

2010 年青海玉树地震及震后青藏高原 强震趋势分析^{*}

钱晓东, 秦嘉政

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 2010 年 4 月 14 日青海玉树发生 7.1 级地震, 这是该区历史上发生的最为强烈的地震。该地震属走滑型, 地处青藏高原巴颜喀拉地块南边界, 发震断裂为甘孜—玉树—风火山左旋走滑断裂, 地震破裂主要向震中东南方向。该地震是巴颜喀拉地块与羌塘地块以不同速率向东运动, 地块间的差异运动使其边界应力积累到一定程度引发破裂的结果。根据地震定标律估算的主震断层破裂参数和应力参数为: 地震矩 $M_0 = 1.78 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ 矩震级 $M_w = 6.8$ 断层破裂面积 $S = 468 \text{ km}^2$ 断层错距 $D = 1.4 \text{ m}$ 断层破裂长度 $L = 37 \text{ km}$ 断层破裂宽度 $W = 12.6 \text{ km}$ 剪应力 $\tau_0 = 16.8 \text{ MPa}$ 应力降 $\Delta\sigma = 7.03 \text{ MPa}$ 历史地震分析表明, 玉树 7.1 级地震是在世界 8 级以上地震、中国西部大三角 7.8 级以上地震、南北地震带 7 级以上地震和巴颜喀拉块体 7 级以上地震处于强烈活动背景下发生的。玉树地震后, 青藏高原巴颜喀拉地块、羌塘地块及川滇菱形块体未来发生 7 级以上地震的危险性较大。

关键词: 玉树地震; 震源机制; 青藏高原; 活动地块; 强震活动

中图分类号: P315.72⁺7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)04-0255-10

0 前言

2010 年 4 月 14 日, 青海省玉树县发生 $M_s 7.1$ 地震。这是该区历史上发生的最为强烈的地震, 1900 年以来玉树地区距离震中 250 km 范围没有发生过 7.0 级以上地震。玉树 $M_s 7.1$ 地震发生于青藏高原巴颜喀拉地块南边界, 该地块是青藏高原较为重要的地块, 也是强震、大震经常发生的地区。近年来该地块边界附近强震活动频繁, 短时间内多次发生 7 级以上强烈地震。同时, 在该地块东南部, 沿金沙江断裂向南即为川滇菱形块体, 该块体受力复杂, 历来是强震多发地带, 由于横跨川、滇, 紧邻西藏, 该块体内发生的强烈地震的影响面较为广泛, 而玉树 7.1 级地震的发生, 是否会对菱形块体强震活动造成影响, 尤其是大震背景强烈的菱形块体南部、已经长达 14 年未发生 7 级以上地震的云南地区。本文详细分析了玉树地震的发震机理、地震地质、地震序列和强震活动

等基本特征, 进而讨论了玉树地震后青藏高原及周边地区强震形势, 以期向广大地震科技工作者提供基础资料。

1 玉树 7.1 级地震基本特征分析

1.1 地震地质背景

图 1 给出了玉树及周边地区地震地质构造和公元 128 年以来 5 级以上地震的空间分布。从图中可以看到, 玉树 7.1 地震发生于甘孜—玉树—风火山断裂上。玉树地区发育有一系列近 SEE 走向的平行断裂, 甘孜—玉树—风火山断裂是一条走向约南偏东 70° 的走滑断裂, 断层倾角较陡, 为晚更新世—全新世、距今约 10~20 万年的活动断裂。断裂在玉树附近分为二支, 南部一支称为玉树南—风火山南麓断裂, 北部一支从玉树一直延伸到青海治多附近。该段断裂在第四纪活动过, 但晚更新世以来活动情况不是很清楚, 故在图中用蓝色表示。甘孜—玉树—风火山断裂为左旋走滑断层,

* 收稿日期: 2010-05-28

基金项目: 云南省重点项目“云南强震活动与板缘动力学机制研究”(JCYB-20080601-4)和“地球物理场和化学场动态变化与强震活动关系研究”(JCYB-20080601-5)联合资助。

其东南部与鲜水河断裂在甘孜附近相连，并与鲜水河断裂一起组成巴颜喀拉地块的南边界。甘孜—玉树—风火山断裂在四川石渠县洛须附近（图 1 中 1897 年洛须 7.0 级地震震中附近）向南即为金沙江断裂，它是川滇菱形块体的西边界。

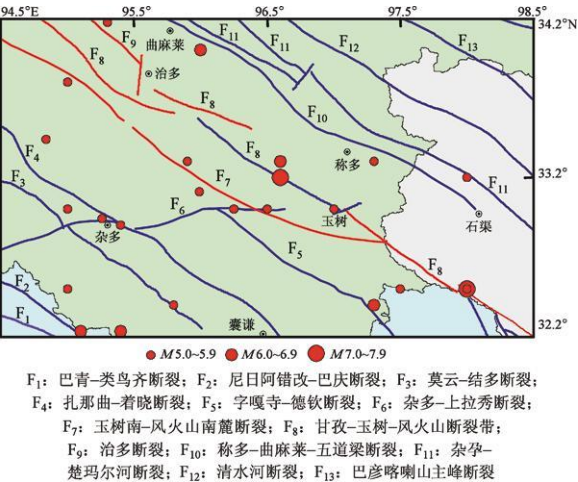


图 1 玉树地区附近历史强震和地质构造
Fig 1 Historical strong earthquakes and geological structure near Yushu area

玉树 7.1 级地震震中附近自公元 128 年以来共发生 24 次 5 级以上地震，其中 17 次 5.0~5.9 级地震，5 次 6.0~6.9 级地震，2 次 7.0~7.9 级地震。5.0~5.9 级地震中，与此次玉树地震距离最近的是 2006 年 7 月 18 日玉树 5.0 级地震，相距 24 km。5 级地震大多发生于 EW 向的杂多—上拉秀断裂附近，占 5 级地震总数的 30%。6.0~6.9 级地震中，与玉树地震距离最近的是 1738 年 12 月 23 日玉树西北 6.5 级地震，相距仅 10 km。其它 4 次分别是 1915 年 5 月 5 日青海治多 6.5 级地震、1971 年 4 月 3 日青海杂多 6.3、6.5 级地震和 1979 年 3 月 29 日青海玉树 6.2 级地震。该区仅发生了 1 次 7 级以上地震，为 1896 年 3 月 1 日四川洛须 7.0 级地震，与此次玉树地震相距约 150 km。

1.2 震源机制

青海玉树 7.1 级地震发生后，中国地震台网中心（CENC）、中国地震局地球物理研究所陈运泰院士研究小组（CYT）和美国地质调查局（USGS）于第一时间在各自网站上发布了相关信息和研究成果。表 1 给出了玉树地震主震和最大余震的基本参数。

从表中可看出，不同机构给出的地震三要素整体上十分接近，主震发震时间相差 1 s，震中纬度最大相差 0.11°，经度最大相差 0.1°，矩震级 M_w 相差仅 0.1 级，主震震源深度在 10~16 km 之间。

表 2 给出了主震和最大余震的震源机制解。为便于比较，对 $M_57.1$ 主震分别给出 CYT 和 USGS 两个研究机构的结果。根据表 2，笔者统一绘制了震源机制参数乌尔夫网投影图（图 2）。从图 2、表 2 看到，不同机构得到的震源机制解结果一致性较好。从 USGS 结果（图 2b）来看，P 轴仰角为 1°，T 轴仰角为 4°，B 轴仰角为 85°；可知水平分量断层面错动所受之力远远大于垂直分量，表明断层在水平力作用下产生错动；两个节面倾角分别为 88°、86°，表明断层产状近似直立，结合震区断层走向及余震震中分布方向，可以推断节面 I 走向 298°、倾角 88° 为发震断层。综合分析认为，玉树 $M_57.1$ 地震发震断层为一条东偏南走向、直立左旋走滑断层。从最大余震 $M_w6.0$ 地震的震源机制来看，P 轴和 T 轴仰角分别为 10° 和 22°，比主震仰角略大，仍属于断层受力以水平方向为主的类型，节面 I 走向 298°，与主震相同，该次余震也为走滑型。陈运泰研究小组根据矩张量反演（中国地震局地球物理研究所，2010）得到的主震破裂过程表明，断层面上主要有两块滑动区域，第一块位于震中附近，最大滑动量约为 2.0 m，最大滑动速率约为 0.9 m/s；第二块位于震中东南 10~30 km，最大滑动量、滑动速率与第一块区域相同。地震破裂持续 23 s，由两次破裂组成，第一次破裂发生于 0~5.5 s，第二次破裂发生于 5.5~23 s，第二次破裂规模远大于第一次。

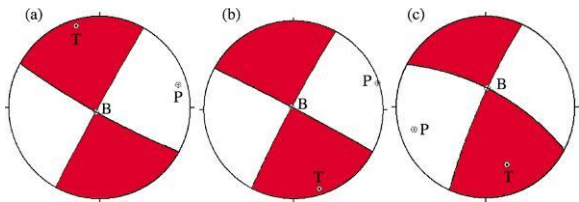


图 2 主震和最大余震震源机制解
(a) 主震 $M_w7.0$ (编号 2); (b) 主震 $M_w6.7$ (编号 3);
(c) 最大余震 $M_w6.0$ (编号 5)

Fig 2 Main shock and largest aftershock focal mechanism solution

表 1 地震基本参数
Tab 1 Basic earthquake parameters

地震 编号	发震日期 年-月-日	发震时刻 时:分:秒	震中位置 / (°)		震级	深度 /km	地名	来源
			φ_N	λ_E				
1	2010-04-14	07: 49 37	33. 20	96. 60	M_S 7. 1	11	青海玉树	CENC
2	2010-04-14	07: 49 37	33. 27	96. 63	M_W 7. 0	10	青海玉树	CYT
3	2010-04-14	07: 49 38	33. 16	96. 53	M_W 6. 9	16	青海玉树	USGS
4	2010-04-14	09: 25 18	33. 20	96. 50	M_S 6. 3	20	青海玉树	NECE
5	2010-04-14	09: 25 18	33. 20	96. 54	M_W 6. 0	17	青海玉树	USGS

注：地震编号 1、2、3为主震，4、5为最大强余震。

表 2 震源机制解
Tab 2 Focal mechanism solution

地震 编号	节面 I			节面 II			P轴		T轴		B轴		来源
	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	方位 /(°)	仰角 /(°)	方位 /(°)	仰角 /(°)	方位 /(°)	仰角 /(°)	
2	119	83	-2	209	88	-173	74	6	344	4	222	83	CYT
3	298	88	4	208	86	178	72	1	162	4	324	85	USGS
5	298	68	9	204	82	157	253	10	159	22	5	66	USGS

注：编号对应的地震参见表 1。

从上述分析可以得知，玉树 7.1 级地震主要向震中东南方向破裂扩展，由于玉树县城正好位于震中东南方向，第二次规模较大的破裂又一次达到玉树县附近，势必对玉树造成较大人员伤亡和财产损失。

1.3 震源参数和应力参数

一次强震发生后，由一个震级值就可估算出一系列相关的震源参数值，这在大震发生期间，快速分析地震破裂过程的某些基本特征和震情趋势判定是非常有用的。秦嘉政等（2005）根据地震标定律关系给出如下快速测定震源参数的关系式：

（1）地震矩与面波震级的标定关系

$$\lg M_0 = \begin{cases} 1.0M_s + 18.6 & M_s \leq 5.6; \\ 1.5M_s + 15.6 & 5.6 < M_s \leq 7.8; \\ 3.0M_s + 3.9 & 7.8 < M_s \leq 8.5; \\ M_{s_{\max}} \approx 8.5. \end{cases} \quad (1)$$

（2）断层长度与面波震级的标定关系

$$\lg L = \begin{cases} \frac{1}{3}M_s - 1.02 & M_s \leq 5.6 \\ \frac{1}{2}M_s - 1.98 & 5.6 < M_s \leq 7.8 \\ 1.0M_s - 5.9 & M_s > 7.8. \end{cases} \quad (2)$$

其中 L 的单位为 km。
（3）面波震级与破裂面积的标定关系

$$\lg S = \begin{cases} \frac{2}{3}M_s - 2.60 & M_s \leq 5.6 \\ 1.0M_s - 4.43 & 5.6 < M_s \leq 7.8 \\ 2.0M_s - 12.2 & M_s > 7.8. \end{cases} \quad (3)$$

其中 S 的单位为 km²。
（4）面波震级与位错的标定关系

$$\lg D = \begin{cases} \frac{1}{3}M_s - 0.42 & M_s \leq 5.6 \\ \frac{1}{2}M_s - 1.40 & 5.6 < M_s \leq 7.8 \\ 1.0M_s - 5.30 & M_s > 7.8. \end{cases} \quad (4)$$

其中 D 的单位为 m。
地震应力降

$$\Delta\sigma = \frac{4M_0}{S^{3/2}}. \quad (5)$$

震源环境剪应力 τ_0 值（陈培善等，1994）：

$$\lg \tau_0 = 0.15 M_W + 0.16. \quad (6)$$

式中矩震级 M_W 由下式决定

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7. \tag{6}$$

根据上述关系，我们得到此次玉树 $M_s7.1$ 地震的震源参数：地震矩 $M_0 = 1.78 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ ，矩震级 $M_w = 6.8$ ，断层破裂面积 $S = 468 \text{ km}^2$ ，断层错距 $D = 1.4 \text{ m}$ ，断层破裂长度 $L = 37 \text{ km}$ ，断层破裂宽度 $W = 12.6 \text{ km}$ 。美国地质调查局得到的矩震级 $M_w = 6.9$ ，地震矩 $M_0 = 2.50 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ ，陈运泰研究小组得到的矩震级 $M_w = 6.9$ ，地震矩 $M_0 = 2.98 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。他们得到的成果与本文快速测定结果较为接近。此外，据《玉树 7.1 级地震断层地表破裂带和地质灾害调查报告》（中国地震局，2010），中国地震局地震现场应急工作队于 2010 年 4 月 15~22 日先后派出 3 个科考小组对玉树 7.1 级地震地表断层进行了考察，结果表明，此次地震的同震地表破裂带由 3 条主破裂组成，总体走向 310° ，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。破裂为左旋走滑性质，最大走滑位移量发生于北侧主破裂上，约 1.8 m。由此可知现场宏观考察与本文研究结果是一致的。

根据（5）式，我们估算了主震 $M_s7.1$ 、前震 $M_s4.6$ 和最大余震 $M_s6.3$ 的环境剪应力 τ_0 值，前震为 7.1 MPa，主震为 16.8 MPa，最大余震为 12.7 MPa。主震前后震源处环境剪应力 τ_0 值较高，约在 7~17 MPa 之间，平均为 12.2 MPa。根据（4）式可得到主震应力降 $\Delta\sigma = 7.03 \text{ MPa}$ 。

1.4 地震序列

根据中国地震台网中心（2010）发布的地震目录资料，笔者得到了玉树 $M_s7.1$ 地震序列目录。玉树地震序列截止到 2010 年 4 月 23 日共发生 1 级以上地震 255 次，其中，1.0~1.9 级地震 153 次，2.0~2.9 级地震 72 次，3.0~3.9 级地震 21 次，4.0~4.9 级地震 7 次，6.0~6.9 级地震 1 次，7.0~7.9 级地震 1 次。主震发生前约 2 小时发生过 1 次 4.6 级前震，前震距离主震较近（主震以南 11 km）。图 3 给出玉树地震序列震中分布图。从余震分布形状来看，余震大体呈以甘孜—玉树—风火山断裂为长轴的椭圆分布，测量震后 3 天的余震分布参数可知（大于 3 天余震会向四周扩散），长轴约为 110 km，短轴约为 60 km。长、短轴比川滇同等震级的余震分布范围要大，例如 1996 年 2 月云南丽江 7.0 级地震余震序列分布椭圆的长、短轴分

别为 70 km 和 45 km。1976 年 8 月四川松潘、平武 2 次 7.2 级地震余震序列分布椭圆的长、短轴分别为 90 km 和 50 km。可见这次玉树地震影响范围广，危害大。从图中还可看出，6.3 级最大余震与主震的距离为 9 km，震源深度比主震深。从图中可以看到，4 级以上较大余震沿甘孜—玉树—风火山断裂向东南方向分布。图 4 给出玉树地震序列 $M-t$ 图，图中横坐标为以主震发震时刻为零计算的时间（单位为天），虚线表示震级为 4 级时的参考线。从图中看到，6.3 级最大余震在主震后约 2 小时发生，所有 4 级以上较大余震发生于主震后 2 天以内，绝大多数在 1 天内。用累计频度计算地震序列 b 值（钱晓东，秦嘉政，2008），可得 $b = 0.47$ ， b 值截距为 6.2，与已发生的最大余震的截距较为接近。

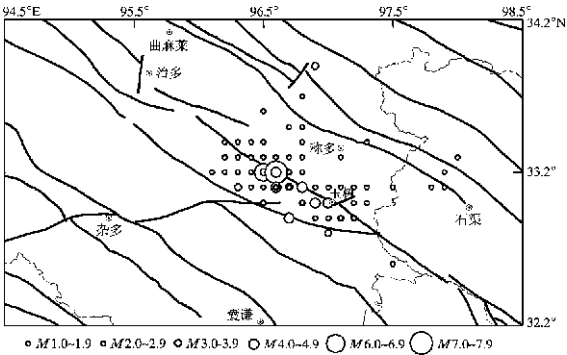


图 3 2010 年 4 月 14~23 日玉树 $M_s7.1$ 地震序列震中分布图
Fig 3 Epicenter distribution map of the $M_s7.1$ Yushu earthquake sequence (2010.4.14~2010.4.23)

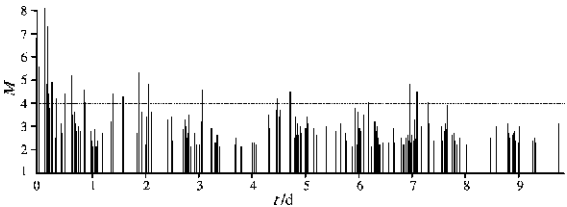


图 4 玉树 $M_s7.1$ 地震序列 $M-t$ 图
Fig 4 $M-t$ diagram of the $M_s7.1$ Yushu earthquake sequence

1.5 地震烈度

根据美国地质调查局（2010）公布的玉树地震仪器观测烈度估计值资料，我们绘制了玉树地震烈度估计图（图 5）。烈度反映的是地震时地面运动的强弱程度，不同地点，震级可能相同，但

烈度值往往不一样。从图中看到，地震发生时，地震能量沿地表均匀扩散。由于主震是一个单侧破裂，得到的断层位移也表明，断层面上滑动区域为东南方向，集中在主震附近及其东南方向，因此沿东南方向（发震断层）的扩散程度要远远大于其北东方向。玉树地震震中附近烈度等震线呈椭圆状分布较为明显。极震区烈度估测达Ⅷ度以上，表现为地震摇动非常强烈，机动车驾驶员能明显感受到地震影响，烟囱、纪念碑、宝塔等扭曲或倒塌，石屋倒塌、地面开裂、峭壁倾斜。玉树县城的烈度达Ⅷ度（图 5），表现为地面强烈摇动，站立困难，机动车驾驶员有察觉，悬挂物颤抖、家具毁坏、砖块松动。由此可见，地震对玉树及周边损害严重。玉树地处青藏高原，地区经济发展水平低，许多房屋抗震能力低（尤其是抗 7 级以上大震），再加上地震的震源深度浅（11 km），而且地震发生在当地清晨时间，多数人还在睡觉，综合各种因素，地震势必造成大量房屋倒塌和严重人员伤亡。从图中还可以看出，尽管称多县与震中的直线距离和玉树相近，但由于称多县城所处方位与烈度等震线椭圆长轴存在约 45°的角度，而玉树县城这一角度接近于零，且地震破裂指向玉树，故称多县所遭受的损失比玉树要小。

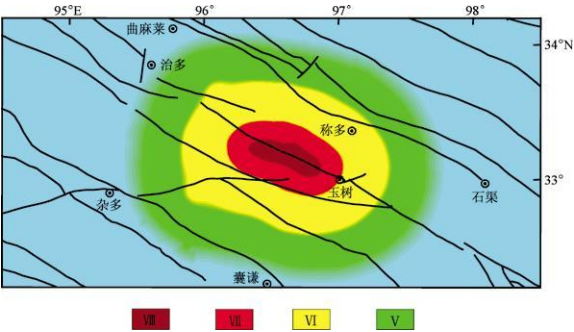


图 5 玉树地震仪器观测估计烈度图
Fig 5 Instrument observations estimated intensity distribution of Yushu earthquake

2 区域应力场分析

利用美国地质调查局（2010）给出的全球震源机制资料，我们获得了玉树及其周边地区（30.0°~37.0°N 92.5°~100.0°E） $M_w \geq 4.8$ 地震的 44 个震源机制解，其中 $M_w 6.0 \sim 6.9$ 地震 4

个， $M_w 7.8$ 地震 1 个，这些地震是 1989 年 5 月 3 日四川巴塘东南 $M_w 6.2$ 、2000 年 9 月 12 日青海兴海至玛多间 $M_w 6.1$ 、2001 年 1 月 14 日新疆青海交界（昆仑山口西） $M_w 7.8$ 以及本次玉树 $M_w 6.9$ 、 6.0 地震。图 6 给出地震的主压应力和张应力空间分布。图中显示，主压应力 P 轴方向以北东向为主，P 轴方位在 45°及 240°左右的地震占 50% 左

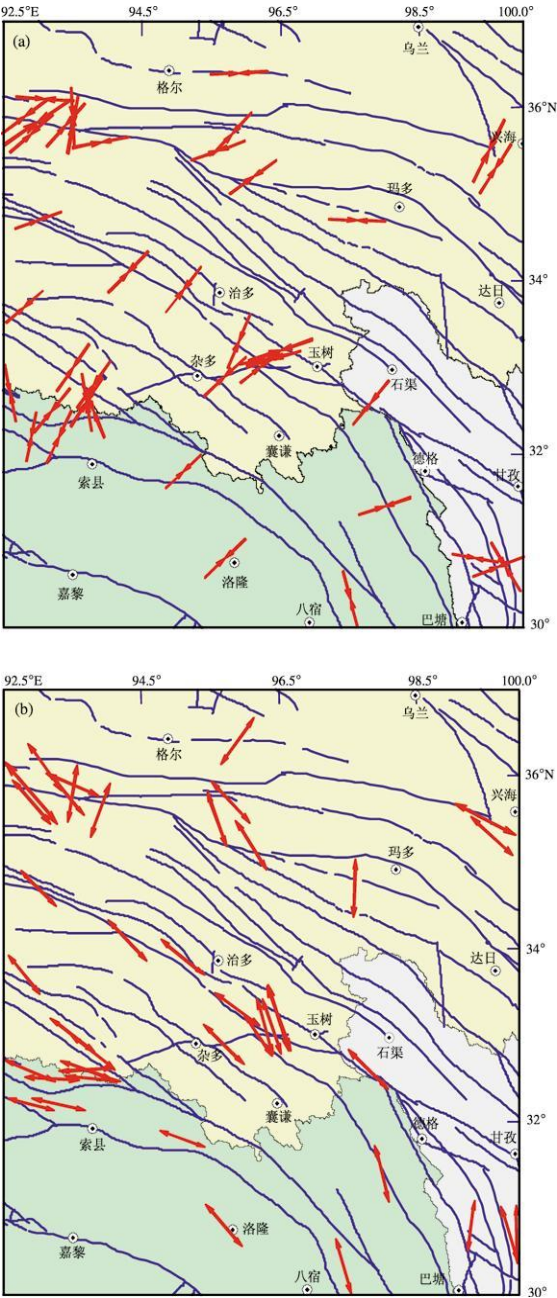


图 6 玉树地震周边主压（张）应力分布
(a) 压应力（P 轴）；(b) 张应力（T 轴）
Fig 6 Distribution of compressive axes P and extensional axes T around Yushu area

右,主张应力 T轴方向则以北西向为主, T轴方位在 310°左右的地震约占 50%左右。从图中还可以看到,玉树周围断裂大部分为近北东方向的弧形断裂, P轴总体走向与这些断裂垂直,而 T轴总体方位与断裂近乎平行。

将青藏高原及其东缘划分为 8 个区域 (图 8b),在青藏高原内部,从南到北各个活动地块与大虚线框相交的部分为所划分的区域,这样大虚线框就包含 6 块区域。在青藏高原东缘,选择典型的 3 块区域:川滇菱形块体、龙门山断裂带及附近区域和祁连地块。图 7 给出这 8 块区域 P 方位角频次统计 ROSE 图,从图中可以看到,喜马拉雅、拉萨两区域主压应力 P 轴方向总体呈北南向,拉萨

区域偏南的地震占较多比例。羌塘区域则与上述二个区域不同,该区域 P 轴方向向东偏转现象明显 (图 7a~7c)。羌塘区域南部的川滇菱形块体, P 轴方位则大幅度翻转至北西和北北西方向。巴颜喀拉区域 P 轴方位总体为 N30°E 与羌塘区域相比向东的地震偏多 (图 7d),巴颜喀拉区域南部边界龙门山断裂带附近 P 轴出现较大变化,从原先的北偏东转为东偏南 (图 7g)。柴达木区域出现近北南向和南西向 2 个优势方向,近北南向的地震主要集中在柴达木区域西北边界附近,而该区域以东的地震 P 轴方位则以南西向地震为主 (图 7e)。祁连区域 P 轴方向继续向东偏转, N45°E 的地震较多 (图 7f)。

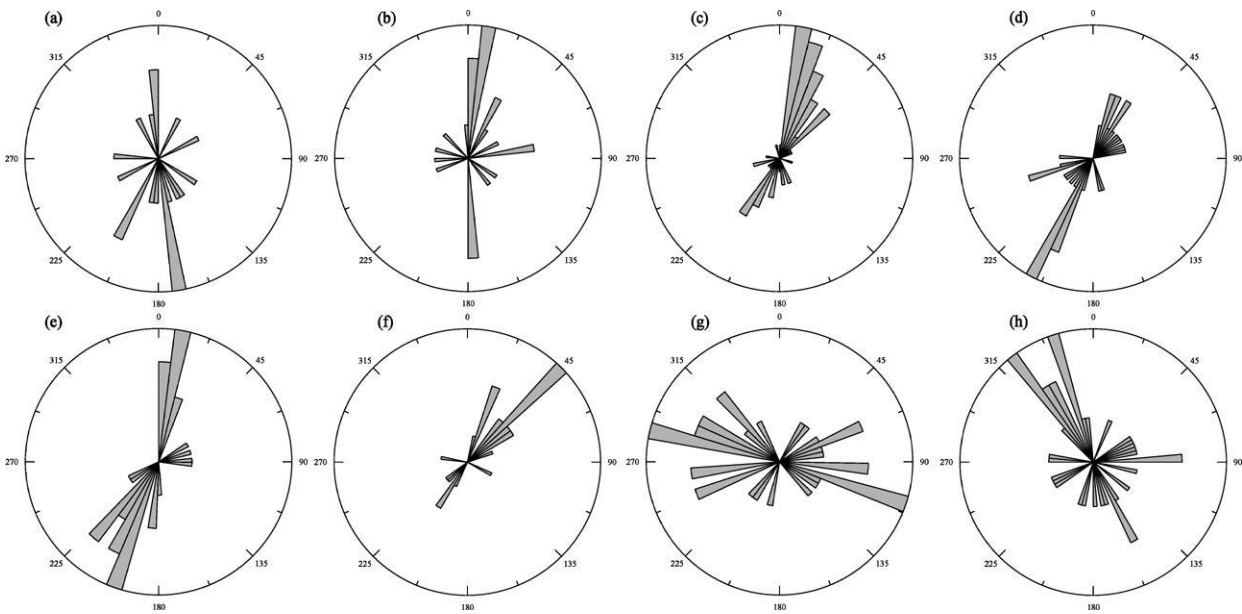


图 7 青藏高原震源机制解 P 轴方位角统计
(a) 喜马拉雅; (b) 拉萨; (c) 羌塘; (d) 巴颜喀拉; (e) 柴达木; (f) 祁连; (g) 龙门山; (h) 川滇菱块
Fig 7 The statistics of azimuths of compressive P axes in Qinghai-Tibet Plateau

P 轴方位呈放射状, T 轴方位呈弧形,二者正交,对于这一明显现象,许多文献均有报道 (阚荣举, 1980; 崔效锋等, 2006)。许忠淮等 (1987) 对此作了合理解释,他们认为呈放射状的 P 轴总体方位指向欧亚板块与印度板块交界地区,即加德满都与廷布一带,这一地区是中源强震频繁发生的地区。P 轴轨迹向阿萨姆角汇聚, T 轴的轨迹线也向这一地区集中。Tapponnier 和 Mohar (1976) 采用刚性冲模对塑性物质的挤压实验,模拟印度与欧亚大陆的碰撞作用,得到的应力轴轨迹线也具有上述特征。此外,安达曼弧存在大量

中、深源地震 (钱晓东, 秦嘉政, 2007),可能说明有一部分岩石层在向地球内部下沉,下沉的物质将会对地表岩层产生拖曳作用,于是周边地区应力分布将具有上述特征。值得注意的是, P 轴方向大致与安达曼弧地震带平行, T 轴大致与之垂直。

3 玉树地震的发震背景分析

3.1 世界大震活动背景

玉树 7.1 级地震是在世界大震处于强烈活动背

景下发生的。从美国地质调查局给出的世界 $M_w \geq 8$ 大震资料来看, 1973年至今的 37 年时间内, 世界大震活动经历了 3 次平静期和 4 次活跃期, 3 次平静期为: 1977 年 4 月 ~1985 年 9 月, 平静 8.4 年; 1989 年 5 月 ~1994 年 10 月, 平静 5.4 年; 1995 年 7 月 ~2001 年 6 月, 平静 5.9 年。4 次活跃期为: 1975 年 5 月 ~1977 年 4 月, 持续 2 年, 发生 8 级以上地震 2 次; 1985 年 9 月 ~1989 年 5 月, 持续 4 年, 发生 8 级以上地震 3 次; 1994 年 10 月 ~1995 年 7 月, 持续 1 年, 发生 8 级以上地震 2 次; 2001 年 6 月至今 (2010 年 5 月) 为最近一次活跃期, 始于秘鲁 2001 年 6 月 M_w 8.4 地震, 持续 9 年, 发生 8 级以上地震 11 次。总体来看, 平静期持续时间长, 在 5 年以上, 期间无 8 级以上大震发生, 前 3 个活跃期持续时间短, 释放能量低, 第四个活跃期持续时间长, 释放能量多 (平均不到 1 年就要发生 1 次 8 级以上大震), 最近 1 次大震为 2010 年 2 月智利 8.8 级巨震, 目前活跃期仍未结束, 已发生 1 次 8.6 级、1 次 8.8 级和 1 次 9.0 级地震。

3.2 中国西部大三角大震活动背景

玉树 7.1 级地震是在中国西部大三角 7.8 级以上大震处于活跃期背景下发生的。中国西部大三角地区是指以 3 个顶点 (60.5°N 109°E)、(38°N 60°E)、(18°N 104°E) 围成的一个三角形区域。1900 年以来发生于该区的 7 级以上强烈地震占整个中国大陆及附近地区地震总数 (不含台湾及沿海) 的 90%, 因此深入分析这一地区的强震活动状况, 对我们正确把握中国大陆强震形势十分重要。大三角地区 $M_s \geq 7.8$ 大震具有明显的活动—平静交替出现的特点, 1900 年以来出现了 4 次大震集中活动现象 (活跃期): 第 1 次活跃期是 1902 年 8 月 ~1911 年 2 月, 持续 8 年, 发生 7.8 级以上大震 10 次, 其中 8 级以上地震 9 次, 最大 8.7 级, 之后经历 10 年平静; 第 2 次活跃期为 1920 年 12 月 ~1934 年 1 月, 持续 14 年, 发生了 5 次 8 级以上地震, 最大 8.5 级, 之后平静 13 年; 第 3 次活跃期是 1946 年 9 月 ~1957 年 12 月, 历时 11 年, 发生地震 4 次, 其中 3 次 8 级以上, 最大 8.6 级, 之后经历长达 43 年的平静, 期间于 1970 年 1 月发生过 1 次 7.8 级地震; 第 4 次活跃期是 2001 年 11 月至 2010 年 5 月, 持续 9 年, 且还未结束, 发生地震 4 次, 2 次 8 级以上地震, 最大

8.1 级。到目前为止, 第 4 活跃期内, 所发生的地震数目或释放的地震能量还未达到前几次活跃期水平, 因此中国西部大三角地区再次发生 7.8 级以上大震的可能性是很大的。

3.3 南北地震带强震活动背景

玉树 7.1 级地震是在南北地震带 7 级以上强震处于活跃期开始阶段背景下发生的。南北地震带是指 ($21^\circ \sim 45^\circ \text{N}$ $95^\circ \sim 110^\circ \text{E}$) 的中国境内范围, 位于西部大三角东边缘, 是中国大陆地震活动最为强烈的地区之一, 玉树地震就发生于这一地震带内。1920 年以来南北地震带经历了 5 次 7 级以上地震活跃、平静时期: 第 1 次活跃期为 1920 ~1937 年, 持续 18 年, 发生地震 8 次, 最大 8.5 级; 第 2 次活跃期为 1947 ~1955 年, 持续 9 年, 发生地震 7 次, 最大 8.6 级; 第 3 次活跃期为 1970 ~1976 年, 持续 7 年, 发生地震 7 次, 最大 7.8 级; 第 4 次活跃期为 1988 ~1996 年, 持续 9 年, 发生地震 5 次, 最大 7.4 级; 第 5 次活跃期起始于 2008 年, 至 2010 年仅 2 年, 发生的地震为 2008 年汶川 8.0 级和本次玉树 7.1 级地震。由于活跃期才开始, 意味着未来几年南北地震带将连续发生至少 5 次 7 级以上地震。

3.4 巴颜喀拉地块强震活动背景

张培震等 (2003) 将中国大陆及邻区的活动地块划分为 6 个 I 级地块和 22 个 II 级地块, 并给出各个地块的平均运动速率和方向。根据他们划分活动地块的原则, 笔者绘制了青藏高原及周边地区活动地块及强震分布图 (图 8)。从图中可以看到, 青藏高原及周边地区主要由喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块、巴颜喀拉地块、祁连地块和川滇菱块组成。这些地块的边界是一些规模较大、活动性强的弧形断裂带, 从拉萨地块向北断裂带依次为: 喜马拉雅主逆冲带、喀喇昆仑—嘉黎断裂带、玛尼—玉树—鲜水河断裂带、昆仑—玛沁断裂带、阿尔金—海原断裂带, 此外还有龙门山断裂带、金沙江—红河断裂带和小江断裂带。巴颜喀拉地块近年来强震异常活跃——1997 年 1 月至 2010 年 5 月发生于青藏高原及周边地区的 7 级以上地震, 除 2000 年 6 月缅甸弧的 7.0 级地震外, 其余地震均发生于该地块, 分别是 1997 年 11 月西藏玛尼 7.5 级地震、2001 年 11 月昆仑山口 8.1 级地震、2008 年 3 月新疆于田 7.3 级地震、2008 年 5 月四川汶川 8.0 级地震及本

次青海玉树 7.1 级地震，这些强烈地震在较短时间内集中发生于地块边界附近，表明近 14 年来巴颜喀拉块体强震非常活跃。

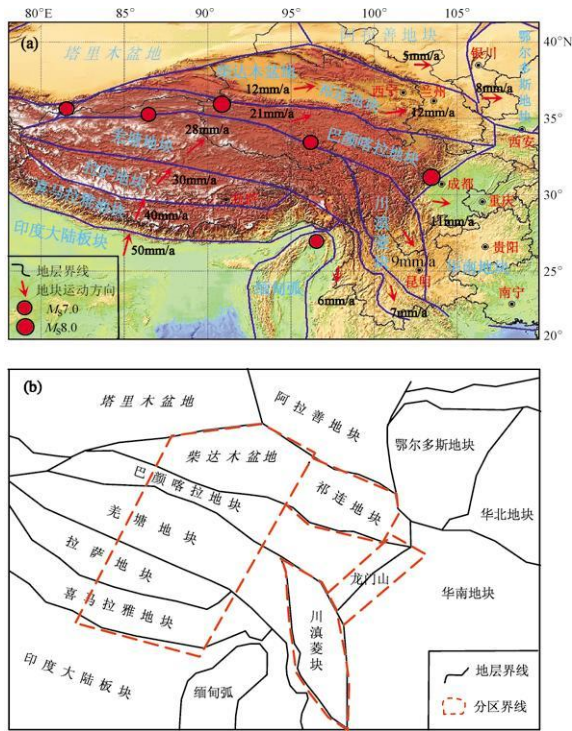


图 8 青藏高原及周边地区活动地块的运动速率和方向 (a) 及分区 (b)
(实心圆表示 1997~2010 年 $M \geq 7.0$ 地震, 大圆代表 8 级以上地震)

Fig 8 Active blocks movement rate (a) and direction around Qinghai-Tibet Plateau (b)

4 玉树地震后青藏高原强震形势讨论

印度大陆以大约 50~55 mm/a 的速率向北偏东方向快速运动，与欧亚板块碰撞并向北俯冲，导致青藏高原强烈变形并隆起、抬升。青藏高原整体在北东向压应力场和南东向张应力场共同作用下（图 6），沿张应力方向形成一系列近乎平行的弧形断裂，一些深大断裂由于活动剧烈被作为活动地块边界。在印度板块快速向北东方向俯冲、挤压欧亚板块过程中，青藏高原内部地块沿边界断裂带发生侧向滑动，导致青藏高原整体向东移动。图 8 显示，各个地块运动速率不相同，由南向北呈递减之势。在羌塘地块附近区域，地块运动方向发生明显偏转，从北偏东转向东再转向南。

这一转向使川滇菱形块体以 9 mm/a 的速率向南南东方向运动。地块边界附近往往是强震、大震容易发生的地段，例如 2008 年汶川 8.0 级大地震是在巴颜喀拉地块以约 21 mm/a 速率向东运动时，与华南地块中的四川盆地发生正面碰撞的结果。巴颜喀拉地块向上逆冲（覆盖）下面坚实的华南地块的四川盆地，汶川 8.0 级大地震就发生于地块边界的龙门山逆冲断层的上盘。本次玉树 7.1 级地震则发生于走滑断裂上，由于羌塘地块向东运动的速率比巴颜喀拉地块大，故二个地块交汇的甘孜—玉树—风火山断裂就表现为左旋性质。再由于这二个地块运动方向基本一致，不是正面碰撞，因此发生于这二个地块交界处的地震以走滑型地震为主，地块间的差异运动使其边界应力积累到一定程度引发破裂产生地震。

玉树 7.1 级地震发生后，青藏高原及其周边地区强震活动将面临怎样的形势，是人们普遍关心的问题。图 9 为青藏高原不同地块 1900 年来 5 级以上地震应变图，主要反映了各地块长期能量释放水平。对于地块边界附近的地震，我们按照地块边界线划分地震的归属。为便于区分，图中主要用蓝色和红色来表示 6 个地块的能量释放状况。从图中看到，蓝色代表的 3 个地块在 1955 年以前都经历过能量大释放，以后至今能量释放较为平缓。喜马拉雅地块在 1950 年 8 月西藏察隅 8.6 级地震前强震较为活跃，1947 年 7 月还发生过西藏朗朗 7.7 级地震。察隅地震后至今长达 60 年时间，能量释放较为平缓、均匀，期间无 7 级以上地震发生。考虑到该地块 1833 年还发生过西藏聂拉木 8.0 级地震，至 1950 年西藏察隅 8.6 级地震也仅仅 120 年时间，说明该地块大震能量积累速率较快，因此对该地块今后应关注其能量积累的变化状态。拉萨地块强震活动与喜马拉雅地块相似。1951 年西藏当雄 8.0 级地震以前，强震较为活跃，发生过 2 次 7 级、3 次 6.8 级地震，当雄地震至今已将近 60 年未发生一次 7 级以上地震，但 6 级地震近几年相对较为集中，2004~2008 年连续发生了 4 次 6.5~6.8 级地震。祁连地块地震能量集中大释放比上述二个地块早，1920 年宁夏海源 8.5 级地震后，该地块地震震级逐渐减小，特别是 1990 年以后仅发生了 3 次 6.6 级地震。从以上分析可以得知，由于 1955 年以前发生过 8 级以上大震，地震能量释放较为充分，积累能够发生大震

的能量需要很长时间, 故上述三个地块至今表现出能量较平缓、均匀地释放, 且这种状态还在延续。

再讨论图 9 中红色曲线代表的其它三个地块强震活动特征。从图中可看到, 巴颜喀拉地块 1920 ~ 1973 年能量释放平稳增长, 释放的总能量仅次于喜马拉雅地块。1973 ~ 1976 年经历过 1 次能量加速释放期, 期间发生了 1976 年 2 月四川炉霍 7.6 级、1976 年 8 月 16、23 日四川松潘、平武 2 次 7.2 级地震, 之后变得平静。从 2001 年 11 月开始, 该地块能量加速释放较为明显, 至今已发生了 2 次 8 级地震。玉树 7.1 级地震是在该地块处于强震剧烈活动的情况下发生的, 目前这种大震频发状态还在持续, 故该地块仍然是今后 7 级以上地震发生的危险区域。

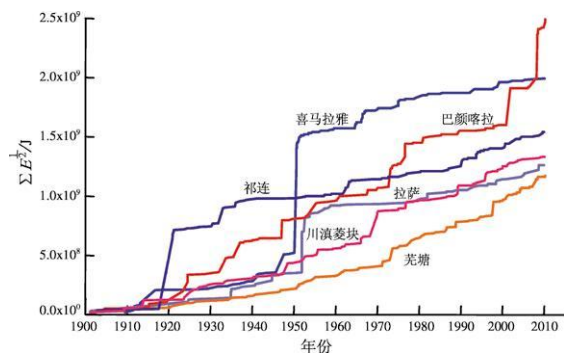


图 9 不同地块应变曲线 ($M_s \geq 5.0$)

Fig 9 Strain release of different blocks ($M_s \geq 5.0$)

由图 9 可见, 羌塘地块曲线与川滇菱形块体曲线很相似, 但羌塘地块能量释放比川滇菱形块体弱。羌塘地块 1973 年以前以 5 ~ 6 级地震为主, 1973 年 7 月西藏亦基台错 7.3 级地震后能量释放有所增强, 最近一次强震为 2008 年 1 月西藏改则 6.9 级地震。从图形上看, 该区近年来能量释放有加速迹象, 未来存在发生 7 级以上地震的危险。

川滇菱形块体历史上有过 2 次较大能量释放, 分别是 1948 年和 1970 年。该地块整体能量随时间呈线性增长, 当曲线偏离长期趋势线较远时, 就要通过平静或发生强震来进行修正, 属于典型的长时间平静至发生大震形态。1948 年 5 月四川理塘 7.3 级地震前曾出现长达 23 年的平静, 期间无一次 6.5 级以上地震; 1970 年 1 月通海 7.8 级地震前也经历过长达 15 年的平静, 期间仅于 1966 年 2 月在云南东川发生过 1 次 6.5、6.2 级双震。该地

块自 1996 年 2 月云南丽江 7.0 级地震至今平静时间已有 14 年多, 期间仅于 2000 年 1 月在云南姚安发生过 1 次 5.9、6.5 级双震, 与通海地震前所处状态相似, 因此该地块未来发生 7 级以上地震的背景较为强烈。

综上所述, 2010 年青海玉树 7.1 级地震后, 青藏高原及其周边地区的巴颜喀拉地块、羌塘地块及川滇菱形块体未来发生 7 级以上地震的危险性较大。

5 结论

(1) 2010 年 4 月 14 日青海玉树发生 7.1 级地震, 这是该区历史上发生的最强烈的地震。该地震是走滑型地震, 地处青藏高原内部巴颜喀拉地块南边界, 发震断裂为甘孜—玉树—风火山左旋走滑断裂, 地震主要向震中东南方向破裂。该地震是巴颜喀拉地块与羌塘地块以不同速率向东运动, 地块间的差异运动使其边界应力积累到一定程度从而引发破裂的结果。

(2) 根据地震定标律估算的主震断层破裂参数和应力参数为: 地震矩 $M_0 = 1.78 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 矩震级 $M_w = 6.8$, 断层破裂面积 $S = 468 \text{ km}^2$, 断层错距 $D = 1.4 \text{ m}$, 断层破裂长度 $L = 37 \text{ km}$, 断层破裂宽度 $W = 12.6 \text{ km}$, 剪应力 $\tau_0 = 16.8 \text{ MPa}$, 应力降 $\Delta\sigma = 7.03 \text{ MPa}$ 。

(3) 历史地震分析表明, 玉树 7.1 级地震是在世界 8 级以上地震、中国西部大三角 7.8 级以上地震、南北地震带 7 级以上地震和巴颜喀拉块体 7 级以上地震处于强烈活动背景下发生的。玉树地震后, 青藏高原巴颜喀拉地块、羌塘地块及川滇菱形块体未来发生 7 级以上地震的危险性较大。

参考文献:

- 陈培善, 肖磊, 白彤霞, 等. 1994. 唐山地震序列的环境应力场 [J]. 地震学报, 16(4): 441—447.
- 崔效锋, 谢富仁, 张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义 [J]. 地震学报, 28(5): 451—461.
- 阙荣举. 1980. 西南地区现代构造应力场与板内强震活动关系 [J]. 地震研究, 3(3): 45—59.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2007. 滇缅孤板缘地震及其与云南地震活动关系 [J]. 云南大学学报, 30(增刊): 467—475.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2008. 用 b 值距离估算汶川 8.0 级地震序列最大余震 [J]. 地震研究, 31(增刊): 436—441.
- 秦嘉政, 皇甫岗, 钱晓东. 2005. 云南强震活动与预测方法研究 [M].

昆明: 云南科技出版社: 6—13.

许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 1987. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征 [J]. 地球物理学报, 30 (5): 476—486.

张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. 中国科学, 33 (增刊 D 辑): 12—20.

中国地震局. 青海玉树 7. 1 地震专辑, 玉树 7. 1 级地震断层地表破裂带和地质灾害调查报告 [EB/OL]. (2010—04—24). [2010—05—28]. http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632f65d0116674a018300cf_content/10_04/24/1272080095876.html

中国地震局地球物理研究所. 2010 年青海玉树 7. 1 级地震初步研究 [J/OL]. (2001—04—17) [2001—05—20]. <http://www.ceajp.ac.cn/更多图片新闻/2010年青海玉树7.1级地震初步研究.htm>.

中国地震台网中心. 地震数据管理与服务系统 [DB/OL]. (2010—04—24) [2010—05—28]. <http://www.csdmc.ac.cn/newweb/>.

Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip line field theory and large-scale continental tectonics [J]. Nature 364 (5584): 319—324.

USGS Historic World Earthquakes Magnitude 6. 9—SOUTHERN QINGHAI CHINA [J/OL]. (2010—05—18) [2010—05—28]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010vaqp/>.

USGS Source Parameter Search Global & National Data [J/OL]. (2010—05—18) [2010—05—28]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/spar/>.

2010 Earthquake in Yushu, Qinghai Province and Strong Earthquake Trend Analysis of the Qinghai-Tibet Plateau after the Earthquake

QIAN Xiao-dong Q in Jia-zheng

(Earthquake Administration of Yunnan Province Kunming 650224 Yunnan China)

Abstract

On April 14 2010 an earthquake of magnitude 7. 1 occurred in Yushu Qinghai Province it is the strongest earthquake that have ever taken place in this region. The earthquake is a strike-slip earthquake in the plateau the Bayankala block south boundary. Seismogenic fault is Ganzi-Yushu-Fenghuoshan left-lateral and strike-slip fault the earthquake major rupture to the southeast of the epicenter. The earthquake results from the Bayankala block and Qiangtang block east at different rates of movement differential movement between the block boundary to accumulate stress to a certain extent to trigger fault rupture. Based on scaling law fault rupture and stress parameters of the M_s 7. 1 Yushu earthquake are estimated resulting the seismic moment $M_0 = 1.78 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ moment magnitude $M_w = 6.8$ area $S = 468 \text{ km}^2$ maximum offset $D = 1.4 \text{ m}$ fault length $L = 37 \text{ km}$ the width $W = 12.6 \text{ km}$ shear stress $\tau_0 = 16.8 \text{ MPa}$ stress drop $\Delta\sigma = 7.03 \text{ MPa}$. Analysis on historical earthquakes shows that Yushu magnitude 7. 1 earthquake occurred in the world for more than magnitude 8 earthquake in West China Triangle over magnitude 7. 8 earthquake north-south seismic zone earthquakes above magnitude 7 and the Bayankala block more than magnitude 7 earthquake in the context of intense activity. After the earthquake Yushu Bayankala block and Qiangtang block and the Sichuan-Yunnan Rhombic block of Qinghai-Tibet Plateau future occurrence of more than magnitude 7 earthquake in more dangerous.

Key words Yushu earthquake focal mechanism Qinghai-Tibet Plateau active block strong seismicity