4月14日青海玉树地震破裂过程快速反演. 地震学报, 2010, 32(3): 361-365.
Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. Fast inversion of rupture process for 14 April 2010 Yushu, Qinghai, earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2010, 32(3): 361-365.
- [4] 倪四道,王伟涛,李丽. 2010年4月14日玉树地震:一个有前震的破坏性地震. 中国科学(D辑):地球科学, 2010, 40(5): 535-537.
Ni S D, Wang W T, Li L. The April 14th, 2010 Yushu earthquake, a devastating earthquake with foreshocks. *Sci. China Earth Sci.*, 2010, 53(6): 791-793.
- [5] 陈立春,王虎,冉勇康等. 玉树 $M_s7.1$ 级地震地表破裂与历史大地震. 科学通报, 2010, 55(13): 1200-1205.
Chen L C, Wang H, Ran Y K, et al. The $M_s7.1$ Yushu earthquake surface ruptures and historical earthquakes. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 2010, 55(13): 1200-1205.
- [6] 张桂芳,屈春燕,单新建等. 2010年青海玉树 $M_s7.1$ 级地震地表破裂带和形变特征分析. 地球物理学报, 2011, 54(1): 121-127.
Zhang G F, Qu C Y, Shan X J, et al. The surface rupture and coseismic deformation characteristics of the $M_s7.1$ earthquake at Qinghai Yushu in 2010. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(1): 121-127.
- [7] 周荣军,马声浩,蔡长星. 甘孜—玉树断裂带的晚第四纪活动特征. 中国地震, 1996, 12(3): 250-260.
Zhou R J, Ma S H, Cai C X, et al. Late Quaternary active features of the Ganzi-Yushu fault zone. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1996, 12(3): 250-260.
- [8] 闻学泽,徐锡伟,郑荣章等. 甘孜—玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂. 中国科学(D辑), 2003, 33(增): 199-208.
Wen X Z, Xu X W, Zheng R Z, et al. The average slip rate and the surface rupture of recent earthquakes Ganzi-Yushu fault zone. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, 33(Suppl. 1): 200-208.
- [9] 徐锡伟,闻学泽,郑荣章等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学(D辑), 2003, 33(增): 151-162.
Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, et al. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(Suppl. 2): 210-226.
- [10] 国家地震局震害防御司. 中国近代地震目录. 北京:科学与技术出版社, 1999: 637.
Division of Earthquake Monitoring and Prediction CEA. The Catalogue of Modern Earthquakes in China (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1999: 637.
- [11] 周荣军,闻学泽,蔡长星等. 甘孜—玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计. 地震地质, 1997, 19(2): 115-124.
Zhou R J, Wen X Z, Cai C X, et al. Recent earthquakes and assessment of seismic tendency on the Ganzi Yushu fault zone. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1997, 19(2): 115-124.
- [12] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 2001, 294(5547): 1671-1677.
- [13] Xu X W, Yeats R S, Yu G H. Five short historical earthquake surface ruptures near the Silk Road, Gansu Province, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(2): 541-561, doi: 10.1785/0120080282.
- [14] Yeats R S, Sieh K, Allen C R. The Geology of Earthquakes. Oxford: Oxford Univ. Press, 1997: 568.
- [15] 徐锡伟,于贵华,马文涛等. 昆仑山地震($M_w7.8$)破裂行为、变形局部化特征及其构造内涵讨论. 中国科学D辑:地球科学, 2008, 38(7): 785-796.
Xu X W, Yu G H, Ma W T, et al. Rupture behavior and deformation localization of the Kunlunshan earthquake ($M_w7.8$) and their tectonic implications. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(10): 1361-1374.
- [16] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Co-seismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, 37(6): 515-518, doi: 10.1130/G25462A.1.
- [17] Xu X W, Yu G H, Klinger Y, et al. Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake ($M_w7.8$), Northern Tibetan Plateau, China. *Journal Geophysical Research*, 2006, 111, B05316, doi: 10.1029/2004JB003488.
- [18] Xu X W, Chen W B, Ma W T, et al. Surface rupture of the Kunlun earthquake ($M_s8.1$), northern Tibetan Plateau, China. *Seismological Research Letters*, 2002, 73(6): 884-892.
- [19] Deng Q D, Wu D N, Zhang P Z, et al. Structure and deformational character of strike-slip fault zones. *Pure and Applied Geophysics*, 1986, 124(1-2): 203-223.
- [20] Plafker G. Tectonic aspects of the Guatemala earthquake of 4 February 1976. *Science*, 1976, 193(4259): 1201-1208.
- [21] Tchalenko J S. Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geol. Soc. America Bull.*, 1970, 81(6): 1625-1640.
- [22] Yu G, Xu X, Klinger Y, et al. Fault-scarp features and

- cascading-rupture model for the M_w 7.9 Wenchuan earthquake, eastern Tibetan plateau, China. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2010, 100(5B): 2590-2614.
- [23] 邵芸, 谢酬, 岳中琦等. 青海玉树地震差分干涉雷达同震形变测量. *遥感学报*, 2010, 14(5): 1029-1037.
Shao Y, Xie C, Yue Z Q, et al. Co-seismic ground deformation of Yushu Earthquake detected with D-InSAR technique. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2010, 14(5): 1029-1037.
- [24] Knuepfer P L K. Implications of the characteristics of end-points of historical surface fault ruptures for the nature of fault segmentation. U. S. G. S. Open-File Report, 1989; 89-135, 193-228.
- [25] Cunningham W D, Mann P. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. *Geological Society*, 2007, 290(1): 1-12, doi: 10.1144/SP290.1.
- [26] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1994, 84(4): 974-1002.
- [27] 刁桂苓, 王晓山, 高国英等. 以震源机制类型划分汶川、玉树地震构造块体归属. *地球物理学报*, 2010, 53(8): 1778-1783.
Diao G L, Wang X S, Gao G Y, et al. Tectonic block attribution of Wenchuan and Yushu earthquakes distinguished by focal mechanism type. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1778-1783.
- [28] Xu X W, Wang F, Zheng R Z, et al. Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh fault and its structural transformation model. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(3): 384-397.
- [29] Fu B H, Awata Y. Displacement and timing of left-lateral faulting in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet, inferred from geologic and geomorphic features. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(2-3): 253-265.
- [30] Zhang Z J, Klemperer S L, Bai Z M, et al. Crustal structure of the Paleozoic Kunlun orogeny from an active-source seismic profile between Moba and Guide in East Tibet, China. *Gondwana Research*, 2011, 19(4): 944-1007, doi: 10.1016/j.gr.2010.09.008.
- [31] Zhang Z J, Wang Y H, Chen Y, et al. Crustal structure across Longmenshan fault belt from passive source seismic profiling. *Geophysical Research Letter*, 2009, 36: L17310.
- [32] Fu B H, Shi P L, Guo H D, et al. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4): 805-824, doi: 10.1016/j.jseas.2010.11.011.
- [33] Zhang Z J, Yuan X H, Chen Y, et al. Seismic signature of the collision between the east Tibetan escape flow and the Sichuan Basin. *Earth and Planetary Science Letter*, 2010, 292(3-4): 254-264.

(本文编辑 胡素芳)