

# 丽江 7.0 级大震发震机制新见

王运生, 王士天, 李渝生

(成都理工学院, 四川成都 610059)

**摘要:**通过对丽江地区构造格架和丽江大震的震后调查,对丽江地震的发震环境进行了系统分析,认为丽江地震是在主压应力为近 NS 向区域应力场作用下,NE 向丽江-小金河断裂左旋错动和 NW 向中甸-永胜断裂右旋错动,从而导致巨甸-九子海三角形断块东部近尖端部位出现局部拉张环境,最终导致近 NS 向西倾的玉龙雪山东麓断层北端撕裂而发震.

**关键词:** 构造格架; 地震断层; 丽江 7.0 地震; 发震机制

**中图分类号:** P315.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0442-05

## 1 概述

1996 年 2 月 3 日 19 时 14 分 18 秒,在云南省丽江市大具乡 ( $27^{\circ}18'N$ ,  $100^{\circ}12'E$ )发生了  $M_s7.0$  地震,震中南距丽江县城 40 km,震源深度 10 km.震后国内外联合考察队进行了实地考察,但对一些关键性问题未能作出明确的解释,如较为公认的发震断层为近 NS 向玉龙雪山东麓断层,原有地质图上该断层表示为东倾,但为什么国家正式公布的这次大震(以正断为主)震中位于该断层的西盘?又为什么所求得的与发震断层走向一致的节面倾向与发震断层的倾向相反?

丽江地震后,1997 年笔者赴现场对地震遗迹进行了考察,通过对调研资料的综合分析,对丽江地震有了较为全面的认识.

## 2 发震断层、震中位置和震级

根据国家地震台网的资料,主震震中在构造位置上属巨甸-九子海断块东部次级断块——玉龙雪山断块的东北缘,东距玉龙雪山东麓断层 2.6 km,震级 7.0 级,发震断层为近 NS 向延伸的玉龙雪山东麓断裂西支断层(以下简称东麓断层).最大余震 6.0 级亦位于东麓断层西侧丽江地震构造见图 1.

### 2.1 震源机制解

在震后公布的震源机制解(表 1)中,美国哈佛大学提供的中心距张量解是主震破裂力学机制以倾滑为主兼张性的正断层;云南省地震局王绍晋据 P 波初动解给出的震源机制解是主震破裂为具有一定走滑分量的左旋错动的正倾滑断层,结合地表破裂走向为 NNE,等震线为近 NS 向,他认为节面 B 为主震破裂面,地表对应的断层是东麓断层<sup>[1]</sup>.

收稿日期: 1999-08-31

基金项目: 地质矿产部基础重点项目(9501114), 成都理工学院地核技术应用开发四川省重点实验室资助(001).

作者简介: 王运生(1961-), 男, 博士, 副教授, 从事区域稳定性及岩体稳定性研究.

主震发生后约 30 h, 在主震震中的正南方玉湖北发生了  $M_s6.0$  最大强余震.

震后提供的主震震源参数<sup>[2]</sup>为破裂长度 33 km, 断层破裂面积  $490 \text{ km}^2$ , 平均位错 0.78 m, 地震距  $12.5 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$ , 总破裂时间 13.8 s, 初始破裂时间 6.0 s, 主破裂 8 s, 发震应力背景值  $\tau_0 = 33.6 \text{ MPa}$ , 应力降  $\Delta\sigma = 4.6 \text{ MPa}$ . 从上述参数可以看出, 震源环境应力强度高, 达  $33.6 \text{ MPa}$ ; 主震发生后, 尽管有较大的应力降 (4.6 MPa), 但断层面上仍有较高的应力背景, 为 6.0 级强余震的发生奠定了基础; 破裂有一个明显的由北向南发展的过程.

表 1 丽江主震与最大余震断层机制解

发震时间	节面 A			节面 B			P 轴		T 轴		N 轴		矛盾比	精度	资料来源
	走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角			
1996-02-03	337°	NEE	50°	6°	W	44°	3°	75°	260°	4°	169°	15°	0.28	B	王绍晋
1996-02-03	157°	—	48°	353°	—	44°	358°	81°	255°	2°	164°	9°	—	—	哈佛大学
1996-02-05	330°	SW	53°	17°	SEE	47°	178°	65°	82°	3°	351°	25°	0.21	B	王绍晋

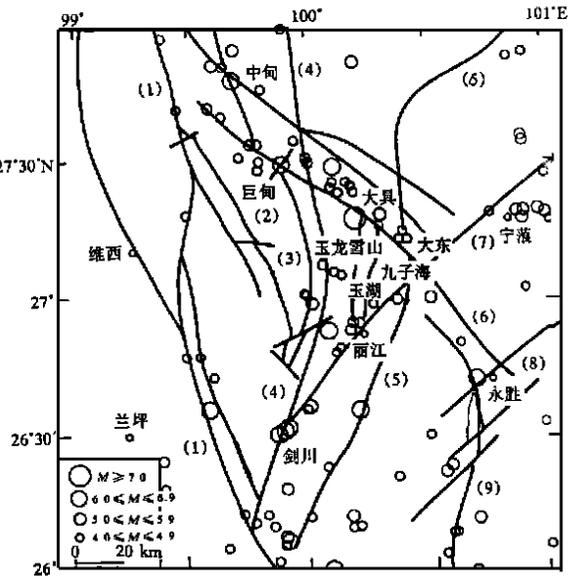
### 2.2 发震断层特征

东麓断层最早由云南省第一区调队 (1977) 发现. 断层北起大具乡大坝子, 向南顺大沟经里那比格, 终止于玉湖北, 全长 32 km. 从区测报告中展示确定该断层性质的剖面来看, 点西为泥盆系大理岩, 点东为冰渍物, 断面近直立, 向深处延伸具有多解性, 定为东倾的正断层证据并不充分. 1995 年笔者对该断层进行了较详细研究, 研究结果认为该断层应是西倾的, 证据有: (1) 里那比格跨断层  $\alpha$  辐射测量表明断层西侧曲线衰减明显低于东侧, 据衰减曲线与断层产状的对应关系可以判断该断层为一西倾断层; (2) 白水河在玉龙雪山东麓一带为一东西流向的深切河谷, 按 1:20 万丽江幅区地质图所标的断层位置, 沿河 (垂直断层走向) 测了一条 1.5 km 长的剖面, 无异常显示, 说明断层未在测线范围内通过, 由于东侧进行了最大限度的延伸, 故推断该断层应在西侧冰川悬谷脚下 (1:5 万 TM 图像线性影像明显) 通过, 修正后的断层线, 按 V 字形法则可以判断该断层为一西倾断层. 根据断层两盘的新老关系及断面倾向, 断定该断层为一西倾之逆断层.

### 2.3 地震烈度及地表破坏等地震现象

#### 2.3.1 地震烈度

云南省地震局、丽江行署地震局<sup>[3]</sup>和丽江市地震局震后对震区破坏情况统计表明, 本次地震的等震线为近 NS 向, 极震区烈度为 IX 度, 大具—丽江一带均在极震区内. 据现场调查, 极



(1)金沙江-红河断裂; (2)金江断裂; (3)中甸断裂;  
(4)楚波-白汉场断裂; (5)三江口-鹤庆断裂; (6)中甸-永胜断裂;  
(7)丽江-小金河断裂; (8)程海-金菁断裂; (9)永胜-宾川断裂

图 1 丽江地震构造

Fig. 1 The seismotectonic map of Lijiang  $M_s7.0$  earthquake in 1996.

震区内震害严重的有大具乡的大坝子、峨眉芝、三家村、克石地和头台,大东乡的甲子村、黑水;丽江盆地内有黄山乡的中海村、文荣村,金山乡的新团村和文智十队,震害指数在0.5~0.7之间,局部异常点大于0.7.

### 2.3.2 地裂缝

这次地震形成的构造地裂缝有3处:峨眉芝、黑水及玉湖—文华间.

大具峨眉芝地裂缝位于大具盆地南侧由二叠系玄武岩构成的斜坡地带.裂缝展布于玉龙雪山东麓断裂以东,与玉龙雪山东麓断裂近平行延伸,二者相距约500~600 m.裂缝总体走向 $N22^{\circ}E$ ,总长约850 m,宽约5~10 m.裂缝带由长几米至几十米的平直张扭裂缝组成,裂缝延伸不受地形影响,切过公路、小路及田埂等,呈右阶左行排列,缝面总体向西倾斜.单条裂缝长5~60 m,缝面平直、陡立,产状为 $N25^{\circ}E/NW \angle 82^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ,裂缝张开2~30 cm,一般在3~7 cm;可见深度20~70 cm;水平左旋位错明显,最大位错达30 cm.

黑水地裂缝出现在上黑水北侧的缓坡地带(图2).该处是二叠系玄武岩分布区,表层为坡残积.裂缝带由几米到20 m长的张剪裂缝右阶左行排列而成,总体延伸方向为 $N21^{\circ}E$ ,与自然坡面基本垂直.裂缝带宽1~3 m,南北延伸约1.2 km.单条裂缝长5~20 m,一般5~10 m,走向 $N20^{\circ} \sim 30^{\circ}E$ ,缝面一致向西陡倾.缝宽15~20 cm,可见缝深达30 cm.整个裂缝带均毫不例外地显示西盘下降,垂直位错15~35 cm.裂缝水平反扭错断公路、地坎和树根,最大错距达30 cm.

文华—玉湖地裂缝出现在文华—玉湖一带的洪积物上,总体呈 $NWW$ 向延伸,属主裂缝西侧的分支裂缝.裂缝呈3段(东段、中段和西段)断续延伸.单条裂缝长0.2~1.2 m,由 $NW$ 和 $NE$ 向裂缝首尾相接而成, $NW$ 向裂缝拉张,一般缝宽可达2 cm,垂直位错达1 cm(南西盘下降), $NE$ 向地裂缝右旋错动地埂和草根,错距达3~4 cm.整个裂缝带的东延线正好与主裂缝的南延线交汇于文华村村口.

通过地裂缝的研究,可以得出如下结论:①主构造裂缝在不受滑坡影响的黑水缝面向西陡倾,西盘下降,进一步证实了发震断裂确实是西倾的;②地裂缝的空间排列均为右阶,左旋错断地物,表明发震机制为正断兼左旋;③在主裂缝南延线的西侧出现 $NWW$ 向左阶右行分支裂缝,表明地震时上盘的运动具有分块性.

### 2.3.3 地表跳石现象

本次地震在主裂缝的西盘,玉湖—文华一带的冰碛台地上出现大量的地表跳石现象,分布面积约 $0.5 \text{ km}^2$ ,西距玉湖约1 km.该处地面向东缓倾,坡度在 $5^{\circ}$ 左右.调查中发现,一种是台地上的散石发生跳动位移,底部部分嵌于沙土或位于沙土之上的分散砾石在地震时跳离原地,砾石重数十至数千克不等,跳离原地数厘米至数十厘米(30~60 cm),砾石跳动的优势方位为 $NEE$ 和 $SEE$ <sup>[4]</sup>;另一种是石垅上的堆石跳向一侧, $NNE$ 向的堆石垅在地震时散架并有部分砾

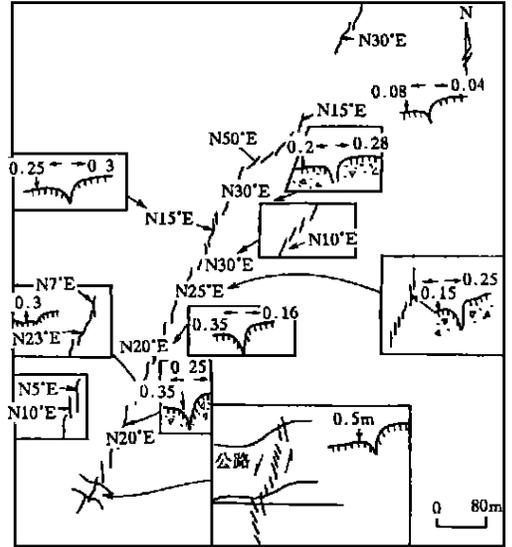


图2 黑水地裂缝平面分布

Fig. 2 The surface cracks in Heishui.

石向东跳离石垅, 呈星点状散布于石垅东侧, 跳石粒径 15 ~ 20 cm, 抛出距离一般为数十厘米。砾石长期暴露在地表的一面呈黑色或灰黑色, 而底面则呈土黄色, 跳石落地后一般都翻出土黄色的底面, 与原地砾石极易区分。

在黑水四社也有跳石现象。该处位于断裂东盘, 四社南呈东西向延伸的山坡脊上有一块 50 cm × 60 cm × 70 cm 的巨石在地震中向南跳出 2.6 m。

笔者认为, 这种跳石现象是地震时砾石所在盘岩体突然运动产生的惯性力作用的结果。此次发震断层西盘的跳石跳动方向都是由西向东, 表明地震时断层上盘突然产生了向西的倾滑错动, 惯性力的作用将地面上的砾石向斜上方(向东)抛出, 被抛出的砾石按抛物线轨迹落于东侧的一定距离处; 而断层东盘的跳石现象则以由北向南的跳动为主要特征, 说明地震时断层东盘发生了向北的相对运动。两盘跳石的这些特征, 无疑地表明本次地震是由西倾的玉龙雪山东麓断层发生以正断为主兼一定左旋走滑分量的运动所致。

#### 2.3.4 其它地表破坏现象

崩塌、雪崩、岩体崩塌主要分布于玉龙雪山冰川周围, 即玉龙雪山断层西侧。

### 3 地震的产生条件及发震机制分析

1467 年以来, 丽江-小金河断裂和中甸-永胜断裂地震活动可分为以下 4 个阶段:

第 1 阶段(1467 ~ 1520 年): 地震活动首先从剑川-宁蒗地震活动带(以下简称南带)西南端剑川开始, 然后是中甸-永胜断裂地震活动带(以下简称北带)东南端发生大震。

第 2 阶段(1625 ~ 1751 年): 南带西南端剑川地震反复活动, 其它带相对平静。

第 3 阶段(1901 ~ 1933 年): 地震活动首先从南带西南端开始, 然后迁移至龙蟠-石鼓一带活动, 进而向北迁移至北带北西段小中甸一带活动。

第 4 阶段(1947 ~ 1998 年): 本阶段可进一步细分成 3 个小时段: 1947 ~ 1955 年, 地震活动首先从兰坪(金沙江-红河断裂发震)开始, 然后迁移到剑川; 1961 ~ 1976 年, 地震活动首先从南带剑川开始, 然后迁移到北带北西段中甸-白地一带活动, 继之又转移到南带宁蒗一带活动; 1992 ~ 1993 年, 分别在北带南东段永胜、北西端中甸发生 3 次 4.0 ~ 5.8 级地震, 而在该带中段大具-大东一带地震表现平静, 直到 1996 年丽江大地震发生。

从上述的演化特征可以得出如下几点认识:

(1) 在现今区域应力场作用下, NW 向中甸-永胜断裂和 NE 向丽江-小金河断裂分别发生右旋和左旋粘滑错动, 使丽江地区成为川滇菱形断块西南部两个重要的地震活动带(以潜在走滑型为主);

(2) 地震活动的时空迁移具有明显的规律性, 每一个地震活跃阶段总是首先从靠近川滇菱形断块西南边界的剑川开始, 然后向断块内部迁移。第 1 至第 3 阶段地震活动主要集中在南带, 而第 4 阶段地震活动主要集中在北带, 这种不均匀现象是由于 2 条断裂在不同阶段具有不同的应力-强度关系所决定的, 前期, 丽江-小金河断裂为相对易动型, 故粘滑错动主要沿南带发生; 但随着破裂变形的发展和断块间应力调整, 中甸-永胜断裂于后期成为活动性较强的易动型断裂;

(3) 沿巨甸-九子海断块(金沙江断裂、丽江-小金河断裂和中甸-永胜断裂围限的三角形断块)南北两边界断裂的粘滑错动都是首先从西端开始, 然后再沿带往返迁移的。之所以如此, 主要是因为该断块相对于南北二侧的运动是整体向西的, 两断裂的西端都位于断块前方, 接近于潜在的运动消减区的部位, 显然, 只有这些部位先破裂, 才能引起破裂沿两边界断裂的进一

步发展;

(4) 巨甸—九子海断块南北两边界断裂的粘滑错动是导致 1996 年丽江大地震发生的直接原因. 因为这种错动的结果必然使地处该三角形断块东部尖端附近的区段遭到越来越大的东西向拉张作用, 近 NS 向东麓断层显然是该区段内的最薄弱部位, 因此它是该区段内主要的具有正断机制的孕震和发震断裂, 而它的孕震和发震都是三角形断块沿南北两边界断裂的粘滑错动所直接引起的. 因此这种以正断为主的发震机制是潜在走滑型区域构造应力场和特定的构造环境下出现的一种特殊类型.

## 4 结语

通过上述讨论, 可以得出如下几点看法:

- (1) 在现今近 NS 向潜在走滑型应力场作用下, NW 向中甸-永胜断裂和 NE 向丽江-小金河断裂上发生的地震以走滑错动为主;
- (2) 由于中甸-永胜断裂和丽江-小金河断裂的走滑错动导致巨甸—九子海三角形断块东部尖端出现局部拉张环境;
- (3) 丽江地震正是在这种局部拉张环境中近 NS 向西倾的玉龙雪山东麓断裂发生倾滑而触发的.

### [参考文献]

- [1] 王绍晋, 龙晓帆, 罗淑进. 丽江地震序列的震源机制、发震应力场和破裂特征[J]. 地震研究, 1997, 20(1): 26—34.
- [2] 秦嘉政, 刘祖荫, 张俊伟. 用地震标定律研究丽江 7.0 级地震的破裂过程[J]. 地震研究, 1997, 20(1): 47—57.
- [3] 韩新民, 周瑞琦. 丽江 7.0 级地震的烈度分布[J]. 地震研究, 1997, 20(1): 35—46.
- [4] 张建国, 周瑞琦, 吴伯黔, 等. 丽江 7.0 级地震地表破裂与变形特征[J]. 地震研究, 1997, 20(1): 58—56.

## A NEW IDEA ON THE MECHANISM OF LIJIANG $M_S7.0$ EARTHQUAKE

WANG Yun-sheng, WANG Shi-tian, LI Yu-sheng

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Based on the study of the regional tectonic framework and investigations of the Lijiang  $M_S7.0$  earthquake in 1996, the earthquake generating environments are systematically analyzed. Under the action of potential regional nearly NS compressive stress field, the sinistral slip of the NE-strike Lijiang-Xiaojinhe fracture and right-lateral slip of NW-strike Zhongdian-Yongsheng fracture resulted in local and extension environment in the eastern triangle end of Yulongxueshan-Jiuzihai faulted block, at last the north end of the nearly NS-strike and dipping-westwards Yulongxueshan's east piedmont fault was ripped up and the Lijiang  $M_S7.0$  earthquake happened.

**Key words:** Tectonic framework; Seismic fault; Lijiang  $M_S7.0$  earthquake; Earthquake mechanism