

2003 年大姚 6.2、6.1 级地震构造应力环境 及静态应力触发研究*

虎雄林¹, 解朝娣², 刘丽芳¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 云南大学 地球物理系, 云南 昆明 650091)

摘要: 利用 2003 年 7 月 21 日、10 月 16 日大姚 6.2、6.1 级地震余震序列的震源机制解资料, 采用滑动方向拟合法反演出大姚两次强震的构造应力, 定量给出其构造应力变化量。以反演得到的 2003 年大姚 6.2、6.1 级地震构造应力为基础, 分别计算两次强震后产生的静态库仑破裂应力变化, 研究大姚 6.2 级地震引起的应力变化是否触发了 6.1 级地震。结果显示: 两次地震发生后震源区构造应力场最大主压应力 S_1 作用由北东向近水平作用为主转为北东向水平作用, 6.2 级地震对 6.1 级地震有明显的触发作用。

关键词: 大姚地震; 震源机制解; 构造应力场; 库仑破裂应力; 滑动方向拟合

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)01-0047-10

0 引言

2003 年 7 月 21 日、10 月 16 日在云南省大姚县先后发生了 6.2、6.1 级地震, 震中位于滇中构造块体内部。该区历史上地震活动较弱, 1993 年前, 仅记录到 $M \geq 5.0$ 地震 5 次。然而自 1993 年以来, 该区地震活动明显增强, 中强地震频发, 相继发生了 1993 年 2 月 1 日大姚 5.3 级地震、1993 年 8 月 14 日姚安 5.6 级地震、2000 年 1 月 15 日姚安 5.9 级、6.5 级地震和 2003 年大姚 6.2 级、6.1 级地震。云南地区 6 级以上地震主要沿着一些主要断裂带分布, 地震的发生都能找到对应的发震构造, 但上述这 6 次地震没有发生在明显的断裂构造附近 (苏有锦, 2004)。为了探讨该地区强震发生的动力背景及双震发生的机制, 张建国等 (2009), 华卫等 (2006), 周龙泉等 (2007) 从地震构造、地壳速度结构及震源特征等方面对这 6 次地震进行了研究。

谢富仁等 (1994, 2011) 研究表明, 地壳中的应力状态与地震活动关系密切, 活动断裂带的构造应力方向、类型变化的部位是易发生强震的地点; 均匀区域应力场背景上的局部应力变化是

强震活动相对集中的地区。构造应力场是强震孕育、发生的动力学来源, 而断层之间相互作用引起的应力变化也能触发强震。本文旨在探讨 2003 年大姚两次强震的构造应力处于什么状态? 是否与区域构造应力一致? 两次地震的构造应力是否发生了改变? 2003 年 7 月 21 日大姚 6.2 级地震引起的应力变化是否触发了 10 月 16 日大姚 6.1 级地震。

构造应力的基础资料包括震源机制解、断层滑动反演、钻孔崩落、水压致裂和应力解除资料等。其中断层滑动反演、钻孔崩落、水压致裂和应力解除资料反映的是地壳浅部的应力状态, 而震源机制解资料主要反映了中、上地壳的应力状态, 地震的发生一般在十至数十公里深的地壳内部, 震源机制解资料能更好的反映构造应力环境。通常对震源机制解进行统计分析得到 P、T 和 N 轴的优势方位, 这个优势方位代表该地区的构造应力场方向。但 P、B、T 轴并不等同于构造应力场的 3 个主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 轴, 统计分析得到 P、T 和 N 轴的优势方位只能对构造应力场进行大致的方向性描述, 很难准确描述某一地区的构造应力场特征。

笔者利用 2003 年 7 月 21 日、10 月 16 日在大

* 收稿日期: 2011-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金“川滇地区构造应力场环境与地震活动性关系研究”(41004021)与“断层的地震成核-失稳过程受应力扰动影响的研究”(41104036)联合资助。

姚 6.2、6.1 级地震余震序列的震源机制解资料, 采用滑动方向拟合法 (许忠淮, 1985) 反演出两次强震的构造应力, 对其进行对比分析, 定量给出两次地震的构造应力变化量。

地震是应力积累到一定程度, 地壳岩层突然破裂、错动的一种自然现象 (徐纪人等, 2008)。强震的同震位错会引起附近区域的应力变化, 其通过持久性地改变施加在断层上的应力来影响后续地震, 应力变化将影响断裂的破裂失稳条件, 当应力变化为正值时, 加速了周围断裂或临近区域的应力累积, 使下次地震提前发生, 这种作用即为增震作用, 也称为地震触发效应; 相反, 应力变化为负值时, 周围断裂或临近区域的应力累积进程会被延缓滞后 (万永革等, 2000, 2002; 刘桂萍, 傅征祥, 2001; 张国民, 李丽, 1997; Harris, 1998; 吴小平等, 2007)。华卫等 (2006) 对 2003 年大姚 6.2、6.1 级地震库仑破裂静应力变化研究表明, 7 月 21 日 6.2 级地震对 10 月 16 日 6.1 级地震有明显的触发作用, 但其在计算地震库仑破裂静应力变化时没有考虑构造应力的影响。

笔者以反演得到的 2003 年大姚 6.2、6.1 级地震构造应力为基础, 分别计算两次强震后产生的静态库仑破裂应力变化, 探讨 2003 年 7 月 21 日大姚 6.2 级地震引起的应力变化是否触发了 10 月 16 日大姚 6.1 级地震。

1 震源区构造应力场反演

1.1 计算方法

(1) 断层面上剪应力的方向

设控制断层滑动的应力张量为 \mathbf{T} , 则作用于断层面的力 (图 1a)

$$\mathbf{f}' = \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}. \quad (1)$$

式中, \mathbf{n} 为断层面单位法向矢量。 \mathbf{f}' 可以分解成沿断层面的剪应力 τ'_{shear} 和垂直断层面的正应力 σ'_n

$$\mathbf{f}' = \tau' + \sigma'_n. \quad (2)$$

则断面上的剪应力

$$\tau' = \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}. \quad (3)$$

应力张量 \mathbf{T} 可以用含有归一化偏应力张量 \mathbf{D} 的形

式来表示 (Angelier, 1979; 谢富仁等, 1994; 许忠淮, 戈澍漠, 1984)

$$\mathbf{T} = t_1 \mathbf{D} + t_2 \mathbf{I}. \quad (4)$$

式中, \mathbf{I} 为单位矩阵; $t_1 (> 0)$, t_2 为任意数。由于只有偏应力张量 \mathbf{D} 才产生剪应力

$$\tau = \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}. \quad (5)$$

所以 τ 与 τ' 的方向相同, 如图 1b 所示。

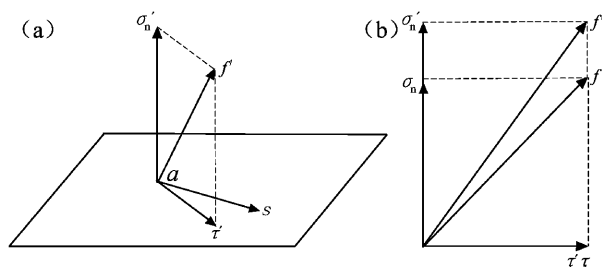


图 1 断层面上应力示意图

(\mathbf{n} 为断层面单位法向矢量, \mathbf{f}' 为断层面上应力, τ' 为断层面上剪应力, σ'_n 为断层面上正应力, S 为断层面滑动方向, α 为断层面上剪应力与滑动方向间的夹角; f , σ_n 和 τ 分别是偏应力张量作用于断面上的应力、正应力和剪应力)

Fig. 1 Schematic diagram of stress on the fault plane (\mathbf{n} is unit normal vector, \mathbf{f}' is stress, τ' is shear stress, σ'_n is the normal stress, S is the sliding direction, α is angle between shear stress and slip direction on the fault plane; f , σ_n and τ is the stress, normal stress and shear stress which are deviator stress tensor acting on the fault plane)

滑动方向拟合法提出 3 个基本假定: (1) 断层沿断面上剪应力的方向滑动; (2) 一组断层所分布的区域内存在着平均应力场; (3) 断层滑动相互独立。在此基本假定条件下, 滑动方向拟合法就是寻找一个适当的偏应力张量 \mathbf{D} , 使得作用于一组断面上的剪应力 $\tau_i (i = 1, 2, \dots, m; m$ 为断层数) 与断层滑动单位矢量 S_i 之间的夹角 α 最小 (谢富仁等, 1994; 许忠淮, 戈澍漠, 1984) (图 1a)。由于 t_1 、 t_2 的任意性, 只能由一组断层滑动单位矢量确定应力张量 \mathbf{T} 的 6 个独立分量中的 4 个, 即 3 个主应力的方向和 1 个表示主应力相对大小的应力形因子

$$\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3). \quad (6)$$

(2) 断层面上剪应力的相对大小

若要使断层真正产生滑动，剪应力的大小应符合摩擦滑动准则

$$\tau' = C_0 + \mu \sigma_n',$$

(7)

其中， μ 是摩擦系数， C_0 为聚合强度。对于断层 C_0 可以忽略不计 (Brace, Kohlstedt, 1980; Zoback, 1992)，式 (7) 可改写成

$$\tau' / \sigma_n' = \mu.$$

(8)

由于只有偏应力张量 D 才产生沿断层面的剪应力，球应力张量部分只对正应力有影响，由式 (3)、(4) 和 (5) 推出 (图 1b)

$$\tau / \sigma_n \geq \tau' / \sigma_n'.$$

(9)

也就是说，当偏应力张量作用在断层面上剪应力与正应力的大小之比满足

$$\tau / \sigma_n \geq \mu.$$

(10)

时，断层才能产生滑动。

1.2 基础资料

据云南数字地震台网测定，2003 年 7 月 21 日 23 时 16 分 30 秒，云南大姚发生了 $M6.2$ 地震，震中位置 (25.95°N , 101.23°E)，震源深度为 6 km。之后，10 月 16 日 20 时 28 分 03 秒，在该区再次发生 $M6.1$ 地震，震中位置 (25.92°N , 101.30°E)，震源深度为 5 km，位于第 1 次地震东南向约 8 km 处 (图 2)。震后，云南省地震局在地震现场布设了临时地震台网，自震后第二天进行了为期一个月的

近源观测，监测余震的发展趋势，获得了丰富的数字化余震记录。读取台网接收到的波形资料中的 P 波初动和振幅比，反演得到了两次主震和 49 个余震的震源机制解 (表 1、表 2)。其中大姚 6.2 级地震有 37 个余震震源机制解，大姚 6.1 级地震有 12 个余震震源机制解。

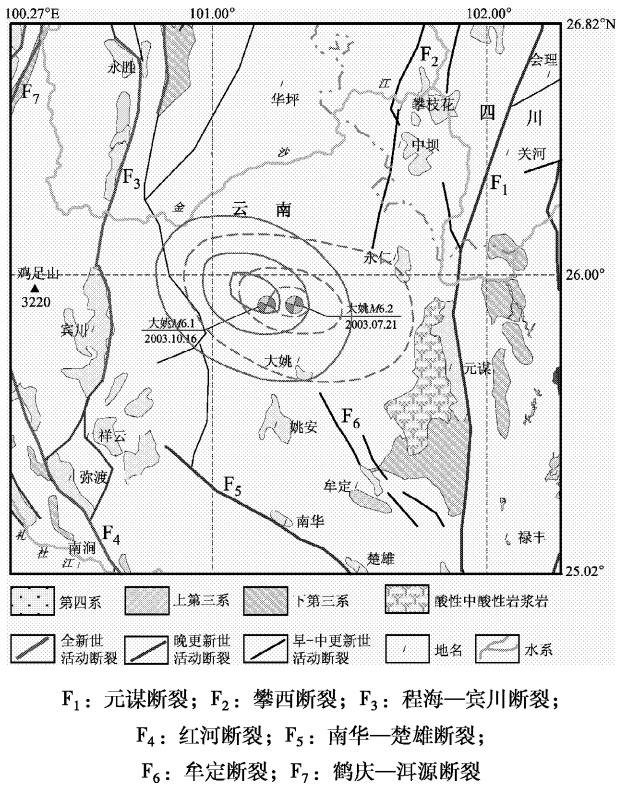


图 2 大姚地区地震构造图
Fig. 2 Seismotectonic map of Dayao area

表 1 大姚 M6.2、M6.1 地震震源机制解
Tab. 1 Focal mechanism solution of Dayao M6.2, M6.1 earthquakes

编号	发震日期 /年-月-日	震中位置		震级 <i>M</i>	深度 /km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴	
		φ_N /(°)	λ_E /(°)			走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	方位 /(°)	仰角 /(°)	方位 /(°)	仰角 /(°)
1	2003-07-21	25.95	101.23	6.2	6.0	14.77	83.72	-13.6	106.2	76.43	-173	329.8	14.0	61.1	5.08
2	2003-10-16	25.92	101.30	6.1	5.0	204.6	85.79	-9	295.3	80.94	-175.7	59.72	9.39	250.2	3.4

1.3 区域构造应力场

由大姚 6.2 级地震的 37 个余震、6.1 级地震的 12 个余震的震源机制解资料，利用 Max Wyss 和 Stefan Wiemer 的震源机制应力反演软件 ZMAP 程序，分别反演了大姚 6.2、6.1 级地震时，在大姚附近地区的区域构造应力场 (表 3)。从图 3a 可以看出，大姚 6.2 级地震所在地

区的区域最大主压应力以水平分量为为主 (倾角为 28°)，方位角呈南西向 (方位角为 240°)，代表应力值相对大小的 R 值为 0.4。从图 3b 可以看出，大姚 6.1 级地震所在地区的区域最大主压应力以水平分量为为主 (倾角为 6°)，方位角呈南西向 (方位角为 250°)，代表应力值相对大小的 R 值为 0.6。

表 2 2003 年 7 月 21 日、10 月 16 日大姚 6.2、6.1 级地震序列余震震源机制解
Tab. 2 Focal mechanisms of aftershocks of Dayao $M_{5.6}$ 2 earthquake on Jul. 21 and $M_{5.6}$ 1 earthquake on Oct. 16 in 2003

序号	发震时间			震中位置		震级 M	深度 /km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴	
	年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N(^{\circ})$	$\lambda_E(^{\circ})$	走向 /($^{\circ}$)			倾向 /($^{\circ}$)	滑动角 /($^{\circ}$)	走向 /($^{\circ}$)	倾向 /($^{\circ}$)	滑动角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	仰角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	仰角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	仰角 /($^{\circ}$)	
1	2003-07-21	23:57:15	26.00	101.07	3.8	8.0	18.43	71.25	-7.10	110.72	83.28	-161.12	336.00	18.06	243.27	8.31	288.43	18.75	
2	2003-07-22	00:35:24	26.00	101.07	3.3	8.0	349.13	38.29	-47.00	119.22	63.05	-118.30	345.30	61.10	229.39	13.57	259.13	51.71	
3	2002-07-22	00:55:22	25.97	101.20	3.0	6.0	0.49	65.10	-2.33	91.47	87.89	-155.08	318.80	18.89	223.26	15.76	270.49	24.90	
4	2003-07-22	04:26:30	25.97	101.17	3.3	6.0	357.83	52.24	-26.57	104.86	69.29	-139.11	327.82	43.08	227.79	10.54	267.83	37.76	
5	2003-07-22	08:09:38	25.93	101.20	4.3	4.0	26.92	85.79	24.67	294.99	65.40	175.37	158.40	14.03	253.69	20.26	296.92	4.21	
6	2003-07-22	18:08:40	25.95	101.23	3.2	9.0	161.82	68.37	-28.21	263.00	63.93	-155.77	121.22	34.85	213.22	2.87	71.82	21.63	
7	2003-07-22	19:00:06	25.97	101.22	3.9	11.0	223.43	75.52	26.57	126.30	64.34	163.89	353.06	7.44	87.19	28.88	133.43	14.48	
8	2003-07-23	12:12:00	25.92	101.22	3.1	2.0	239.68	70.71	-5.38	331.46	84.92	-160.63	197.16	17.23	104.08	9.85	149.68	19.29	
9	2003-07-23	12:42:29	26.00	101.05	4.3	8.0	202.14	57.39	-13.47	299.50	78.68	-146.66	165.75	31.32	67.00	14.02	112.14	32.61	
10	2003-07-23	14:46:29	25.92	101.23	3.5	7.8	187.37	70.32	-3.62	278.59	86.59	-160.28	144.69	16.27	51.34	11.31	97.37	19.68	
11	2003-07-23	22:31:11	25.92	101.23	3.9	10.7	206.74	81.69	18.26	114.01	71.94	171.26	339.28	6.72	71.58	18.75	116.74	8.31	
12	2003-07-24	07:52:41	25.92	101.23	4.5	9.1	202.14	80.34	2.61	111.70	87.43	170.33	157.30	4.99	66.54	8.65	112.14	9.66	
13	2003-07-24	12:37:19	25.92	101.24	3.6	9.2	357.08	85.79	-24.67	89.01	65.40	-175.37	310.31	20.26	45.60	14.03	267.08	4.21	
14	2003-07-24	13:01:44	25.92	101.24	3.1	9.8	350.93	87.13	-34.90	82.93	55.15	-176.50	301.14	26.07	42.33	21.63	260.93	2.87	
15	2003-07-24	15:18:50	25.92	101.26	3.0	10.8	245.90	67.48	-20.36	343.99	71.25	-156.14	205.76	29.87	114.33	2.50	155.90	22.52	
16	2003-07-24	22:27:16	25.93	101.23	3.0	13.0	345.50	68.53	-13.12	80.38	77.80	-158.01	304.47	24.09	211.65	6.28	255.50	21.47	
17	2003-07-26	03:15:09	25.98	101.05	3.2	8.1	14.95	85.17	-1.30	105.06	88.70	-175.17	330.10	4.33	239.91	2.50	284.95	4.83	
18	2003-07-26	12:52:25	25.94	101.21	3.0	8.9	38.31	80.15	-1.75	128.61	88.28	-170.15	353.87	8.18	263.05	5.72	308.31	9.85	
19	2003-07-26	13:24:35	25.94	101.21	3.4	7.5	21.73	77.76	8.74	289.86	81.46	167.62	336.13	2.57	245.45	14.77	291.73	12.24	
20	2003-08-04	16:33:29	25.97	101.08	3.6	9.2	22.35	83.72	24.25	289.53	65.90	173.12	153.62	12.20	248.50	21.47	292.35	6.28	
21	2003-08-05	20:49:04	25.93	101.23	4.6	11.9	32.83	71.25	-7.10	125.12	83.28	-161.12	350.40	18.06	257.67	8.31	302.83	18.75	
22	2003-08-06	10:32:19	25.94	101.21	3.2	8.0	187.18	77.05	7.63	95.46	82.57	166.94	141.80	3.84	50.81	14.48	97.18	12.95	
23	2003-08-09	22:27:47	25.94	101.21	3.1	10.0	194.33	80.61	-3.45	284.89	86.60	-170.89	149.95	9.05	59.28	4.21	104.33	9.39	
24	2003-08-10	17:06:07	25.94	101.20	3.7	10.2	25.64	77.76	-8.74	117.51	81.46	-167.62	341.92	14.77	251.24	2.57	295.64	12.24	
25	2003-08-12	23:59:40	26.00	100.98	4.5	10.0	178.28	70.08	-1.82	268.90	88.29	-160.07	135.36	15.19	41.86	12.70	88.28	19.92	

续表 2

序号	发震时间			震中位置		震级 M	深度 /km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴	
	年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N(^{\circ})$	$\lambda_E(^{\circ})$	走向 /($^{\circ}$)			倾角 /($^{\circ}$)	滑动力 /($^{\circ}$)	走向 /($^{\circ}$)	倾角 /($^{\circ}$)	滑动力 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	仰角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	仰角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	仰角 /($^{\circ}$)	
26	2003-08-18	18:00:17	25.91	101.25	4.7	6.0	184.23	60.13	-2.88	275.67	87.50	-150.10	144.09	22.52	46.00	18.74	94.23	29.87	
27	2003-09-06	13:31:39	25.98	101.25	3.0	10.0	175.44	60.50	-28.34	280.31	65.60	-147.27	139.56	39.82	46.88	3.21	85.44	29.50	
28	2003-09-09	12:57:51	25.95	101.27	3.1	3.0	170.88	65.41	-18.99	269.03	72.79	-154.17	131.58	30.23	38.73	4.88	80.88	24.59	
29	2003-09-12	20:53:18	25.93	101.27	3.0	4.0	166.31	64.34	-16.10	263.43	75.52	-153.43	127.19	28.88	33.06	7.44	76.31	25.66	
30	2003-09-24	06:59:54	25.93	101.23	3.8	10.0	1.72	70.08	1.82	271.10	88.29	160.07	318.14	12.70	224.64	15.19	271.72	19.92	
31	2003-09-24	07:15:26	25.97	101.23	3.2	14.0	1.34	46.92	14.51	261.32	79.46	135.99	318.38	20.71	211.35	37.76	271.34	43.08	
32	2003-09-27	09:06:29	25.93	101.22	4.2	10.0	207.08	70.08	-1.82	297.70	88.29	-160.07	164.16	15.19	70.66	12.70	117.08	19.92	
33	2003-09-27	10:17:20	25.95	101.25	3.1	10.0	221.51	60.50	5.73	128.68	85.01	150.38	178.77	16.66	81.04	24.18	131.51	29.50	
34	2003-10-11	17:11:21	26.02	101.23	3.0	13.0	188.68	85.02	-29.62	281.51	60.50	-174.28	141.04	24.18	238.76	16.67	98.68	4.98	
35	2003-10-14	00:18:48	25.97	101.20	3.0	15.0	172.04	83.59	-39.57	267.31	50.73	-171.71	121.92	31.77	226.14	21.63	82.04	6.41	
36	2003-10-16	11:56:28	25.93	101.28	3.9	5.0	349.89	86.17	-3.22	80.11	86.79	-176.16	305.02	4.98	214.98	0.44	259.89	3.83	
37	2003-10-16	21:07:33	25.92	101.33	3.9	6.0	165.78	65.60	-32.73	270.65	60.50	-151.66	126.53	39.81	219.21	3.21	75.78	24.40	
38	2003-10-16	21:28:12	35.90	101.33	3.6	2.0	179.73	84.92	-19.73	271.55	70.35	-174.60	133.98	17.48	227.19	10.09	89.73	5.08	
39	2003-10-17	00:28:02	25.93	101.27	3.1	5.0	2.23	57.20	32.73	253.03	62.97	142.54	308.81	3.54	215.30	44.78	272.23	32.80	
40	2003-10-17	06:41:32	25.97	101.27	4.7	7.0	178.71	75.52	-3.97	269.70	86.16	-165.70	135.08	12.96	43.36	7.44	88.71	14.48	
41	2003-10-17	08:14:39	25.93	101.27	3.8	5.0	160.04	85.08	0.87	69.97	89.13	175.08	115.11	2.86	24.90	4.09	70.04	4.92	
42	2003-10-17	11:44:53	25.91	101.28	3.0	5.6	224.69	81.46	34.07	128.96	56.36	169.72	352.38	16.66	92.24	29.78	134.69	8.54	
43	2003-10-17	11:53:46	25.93	101.24	3.3	7.9	181.85	80.04	-0.88	272.00	89.13	-170.04	137.36	7.64	46.50	6.41	91.85	9.96	
44	2003-10-17	13:18:43	25.92	101.26	3.1	4.5	355.87	72.61	42.19	250.71	50.14	157.09	118.55	14.00	221.35	41.65	265.87	17.39	
45	2003-10-17	22:31:27	25.92	101.26	3.1	7.2	22.24	87.13	34.90	290.24	55.15	176.50	150.84	21.63	252.03	26.07	292.24	2.87	
46	2003-10-18	02:39:52	25.92	101.27	3.1	5.5	179.20	81.82	-5.78	270.03	84.28	-171.78	134.76	9.85	44.46	1.73	89.20	8.18	
47	2003-10-20	05:01:12	25.90	101.17	4.0	5.0	216.49	65.10	-2.33	307.47	87.89	-155.08	174.80	18.89	79.26	15.76	126.49	24.90	
48	2003-10-27	10:16:54	25.90	101.30	3.8	2.3	356.13	75.23	2.66	265.45	87.43	165.21	311.71	8.54	219.85	12.24	266.13	14.77	
49	2003-11-01	02:09:22	25.93	101.23	4.7	3.4	199.63	51.13	34.36	86.41	63.93	135.68	145.71	7.64	46.84	48.98	109.63	38.87	

表 3 大姚 6.2、6.1 级地震构造应力场反演结果

大姚地震	第一主应力 S_1		第二主应力 S_2		第三主应力 S_3		R 值
	方位/(°)	仰角/(°)	方位/(°)	仰角/(°)	方位/(°)	仰角/(°)	
$M_{6.2}$	240	28	60	62	330	0	0.4
$M_{6.1}$	250	6	138	74	342	14	0.6

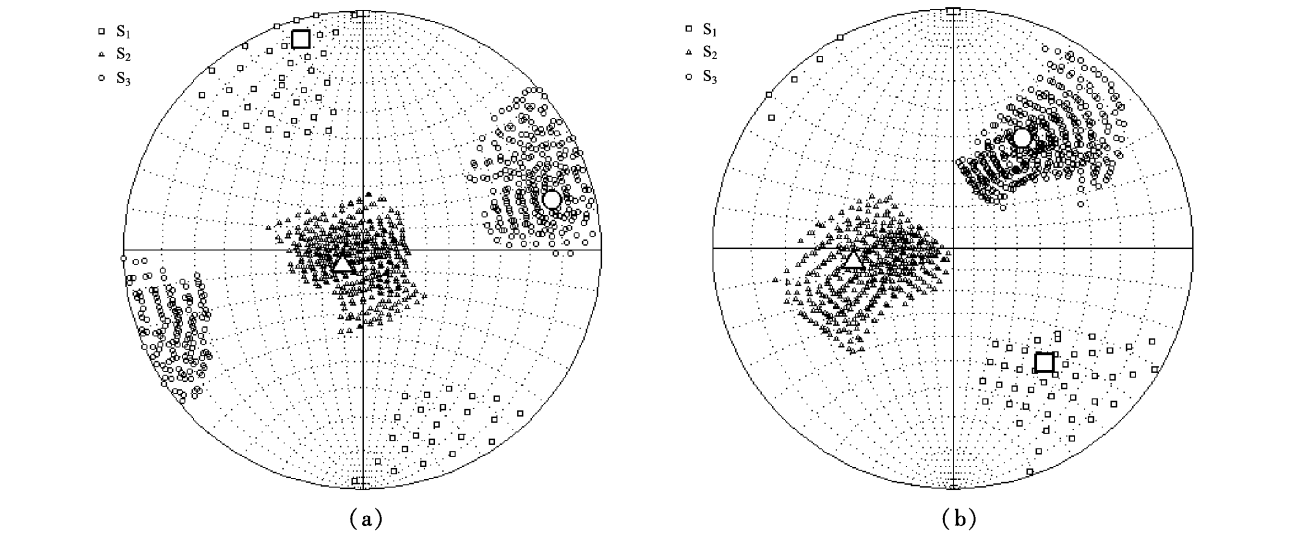


图 3 反演得到的大姚 6.2 级 (a)、6.1 级 (b) 地震区域构造应力场

Fig. 3 Regional tectonic stress field of Dayao $M_{6.2}$ (a), $M_{6.1}$ (b) earthquakes obtained in inversion

崔效锋和谢富仁 (1999) 通过利用震源机制解反演我国西南及邻区构造应力, 对应力场进行了分区, 大姚两次强震所在的区域位于应力场分区的 D 区 (表 4)。对比反演得到的大姚两次地震构造应力与应力场分区 D 区构造应力, 可以发现两次地震构造应力最大主应力轴 S_1 方位分别相差 21° 和 11° , 仰角分别相差 5° 和 17° ; R 值分别相差 0.01 和 19。虽然最大主应力轴 S_1 方位分别相差 21° 和 11° , 但其方位均为北北东向, 反演得到大姚两次地震构造应力的最大主应力轴 S_1 方位与区域构造应力基本一致。

表 4 滇西南地区 D 区构造应力场 (崔效锋, 谢富仁, 1999)

Tab. 4 Tectonic stress field of D-area in Southwestern Yunnan (Cui, Xie, 1999)						
第一主应力 S_1		第二主应力 S_2		第三主应力 S_3		Φ 值
方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角	
$\nearrow(^{\circ})$	$\nearrow(^{\circ})$	$\nearrow(^{\circ})$	$\nearrow(^{\circ})$	$\nearrow(^{\circ})$	$\nearrow(^{\circ})$	
261	23	95	67	353	5	0.41

3 最优取向断层面投影的库仑破裂应力变化计算

3.1 原理和方法

根据库仑破裂准则, 使岩石破裂失稳的库仑破裂应力为 (King *et al*, 1994)

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu(\sigma_\beta - p).$$

(11)

式中, σ_β 为断层面上的正应力, τ_β 为切应力, p 为孔隙流体压力, μ 为断层面介质的摩擦系数。

如果断层面与主应力 σ_1 轴的夹角为 β (图 4), 则正应力和切应力可以表示为

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta,$$

(12)

$$\tau_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta.$$

(13)

其中, σ_1 是最大主应力; σ_3 是最小主应力。式 (11) 为

$$\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\beta - \mu \cos 2\beta) - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3) + \mu p. \quad (14)$$

对式 (14) 求 β 的偏微分, 可以发现 β 满足 $\cot 2\beta = -\frac{1}{\mu}$ 时, 库仑破裂应力取最大值 σ_f^{\max} 。

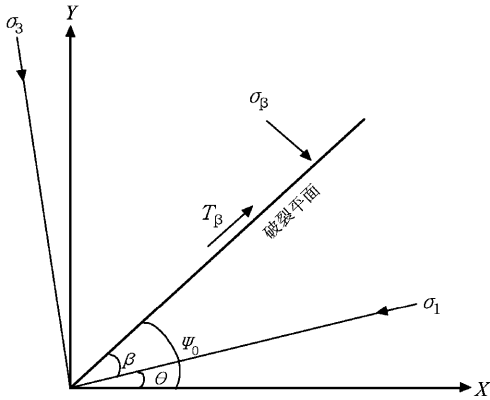


图 4 最优取向断层面上应力的坐标系示意图
Fig. 4 Sketch map of coordinate system on the fault plane stress in optimal orientation

如式 (11) 所示, 孔隙流体压力 p 调制着断层面上的有效正应力, 当岩石应力的改变远远快于岩石中的流体压力扩散, 则流体压力 p 可以通过 Skemtons 系数 B 在式 (11) 中得到反映, 并取视摩擦系数 $\mu' = \mu(1 - b)$, 则式 (11) 变为

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu' \sigma_\beta. \quad (15)$$

μ' 包括了孔隙流体和断层面上的介质特性, 一般 μ' 取 0.2 ~ 0.8。由于难以对地壳应力值直接进行精确测量, 因此利用库仑破裂应力变化可估计应力的相对变化, 式 (15) 可改写为

$$\Delta \sigma_f = \Delta \tau_\beta - \mu' \Delta \sigma_\beta. \quad (16)$$

式中, $\Delta \sigma_\beta$ 为断层面上的正应力变化, $\Delta \tau_\beta$ 为切应力变化。

库仑破裂应力变化定义于具体的断层面, 所谓最优取向断层面是指计算库仑破裂应力变化时, 某一产状接收断层面上计算得到的库仑应力变化大于同一地点其他产状的接收断层面上得到的应力变化幅值, 这类产状的接收断层即是最优取向

断层。以最优取向断层面投影计算得到的应力变化空间分布, 可以解释余震分布情况, 也可以预测未来后续地震活动的空间分布。

要计算最优取向断层面上的库仑破裂应力变化, 首先用 Okada (1992) 给出的静态位移和应变的解析表达式, 计算震源断层在接收断层面处产生的应变分量, 由胡克定律计算出应力分量 σ_{ij}^q 。然后将已计算出的 σ_{ij}^q 和区域构造应力 σ_{ij}^r 叠加得到总应力:

$$\sigma_{ij}^t = \sigma_{ij}^r + \sigma_{ij}^q. \quad (17)$$

由总应力 σ_{ij}^t 确定主应力轴方向, 如图 2 所示, θ 为最大主应力轴与 x 轴的夹角:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{xy}^t}{\sigma_{xx}^t - \sigma_{yy}^t} \right). \quad (18)$$

此时最优取向断层面的方向 ψ_0 通过 $(\theta \pm \beta)$ 得以确定。

虽然最优取向断层面的方向性通过总应力确定, 但是该断层面上的正应力和切应力变化值却只取决于震源断层产生的应力变化, 因此在最优取向断层面上的库仑破裂应力变化表示为

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx}^q \sin^2 \psi_0 - 2\sigma_{xy}^q \sin \psi_0 \cos \psi_0 + \sigma_{yy}^q \cos^2 \psi_0, \quad (19)$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_{yy}^q - \sigma_{xx}^q) \sin 2\psi_0 + \tau_{xy}^q \cos 2\psi_0. \quad (20)$$

求得 σ_{33} 和 τ_{13} 的相对变化 $\Delta \sigma_{33}$ 与 $\Delta \tau_{13}$, 进而最优取向投影方向上的库仑破裂应力变化 (King *et al*, 1994)

$$\Delta \sigma_f^{\text{opt}} = \Delta \tau_{13} - \mu' \Delta \sigma_{33}. \quad (21)$$

3.2 计算步骤

笔者使用的大姚地区的地壳模型见表 5, 该模型参考了国家地震局 82 测深工程有关资料和阚荣举和林中洋 (1986), 王椿镛等 (2002), 吴建平 (2001), 胡家富等 (2003), 周龙泉等 (2007) 有关云南地壳结构的研究, 并在上部增设了一个弹性半空间, 表 5 中 S 波速度 V_s 由经验关系式 $V_p = 1.73V_s$ 确定, 密度由周真恒等 (2001) 对云南地壳和上地幔的岩石学结构研究给出。

研究区域以大姚 6.2 级地震震中为中心的 $(100 \times 100) \text{ km}^2$ 的区域,如图 5a 所示,图中中间粗线表示地震断层在地面的投影。

利用 P 波初动和振幅比对大姚 $M_{\text{s}}6.2$ 、 $M_{\text{s}}6.1$ 级地震序列求解得到的震源机制解(表 1),结合两次地震的等震线图(图 2),得到两次地震的断层参数,如表 6 所示,断层长度据华卫等(2006)运用地震标定律对两次地震研究得到的结果,分别取 15.1 km 和 13.8 km。

表 5 大姚地区的地壳模型

Tab. 5 The crustal model in Dayao area

层数	层厚/km	P 波速度/km·s	S 波速度/km·s	密度/kg·m ⁻³
1	1.5	4.3	2.5	2.73
2	18.5	5.79	3.35	2.78
3	6.0	6.31	3.65	2.83
4	6.67	6.54	3.78	2.96
5	8.5	7.04	4.07	3.06
6	0.0	7.70	4.45	3.4

表 6 大姚主震断层参数

Tab. 6 Fault parameters of Dayao $M_{\text{s}}6.2$ 、 $M_{\text{s}}6.1$ earthquakes

地震 编号	震级 M	震源深度 /km	走向 /(°)	断层倾角 /(°)	滑动角 /(°)	断层长度 /km
1	6.2	6.0	106.2	76.43	-173	15.1
2	6.1	8.0	110.7	83.28	-161	13.8

笔者利用 Robinson 和 McGinty (2000) 根据 Okada (1992) 方法编制的 GNStress 程序计算地震产生的库仑破裂静应力变化。取 $\mu' = 0.75$, 计算结果见图 5, 图中蓝色区域代表库仑破裂应力变化为负的地区, 红色区域代表库仑破裂应力变化为正的地区, 空心圆圈代表地震。

3.3 库仑破裂静应力变化

根据表 5 中地壳模型和表 6 中大姚 6.2 级地震断层参数, 以反演得到的大姚 6.2 级地震震源区构造应力场为基础建立最佳断层投影面。由于大姚 6.2 级地震震源深度在 5 km。因此, 我们计算此次地震在深度为 5 km 处的地震库仑破裂静应力变化(图 5a)。由图可见, 6.2 级地震位于库仑破裂静应力变化为正值的地区, 库仑破裂静应力变化大约在 0.16 ~ 0.179 MPa 之间, 静态库仑破裂应力变化触发阈值一般为 0.1 MPa, 这表明 6.1 级地震可能是由 6.2 级地震触发的结果。

根据地壳模型(表 5)和大姚 6.1 级地震断层参数(表 6), 以反演得到的大姚 6.2、6.1 级地震震源区构造应力场为基础建立最佳断层投影面。由于 10 月 16 日 6.1 级地震序列震源深度在 2 ~ 10 km 之间, 平均深度 6 km。因此, 我们计算的是 6.2、6.1 级地震在深度为 6 km 处的地震库仑破裂静应力变化(图 5b)。由图可见, 库仑破裂静应力变化为正值的地区最大值为 0.098 1 MPa, 小于静态库仑破裂应力变化触发阈值 0.1 MPa。这表明

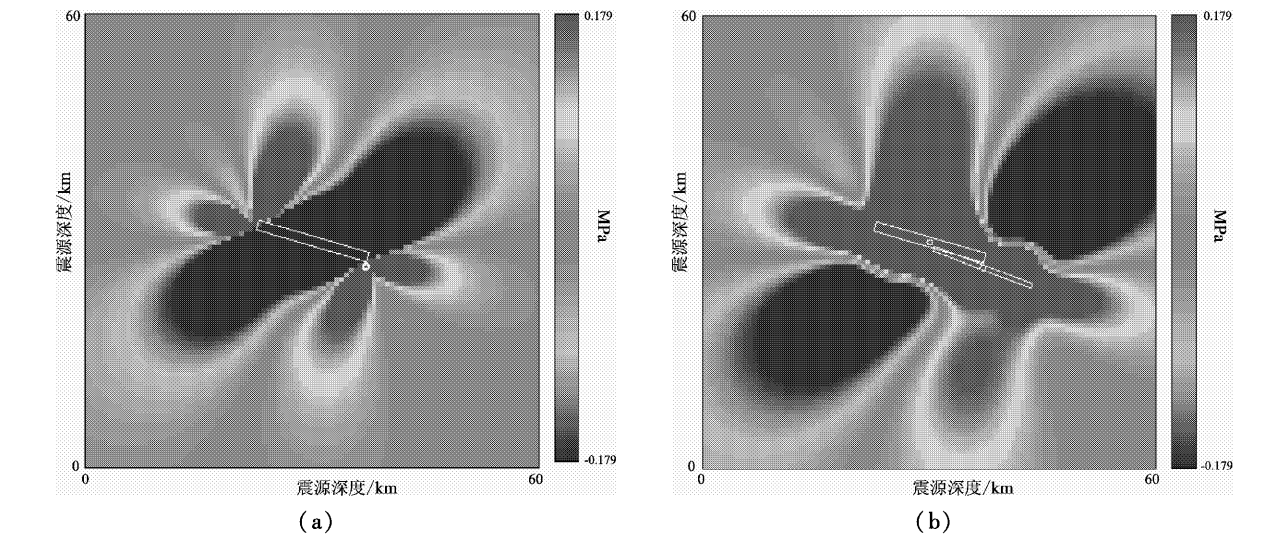


图 5 地震库仑破裂静应力变化计算结果
(a) 大姚 $M_{\text{s}}6.2$ 地震; (b) 大姚 $M_{\text{s}}6.1$ 地震
Fig. 5 Calculation results of variation of seismic coulomb static stress
(a) Dayao $M_{\text{s}}6.2$ earthquake; (b) Dayao $M_{\text{s}}6.1$ earthquake

6.1 级地震发生后, 由 6.2、6.1 级地震共同产生的静态库仑破裂应力为正值的地区虽然面积较大, 但其最大值为 0.098 1, 小于静态库仑破裂应力变化触发阈值, 其对后续地震的发生作用较弱。

4 结论与讨论

震源机制解滑动方向拟合法结果不仅具有实际物理意义, 并且是定量化的, 避免了利用震源机制解的 P、T 轴分析带来的系统偏差。另外, 由于震源机制解真实反映了深部地壳现今应力状况和断层构造的运动特性, 因而其结果可能比其它资料得到的结果可靠性更高。

由大姚 M6.2、M6.1 地震余震震源机制解, 反演得到的大姚两次地震震源区的区域构造应力场结果显示: 大姚 M6.2 地震震源区最大主压应力 S_1 方位角为 240° , 仰角为 28° , 相对大小的 R 值为 0.4; 大姚 6.1 级地震震源区最大主压应力 S_1 方位角为 250° , 仰角为 6° , 相对大小的 R 值为 0.6。大姚 6.1 与 6.2 级地震 S_1 方位角和仰角相比, 大姚 M6.1 地震 S_1 方位角相差 10° , 仰角相差 22° , R 值相差 0.2。这说明两次地震发生后构造应力场发生了微小改变, 震源区构造应力场最大主压应力 S_1 作用仍为北东东向水平作用。

此次大姚 6.2、6.1 级双震, 震中位置十分靠近, 余震的空间分布呈不均匀单侧展布, 其余震序列空间分布优势方向北西西—南东东的展布方向与震源机制节面 B、地震的等震线长轴走向基本一致, 表明两次地震受控于同一发震断层。大姚 6.1 级地震余震序列位于 6.2 级地震时断层破裂不充分的东南端, 表明大姚 6.1 级地震是 6.2 级地震在同一断层向东南端延伸的另一次破裂。地震库仑破裂静应力变化的计算结果表明, 7 月 21 日大姚 6.2 级地震对 10 月 16 日 6.1 级地震有明显的触发作用, 这种触发作用可能与两次地震受控于同一断裂相关。

参考文献:

崔效锋, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, 21(5): 513–522.

胡家富, 苏有锦, 朱雄关, 等. 2003. 云南的地壳 S 波速度与泊松比结构及其意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 33(8): 714–712.

华卫, 刘杰, 郑斯华, 等. 2006. 2003 年云南大姚 6.2、6.1 级地震序列特征分析及地震触发研究[J]. 中国地震, 22(1): 10–23.

阚荣举, 林中原. 1986. 云南地壳上地幔构造的初步研究[J]. 中国地震, 2(4): 50–61.

刘桂萍, 傅征祥. 2001. 海原大地震对古浪大地震的静应力触发研究[J]. 地球物理学报, 44(z1): 107–115.

苏有锦. 2004. 2003 年 7 月 21 日、10 月 16 日云南大姚 6.2 级和 6.1 级地震预测预报回顾与讨论[J]. 国际地震动态, (1): 18–21.

万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2000. 几次复杂地震中不同破裂事件之间的“应力触发”问题[J]. 地震学报, 22(6): 568–576.

万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2002. 地震应力触发研究[J]. 地震学报, 24(5): 533–551.

王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 等. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 24(1): 1–16.

吴建平, 明跃红, 王春糖, 等. 2001. 云南数字地震台下方的 S 波速度结构研究[J]. 地球物理学报, 44(2): 228–237.

吴小平, 虎雄林, Michel Bouchon, 等. 2007. 云南澜沧—耿马 $M_s 7.6$ 地震的完全库仑破裂应力变化与后续地震的动态、静态应力触发[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 37(6): 746–752.

谢富仁, 刘光勋, 梁海庆. 1994. 滇西北及邻区现代构造应力场[J]. 地震地质, 16(4): 329–333.

谢富仁, 张红艳, 崔效峰, 等. 2001. 中国大陆现代构造应力场与强震活动[J]. 国际地震动态, (1): 4–12.

徐纪人, 赵志新, 石川有三. 2008. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J]. 地球物理学报, 51(3): 770–781.

许忠淮, 戈谟谟. 1984. 用滑动方向拟合法反演富蕴地震断裂带应力场[J]. 地震学报, 6(4): 395–404.

许忠淮. 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. 地震学报, 7(4): 349–361.

张国民, 李丽. 1997. 强震成组孕育、成组发生过程中相互间影响的研究[J]. 地震, 17(3): 221–231.

张建国, 刘丽芳, 李西, 等. 2009. 姚安、大姚中强震区地震构造初析[J]. 地震地质, 31(3): 536–540.

周龙泉, 刘杰, 张晓东, 等. 2007. 2003 年大姚 6.2 和 6.1 级地震前三维波速结构的演化[J]. 地震学报, 29(1): 20–30.

周真恒, 向方英, 杨昆杰. 2001. 云南地区地壳和上地幔的岩石学结构[J]. 地震地质, 21(1): 69–78.

Angelier J. 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population[J]. Tectonophysics, 56(3–4): 17–26.

Brace W F, Kohlstedt D. 1980. Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments[J]. JGR, 85(B11): 6 248–6 252.

Harris R A. 1998. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. JGR, 103(10): 24 347–24 358.

King G, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquake[J]. BSSA, 84(3): 935–953.

Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. BSSA, 82(2): 1018–1040.

Robinson R, McGinty P J. 2000. The enigma of the Arthur's Pass, New Zealand, earthquake 2: the aftershock distribution and its relation to regional and induced stress fields[J]. JGR, 105(B7): 16 139–16 150.

Zoback M I. 1992. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project[J]. JGR, 97(B8): 11 703–11 728.

Research on Tectonic Stress Environment and Static Stress Trigger of Dayao $M6.2$, $M6.1$ Earthquakes

MAO Xiong-lin¹, XIE Zhao-di², LIU Li-fang¹

(1. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China*)

Abstract

Using the focal mechanism solutions of aftershock sequence of Dayao $M6.2$, $M6.1$ earthquakes occurred on Jul. 21 and Oct. 16 in 2003, we inversed the tectonic stress of these two strong earthquakes by slips direction fitting method and obtained their tectonic stress variation. Basing on the tectonic stress of these two earthquakes, we calculated static coulomb failure stress variation after these two strong earthquakes and studied whether the tectonic stress of Dayao $M6.2$ earthquake triggered the Dayao $M6.1$ earthquake. The results showed that the maximum principal stress S_1 of tectonic stress field which was nearly horizontal action with NE turned to NEE direction in the focal zone after two strong earthquakes. The Dayao $M6.2$ earthquake on Jul. 21 apparently triggered the Dayao $M6.1$ earthquake on Oct. 16 in 2003.

Key words: Dayao $M6.2$, $M6.1$ earthquakes; focal mechanism solutions; tectonic stress field; coulomb failure stress