

# 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  $\sigma_1$  和最小压应力主轴  $\sigma_3$  分别呈近东西和近南北的水平方向. 中等压应力主轴  $\sigma_2$  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  $\sigma_2$  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  $19^{\circ}$

\* 地震科学联合基金资助项目(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  $\alpha$ , 两个  $T$  轴的夹角为  $\beta$ , 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)

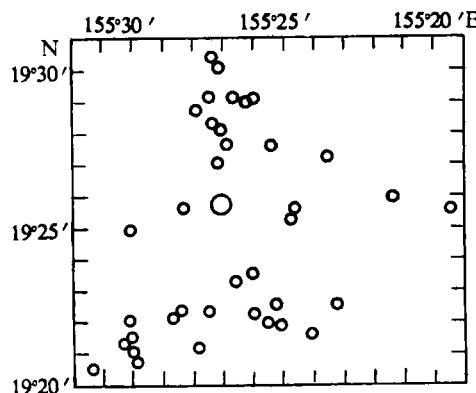


图 1 Kaoiki 6.6 级地震序列  $M \geq 3$  震中分布

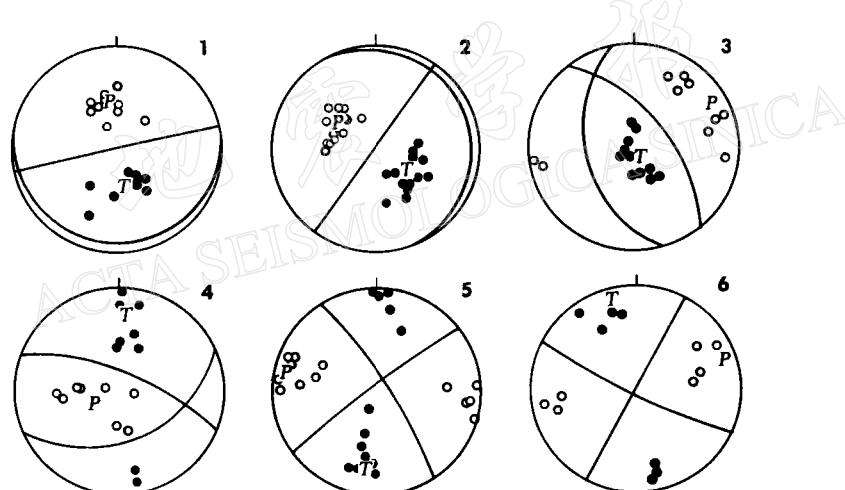


图 2 系统聚类法分类  $P$ ,  $T$  轴及相应平均解取向实心圆表示平均  $P$ ,  $T$  轴

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，以类型号为纵坐标，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。

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。

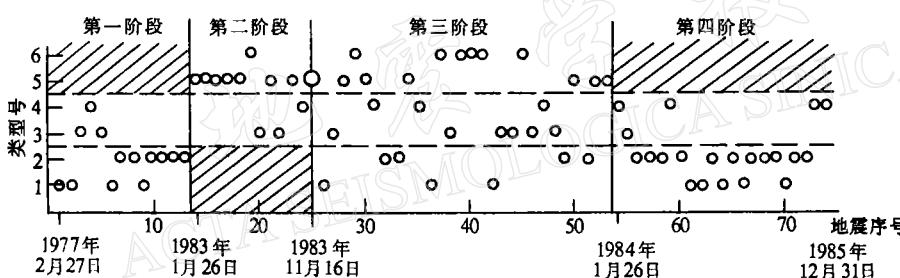


图 3 机制解类型随时间(地震序号)的变化

### 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  $\sigma_1$  呈水平东西向, 最小压应力主轴  $\sigma_3$  呈水平南北向, 中等压应力主轴  $\sigma_2$  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  $\sigma_2$  接近水平,  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  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  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  呈水平、 $\sigma_2$  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  $\sigma_2$  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。

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	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$	
			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

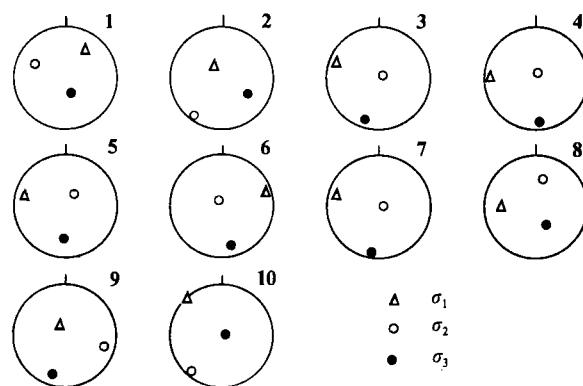


图 4 10 组机制解所得应力场投影

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

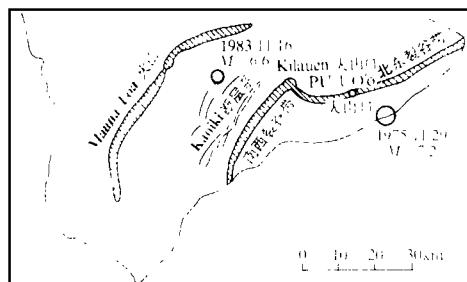


图5 夏威夷岛南部火山、构造、强震分布

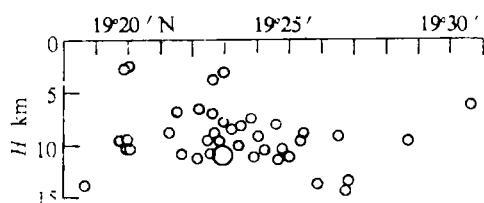


图6 Kaoiki 6.6 级地震序列震源深度剖面( $M \geq 3$ )

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 $\sigma_1$ 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，究竟在哪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.
- 许忠淮, 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., Simbirseva, I. G. and Uldmov, V. I., 1972. The processes preceding strong earthquake in some regions of midle Asia. *Tectonophysics*, 14, 3/4, 295—307.
- Луцк, А. А., Нерсесов, И. Л., Юнча, С. М., 1980. Временные вариации механизма очагов землетрясений гармского района, Изв. АН СССР, Физика Земли, 2, 10—21.