

美国加州洛马普列塔7.1级地震概况

朱传镇

(国家地震局地球物理研究所)

刘蒲雄

(国家地震局分析预报中心)

叶洪

(国家地震局地质研究所)

摘 要

本文是中国地震代表团于洛马普列塔地震后赴美进行实地考察,并做短期研究的工作报告的一部分,文中概述了该地震的基本参数、震前的预测预报情况、地震序列的时空分布特征、震源构造及地表变形,以及这次地震前后观测到的地震前兆现象。最后,本文对加州北部地区未来地震发展趋势,作了简要的分析和讨论。

1989年10月18日00时04分(UTC),在美国旧金山东南约100公里的圣克鲁斯山区发生7.1级地震,根据当地的地名,命名为“洛马普列塔(Loma Prieta)”地震。这次地震是继1906年旧金山8.3级地震以后,加州北部地区最大的一次地震,也是美国地震史上的一次重要事件。

一、地震基本参数

根据美国地质调查局科罗拉多地震中心和门洛帕克分部测定的结果,这次地震的基本参数为:①发震时间:1989年10月18日00时04分15秒(UTC);②震中位置:37°2.19'N、121°52.98'W,震中位于圣克鲁斯城东北约16公里处;③震源深度:18.5公里;④震级(M_s):7.1;⑤地震矩(M_0): 2.2×10^{26} 达因-厘米;⑥震中地面最大加速度:水平0.64g、垂直0.66g。

二、震前预测

1. 长期预测

多年来,美国对圣安德烈斯断层的运动性质、地震活动性和地球物理特征进行了多方面的深入分析与研究,它们是这次地震长期预测的基础。具体来说,他们从5个方面对这次地震的危险性作了估计。

(1) 基于假定沿圣安德烈斯断层的强震发生时间服从对数正态分布,结合考虑其平均复发周期,按贝叶斯原理,分段计算了未来不同时段强震发生的条件概率,对旧金山半岛地区计算的结果是,未来30年内发生7级地震的概率为50%,而在南段圣克鲁斯山区,30公里长破裂发生的概率为30%;后一地段正是这次洛马普列塔地震震中所在地段。

(2) 根据对1906年旧金山8.3级地震地表位移的测量和蠕动率的变化,认定圣克鲁斯山地段属闭锁区,具有积累弹性应变能的条件。

(3) 从20多年来微震深度分布剖面,发现在这次地震震源周围存在一个深度上的“空区”,可能是一个高应力积累区。

(4) 根据50年代以来加州北部地震活动的明显增强,以及根据应变释放轮回性分析,采用时间可预报发震模型,计算求得80年代中期至90年代初,旧金山海湾地区将很可能发生一次强震。

(5) 由形变和地震活动突然增加,结合沿断层带蠕动的端点,以及邻近地区中强地震的发生,提出的加州10年(1986—1996)强震($M \geq 5.7$)预测图上,洛马普列塔附近地区也是一个危险点。

2. 中期预测

按苏美地震合作研究计划,以凯利斯-博罗克(Keilis-Borok)院士为首的苏方研究组对加州和内华达西部地区的地震危险性进行了较全面的研究,他们主要采用称之为 TIP(Time of Increased Probability)方法,根据地震活动时间和空间分布变化的特征,通过建立描述这些特征的函数,定量地寻找发震概率增长的时段,在此基础上他们提出1989年4月以后的一年左右时间内,加州北部将会发生 $M \geq 6.4$ 地震,他们并将此结果以苏联科学院地球物理所所长萨道夫斯基院士的名义,于1989年5月正式发函给美方研究组高级科学家诺波夫教授。虽然上述意见并未引起美方的足够重视,但仍不失为一次较好的中期预测。

3. 短期地震危险性估计

1989年8月8日,在这次7.1级地震震中附近发生了5.2级地震,当地强烈有感,同时引起美国地质调查局地震工作者的密切关注,基于对该地区长期预测背景的认识,结合对这次5.2级地震序列能量分布异常的分析,他们认为该地区数日内有发生更强地震的可能,于是当日下午就将此意见通知给加州紧急事务办公室。加州紧急事务办公室接此通知后经过

讨论很快发文给圣克鲁斯等5个市县,劝告他们务必做好防震准备。与此同时,又通过报纸与电视将此消息向广大公众发布。这样做的结果并未在社会上引起混乱和不安,实际上采取上述措施在后来的7.1级地震中起到了一定的预防作用,收到了减轻灾害的效果。这次7.1级地震震前没有临震预报。

三、地震序列特征

在7.1级地震发生后头三天内,可定位的地震有2301次,其震中沿圣安德烈斯断层分布约长50公里,深度从22公里到2公里,在沿断层走向的剖面内构成一个向南西以 70° 角倾斜的断面(见图1)。迄今为止,最大余震震级为5.2和4.5以上的地震共10次(如表1)。

值得注意的是在7.1级地震发生之后约33小时,发生一次5.0级地震,这次地震的位置比较特殊,它不在圣安德烈斯断层面上,而是发生在断层上盘8公里左右的深度,离圣安德烈斯断层水平距离约7—8公里,这个地震及其后发生的小地震勾画出一个向北东倾的小断面,与7.1级地震主破裂面构成Y字型式。表明洛马普列塔地震震后应力调整主要集中在具

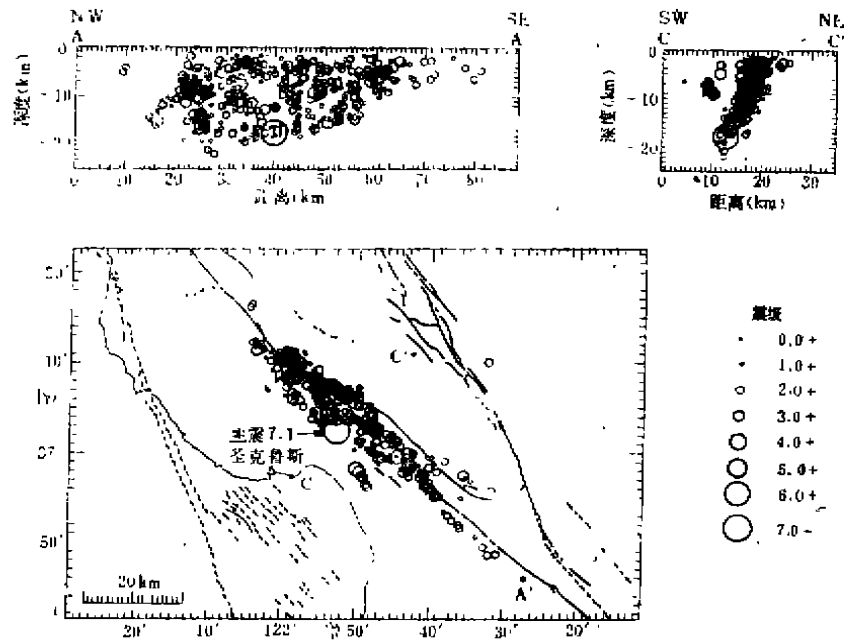


图1 1989年10月18日加州洛马普列塔7.1级地震

表1 洛马普列塔M7.1地震序列($M \geq 4.5$)

发震时刻				震中位置	震级
月	日	时	分		
10	18	00	04	37°02' N, 121°53' W	7.1
			12	37°07' N, 122°01' W	4.5
			25	37°02' N, 121°48' W	4.8
			41	37°10' N, 122°03' W	5.2
			02	37°04' N, 121°44' W	4.5
			10	36°59' N, 121°51' W	4.5
10	19	09	53	36°55' N, 121°41' W	4.5
			14	36°57' N, 121°50' W	5.0
10	21	22	15	37°03' N, 121°53' W	4.6
10	25	01	27	37°05' N, 121°50' W	4.5

有逆冲分量的断层上盘。

为研究洛马普列塔地震序列的性质，我们利用美方提供的序列资料，开展了以下几方面的工作：

①分析序列的衰减情况，求得衰减系数 $h = 1.2$ ，表明衰减是比较快的。

②这次地震序列的 b 值为 0.67 ± 0.07 ，其随时间的变化较稳定。

③应变释放曲线呈现较好的线性，未见有明显加速现象。

④按等待时间方法，取 $M_L \geq 4.5$ 地震，求得拟合方程为 $\log \Delta t = 0.91 \log t + 0.29$ ，即具有良好的线性，且系数 0.91 与国内地震相应的系数 0.92 十分接近。

⑤由广义前震震级估算主震震级。洛马普列塔地震虽没有直接前震，但 8 月 8 日发生的 5.2 级地震可看作为广义前震，按我国的经验关系 $M = 0.57 M_f + 0.76 \log t + 1.81$ ，以 $M_f = 5.2$ 及相应的时间间隔 $t = 69$ 天代入，得 $M = 6.9$ 。

⑥由余震分布尺度，按关系式： $M = 3.3 + 2.1 \log L(\text{km})$ 估算，求得主震震级约为 6.9 (取 $L = 50 \text{km}$)。

⑦从地震序列中部分较强地震震源机制来看，情况比较复杂，除走滑型机制外，还有逆冲型、张裂型等，反映了震后应力的调整过程。

此外，未见到余震序列的空间分布范围有明显扩展的迹象。

综上所述，可判定洛马普列塔地震主震余震型序列。

美国地质调查局地震学家在一次强震发生后基本上采用统计方法对其后可能发生的较强地震作出概率估计。他们基于地震时间过程为非均匀泊松过程的假定，通过震级-频度关系以及余震衰减的大森公式，结合加州 60 余次震例，给出洛马普列塔 7.1 级地震后，不同时段内，不同震级地震发生的概率，这种概率性预测比较符合当前对地震的认识程度，对社会各个方面采取必要的抗震措施，有一定的实际意义。

四、震源构造和地表变形

洛马普列塔 7.1 级地震发生在 1906 年旧金山大地震破裂带的最南端，根据美国地质调查局加州中部地震台网 267 个 P 波初动资料，计算得到的震源机制解表明，主震破裂面的走向为 $NW50^\circ \pm 8^\circ$ ，倾向 $SW220^\circ \pm 8^\circ$ ，倾角 $70^\circ \pm 10^\circ$ ，是一个右旋走滑兼逆冲的断层运动，水平位移与垂直位移近于相等。由长周期体波和面波反演得到的结果与上述结果基本一致。根据震后大地测量数据反演得到的结果表明，主震破裂的水平位移为 1.6 ± 0.2 米，垂直位移为 1.1 ± 0.4 米，主震破裂由 18 公里深处向上扩展到离地面约 4—6 公里处终止，向两侧扩展各约 17—18 公里，南到 Pajaro 空区，北到 Lake Elsmar，总长度为 35 公里左右。因此，是一条由下往上、由中心向两侧扩展的破裂，破裂总面积约为 190 平方公里。按地震波资料推算，整个破裂过程持续约 7—10 秒。

与以往加州大地震相比，这次洛马普列塔地震的一个重要特点是其地震破裂未达到地表。沿震中附近的圣安德烈斯断层线，只观测到局部小型裂隙带，其中最长的—条带约有 900 米，它由无数条小裂隙成左阶羽列式构成，宽约 3—30 米，震后 16 小时内仅观察到 2 厘米的右旋水平位移，显然不能将其认为是地震破

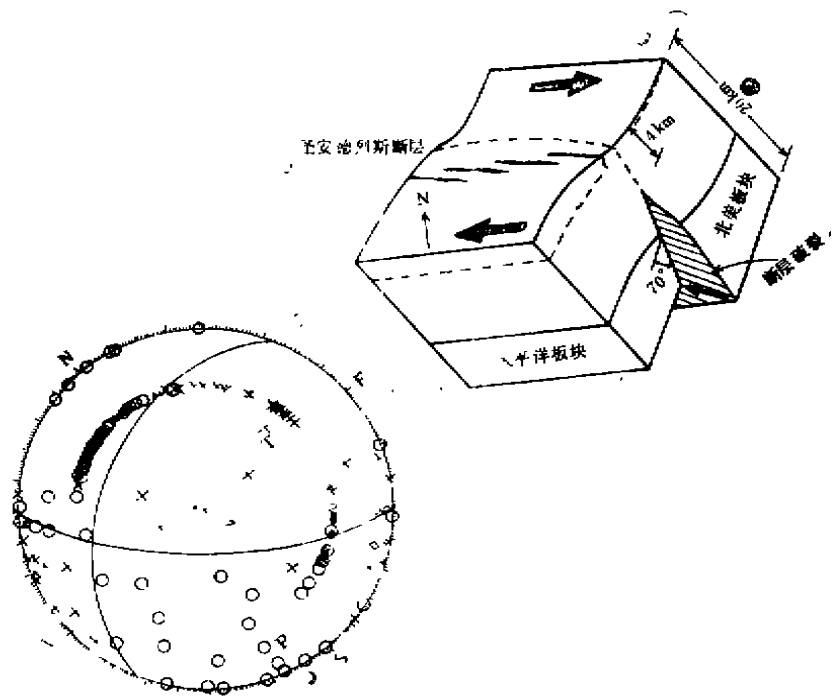


图2 主震机制解

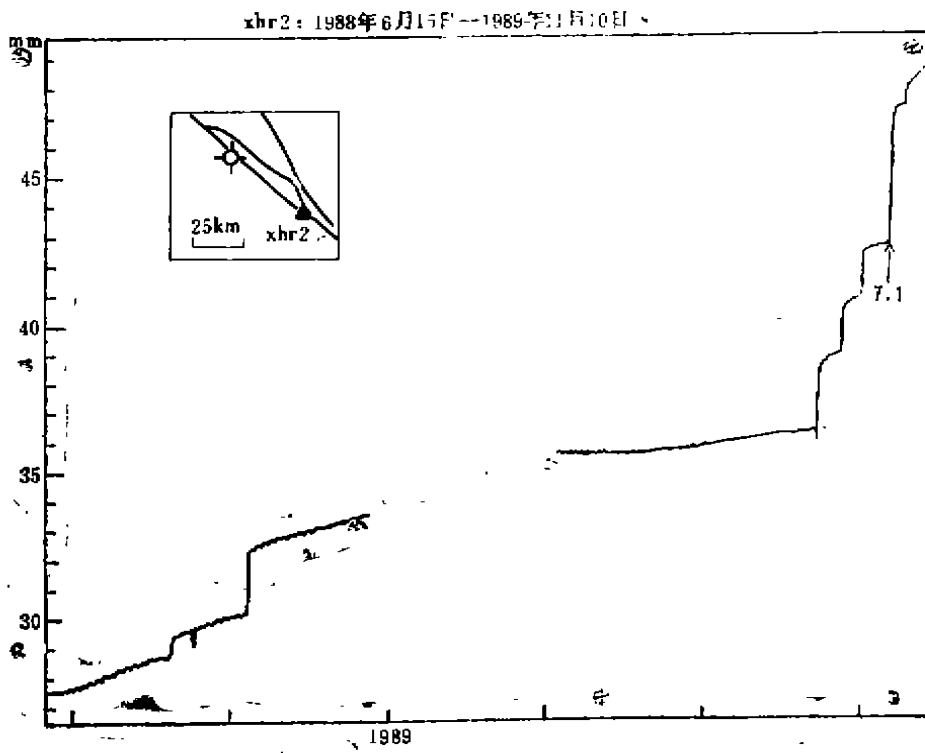


图3 蠕动变化

裂面达到地表现象。

根据11个高精度光电测距仪和4个GPS测量结果，震后断层上盘上升最高可达45厘米，而下盘下降最低达15厘米。由于地震断层的运动在断层上盘及下盘的地表分别形成引张和挤压变形（图2）。在震中西北方向约12公里处，裂隙带发育在山顶夷平面部位，最长达

700米，很多为具有左旋平移分量的拉张裂隙，水平位移最大可达75厘米，垂直位移相对较少。在断层下盘，沿圣克鲁斯山东北边缘，断断续续有一些挤压性的地表变形，在NE-SW方向上约有25厘米的水平缩短。有人认为断层下盘的这些挤压变形，可能同断层下盘一侧的一些次级NW向断层，在主断层运动的影响下

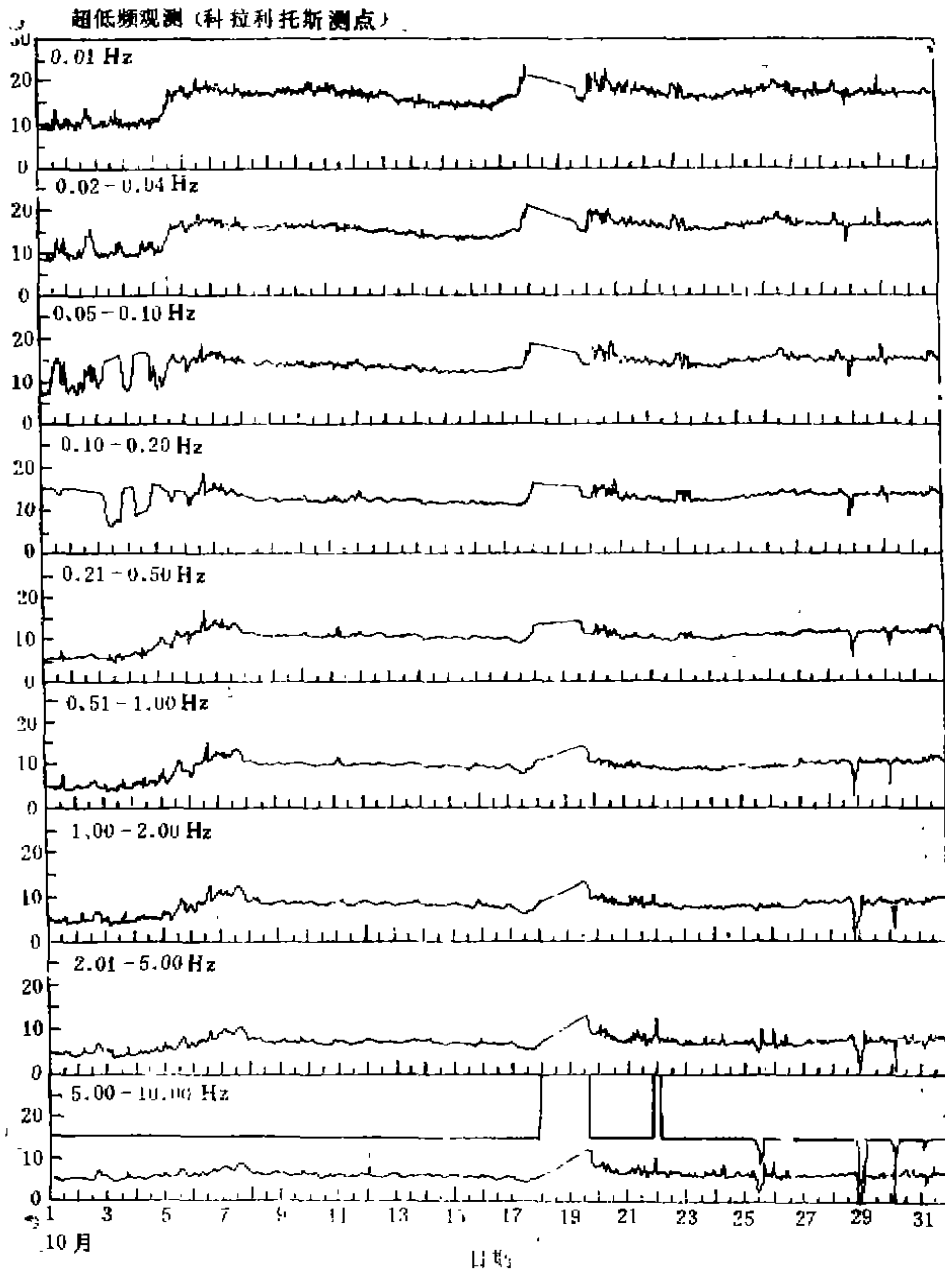


图4 电磁波观测记录

发生小规模逆冲运动有关。

五、前兆观测

震前，除了地震观测台以外，在震中周围前兆观测较少，最近的前兆观测点距主震震中约40公里。现将有关这次地震前兆观测情况分述如下：

1. 地震活动

震前16个月震中及其周围地区，中强地震活动显著增加，震源区内曾先后发生过两次5.2级地震，但在临震前24小时内，呈现平静状态，没有观测到直接前震。

2. 形变

每月在震中附近进行大地测量，初步分析表明，至少在震前两周以内，未发现短期异常变化。距震中约40公里处，设有体积应变仪。从记录上来看，同震反映是很明显的，但未见到震前有任何异常特征。

跨断层的蠕变观测，同震反映十分清楚。只有一个测点(Xhr 2)上，观测到震前一个半月内蠕变出现3次阶跃性变化(如图3所示)，但是否属地震前兆，尚待进一步研究。

3. 地下水动态

在震中东北方向上，距震中约40公里处有一观测井，井深约200米，8月8日观测到的水电导显著增大，之后在高值上摆动，10月11日，即在震前6天，又进行了一次观测，发现水电导再次增加，10月17日(当地时间)就发生了7.1级地震。是否可认为这是一种地震前兆，美国地质调查局的有关人员正在对此进行研究。另据了解，在震中西北方向约35公里处，一公园小溪的水流量在震前1.5小时突然增大。

4. 电磁波

斯坦福大学 STAR 实验室，在大学校园内($\Delta \approx 50$ 公里)及近震中的科拉利托斯($\Delta = 5$ 公里)设有电磁波观测点，前者主要观测中、高频段电磁波(10Hz—32kHz)，震前未发现异常信号；后者观测超低频电磁波(ULF)，频率范围为0.01—10Hz，共分成9个频道(如

图4)。由图可见，自10月5日开始 ULF 全段干扰明显增大，震前一天(即16日)在0.2—5Hz段，干扰背景明显降低，而在震前3小时左右，0.01—0.5Hz段干扰信号又陡然增加。经过详细核实，在此期间内未发现有大气电磁场的扰动，也无小地震可能造成的仪器振动，初步认为可能是地震的一种前兆。

5. 地磁

由于受经费所限，本区地磁总强度观测已于1986年初停止，因而没有取得资料。

六、趋势估计

洛马普列塔7.1级地震发生后，使整个加州的地震形势更加严峻，特别是旧金山海湾周围地区面临另一次强震的威胁。图5为加州北

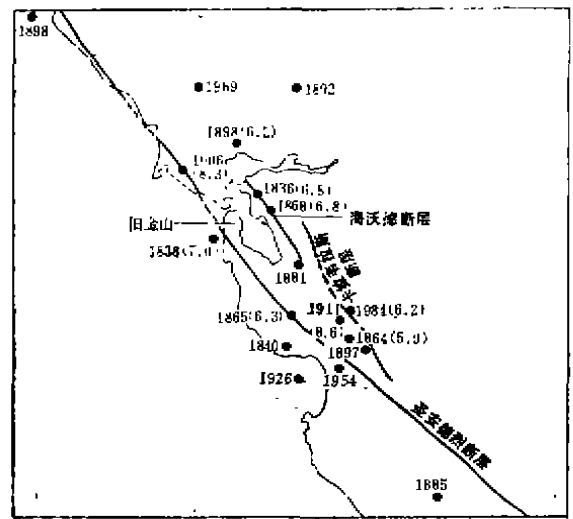


图5 加州北部历史地震分布

部地区历史强震震中分布。由图可以看到在旧金山海湾地区存在3条走向基本平行的活动断层，即圣安德烈斯断层、海沃德断层和卡拉韦拉斯断层。这几条断层上发生的一些大地震($M \geq 6.0$)之间存在显著的相关性，例如：1865年在本次地震附近发生6.3级地震，三年后的1868年在海沃德断层上发生了6.8级地震，又如1836年在海沃德断层上发生6.8级地震，不久于1838年在旧金山地区发生7.0级地震。我们则研究了较大时空范围内加州北部强震活动

特点,发现内华达西部地震与圣安德烈斯断层北段的强震($M \geq 6.0$)之间出现交替活跃,活跃期一般可持续20年左右,在此期间可出现数次7级乃至8级地震。根据对加州北部地区应变能释放曲线形态的分析,本区自1979年已开始进入地震活跃期,因此,预计本世纪末以前,对加州北部地震的危险性是不容乐观的。由于旧金山海湾地区经济发达,人口稠密,为了尽量减少未来地震对人民生命和财产造成的损

失,目前美国地震学家与其他有关科学家正在从多方面对未来地震发展趋势及可能的震害作全面系统的研究和估计,以期把预测预防工作做在大地震来临之前。

笔者对美国地质调查局门洛帕克分部的巴孔和奥本海默(W. Bakun and D. Oppenheimer)博士在工作中所给予的大力支持和协助,表示感谢。

BRIEF ACCOUNT OF THE EARTHQUAKE WITH Ms 7.1 IN LOMA PRIETA, CALIFORNIA, U. S. A.

Zhu Chuanzhen

(Institute of Geophysics, SSB)

Liu Puxiong

Ye Hong

(Center for Analysis and Prediction, SSB) (Institute of Geology, SSB)

Abstract

This paper is a part of the work report of on-the-spot investigation and short term study by the Chinese seismological delegation after the earthquake of October 18, 1989 in U. S. A. It overviews the basic parameters, forecasting and prediction before the earthquake, temporal and spatial distribution characteristics of the earthquake sequence, source structure and land surface deformation of the Loma Prieta earthquake, as well as precursory phenomena observed before and after this earthquake. Finally, the development trend of future earthquakes in northern California is briefly analyzed and discussed.

1989年10—12月的全球地震动态

吴佳翼

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

1989年第四季度,全球发生7级以上地震4次,都在环太平洋带上,在全年的四个季度中,地震活动经历了两低两高的过程。美国加州的洛马普列塔发生7.1级地震。日本本州以东海域发生7.3级地震。亚欧带本季度地震活动基本平静。中国华北的大同-阳高地震群,震级都在6级以下。

1989年10—12月,全球共发生19次6级以上地震(按美国资料《PDE》周报),另有7

次接近6级的地震。中国台网补充了13次6级以上地震。附表中包含了4次7级以上地震,