

岷县 $M_s6.6$ 地震震源机制及构造应力研究^①

刘旭宙^{1,2}, 张元生^{1,2}, 秦满忠^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,

甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用甘肃省测震台网观测到的主震波形记录的首动符号求解了 2013 年 7 月 22 日岷县 $M_s6.6$ 地震主震的震源机制, 并与哈佛及 usgs 发布的震源机制进行了对比, 对这一地区过去发生过的若干次 $M_b4.5$ 以上的地震也利用首动符号求解了震源机制, 发现与 $M_s6.6$ 地震的震源机制形态较为相似。进而利用 2010 年至 2011 年甘东南宽频带流动台阵的大量近震资料, 对在震中距 50 km 范围内, 并且接近岷县 $M_s6.6$ 地震发震断裂临潭—宕昌断裂的中小地震进行了检索, 对检索到的地震进行首动识别后得到首动数目大于 10 个、并且对震源包络良好的中小地震 31 个, 利用小震的震源机制解求解了该区域的区域应力场。结果表明这一区域的主压力方向为 NEE 方向。

关键词: 岷县 $M_s6.6$ 地震; 震源机制; 构造应力

中图分类号: P315.332 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)03-0432-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0432

Analysis of the Focal Mechanism and Tectonic Stress of Minxian $M_s 6.6$ Earthquake

LIU Xu-zhou^{1,2}, ZHANG Yuan-sheng^{1,2}, QIN Man-zhong^{1,2}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The Minxian $M_s 6.6$ earthquake, the largest destructive earthquake to affect Gansu province, occurred on July 22, 2013. Its epicenter at $N34.54^\circ, E104.21^\circ$ was located between the northern fringe fault of western segment of Qinling Mountain and the Lintan—Tanchang fault. After the earthquake occurred, we solved the focal mechanism of the main shock with P wave polarity from the waveforms obtained from the Gansu province seismic network. We then compared the solution with the focal mechanisms published by Harvard and the United States Geological Survey (USGS).

During the 10 years prior to the Minxian earthquake, several earthquakes stronger than $M_b 4.5$ occurred in this region. We solved the focal mechanisms of these earthquakes with P wave polarity data, and we compared the focal mechanisms with those of the Minxian earthquake. Similar morphologies were revealed, and each contained a larger thrust component.

The focal mechanism of a small earthquake is more difficult to solve than that of a large earthquake. However, because small earthquakes occur more often than large earthquakes, it is desirable to refer to the tectonic stress by the focal mechanisms of multiple small earthquakes to decrease the effects of local structures and to highlight the features of the region tectonic stress.

① 收稿日期: 2013-08-30; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013067

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IESLZ03)

作者简介: 刘旭宙(1976—), 男, 高级工程师, 从事地震学研究. Email: liuxz@gssb.gov.cn

Previous methods used to determine tectonic stress from multiple focal mechanisms include grid search. However, because the smallest search grid is 5° , the search grid was too large to meet the exact solution of the tectonic stress. Other methods ignore the data accuracy or cannot give the error of parameters. The newest method obtains the optimal solution of tectonic stress using finer grid parameters of $1^\circ \times 1^\circ$ and gives the error of parameters. In this paper, we solve the tectonic stress using this method.

A broadband mobile seismometer observation array was conducted in southeastern Gansu in 2010–2011, in which abundant near shock waveforms were obtained. We examined small earthquakes in close proximity to the Lintan–Tanchang fault, which was the triggering seismic fault of the Minxian earthquake, at a distance of less than 50 km. To maintain the reasonableness of the focal mechanism, after identifying the P wave polarity of selected earthquakes, we identified 31 earthquakes in which the P wave polarity was more than 9 and had a good envelope to the source. We solved their focal mechanisms, which we used to solve the tectonic stress in this region. The results show that the direction of the main pressure was 70.12° , which is very close to the results of previous studies. The main pressure was NEE in this region because of the combined action of the Qinghai–Tibetan Plateau, Ordos, and South China blocks. After the Minxian earthquake, a series of aftershocks occurred, from which and we expect to obtain additional data for analyzing the changes of tectonic stress.

Key words: Minxian $M_s6.6$ earthquake; focal mechanism; tectonic stress

0 引言

2013 年 7 月 22 日岷县发生 $M_s6.6$ 地震,发震断裂为临潭—宕昌断裂。该断裂在此次 $M_s6.6$ 地震的震中附近 50 km 范围内在过去十几年中已经发生过 4 次 $M_b4.5$ 以上的地震,对比上述地震的震源机制解可以更深入地理解临潭—宕昌断裂在这一地区的发震构造和应力机制。我们首先通过 $M_s6.6$ 地震震源机制解的比较检验本文使用的 P 波初动求解震源机制的方法,然后用 P 波初动的方法求解以上几次地震的震源机制解,并进行比较。

单个地震的 P、B、T 轴反映的是地震前后震源区的应力变化,而不能代表震源所在区域的构造应力场^[1],而一定区域内多个地震的平均 P、B、T 轴方向就能够代表该区平均构造应力场方向^[2]。甘东南宽频带流动台阵是由中国地震局地质研究和兰州地震研究所共同实施的宽频带野外台站观测项目,在

其观测期间记录了甘东南地区大量的中小地震,在此次 $M_s6.6$ 地震发震前两年的时间内于断层附近也获得了一定数量的地震。利用这些小震的震源机制可以求解此区域在 $M_s6.6$ 地震前的构造应力情况,深入认识 $M_s6.6$ 地震的构造应力背景。

1 主震震源机制

震后我们收集了甘肃省及临近台网的 49 个 P 波初动,并用 P 波初动做出了震源机制解。然后将该震源机制解与哈佛 Global CMT 以及美国地质勘探局(USGS)发布的震源机制解进行了对比。表 1 为震源机制解的各项参数,其中哈佛 Global CMT 的震源机制解 Exp0 项为 25,我们用 P 波初动得出的震源机制解的矛盾比为 0.082。图 1 为震源机制解图示。

因为本文采用 P 波初动解得震源机制,所以其

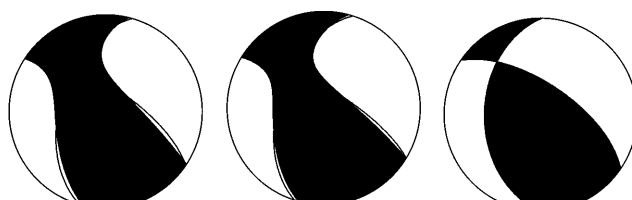
表 1 不同来源的岷县 $M_s6.6$ 震源机制解参数对比

Table 1 Comparison of the focal mechanisms parameters of Minxian $M_s6.6$ earthquake from different authors

来源	节面 I			节面 II			P 轴	P 轴	T 轴	T 轴	B 轴	B 轴
	走向 / $^\circ$	倾角 / $^\circ$	滑动角 / $^\circ$	走向 / $^\circ$	倾角 / $^\circ$	滑动角 / $^\circ$	方位/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$
CMT	304	69	43	196	50	153	0.62	0.42	-1.04	-0.57	0.19	0.68
USGS	302	73	41	198	51	158	65	14	167	40	320	46
本文	304	64	56	181	41	139	58	13	168	57	320	30

表2 本区 $M_b 4.5$ 以上地震信息Table 2 Information of the earthquakes with magnitude $\geq M_b 4.5$ in the region

发震日期	时刻	震中纬度/(°N)	震中经度/(°E)	震源深度/km	震级
2003-11-13	02:35:10.34	34.712	103.834	10.0	5.1(M_{wc})
2004-09-07	12:15:49.78	34.682	103.781	10.0	5.2(M_b)
2011-02-23	13:32:13.04	34.415	103.857	12.1	4.6(M_b)
2011-11-01	17:18:06.99	34.538	104.172	31.9	5.0(M_b)



(a) 哈佛GlobalCMT发布 (b) usgs发布 (c) 本文初动解

图1 不同来源的岷县 $M_s 6.6$ 震源机制解图示Fig. 1 The focal mechanisms of Minxian $M_s 6.6$ earthquake from different authors

解为最优节面解,哈佛 Global CMT 以及美国地质勘探局(USGS)则给出的是矩张量解。就两个可能的发震节面来看差别并不大。可以看出在保证初动数量和对震中有较好的包络的情况下 P 波初动震源机制解可以取得较好的效果。

2 该地区 $M_b 4.5$ 以上地震震源机制解

临潭-宕昌断裂为 $M_s 6.6$ 地震的发震断裂,该

表3 本区中强地震震源机制解

Table 3 The focal mechanisms of moderat-strong earthquakes in the region

日期	节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		B 轴 / (°)		矛盾比	初动数
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角		
2003-11-13	174	70	101	324	22	63	255	25	100	63	350	10	0.095	21
2004-09-07	176	53	115	318	44	60	248	5	146	69	340	20	0.111	18
2011-02-23	190	73	122	306	36	31	257	21	137	52	180	30	0	41
2011-11-01	14	36	149	130	73	58	243	21	3	52	140	30	0.085	47

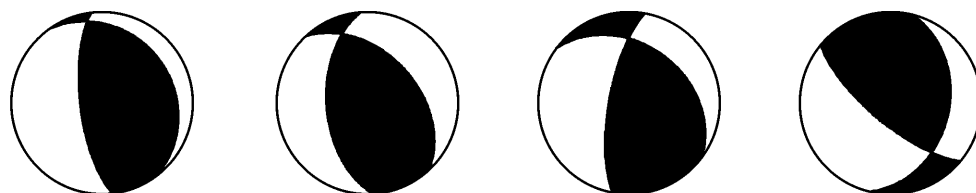
(a) 2003-11-13 $M_w 5.1$ (b) 2004-09-07 $M_b 5.2$ (c) 2011-02-23 $M_b 4.6$ (d) 2011-11-01 $M_b 5.0$

图2 本区中强地震震源机制解图示

Fig. 2 The focal mechanisms of moderat-strong earthquakes in the region

4 次地震的震源机制都含有较大的逆冲成分。其主压力轴 P 轴较为接近, T 轴的差别也不是很大。临潭-宕昌断裂位于西秦岭北缘断裂和东昆仑断裂东段之间的区域,此区域内有多条弱走滑、强逆

断裂在此次 $M_s 6.6$ 地震的震中附近十几年来已经发生过多起 $M_b 4.5$ 以上的地震。表 2 为根据 USGS 检索到的地震目录,表中的时间均为世界时。

我们同样用 P 波初动的方法做出了这几次地震的震源机制解,表 3 为震源机制解的各项参数,图 2 为各震源机制解图示。

冲的性质的 NWW 及 NEE 晚更新世及全新世断裂^[3-4],4 次地震的震源机制解也反映出断裂整体的性质。

3 利用小震求解构造应力

相比强震的震源机制解,单个中小地震的震源机制在求解时资料相对少、受到的干扰更大,得出的结果常常只能对应局部的发震构造。但是中小地震是远远多于强震的,利用多个小震的震源机制解来推断构造应力主轴的方向有时比利用强震震源机制解有更大的优越性。大量的小震震源机制解可以将局部的构造条件影响降至更低的水平,而凸显出整个区域的构造应力场特性^[2]。

Gephart 等利用网格搜索来确定一定区域内一组震源机制解所对应的主应力的相对大小和应力比值,但是其采用网格搜索应力场参数的搜索网格太大(最细的搜索网格为 5°),难于满足精确求解应力场的目的;另外 Michael 和许忠淮等采用的方法也存在忽略数据精度和无法给出应力场参数误差等问题。万永革在上述问题的基础上给出一种方法,能够采用不等精度的震源机制数据、采用更细的应力场参数网格($1^\circ \times 1^\circ$)来搜索应力场参数的最优解,并且给出应力场估计参数的误差。本文求解应力场所采用的是万永革所使用的方法。

甘东南宽频带流动台阵在 2009 年 11 月至 2011 年 11 月期间获得了大量的小震记录。我们挑选了岷县 $M_S6.6$ 地震震中 50 km 范围内的小震,并进行了震相和初动识别。考虑到 P 波初动数目对

于震源机制解的影响,我们再次从结果中挑选出 P 波初动大于等于 10 个的 31 个小震,采用三维网格搜索法进行了定位^[12],并用 P 波初动的方法做出震源机制。台阵的部分台站和小震分布如图 3,小震震源机制解如表 4。

根据小震的震源机制解,利用前文提到的方法反演了该区域的构造应力场:

P 轴的不确定范围:方位角: $66.12^\circ \sim 70.14^\circ$,
倾角: $0.49^\circ \sim 1.49^\circ$

B 轴的不确定范围:方位角: $336.00^\circ \sim 340.50^\circ$,倾角: $6.50^\circ \sim 8.00^\circ$

T 轴的不确定范围:方位角: $164.15^\circ \sim 168.65^\circ$,倾角: $-0.38^\circ \sim 0.14^\circ$

最优解如表 5 所示,其中 R 为相对应力大小。

此结果非常接近前人的研究结果^[6-7]。表明这一区域受到青藏高原块体、鄂尔多斯块体和华南块体的共同作用,其应力主轴成 NEE 方向,结合 $M_b4.5$ 以上地震的震源机制解,可以更好明白岷县 $M_S6.6$ 地震的整体构造应力背景,以及震源表现出的逆冲性质。 $M_S6.6$ 地震后发生了一系列的余震,此余震也会在更长的时间内持续,我们也期待在收集更多余震的资料后,可以研究震前震后的应力场变化。

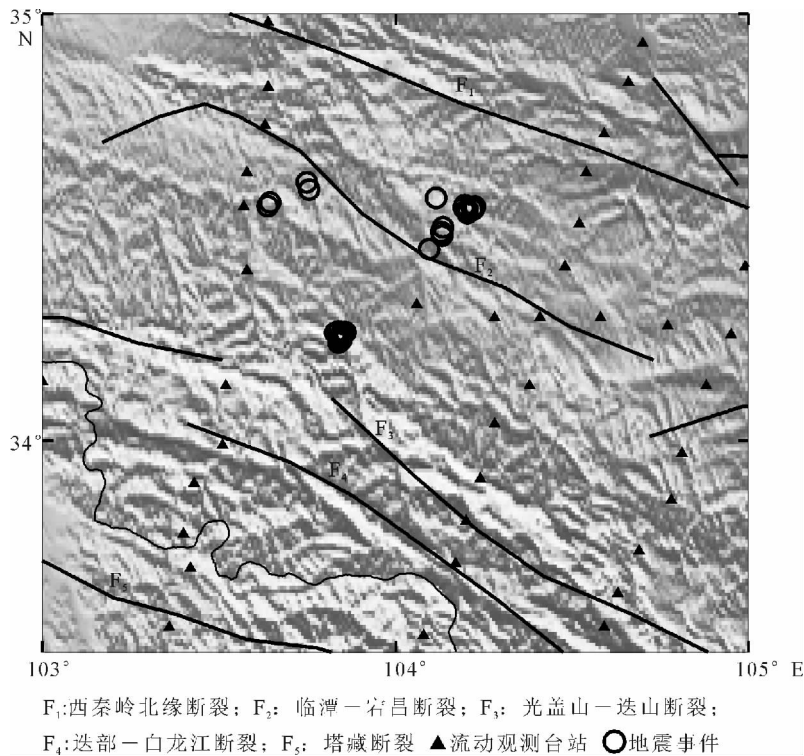


图 3 部分台站及参与应力反演的小震分布

Fig. 3 Distribution of used mobile stations and chosen small earthquakes

表4 小震震源机制解

Table 4 The focal mechanisms of chosen small earthquakes

序号	发震时间		节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比
	时间	时刻	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位角	仰角	方位角	仰角	方位角	仰角	
1	2010-06-06	07:10:54	350	90	-110	260	20	0	241	42	99	42	350	20	0.167
2	2010-07-28	06:02:17	107	75	-132	0	44	-22	336	44	227	19	120	40	0.182
3	2010-08-24	08:06:07	89	31	-163	345	81	-60	286	45	51	30	160	30	0.083
4	2011-01-14	15:12:50	263	56	127	29	48	48	327	4	230	60	60	30	0.063
5	2011-02-23	13:49:05	161	41	139	284	64	56	38	13	148	57	300	30	0.037
6	2011-02-23	13:57:17	208	80	163	302	73	10	256	5	164	19	180	70	0.083
7	2011-02-23	14:00:23	27	76	153	124	64	16	77	7	343	29	180	60	0.067
8	2011-02-23	14:19:13	181	62	113	319	36	54	255	14	132	65	350	20	0
9	2011-02-23	14:45:31	208	61	138	323	54	37	267	4	172	50	180	40	0
10	2011-02-23	19:31:02	208	61	138	323	54	37	267	4	172	50	180	40	0
11	2011-02-23	20:00:24	25	81	120	129	31	17	91	30	326	45	200	30	0.05
12	2011-02-23	22:51:32	168	48	149	280	67	46	40	11	143	48	300	40	0
13	2011-02-24	17:41:19	63	80	-152	327	62	-11	288	27	192	12	80	60	0.133
14	2011-02-26	11:30:21	171	48	132	297	56	53	53	4	150	60	320	30	0
15	2011-03-11	21:38:08	98	51	103	258	41	75	179	5	63	79	270	10	0
16	2011-03-21	04:19:43	165	81	120	269	31	17	231	30	106	45	340	30	0
17	2011-03-21	04:28:24	171	48	132	297	56	53	53	4	150	60	320	30	0.023
18	2011-06-04	12:07:00	169	36	-126	31	62	-67	342	65	105	14	200	20	0
19	2011-06-12	05:22:55	208	80	163	302	73	10	256	5	164	19	180	70	0
20	2011-11-01	17:17:05	204	71	144	307	56	23	258	10	161	38	180	50	0.038
21	2011-11-01	18:16:46	20	81	175	110	85	9	245	3	335	10	140	80	0
22	2011-11-01	18:29:52	171	48	132	297	56	53	53	4	150	60	320	30	0.105
23	2011-11-01	19:35:52	181	48	132	307	56	53	63	4	160	60	330	30	0.071
24	2011-11-01	21:06:35	190	90	180	280	90	0	55	0	145	0	180	90	0
25	2011-11-01	21:26:29	210	85	171	300	81	5	255	3	165	10	180	80	0
26	2011-11-02	01:31:46	151	41	139	274	64	56	28	13	138	57	290	30	0
27	2011-11-02	17:34:44	181	48	132	307	56	53	63	4	160	60	330	30	0.063
28	2011-11-03	10:21:27	210	90	180	300	90	0	75	0	165	0	180	90	0
29	2011-10-15	00:17:22	210	85	171	300	81	5	255	3	165	10	180	80	0
30	2011-06-04	20:07:31	169	36	-126	31	62	-67	342	65	105	14	200	20	0
31	2011-01-14	23:13:47	263	56	127	29	48	48	327	4	230	60	60	30	0.063

表5 构造应力反演结果

Table 5 Result of the tectonic stress inversion

P 轴		B 轴		T 轴		R
走向/(°)	倾角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	
70.12	0.99	340.00	7.00	168.15	82.93	0.60

致谢:本文中所用到的应力场反演程序来自万永革老师提供,特此说明,并致以衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] 李海兵,王宗秀,付小方,等. 2008年5月12日汶川地震($M_s 8.0$)地表破裂带的分布特征[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 803-813.
LI Hai-bing, WANG Zong-xiu, FU Xiao-fang, et al. The Surface Rupture Zone Distribution of the Wenchuan Earthquake ($M_s 8.0$) Happened on May 12th, 2008[J]. Chinese Geology, 2008, 35(5): 803-813. (in Chinese)
- [2] 冯建刚,代炜,董治平,等. 青藏块体东北缘平均波速比的测定及研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(1): 61-65.

FENG Jian-gang, DAI Wei, DONG Zhi-ping, et al. Determination and Study on Average Seismic Velocity Ratio (V_p/V_s) in Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Block[J]. North-western Seismological Journal, 2009, 31(1): 61-65. (in Chinese)

- [3] 傅征祥,程燕. 北京和张家口地区地壳平均波速比的联合测定[J]. 地震, 1988, 8(4): 28-34.
FU Zheng-xiang, CHENG Yan. Joint Determination of Crust Wave Velocity Ratio in Beijing and Zhangjiakou Region[J]. Earthquake, 1988, 8(4): 28-34. (in Chinese)
- [4] Aggarwal Y P, Sykes L R, Ambruster J, et al. Premonitory Changes in Seismic Velocities and Prediction of Earthquakes[J]. Nature, 1973, 241 (5385): 101-104.
- [5] 冯德益. 地震波速异常[M]. 北京:地震出版社, 1981.
FENG De-yi. Anomalies of Seismic Velocity[M]. Beijing: Seismological Press, 1981. (in Chinese)
- [6] 王林瑛,李艳娥,李芳,等. 汶川地震前后地震波速比和视速度变化特征的研究[J]. 地震学报, 2011, 33(1): 1-14.
WANG Lin-ying, LI Yan-e, LI Fang, et al. Temporal Varia-

- tion of V_p/V_s , V_p and V_s before and after 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2011, 33(1): 1-14. (in Chinese)
- [7] 黎明晓, 刘杰. 云南地区地震序列的波速比 (V_p/V_s) 异常研究[J]. *地震*, 2006, 26(1): 26-34.
LI Ming-xiao, LIU Jie. Study on Velocity Ratio (V_p/V_s) Anomaly of Earthquake Sequences in Yunnan Region[J]. *Earthquake*, 2006, 26(1): 26-34. (in Chinese)
- [8] 黎明晓, 张晓东. 应用多站法测定华北地区地壳的平均波速比[J]. *地震*, 2004, 24(1): 163-169.
LI Ming-xiao, ZHANG Xiao-dong. Determining Average Seismic Velocity Ratios (V_p/V_s) in the Crust in North China Region by Multi-station Method[J]. *Earthquake*, 2004, 24(1): 163-169. (in Chinese)
- [9] 李善邦. *中国地震*[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
LI Shan-bang. *Chinese Earthquake*[M]. Beijing: Seismological Press, 1981. (in Chinese)
- [10] 王志铄, 李源. 汶川地震余震区波速比与强余震的关系[J]. *山西地震*, 2012, 1:2.
WANG Zhi-shuo, LI Yuan. The Relationship between Wave Velocity Ratio and Strong Aftershocks in Wenchuan Aftershock Zone[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, 2012, 1:2. (in Chinese)
- [11] 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 1970 年以来甘肃台网地震观测报告收集整理及其重新定位研究[J]. *西北地震学报*, 2012, 34(3): 289-293.
FENG Jian-gang, JIANG Chang-sheng, HAN Li-bo, et al. Collection and Reestablish Work for the Earthquake Observation Reports of the Gansu Seismographic Network since 1970 and Earthquake Relocation[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012, 34(3): 289-293. (in Chinese)
- [12] 龙海英, 聂晓红, 唐兰兰. 新疆乌苏 5.1 级地震前波速比异常震例研究[J]. *地震研究*, 2011, 34(2): 126-130.
LONG Hai-ying, NIE Xiao-hong, TANG Lan-lan. Study of the Abnormity of Wave-velocity Ratio before $M_s 5.1$ Wusu Earthquake in Xinjiang[J]. *Journal of Seismological Research*, 2011, 34(2): 126-130. (in Chinese)
- [13] Whitcomb J H, Garmany J D, Anderson D L. Earthquake Prediction: Variation of Seismic Velocities before the San Fernando Earthquake[J]. *Science*, 1973, 180: 632-641.
- [14] Gupta I N. Premonitory Seismic-wave Phenomena before Earthquakes near Fairview Peak, Nevada[J]. *BSSA*, 1975, 65 (2): 425-437.