玉树 M_s7.1 地震时空破裂过程及 与地表破裂带的对应关系

刘白云1,袁道阳1.2,陈继锋3,牛延平3

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 73000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000)

摘 要:根据 IRIS 全球地震台网 15 个台的长周期地震仪记录的 P 波资料,用远场体波地震图反演 震源破裂过程的方式,研究了 2010 年 4 月 14 日玉树 M_s7.1 地震震源破裂,并与震后调查地表破 裂带做了对比。结果表明:玉树地震在总体上是一次单侧破裂事件,破裂从初始破裂点(即震源位 置)开始向东南方向展开,破裂离震源 20 km 处开始贯穿至地表,沿走向方向延伸了约 50 km,最大 滑移量达 2 m。这些结果与震后考察得到的地表破裂带的特征十分吻合。

关键词:玉树 M_s7.1 地震; 震源破裂过程; 地表破裂带; 对应关系 中图分类号: P315.331 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2012)01-0023-06

Relation between the Source Rupture Process and Surface Rupture Zone of the $M_s7.1$ Yushu Earthquake

LIU Bai-yun¹, YUAN Dao-yang^{1,2}, CHEN Ji-fen³, NIU Yan-ping³ (1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract:Based on the digital teleseismic P-wave seismograms recorded by 15 long-period seismograph stations of the global seismic network, source rupture process of the April 14, 2010 Yushu $M_{\rm s}=7.1$ earthquake is studied by a inversion method, and compared with surface rupture zone which was investigated after the earthquake. The result shows that the earthquake is a unilateral rupture event on the whole. The source rupture initiated at the hypocenter (33.2°N, 96.6°E, focal depth 10 km), and propagated to the southeast at first. The rupture broken though the ground surface departed from 20 km of the epicenter, it extended 50 km along strike, the maximal slip is 2 m. These results are coincide with the investigated feature of the surface rupture zone.

Key words: Yushu M_s 7.1 earthquake; Source rupture process; Surface rupture zone; Corresponding relationship

0 引言

省玉树县发生了 M_s7.1 地震。根据中国地震台网 中心测定结果,玉树地震震中位置为 33.2°N,96.6°

2010年4月14日7时49分37秒,在我国青海

收稿日期:2010-11-01

基金项目:国家自然基金(40872132);兰州地震研究所青年地震科学基金(201005);中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2012009

作者简介:刘白云(1980-),男(汉族),甘肃陇西人,工程师,在读硕士,主要从事活动构造的学习与研究.

E,震源深度约14 km,位于玉树城区西北约44 km 处。此次地震造成了巨大的生命和财产损失^[1-2]。 有关该次地震的发震构造背景、震源时空破裂过程 以及地表形变带特征等,一直是广大科研人员关注 的问题。

在震后的数小时,张勇等曾快速反演了此次地 震的震源时空破裂过程,但限于当时可使用的地震 波资料较少以及震源位置和震源深度的不确定性。 反演结果与震后实地考察的地表破裂带只有部分相 符,未能完全揭示破裂出露地表的明显特征。

为深入理解和认识玉树地震的震源时空破裂过 程及其与地表形变带的对应关系,本文利用全球地 震台网(Global Seismographic Network,简写为 GSN)的长周期数字地震资料,同时结合中国地震 局台网中心最新确定的震源位置和震源深度,反演 玉树大地震动态时空破裂过程,得到此次地震的静 态滑动量分布、破裂时空变化等参数,并将这些结果 与震后实地考察的地表破裂带做对比,进一步了解 计算结果与考察结果的异同,同时检验反演算法的 健壮性与有效性。

1 地震构造环境

大地构造上,玉树震区处于青藏高原中部,巴颜 喀拉地块与羌塘地块交界的金沙江缝合带附近^[3]。 地震发生在 NWW 走向的玉树一甘孜断裂上(图 1)。



高原外地块; 2. 高原边缘挤压构造带; 3. 板块缝合带及其编号;
 4. 高原内部地块及其编号; 5. 逆冲断层; 6. 大走滑断裂带
 ①雅魯藏布缝合带; ②班公湖怒江缝合带; ③金沙江缝合带;
 ④东昆仑缝合带; ⑤西昆仑祁连缝合带; I 喜马拉雅地块;
 Ⅲ藏北地块; Ⅲ羌塘地块; Ⅳ巴颜喀拉地块; Ⅴ柴达木地块

图 1 玉树震区主要构造单元分布(据文献[3]) (实心圆为玉树地震震中位置)

Fig. 1 The major tectonic units of Yushu earthquake area (from reference[3]) (solid round indicates the epicenter of Yushu earthquake).

2 玉树地震震源时空破裂过程反演

为了对地震破裂过程中发生在断层面上的破裂 传播行为以及断层面上不同位置的滑动位错大小分 布有所认识,就必须对地震进行时空破裂过程反演。 震源破裂过程反演的研究工作开始于 20 世纪 80 年 代初期,经过 20 多年的发展,逐渐形成了多种不同 的反演方法,包括线性反演和非线性反演。本文采 用的是线性反演中的一种直接波形反演方法^[9-10]。

2.1 反演理论

不考虑体力和应力的间断性,在一个分界面 Σ 两侧的位移间断[$u_j(\xi,\tau)$]所引起的弹性位移:

$$u_{i}(x,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_{\Sigma} [u_{j}(\xi,\tau)] c_{jkpq} v_{k} G_{ip,q}(x,t;\xi,\tau) d \sum (\xi)$$
(1)

式中, c_{jkpq} 为断层介质的弹性模量; v_k 为断层面法向 方向余弦; $G_{ip}(x,t;\xi,\tau)$ 为断层面上 ξ 点与观测点x之间的路径效应,即格林函数;而 $G_{ip,q}(x,t;\xi,\tau)$ 是 G_{ip} 对 ξ_q 的导数。

在一个均匀、各向同性、完全弹性的无限介质 内,格林函数可以用解析式表示:

$$G_{ip}(x,t;\boldsymbol{\xi},\tau) = \frac{1}{4\pi\rho} (3\gamma_i\gamma_p - \delta_{ip}) \frac{1}{r^3} \int_{r/\alpha}^{r/p} t' \delta(t-\tau-t') dt' + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \gamma_i\gamma_p \frac{1}{r} \delta\left(t-\tau-\frac{r}{\alpha}\right) - \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} (\gamma_i\gamma_p - \delta_{ip}) \frac{1}{r} \delta\left(t-\tau-\frac{r}{\beta}\right)$$

$$(2)$$

式中, γ 是从震源点 ϵ 到接收点x 的单位向量; $r = |x-\epsilon|$ 是两点间的距离。

如果观测点的位置离断层面上所有的点足够远,满足远场成立的条件,那么在格林函数内仅有远场项(上式中第二项和第三项)是有意义的。将式(2)代入式(1),利用关系 $\partial/\partial x_q = -\partial/\partial \xi_q$,并对 τ 积分后得到远场位移

$$u_{i}(x,t) = -\frac{1}{4\pi\rho\alpha^{2}} \frac{\partial}{\partial x_{q}} \int_{\Sigma} c_{jkpq} \frac{\gamma_{i}\gamma_{p}}{r} \left[u_{j}\left(\xi, t-\frac{r}{\alpha}\right) \right] v_{k} d\sum + \frac{1}{4\pi\rho\beta^{2}} \frac{\partial}{\partial x_{q}} \int_{\Sigma} c_{jkpq} \left(\frac{\gamma_{i}\gamma_{p}-\delta_{ip}}{r}\right) \left[u_{j}\left(\xi, t-\frac{r}{\beta}\right) \right] v_{k} d\sum$$

$$(3)$$

对 x_q 求导后,略去所有比 r^{-1} 衰减快的项,得到 $u_i(x,t)$ 的远场项如下:

$$u_{i}^{t}(x,t) = \iint_{\Sigma} \frac{c_{jkqp}}{4\pi\rho\alpha^{3}r} \gamma_{i}\gamma_{p} \left[\dot{u}_{j} \left(\xi, t - \frac{r}{\alpha} \right) \right] \frac{\partial r}{\partial x_{q}} v_{K} d\Sigma + \iint_{\Sigma} \frac{c_{jkqp}}{4\pi\rho\beta^{3}r} (\gamma_{i}\gamma_{p} - \delta_{ip}) \left[\dot{u}_{j} \left(\xi, t - \frac{r}{\beta} \right) \right] \frac{\partial r}{\partial x_{q}} v_{k} d\Sigma$$

$$(4)$$

式中 u_i^t 为 u_i 的远场项,第一项相当于 P 波,第二项 相当于 S 波。

震中距远大于断层面∑的线性尺度时,那么距离 r 和方向余弦近似为常数,而与 ε 无关。同时如果断层面是平面,且断层面上各点的位错的方向都相同,则有

$$\left[u_{j}(\boldsymbol{\xi},t)\right] = n_{j}\Delta u(\boldsymbol{\xi},t) \tag{5}$$

式中 $\Delta u(\xi,t)$ 是一个标量函数,称为"震源函数"。

在平面断层情况下,远场项可写成

$$u_{i}^{t}(x,t) = \frac{\gamma_{i}}{4\pi\rho\alpha^{3}r}c_{jkqp}\gamma_{p}\gamma_{q}\upsilon_{k}n_{j}\iint_{\Sigma}\Delta\dot{u}_{j}\left(\xi,t-\frac{r}{\alpha}\right)d\Sigma + \frac{\delta_{ip}-\gamma_{i}\gamma_{p}}{4\pi\rho\beta^{3}r}c_{jkqp}\gamma_{q}\upsilon_{k}n_{j}\iint_{\Sigma}\Delta\dot{u}\left(\xi,t-\frac{r}{\beta}\right)d\Sigma \quad (6)$$

 $\Delta u(\xi,t)$ 是"震源函数"的时间微商,也称为"远场震源函数"。

从式(6)可以看出,只要断层面上的震源函数确 定,便可确定地震断层引起的位移场;反之,从地震 断层引起的位移场原则上可以确定地震断层的震源 函数。震源函数既是时间的函数又是空间的函数。 所以,震源的时空破裂过程由震源函数来描述。确 定震源函数的过程也就是获取震源破裂过程图像的 过程。

2.2 断层面参数及断层模型

2.2.1 断层面参数

美国哈佛(Harvard)大学、美国地质调查局 (USGS)以及中国地震局地球物理研究所刘超等对 本次地震的矩张量解反演结果如下^[8](表1)。可 见,三组震源参数不完全一致,但总体上都表明,玉 树地震是一次以左旋走滑为主的浅源地震。其中, USGS 与刘超的结果解比较接近,但节面 [] 相差较 大。

表 1 玉树地震的地震矩 M₀、矩震级 M_w 和断层面解

	 	$M_{ m W}$	节面Ⅰ		— <u>————</u> ———————————————————————————————				 T轴		 B轴		 P 轴	
来源	$/10^{19}$ N • m		走向 /°	倾角 /°	滑动 角/°	走向 /°	倾角 /°	滑动 角/°	方位 /°	倾角 /°	方位 /°		方位 /°	倾角 /°
哈佛大学	2.5	6.9	210	67	178	300	88	23	166	9	300	77	74	9
美国地质调查局	2.5	6.9	119	78	3	29	86	168	343	10	191	78	74	5
刘超等	4.4	7.0	119	83	-2	209	88	-173	344	4	222	83	74	6

根据玉树一甘孜断裂的走向(NWW—NW)和 倾向(NE),以及余震震中的分布,可以确定节面 I 为发震断层,本文选用刘超的结果即节面 I(走向 119°/倾角 83°/滑动角-2°)为玉树地震的断层面。 2.2.2 断层模型

根据前人的研究成果以及震后的野外考察并结 合震源的位置,我们选取断层面上沿断层面走向长 约 100 km、沿倾向长约 30 km 的长方形区域作为反 演断层位移(滑动)空间分布的区域。我们将这个长 方形沿走向和倾向方向上划分为 20×6 个边长为 5 km的正方形子断层。将每个正方形子断层视作点源,用正方形中心的点表示(图 2)。由震源参数可确定初始破裂点位于走向方向上第 3 块、倾向方向上第 3 块子断层处,用黑色五角星来表示(33.2°N, 96.6°E, *H*=14 km)。

2.3 反演数据的选取

鉴于水平向 P 波记录受干扰较大,本文选取 I-RIS 的 15 个台站的垂直向 P 波记录(图 3)反演玉 树地震的时空破裂过程。采用全球标准速度模型和 格林函数的反射率计算方法^[11-12],得到了断层面上

•		•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	-	•	•	•
•	•	•	•	•	•	-	•	•	•	-	•	-	•	•		-	-	•	-
-		×		•	•	-		•	•	•	•	-	•	•	-	•	-	•	-
•		•	•	•	•		•	•	•	•	-	•	•	•	٠	•	•	•	
		•		•	•		•		٠	•	•	•	•		٠	•	-	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	-	•	•	•	•

每个子断层为5 km×5 km的正方形; 五角星表示震源位置(33.2°N,96.6°E;H:14 km), 即破裂起始点位置

图 2 玉树地震断层模型

Fig. 2 The fault model of Yushu earthquake.





的时空破裂过程。

2.4 反演结果

2.4.1 静态滑动量分布

玉树地震断层面上滑动量分布从震源开始沿断 层走向(东南方向)逐步扩展(图 4),表现为典型的 单侧破裂特征。初始破裂点从震源开始,沿走向至 约 13 km 处,最大滑动量达 1.3 m,但未到地表。在 距震源 20~43 km 范围内破裂面积和破裂强度均 为最大,滑动量达 2 m,破裂贯穿至地表。该结果与 中国地震局地质研究所陈立春等震后调查的地表形 变破裂带北侧主破裂的特征十分吻合^[1],玉树城区 正好位于该区域范围内,这是玉树县城受灾最为严 重的主因所在。第三个滑动量集中的区域位于距离 震源约为56~65 km的范围内,最大滑移量为1m, 破裂同样贯穿至地表,与调查结果相一致。第四个 破裂区域反演结果不太明显,大致位于走向方向90 km以后,最大滑移量约为0.7 m 左右,反演效果不 太明显,这一结果有待商榷。



Fig. 4 The static slip distribution(final) of Yushu seismic fault plane.

2.4.2 破裂的时空变化

图 5 表示地震断层面上的滑动量随时间(0~40 s)和空间的(0~100 km)的变化图像。从发震时刻 开始到 4 s的时间范围内,破裂不太明显;此后在发 震后 5-13 s期间,在震源处开始快速破裂,并快速 沿断层走向(SE 方向)传播,但破裂未到达地表;在 发震后 14-22 s内,距离震源约 22 km 处的地方开 始新的破裂,在这个阶段破裂涉及的范围最大,幅度 最强,是玉树地震的一个主要过程;在发震后的 23 -32 s内,在距离震源东南方向约 50 km 处又发生 了一次相对于主破裂规模较小,幅度较弱的破裂事 件;在此后的反演时间段内,发生了一次规模很小,

第34卷

	0.5.5		OV	OVT	ONV	2
1 s	8 s	15 s	22 s	29 s	36 s	1.8
				OVE	DON NO	1. 0
2 s	9 s	16 s	23 s	30 s	37 s	1.6
		019	CANE.	CJ1L0	OIL	1.4
3 s	10 s	17 s	24 s	31 s	38 s	-1.2
		Ve	ON V	CON NO	ON V	1
4 s	11 s	18 s	25 s	32 s	39 s	1
	0	DV .	OVE	OVE	ON V	0.8
5 s	12 s	19 s	26 s	33 s	40 s	-0.6
		.ø\1	OVE	CON MA		0.4
6 s	13 s	20 s	27 s	34 s	0 100.1	
٠	.0	LO V	DVIC	OVIC		0. 2
7 s	14 s	21 s	28 s	35 s		1.0

图 5 玉树地震断层面上的位移随时间变化的快照(发震后的第40 s的累积滑动量 即静态滑动量分布,参见图4)

Fig. 5 The snapshots of displacement over time on Yushu seismic fault plane.

幅度十分微弱的破裂事件,至此整个破裂过程结束。 据此可以判断,玉树地震的震源过程较为单一,

磁裂以朝向断层走向方向(SE方向)的单侧破裂为 主,地震的多普勒效应使破裂传播方向上地震能量 强烈聚焦。

3 地表破裂带与时空破裂过程的对应 关系 地质调查局在第一时间组织科考组对此次地震的地 表破裂带做了详细的调查。野外调查结果表明,玉 树 $M_{\rm s}$ 7.1 地震的地表破裂出现在该断裂走向方向 上,此次地震较清晰的地表破裂带由3条主破裂左 阶组成,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 6),属 左旋走滑性质^[1]。北段主破裂位于震中沿断层走向 20~40 km范围内,实测水平走滑位移量为1.1~ 1.8 m,最大位移量为1.8 m。与本文中反演得到的



图 6 玉树地震地表破裂分布简图(据文献[1])

Fig. 6 The schematic plot of Yushu seismic surface ruptures (from reference [1]).

地震发生后,中国地震局地质研究所以及中国

第二个破裂区域对比可知,该结果基本完全与本文 反演得到的结果一致。中段主破裂与北段破裂呈左 阶相连,破裂带长约9km,特征与北段主破裂基本 一致,但相对强度要小,这一带实测的最大水平位错 量为0.9m。同样,与本文反演得到的第三个破裂 区域的特征做对比也十分吻合。南段主破裂与中段 破裂呈左阶相连,破裂特征与其他两段基本一致,在 (33°11′50.0″N,96°49′31.9″E)处实测河岸岸边的 水平位错量约0.5m。这一破裂区域在本文反演得 到的第四个破裂区域上有所显示,但结果不是十分 明显,究其原因,有待进一步研究。

通过对比地表破裂带与玉树地震时空破裂过程 之间的关系,可以看出,野外调查结果基本上与反演 结果相一致。这说明通过地震时空破裂过程的反 演,可以大致得出基本的地表破裂范围及强度,这无 论是对震后应急救援还是科学考察都很有指导意 义。

4 结论

本研究根据 IRIS 全球地震台网 15 个台的长周 期地震仪记录的 P 波资料,直接用远场体波地震图 反演震源破裂过程的方式,研究了 2010 年 4 月 14 日玉树 M_s7.1 地震的震源破裂过程。反演得到的 破裂过程表明,玉树地震的震源破裂过程是以沿断 层走向(SE 方向)朝单侧破裂的方式进行的,破裂最 大区域约从距离震源东南方向 20 km 处开始,直至 距离震源 100 km 的范围内,最大错动量达到 2 m, 主要有 3 个破裂区域贯穿到地表。规模较大、破裂 贯穿至地表的第二个破裂事件是玉树城区遭受严重 破坏在震源方面的主要原因。将反演得到的玉树地 震的震源时空破裂过程与震后实地考察的地表破裂 带做对比,结果表明反演所得到的破裂区域以及最 大滑移量均与考察结果一致。这说明反演所得到的 结果是真实可信的。因此,作者认为在今后的震后 应急救援和科学考察中可以参考结合应用这种反演 方式。

[参考文献]

- [1] 陈立春,王虎,冉勇康,等.玉树 Ms7.1 地震地表破裂与历史大 地震[J].科学通报,2010,55(1):1200-1205.
- [2] 任俊杰,谢富仁,刘冬英,等. 2010 年玉树地震的构造环境、历 史地震活动及其复发周期估计[J].震灾防御技术,2010,5 (2):228-233.
- [3] 李金臣,潘华,张志中. 青海玉树 7.1 级地震构造背景[J]. 国际 地震动态,2010,377(5):1-5.
- [4] 周荣军,闻学泽,蔡长星,等.甘孜一玉树断裂带的近代地震与 未来地震趋势估计[J].地震地质,1997,19:115-124.
- [5] 李闽锋,刑成起,蔡长星,等.玉树断裂活动性研究[J].地震地 质,1995,17:218-224.
- [6] 闻学泽,徐锡伟,郑荣章,等.甘孜一玉树断裂的平均滑动速率
 与近代大地震破裂[J].中国科学(D辑),2003,33(SI):199-208.
- [7] 邓启东,张培震,冉永康,等.中国活动构造基本特征.中国科学
 (D辑),2002,32:1020-1030.
- [8] 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[J].地震学报,2010,32(3):366-368.
- [9] 许力生. 地震破裂的时空过程研究[D]. 北京:中国地震局地球 物理研究所,1995:122108.
- [10] 张勇,冯万鹏,许力生,等.2008 年汶川大地震的时空破裂过 程[J].中国科学(D辑),2008,38(10):1186-1194.
- Okada Y. Surface Deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1985, 75(4): 1135-1154.
- [12] Kennett B L N, Engdahl E R. Travel times for global eart hquake location and phase identification[J]. Geophys. Jint., 1991,105,42922465.