

玉树 $M_s7.1$ 级地震地表破裂与历史大地震

陈立春^①, 王虎^①, 冉永康^{①*}, 孙鑫喆^①, 苏桂武^①, 王继^②, 谭锡斌^①, 李智敏^③, 张晓清^③

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 中国地震灾害防御中心, 北京 100029;

③ 青海省地震局, 西宁 810001

* 联系人, E-mail: ykran@263.net

2010-04-27 收稿, 2010-04-29 接受

国家自然科学基金(批准号: 40872130)、中国地震局地质研究所基本科研业务专项(编号: DF-IGCEA-0607-1-3)和中国地震局地震现场应急工作队资助项目

摘要 野外调查表明, 青海玉树 $M_s7.1$ 级地震较清晰的同震地表破裂带由 3 条主破裂左阶组成, 走向 $310^\circ \sim 320^\circ$, 总长约 31 km, 左旋走滑性质. 另在隆宝镇东侧一带见有长约 2 km 的雁列式张裂缝带, 如以该点为破裂带的北端点, 则破裂带总长约 51 km. 地表破裂带由一系列挤压鼓包与张裂缝相间排列或雁列式裂缝组成, 实测最大水平位错约 1.8 m. 地表破裂带沿甘孜-玉树断裂展布, 显示该断裂是此次地震的发震构造. 甘孜-玉树断裂历史上记载过多次 7 级左右地震, 古地震遗迹明显, 具有短周期的大地震重复特征. 玉树地震的孕育机制与汶川地震一样, 都是青藏高原东扩、地块边界应力积累和释放的结果, 不同的是玉树地震为巴颜喀拉地块与川滇块体向东不均匀挤出产生的左旋走滑型地震.

关键词

玉树 $M_s7.1$ 级地震
地表破裂
历史大地震
甘孜-玉树断裂

2010 年 4 月 14 日 7 点 49 分青海省玉树藏族自治州玉树县发生 $M_s7.1$ 级地震. 地震造成两千二百余人遇难, 结古镇超过 80% 的房屋被毁, 是汶川特大地震之后我国大陆又一次生命、财产遭受巨大损失的地震. 有关该次地震的发震构造背景、地表破裂特征以及发震构造的大地震重复行为, 也成为地震科技工作者和社会所关注的问题. 尽快研究或讨论这些问题, 可对震后重建和确定未来我国大地震重点监视防御区提供十分重要的参考信息. 本文在第一时间现场考察的基础上, 报道玉树地震的同震地表破裂现象, 并结合历史地震记录和古地震遗迹调查的结果, 分析发震构造及其大地震复发特征, 给出一点初步认识.

1 地震构造背景

此次地震的震中位于 33.2°N , 96.6°E , 震源深度 14 km (图 1), 是发生在印度板块向北推挤、青藏地块

隆升、次级的巴颜喀拉活动地块向东挤出^[1]背景下的又一次大地震. 地震发生在 NWW-NW 走向的甘孜-玉树断裂上. 该断裂为左旋走滑性质, 总长约 500 km, 与鲜水河断裂在甘孜附近呈左阶错列, 并和鲜水河断裂共同组成巴颜喀拉地块的南边界(图 1). 20 世纪以来, 巴颜喀拉地块周边已发生 10 余次 7 级以上大地震(图 1). 2008 年 5 月 12 日的汶川地震就发生在作为巴颜喀拉地块东边界的龙门山断裂带上. 而 20 世纪 70 年代的松潘、炉霍地震则分别发生在地块北边界的虎牙断裂和南边界的鲜水河断裂上^[2]. 玉树地震发生后, 陈运泰院士研究小组利用全球部分台站的波形资料反演判定玉树地震发震断裂是 1 条沿着走向 119° 近于直立(倾角 83°)的左旋走滑断层, 地震破裂由震中向东南扩展为主, 长约 60 km (http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c558b00001/content/10_04/17/1271488288058.html). 截止于 2010 年 4 月 21 日的余震沿甘孜-玉树断裂密集分布, 大于

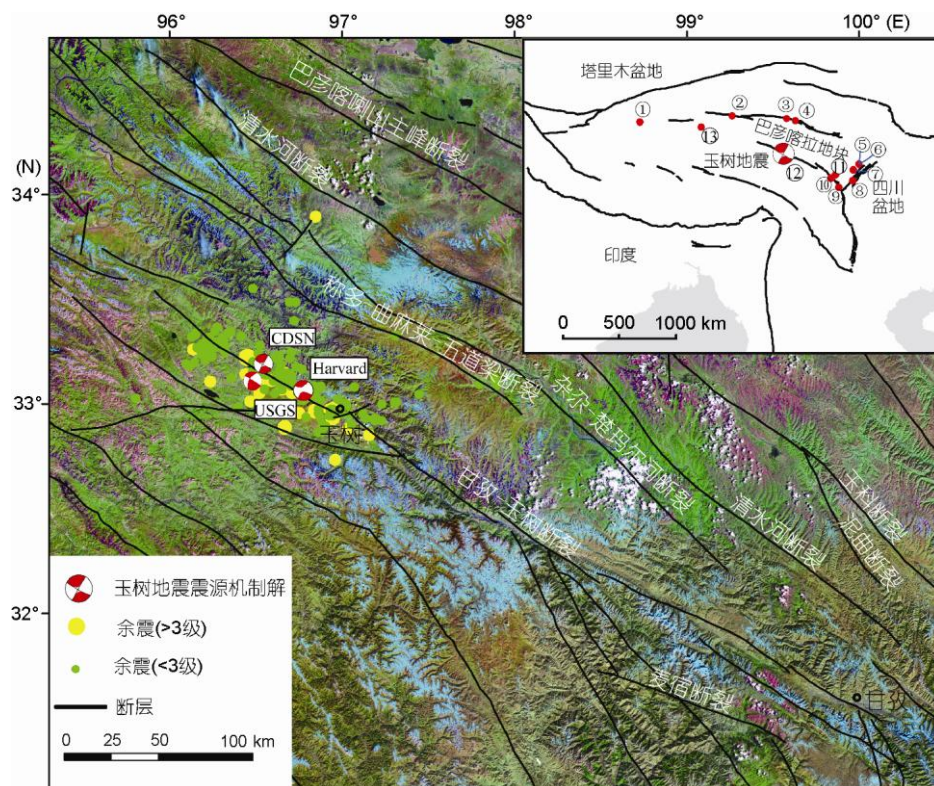


图1 青海玉树地震区域地震构造与震中分布图

黄色为玉树地震余震, 震级范围: 1.1~6.3, 时间: 4月14~22日; 玉树地震震源机制解来自中国地震台网中心(CDSN)(中国地震信息网, 2010), 美国USGS和Harvard(USGS, 2010)。插图红圈为1900年以来7级以上地震震中, 数字依次代表如下大地震: ① 2008年3月, 新疆于田7.3级地震; ② 2001年11月, 东昆仑8.1级地震; ③ 1963年4月, 阿兰湖附近7级地震; ④ 1937年1月, 阿兰湖东7½级地震; ⑤ 1976年8月, 松潘-平武7.2级地震; ⑥ 1976年8月, 松潘-平武7.2级地震; ⑦ 1933年8月, 茂汶-迭溪7½级地震; ⑧ 2008年5月, 汶川8级地震; ⑨ 1955年4月康定-折多塘7½级地震; ⑩ 1923年3月, 炉霍、道孚间7.3级地震; ⑪ 1973年2月, 炉霍附近7.6级地震; ⑫ 2010年4月, 玉树7.1级地震; ⑬ 1997年11月, 西藏玛尼7.9级地震

3级的余震分布长约60 km(图1)。最新野外调查结果表明, 玉树 M_s 7.1级地震的地表破裂出现在该断裂的NW段, 主破裂长约31 km, 加上仪器震中处长约2 km的破裂, 总长达51 km, 是甘孜-玉树断裂再次破裂的结果(图2)。

2 地表破裂的基本特征

此次地震较清晰的地表破裂带由3条主破裂左阶组成, 总体走向 $310^\circ\sim 320^\circ$, 北侧主破裂长约16 km, 中间主破裂长约9 km, 南侧主破裂长约7 km, 总长约31 km(图3), 左旋走滑性质。此外, 在隆宝镇东侧约17 km(微观震中南约500 m)的($33^\circ11'50.0''N$, $96^\circ35'03.4''E$)一带见有走向近EW向、长约2 km的雁列式张裂缝带, 如以该点做为破裂带的北端点, 则破裂带端点之间的直线长度约为51 km。从该点至较

清晰的主破裂带北端点($33^\circ06'02.0''N$, $96^\circ46'18.0''E$)之间, 虽然至今为止并未发现其他较明显的地表破裂, 但沿光缆铺设线路地面破坏非常明显并且连续, 推测为强地面运动造成的结果。3条主破裂中, 北侧主破裂规模最大, 破裂现象最为清晰(图4(a))。地貌上, 沿该段破裂发育山前地震拗槽和山坡坡中槽(图4(c)), 破裂由一系列支破裂雁列组成, 支破裂表现为一系列挤压鼓包与张裂缝相间排列或雁列式裂缝(图4(d)), 穿经河床时, 局部形成规模不大的陷落塘。破裂在地表的产状为 $40^\circ\angle 70^\circ$; 延向大冲沟沟壁基岩中的产状为 $40^\circ\angle 50^\circ$; 北段主破裂的实测水平走滑位移量为1.1~1.8 m, 最大位移量为1.8 m(图4(e))。中段主破裂以玉树结古镇SW侧的牧民新村一带破裂现象最为清晰(图4(b)), 特征与北段主破裂基本一致, 但相对强度要小, 表现在挤压鼓包的高度变

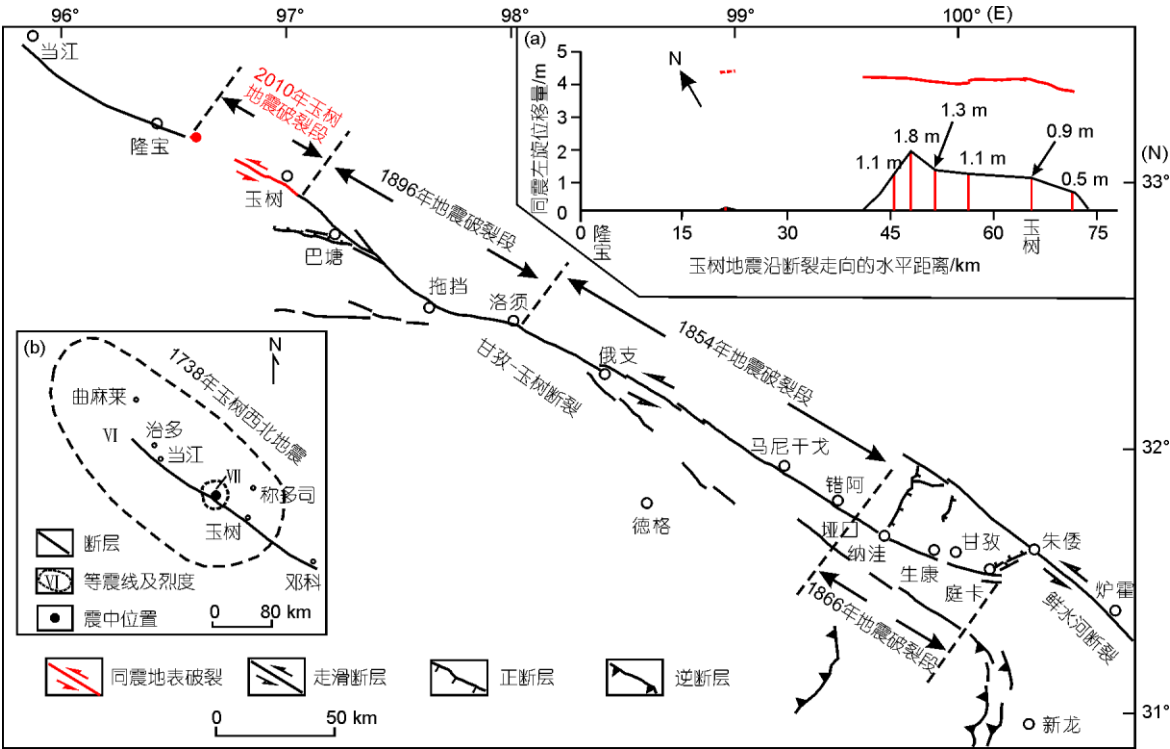


图 2 甘孜-玉树断裂历史地震地表破裂与位错量分布图
历史地震破裂分布据文献[3]

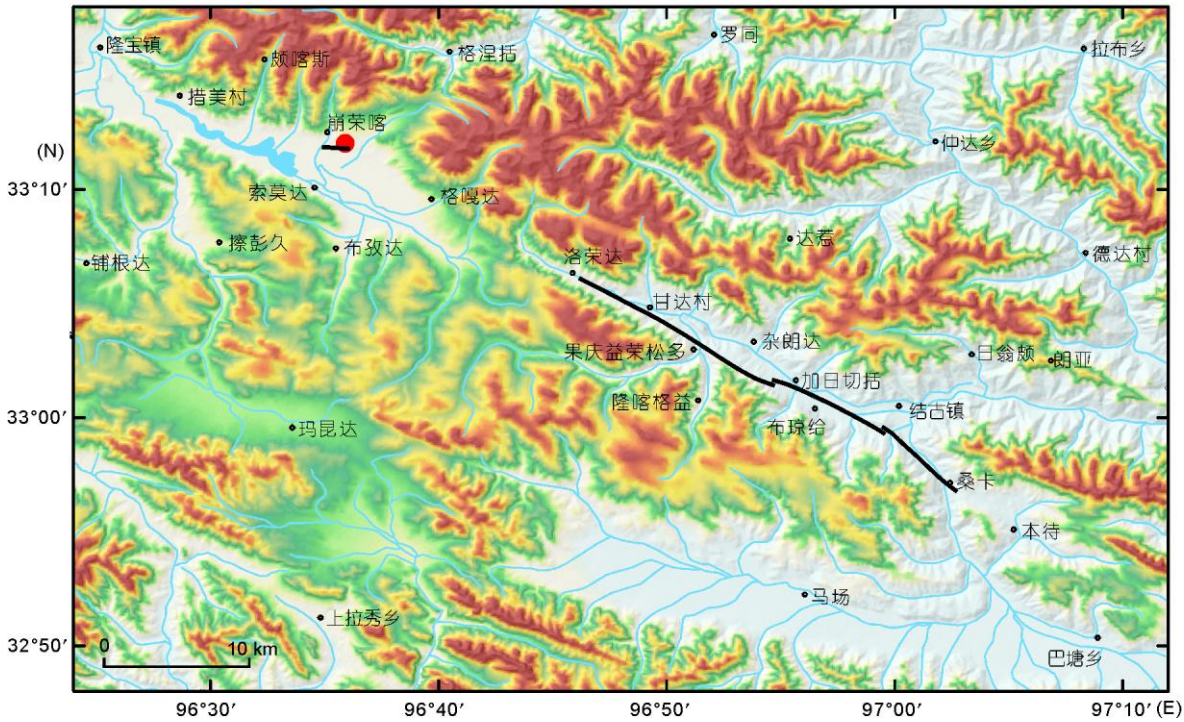


图 3 玉树地震地表破裂分布简图
黑线示意地表破裂, 红圈示意微震震中

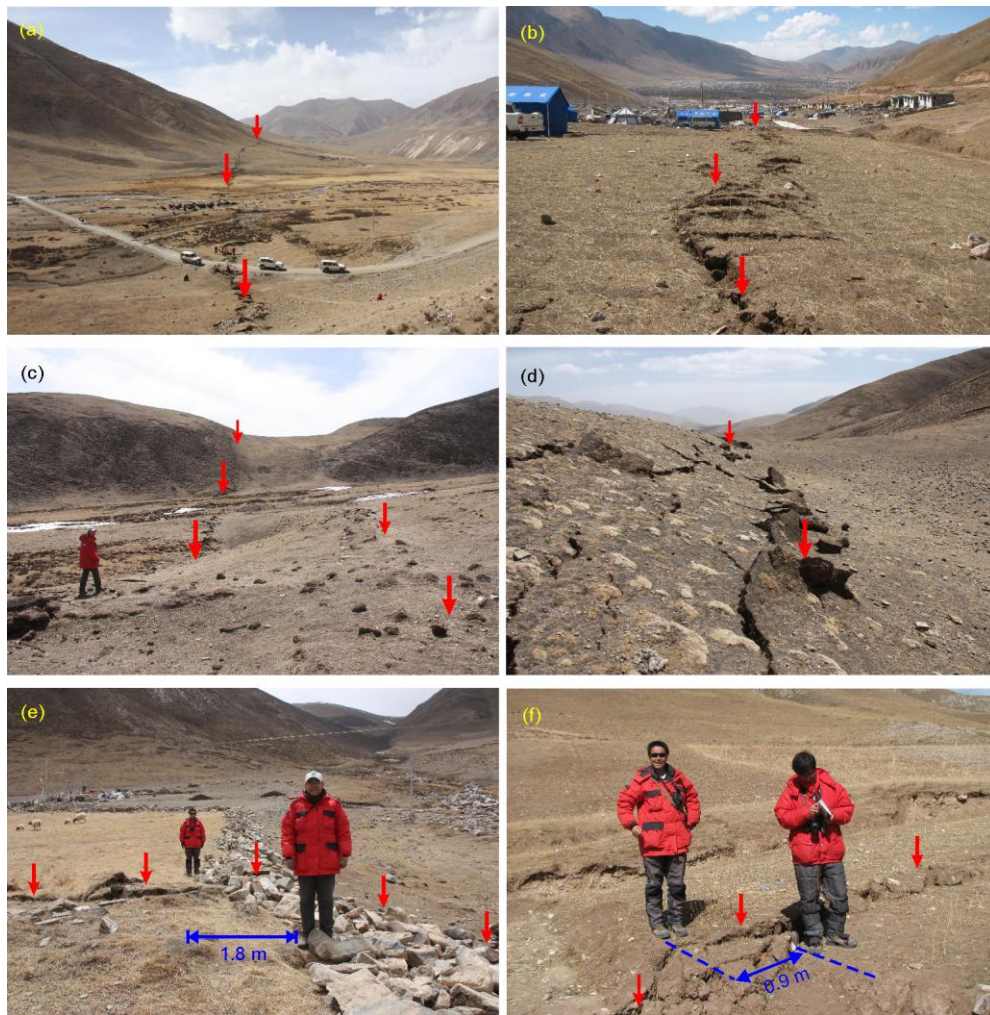


图4 玉树地震地表破裂特征

(a) 北段(33°03'18.6"N, 96°51'15.2"E)一带地表破裂(镜向NW); (b) 中段(32°59'36.6"N, 96°59'08.7"E)一带地表破裂(镜向NW); (c) 北段主破裂地貌(镜向SE); (d) 地震沟槽壁上的此次地震地表破裂(镜向SE); (e) 北段主破裂(33°04'22.5"N, 96°49'31.9"E)处人工石墙左旋同震位错约 1.8 m (此次地震的最大水平位移); (f) 中段主破裂(32°59'36.6"N, 96°59'08.7"E)处田埂边实测左旋位错量 0.9 m

表1 甘孜-玉树断裂大地震平均复发间隔时间

断层分段	同震位移量 /m	地表破裂长度 /km	震级	平均滑动速率 /mm·a ⁻¹	平均复发时间 /a	上次地震发生 年代(公元)	未来发生地震预测 年代(公元)
当江-玉树	2±0.2	31	7.1	7.3±0.6 ^[8,10]	274±30	1738	2012±30
巴塘-洛须	5	70	7.3	11.3±1.8 ^[3]	443±67	1896	2339±67
俄支-垭口	7±2	180	7.7	13.3±1.3 ^[3]	677±61	1854	2531±61
纳洼-庭卡	5~5.3	66	7.3	11.5±1.8 ^[3]	460±62	1866	2326±62

低、裂缝的宽度变窄,这一带实测的最大水平位错量为 0.9 m (图 4(f)). 南段主破裂主要发育于结古镇南、往玉树机场方向的西侧山坡上和禅古寺一带,在山坡两侧,破裂特征与其他两段基本一致,亦表现为雁

列状的挤压鼓包与裂缝,在山坡上,主要表现为强烈发育的各组方向的地裂缝与不太规则的挤压鼓包和山皮叠覆. 在(32°57'19.7"N, 97°02'01.3"E)处实测河岸岸边的水平位错量约 0.5 m.

3 发震构造、区域强震活动历史和地震成因机制的讨论

玉树地震地表破裂 3 条主破裂与甘孜-玉树断裂晚第四纪以来的破裂遗迹完全吻合,同时余震分布和震源破裂过程模拟结果也显示同样的结果,说明甘孜-玉树断裂是此次玉树 $M_s 7.1$ 级地震的发震构造。

甘孜-玉树断裂上历史文字记载的破坏性地震很不完整。最近 200 余年中正式记载的强震共 3 次: 1738 年 12 月 23 日青海玉树及其西北 $6\frac{1}{2}$ 级地震(周荣军等人^[4]根据野外破裂带考察结果认为震级为 $7\frac{1}{2}$)、1896 年 3 月四川石渠县洛须-青海玉树间 7 级地震^[5]、1979 年 3 月 29 日青海玉树南东 6.2 级地震^[6], 均发生在断裂的洛须以北。最近 20 余年来的历史地震和地震地质调查工作陆续发现了洛须以南最近约 200 年期间的大地震线索、地表破裂与位错的遗迹和证据^[3,4,7-10]。即在藏历木虎年(1854 年)和火虎年(1866 年), 甘孜-玉树断裂洛须-错阿和错阿-甘孜分别发生了 2 次大地震。洛须-错阿段地震其矩震级为 7.7, 破裂自洛须附近, 向 SE 至垭口附近, 全长约 180 km。而第二次地震很可能于 1866 年发生在断裂的错阿-甘孜段上, 矩震级为 7.3 左右, 破裂长度由垭口至庭卡之间, 长约 65 km (图 2)。上述说明沿甘孜-玉树断裂强震活动十分频繁。尤其 1738 年 12 月 23 日青海玉树地震等震线图显示的震中位置^[11]与 2010 年 4 月 14 日的地震的发震段落吻合(图 2), 意味着大地震已实现原地复发。

对断裂带的晚第四纪活动特征与长期变形速率, 部分学者曾做过一些较详细的工作^[3,7-10]。综合这些资料, 玉树以西, 断裂全新世以来的左旋位移速率在 7.3 mm/a ^[8,10], 玉树以东, 可达 12 mm/a ^[3]。如果结合已知历史地震同震位移量分析断裂带各段的大地震复发时间, 发现它们在 274~677 年之间, 大地震的复发间隔时间较短(表 1)。需要指出的是, 在通过平均位移速率和最大同震位移量估算的大地震重现时间存在位移速率和最大同震位移不确定性的传递问题,

以及其他不确定因素的影响。但如果认为公元 1738 年地震发生在玉树段, 震级在 7 级左右, 那么实际复发时间与预测复发时间吻合得较好。

在汶川地震之后不到 2 年的时间内, 沿甘孜-玉树断裂再次发生强烈地震说明巴颜喀拉地块是青藏高原最活跃的地块之一。20 世纪以来, 沿该地块边界已发生过 10 余次 7 级以上大地震, 特别是近 10 年来我国两次 8 级以上地震(2008 年汶川 $M_s 8$ 和 2001 年东昆仑 $M_s 8.1$ 级地震)都是发生在该地块的边界断裂上。最新的 GPS 观测资料^[12,13]显示: 青藏高原内部次级块体巴颜喀拉地块、羌塘地块和川滇地块向 SE-S 挤出, 由西向东, 运动速度加快, 而巴颜喀拉地块则由于受到东侧四川盆地的阻挡, 其南边界向东的运动速度较川滇地块北边界向东的运动速率小。因此, 汶川地震是巴颜喀拉地块向东运动受到强硬四川盆地阻挡产生的褶皱-逆断型地震^[14,15], 玉树地震是巴颜喀拉地块与川滇块体向东不均匀挤出产生的左旋走滑型地震, 它们都是青藏高原东扩、地块边界应力积累和释放的结果。

4 初步认识

(1) 地震地表破裂带总体走向为 $310^\circ\sim 320^\circ$, 较连续的主破裂长约 31 km, 加上仪器震中处长约 2 km 的雁列状裂缝带, 总长约 51 km。主破裂由一系列支破裂斜列组成, 支破裂表现为一系列挤压鼓包与张裂缝相间排列或雁列式裂缝, 实测最大水平位错约 1.8 m, 位于北段主破裂上。

(2) 玉树地震地表破裂、余震分布和震源破裂过程模拟结果都沿甘孜-玉树断裂发育, 说明该断裂带是本次玉树断裂的发震构造。

(3) 以往历史地震资料和玉树地震发震段落原地复发的说明甘孜-玉树断裂带上地震具有短周期的原地重复特征。玉树地震的孕育机制与汶川地震一样, 都是青藏高原东扩、地块边界应力积累和释放的结果, 不同的是玉树地震为巴颜喀拉地块与川滇块体向东不均匀挤出产生的左旋走滑型地震。

致谢 此次地震地表破裂调查是在中国地震局地震现场应急工作队前线指挥部组织和领导下开展的。非常感谢青海省地震局、玉树州地震局、玉树地震台以及其他兄弟单位相关领导和同事的指导和协助。工作过程中, 得到了中国地震局地质研究所张培震、欧阳颢、江钊、徐锡伟、尹功明、陈彪等所领导的随时关注和指导, 特此致以深深的谢意。感谢图书资料室、财务、后勤等提供的工作条件保障。感谢张培震研究员和徐锡伟研究员对论文的指导和帮助。谨以此文悼念在地震中不幸离去的同胞们!

参考文献

- 1 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 12—20
- 2 徐锡伟, 张培震, 闻学泽. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. 地震地质, 2005, 27: 446—461
- 3 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: 地球科学, 2003, 33(增刊): 199—208
- 4 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: 115—124
- 5 四川地震资料汇编编辑组. 四川地震资料汇编(第一卷). 成都: 四川人民出版社, 1980. 1—576
- 6 中国地震局监测预报司预报管理处. 中国强地震目录(公元前 23 世纪—公元 1999 年). 1999
- 7 闻学泽, 黄圣陆, 江在雄. 甘孜-玉树断裂带的新构造特征及地震危险性估计. 地震地质, 1985, 7: 23—32
- 8 周荣军, 马声浩, 蔡长星, 等. 甘孜-玉树断裂带的晚第四纪活动特征. 中国地震, 1996, 12: 250—260
- 9 彭华, 马秀敏, 白嘉启, 等. 甘孜玉树断裂带第四纪活动特征. 地质力学学报, 2006, 12: 295—304
- 10 李闽峰, 邢成起, 蔡长星, 等. 玉树断裂活动性研究. 地震地质, 1995, 17: 218—224
- 11 国家地震局地球物理研究所. 中国历史地震图集(清时期). 北京: 中国地图出版社, 1990. 24
- 12 Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, 32: 809—812
- 13 Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J Geophys Res*, 2007, 112: B08416
- 14 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 2008, 51: 1066—1073
- 15 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, 30: 597—629