

强震前后震源区应力场变化一例*

刁桂苓** 于利民 李钦祖

(中国石家庄 050021 河北省地震局)

摘 要

美国夏威夷 Kaoiki 地区 1983 年 11 月 16 日发生 $M=6.6$ 地震. 取该地区 1977—1985 年的 74 次 $M \geq 3$ 地震的震源机制解, 分时段进行系统聚类分析发现: 一般年份的震源机制类型和各类型所占比例差别不大; 6.6 级地震前后出现其它时间没有的直立节面走滑类型地震, 主震亦属此种类型, 此时还抑制了其它时间占优势类型地震的发生. 笔者认为, 这是一种可信的前兆现象. 取不同时间段震源机制解, 用滑动矢量拟合法反演震源区应力场的结果表明, 6.6 级地震前后出现方向较稳定的应力场, 其最大压应力主轴 σ_1 和最小压应力主轴 σ_3 分别呈近东西和近南北的水平方向. 中等压应力主轴 σ_2 基本直立, 且前震、主震、余震的震源机制与它们吻合. 其它时间的应力场都表现为 σ_2 取近水平的状态, 相应的地震破裂以低倾角水平滑动为主. 强震前后的震源区应力场与其它时段应力状态的显著差异表明, 应力场的变化控制了强震孕育、发生、发展的过程. 文中最后讨论了 Kaoiki 地区特定的环境因素及其作用.

关键词 震源区应力场; 震源机制; 前兆现象

1 引 言

地震是地下介质的应力达到极限强度后, 快速释放所积蓄能量的自然现象. 因此, 研究强震震源地区应力的分布及其随时间的变化, 对于了解和预测地震的形成过程具有重要的意义. 为寻找清晰描述地震孕育、发生、发展过程中应力分布形态的方法, 考察震源区的演化进程, 许多地震学家付出过努力. 对中亚一些地区的地震曾有过震源机制 P 轴转向的报道 (Sadovsky *et al.*, 1972), 但随后同一地区的地震也有 P 轴不再转向的事例 (Лукк, 1980). 我国也有以小震综合断层面解方法, 探讨强震前后应力场状态的研究结果 (华祥文, 1980; 刁桂苓、于新昌, 1980; 1982). 由于资料和方法所限, 未能给出应力场在三维空间变化的全部信息.

1983 年 11 月 16 日美国夏威夷岛 Kaoiki 地区发生 $M=6.6$ 地震. 震中位于北纬 19°

* 地震科学联合基金会资助项目 (91060).

1992 年 4 月 7 日收到初稿, 1992 年 12 月 16 日决定采用. 本文由冯德益副主编推荐.

** 现在地址: 天津市地震局.

25.79', 东经 155°27.09', 震源深度 10.9 km. 傅征祥(1991)计算出 1977—1985 年该地区 74 次 $M \geq 3$ 地震的震源机制解. 其中包括 Kaoiki 序列的前震、主震、余震的 41 个解, 震中分布在主震周围 10 km 的区域之内(图 1). 下面就来分析这些震源机制解的异同, 考察区域应力场的表现形态及其演变过程.

2 系统聚类分析

为了客观地比较不同震源机制解之间的异同, 我们提出应用系统聚类分析的方法(刁桂苓等, 1992). 设二机制解之间的两个 P 轴的夹角为 α , 两个 T 轴的夹角为 β , 定义二机制解的距离 $d = \alpha + \beta$, 把距离小于阈值 T (和 d 有关的参数) 的机制解划为同类. 对傅征祥给出的 74 个解, 采用最大距离法, 取阈值 $T = 120$, 将它们分作 6 类. 图 2 是 6 类解的 P, T 轴按类分别投影(下半球). 以矢量合成法求出的每类解的平均 P, T 轴取向, 及由此导出的相应平均节面, 也同时示于图 2 中. 每类解平均力轴诸参数列入表 1. 由图 2 可容易地把 6 类解分成 3 种情况: (1) 两个节面一为水平一为直立的 1, 2 类解, 这两类解形态相似, 方位不同, 占全部解的比例也高(33/74); (2) 两个节面均为倾斜的 3, 4 类解, 一为逆倾滑动, 一为正倾滑动; (3) 两个节面直立的 5, 6 类解, 也是形态相似, 方位不同. 情况(2)、(3)

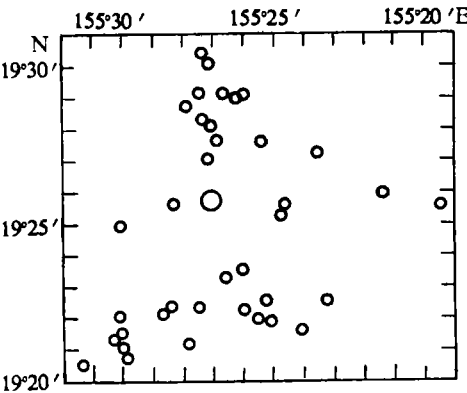


图 1 Kaoiki 6.6 级地震序列 $M \geq 3$ 震中分布

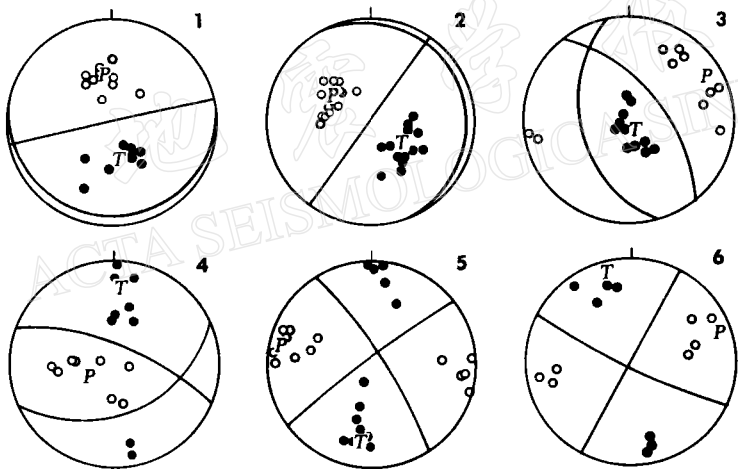


图 2 系统聚类法分类 P, T 轴及相应平均解取向 实心圆表示平均 P, T 轴

所占比例相近, 分别是 20/74 和 21/74. 为表示机制解随时间的变化, 以类型为纵坐标, 地震序号为横坐标给出图 3. 图中显示: 1) 序号 1—13 中只有 1, 2, 3, 4 类解, 且以 1, 2 类为主(10/13); 2) 序号 14—24 只有 3, 4, 5, 6 类解, 又以 5, 6 类居多(8/11). 序号 25 为主震, 属第 5 类; 3) 序号 26—53 各类解均有, 但 1, 2 类少于 3, 4 类, 3, 4 类又少于 5, 6 类, 三者的比例为 7 : 9 : 12; 4) 序号 54—74 又恢复如初, 仅有 1, 2, 3, 4 类解, 仍以 1, 2 类为主(16/21). 以序号划分出的 4 个阶段对应的时间是: ① 1977—1981; ② 1983. 1—1983. 10; ③ 1983. 11—1983. 12; ④ 1984—1985. 图 3 表明 5, 6 类解仅出现在 6. 6 级主震前后的 1983 年, 其它年份仅发生 1, 2, 3, 4 类解的地震, 且以 1, 2 类为主. 据以往的经验可认为前震-主震-余震序列主要由 5, 6 类解的地震组成, 而 1, 2, 3, 4 类地震则主要作为正常背景下的地震活动.

值得注意的是, 当第二阶段出现前震(5, 6 类)时, 抑制了正常背景下主要类型(1, 2 类)地震的发生, 表现出地震类型转换的特殊图像. 而主震之后的一个半月所对应的第二阶段, 各类地震均有发生. 表明主震爆发后震源区内处于一种不稳定的状态, 伴随能量的不断释放和应力的重新调整, 对 1, 2 类地震的抑制作用被减弱. 这和唐山地震序列余震机制相对紊乱的状况一致(李钦祖等, 1983). 总之, Kaoiki 地区的震源机制聚类分析给出一系列清晰的变化图像, 即: 正常背景活动—前震活动—主震爆发—余震调整—恢复正常活动. 上述震源机制类型演化进程描述了一个完整的震前、震时、震后发展过程. 因此, 将第二阶段中出现新的地震机制(5, 6 类), 并抑制了背景性的活动(1, 2 类地震), 作为 Kaoiki 6. 6 级地震的前兆.

表 1 6 类平均解的应力轴取向

类号	P 轴		T 轴		B 轴	
	Az	iH	Az	iH	Az	iH
1	170	48	346	40	78	80
2	122	47	310	44	216	86
3	243	79	351	14	151	76
4	63	28	184	74	281	68
5	101	85	9	77	211	14
6	254	84	162	85	31	8

* Az 为方位角, 从正北顺时针量度, iH 为力轴与垂直轴的夹角.

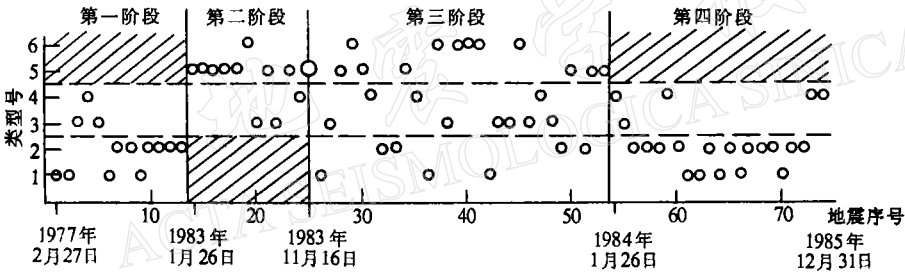


图 3 机制解类型随时间(地震序号)的变化

3 震源区应力场反演

上节分析是基于震源机制解的群体变化, 震源机制类型转化的本质应当是应力场的变化. 利用许忠淮(1985)编制的滑动方向拟合法反演平均应力场的程序, 对前述 4 个阶

段震源机制解再细划分成 10 组，并分别反演了应力场，所得各组 3 个应力主轴下半球投影于图 4。相应的数值列于表 2。图 4、表 2 中的前两组 No. 1—2 对应于第一阶段，No. 3—4 相应于第二阶段，No. 5—7 为第三阶段，No. 8—10 是第四阶段。No. 3—7 的结果相近，最大压应力主轴 σ_1 呈水平东西向，最小压应力主轴 σ_3 呈水平南北向，中等压应力主轴 σ_2 呈直立。主震震源机制解与这种应力场相符，前、余震的第 5、6 类解也与此种应力场吻合。No. 1, 2, 8, 9, 10 五组结果却表现为 σ_2 接近水平， σ_1 和 σ_3 也不同时呈水平，二轴与垂直轴的夹角 iH 差别较大，各组应力轴的空间取向不尽相同。反演中还判别出机制解的破裂面，第一阶段沿低倾角节面错动；第二阶段以直立节面走滑为主，倾斜节面倾滑为辅；第三阶段错动不规则，各种情况兼而有之；第四阶段又逐渐恢复到沿水平节面错动。以此看来，Kaoiki 地区在 6.6 级地震前后，存在着方向比较稳定的震源区应力场，它控制着该序列的孕育和爆发。前震、主震都是 NE 走向的直立

断裂走向滑动。当应力场中 σ_1 和 σ_3 呈水平、 σ_2 呈直立时，水平层面很难错动，仅当主震后震源区处于不稳定的调整状态时，才有少数此类地震发生。而当 σ_2 取水平方向时，直立断裂面又不会产生走向滑动，这也对所发生的地震起到制约作用，第一、第四两个阶段的水平层面地震错动为主就是证明。不同阶段应力场的差异与震源机制类型的转换相对应。这种动态图像，较全面的揭示出强震前后震源区应力场状态的演化进程。

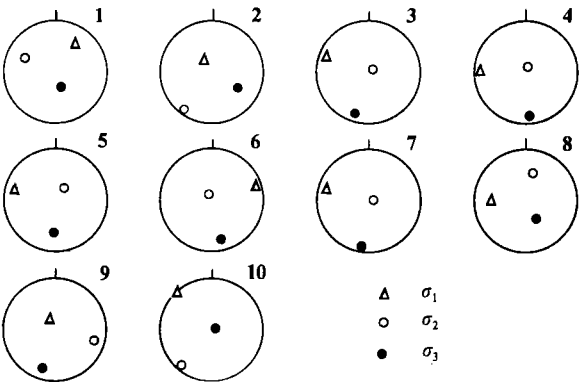


图 4 10 组机制解所得应力场投影

表 2 分时段反演应力场应力轴的空间取向								
组 号	起 止 时 间	解 数 目	σ_1		σ_2		σ_3	
			Az	iH	Az	iH	Az	iH
1	1977-02-07—1979-11-24	7	39	69	297	63	161	36
2	1979-12-05—1981-09-06	6	312	31	216	86	124	59
3	1983-01-06—1983-03-21	5	288	82	52	14	197	79
4	1983-03-24—1983-10-30	6	267	88	14	8	177	83
5	1983-11-16—1983-11-20	10	278	78	32	27	183	66
6	1983-11-23—1983-11-29	10	74	88	336	15	165	75
7	1983-12-04—1983-12-21	9	281	82	63	10	190	84
8	1984-01-26—1984-04-01	7	269	66	15	57	150	43
9	1984-05-09—1985-01-06	7	332	21	104	76	197	75
10	1985-03-04—1985-12-31	7	314	89	224	86	66	4

4 讨 论

根据重力和地震资料分析(Clifford and Alice, 1991)，夏威夷岛地壳下部为古老的海洋沉积层，上覆枕状玄武岩层，二层之间是一软弱界面，它在 Kaoiki 地区的埋深 10 km

左右,沿这一界面可发生低倾角的滑动.1975年11月29日,在附近的 Kalapana 发生的 7.2 级地震就是水平破裂面错动(Ando, 1979). Kaoiki 地区的背景性地震活动,也属水平或近水平层面的滑动.由此构成夏威夷岛南部地震活动的主体. Kaoiki 地区有一组 NE 走向的高倾角断裂穿过,它们切割到地下 10 km 的深度(图 5). 6.6 级主震和前震、余震大都是 NE 走向的直立断层面的走向滑动,表明该序列受局部环境因素的控制.图 6 为 6.6 级地震序列的震源深度分布剖面.可见,包括主震在内,大多数地震发生在 10 km 左右的深度.因此认为,埋深 10 km 左右的软弱界面及与其交汇的 NE 走向断裂组,构成 Kaoiki 地区可孕育发生地震的构造系统.

著名的 Kilauea 和 Mauna Loa 两座活火山位于 Kaoiki 地区东西两侧(图 5),尤其是 Kilauea 火山非常活跃,一百年来已喷发 50 余次,主火山口距 6.6 级地震震中仅 20 km. Kilauea 火山于 1983 年 1 月 3 日开始喷发,无论是喷发量,还是喷发持续时间,均居百年之最.岩浆从上地幔沿主火山口下部的岩浆通道上涌,并侵入到东裂谷带,深度达地下

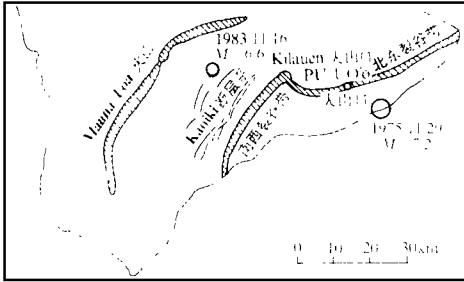


图 5 夏威夷岛南部火山、构造、强震分布

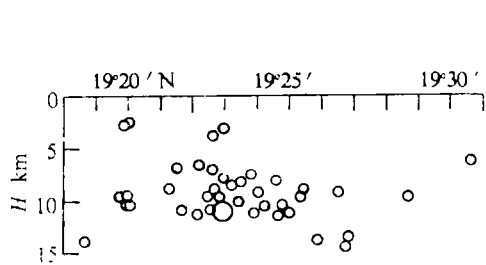


图 6 Kaoiki 6.6 级地震序列震源深度剖面 ($M \geq 3$)

10 km 的层位(Ryan, 1988), 喷发位置是在东裂谷带上的 PU'UO'O 火山口(Heliker *et al.*, 1986). 岩浆的上涌和侵入必然对周围岩体产生强大的压力. 由图 5 可见, 岩浆通道(Kilauea 主火山口下部)、岩浆侵入体部位(东裂谷带)和喷发位置(PU'UO'O 火山口)均位于 Kaoiki 地区的东部, 它们的方向和 1983 年的应力场中最大压应力主轴 σ_1 相同, 和 6.6 级主震震源机制中的 P 轴吻合, 并且喷发的起始时间与前震发生的时间相符, 和出现稳定应力场的起始时间一致. 上述事实表明, Kilauea 火山活动和 Kaoiki 6.6 级地震序列具有内在的联系. 正是这种来自火山-岩浆活动的力源, 作用在 Kaoiki 地区的构造之上, 构成特有的应力系统.

Kaoiki 地区存在着高、低倾角不同的断裂面, 究竟在何种断面上产生地震错动, 事实证明和应力场中应力主轴的空间取向有关. 当然, 也包括傅征祥(1991)指出的应力水平和断面力学性质二因素的共同作用.

本文给出的结果, 描述了应力场对强震序列的控制作用及演化进程, 籍此提取前兆信息, 供地震预报研究借鉴. 这是建立在特定的应力、构造环境因素之上. 迄今尚未见到大陆强震以水平断层面滑动的报道. 因环境条件不同, 大陆地震也会有不同的变化图像, 需要我们具体地分析研究.

参 考 文 献

- 刁桂苓、于新昌, 1980. 唐山地震前后京-津-唐-张地区的综合断层面解. 西北地震学报, **2**, 3, 39—47.
- 刁桂苓、于新昌, 1982. 海坨山地震前综合断层面解矛盾比的变化. 地震, **2**: 16—17.
- 刁桂苓、于利民、李钦祖, 1992. 震源机制解的系统聚类分析, 中国地震, **8**, 3, 86—92.
- 傅征祥, 1991. 1983年11月16日夏威夷 Kaoiki 地震($M=6.6$)前后的小震震源机制解. 地震学报, **13**, 139—149.
- 华祥文, 1980. 唐山强震前后北京、天津周围地区应力的变化过程. 地震学报, **2**, 130—146.
- 李钦祖、刁桂苓、戴英华, 1983. 唐山地震序列的应力释放调整过程. 地球物理学报, **26**, 224—236.
- 许忠谁, 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场. 地震学报, **7**, 349—362.
- Ando, M., 1979. The Hawaii earthquake of November 29, 1975; low dip angle faulting due to forceful injection of magma. *J. Geophys. Res.*, **84**, 7616—7626.
- Clifford, H. T. and Alice, E. G., 1991. Flexure and seismicity beneath the South flank of Kilauea volcano and tectonic implication. *J. Geophys. Res.*, **93**, B5, 4276—4278.
- Heliker, C., Griggs, J. D., Takahashi, T. J. and Wright, T. L., 1986. Volcano monitoring at the U. S. geological survey's Hawaiian volcano observatory. *Earthquake and Volcanoes*, **18**, 1, 3—71.
- Ryan, M. P., 1988. The mechanics and three-dimensional internal structure of active magmatic systems, Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **93**, B5, 4213—4248.
- Sadovsky, M. A., Neksesov, I. L., Nigmatullaev, S. K., Latynina, L. A., Luck, A. A., Semenov, A. N., Simbireva, I. G. and Uldinov, V. I., 1972. The processes preceding strong earthquake in some regions of middle Asia. *Tectonophysics*, **14**, 3/4, 295—307.
- Лукк, А. А., Нересов, И. Л., Юнча, С. М., 1980. Временные вариации механизма очагов землетрясений гарьского района, Изв. АН. СССР, Физика Земли, **2**, 10—21.