

动态空区法在永登 5.8 级地震 回顾性预报中的应用

毕秋菊

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 研究了永登 5.8 级地震前地震活动异常特征, 并应用秦保燕提出的地震动态空区的原理和地震频次起伏加剧, 研究了 1995 年永登 5.8 级地震的孕震过程, 对地震三要素进行了回顾性预报。结果表明, 预测结果与实际地震发生的时间、强度和地点十分接近。

主题词: 地震空区 地震活动性 孕震过程 地震预报 动态空区法

1 前言

1995 年 7 月 22 日在甘肃省永登县 (北纬 $36^{\circ}23'$, 东经 $103^{\circ}13'$) 发生了 M_s 5.8 地震。据考察, 这次地震的极震区烈度为 VIII 度, 长轴走向为 $N 70^{\circ}W$, 长 25 km 左右, 与北西向祁连山断裂走向基本一致^[1]。

这次地震发生在现代中强地震活动一直很平静的甘肃中部地区, 又是自 1990 年 10 月 20 日景泰 6.2 级地震以来 5 年中该区发生的最大的一次地震, 加上它所处的特殊的地理位置, 引起了人们的普遍关注。为此, 我们对这次地震前的地震活动异常进行了分析研究, 试图在地震三要素预报方面寻找更有效的判据, 为甘肃中部地区今后的监测预报服务。

本文应用了秦保燕 1995 年提出的动态空区法原理和计算公式^[1], 对永登地震的整个孕震过程作了回顾性的跟踪研究和预测。

2 甘肃中部地区 (北纬 $35^{\circ}-38^{\circ}$, 东经 $102^{\circ}-106^{\circ}$) 地震活动概况

众所周知, 甘肃地处青藏块体的东北缘, 区内构造十分复杂, 古地震和历史地震主要受北西西向、北西向和北东东向三组深大断裂的控制^[2], 形成了北西西向祁连山地震带和南北向地震带, 而甘肃中部地区恰好处在这两大地震带的交汇部位。据文献 [2] 考证, 该地区西部的 7 级地震主要与北西西向深大断裂活动有关, 东部南北地震带上的强震与北西向活动断裂密切相关外, 北东东向倾滑型断裂也是主要的发震构造。

甘肃中部地区历史上地震活动强烈, 自有记载以来, 该区曾经发生过 1920 年海原 8.5 级和 1927 年古浪 8.0 级两次大震及 1440 年永登 6.3 级和 1888 年景泰 6.3 级两次中强地震。

本文 1996 年 2 月 1 日收到

作者简介: 毕秋菊, 女, 52 岁, 工程师, 主要从事地震预报研究工作。

1) 王振亚, 等, 1996 年地震趋势研究报告。

3 永登 5.8 级地震前地震活动性异常特征

如前所述,甘肃中部地区虽然历史上地震活动强烈,但现代中强地震活动一直很平静,1990 年景泰 6.2 级地震和 1995 年永登 5.8 级地震的相继发生,有可能是该地区地震活动性增强的一种标志。1990 年 10 月 20 日景泰 6.2 级地震后,在甘青交界的兰州、永登、西宁、古浪和合作一带,由 $M \geq 3.6$ 地震逐渐形成了围空区,空区中心位于北纬 $35^{\circ}30'$,东经 $102^{\circ}30'$,最长长轴长度为 350 km(图 1)。

从区域构造上看,空区恰好处在祁连山地震带和南北地震带的交汇部位,北西西向祁连山深大断裂、西秦岭北缘断裂和近南北向庄浪河断裂穿过空区并在空区内部相交(图 2)。据考证,1125 年兰州 7.0 级大震和 1440 年永登 6.3 级中强震可能与庄浪河断裂活动有关^[2]。

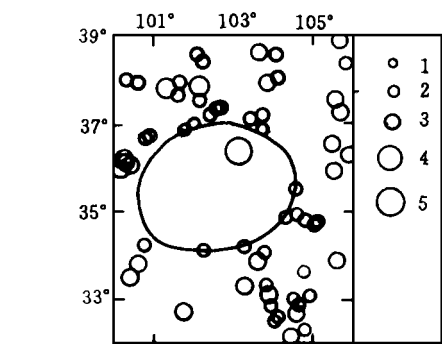


图 1 1991 年 1 月—1995 年 8 月甘肃中部地区—甘青交界地震空区图 ($M \geq 3.6$)

Fig. 1 Seismic gap ($M \geq 3.6$) situated in the middle part of Gansu and juncture of Gansu and Qinghai Provinces.

1 $M \leq 2.9$; 2 $M \leq 3.9$; 3 $M \leq 4.9$; 4 $M \leq 5.9$; 5 $M \leq 6.9$

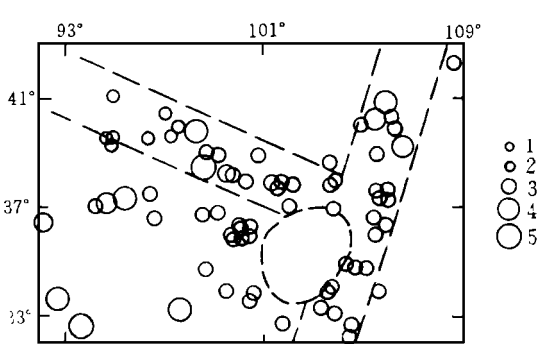


图 2 1991 年 1 月—1995 年 6 月甘青交界 $M \geq 4.0$ 地震空区图

Fig. 2 The spatial relationship between seismic gap in juncture of Gansu and Qinghai Provinces and two large seismic belts.

1 $M \leq 2.9$; 2 $M \leq 3.9$; 3 $M \leq 4.9$; 4 $M \leq 5.9$; 5 $M \leq 6.9$

根据“地震学分析预报方法程序指南”提供的公式进行计算,并结合其他配套异常综合考虑,认为该空区具备发生 6 级左右中强地震的危险。

此外,对甘肃中部地区进行 $2^{\circ} \times 2^{\circ}, 1^{\circ}$ 步长的时空扫描,发现永登 5.8 级地震前,该地区多项指标均有异常显示,其中尤为突出的是地震条带、b 值、c 值、小震频次、缺震及蠕变等。这些异常都具有幅度大和在时间上同步的特点。

为了节约篇幅,本文仅给出空间集中度 c 值和小震频次的研究结果(图 3a, b)。从图 3a 和图 3b 中可以看出,1980 年以来,甘肃中部地区 c 值和小震频次出现过 3 次大幅度的异常变化,其中前两次很好地对应了 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震和 1990 年 4 月 26 日共和 7.0 级和 10 月 20 日景泰 6.2 级地震。在 1993 年,小震频次和 c 值出现同步大幅度的异常变化,从时间上判定应是 1995 年 7 月 22 日永登 5.8 级地震前的震兆反映。

4 用动态空区法对永登 5.8 级地震的回顾预报

如前所述,空区作为目前地震预报的一种手段和方法,虽然有比较好的预报效能,但在具体时间、地点和强度的预报上都存在着很大的不确定因素。例如,按照单空区所规定的预报指标判定,未来主震发生的地点可以是整个空区内部和边缘地带,预报的时间可以是几年、十几年,甚至于上百年,而我们目前对会商的要求则是对未来 1—2 年,甚至要求按月作出地震趋势的判断。在这方面,秦保燕教授在她以往研究的“组合模式”和“立交模式”的基础上,又进行了深入的探索,提出了预报中、强地震的动态空区法,并用这种方法对我国大震进行了回顾性的检验,结果表明,该方法对单空区确定地震危险区有重要改进。根据文献 [1] 的研究,不同时段出现的空区图象不同,但这些不同时段动态空区的交汇点是未来主震区。此外,由动态空区出现的频次增多,地震共轭条带以及中小地震活动加剧等均可判定震源断层的致锁开始时间 t_0 和解锁开始时间 t_b 。由此可预报未来主震震级和地震发生时间(中期时间尺度)。本文应用动态空区法对永登地震三要素进行回顾性预报、检验。

4.1 由动态空区法确定永登地震的震中位置

选用《甘肃省地震目录》中 1989 年 1 月至 1995 年 8 月 31 日的 $M \geq 3.0$ 地震(本区平均地震震级为 $M_L 2.5$),用计算机绘制逐年震中分布图,应用动态空区法的判定指标,从所绘制的一系列图件中逐年勾画出小震空区。为了节约篇幅,图 4 列出了部分动态空区图(图 4a—f)。

图 4a 为 1990 年景泰 6.2 级地震后至 1994 年动态空区轨迹交汇图,交汇区位于北纬 36.3° ,东经 103.4° 。此交汇点与实际发生的永登 5.8 级地震(北纬 $36^\circ 23'$,东经 $103^\circ 13'$)的震中位置十分接近。

图 4b—f 分别为 1990—1994 年的动态空区图。从图中可以看出,除 1994 年为双空区图象外,其它年份均为多空区图象。这些空区的交汇部位即为预测的永登地震的震中位置。虽然在震前的半年内(1995 年 1 月—6 月)永登地区及其附近出现了异常大的空区(图 4g),但我们完全可以根据前几年的动态空区交汇点来预测未来主震的震中位置。图 4g 中“+”符号为永登地震的预测位置,图 4h 为实际发生的永登 5.8 级地震的震中位置,两者十分接近。

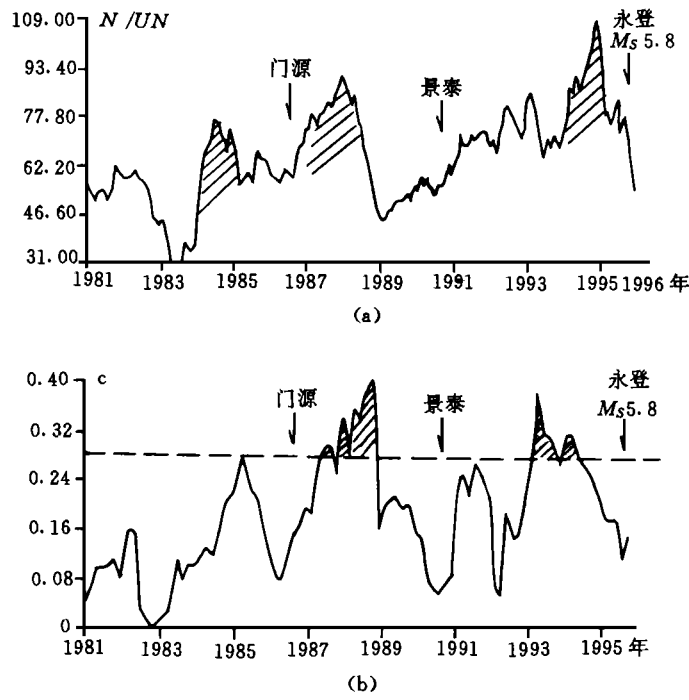


图 3 甘肃中部地区地震 ($M_L \geq 3.0$) 频次曲线 (a) 及 ($M_L \geq 2.6$) 地震 c 值曲线 (b)

Fig. 3 The frequency curve (a) of earthquakes ($M_L \geq 3.0$) and c -value curve (b) of earthquakes ($M_L \geq 2.6$) in the middle of Gansu Province.

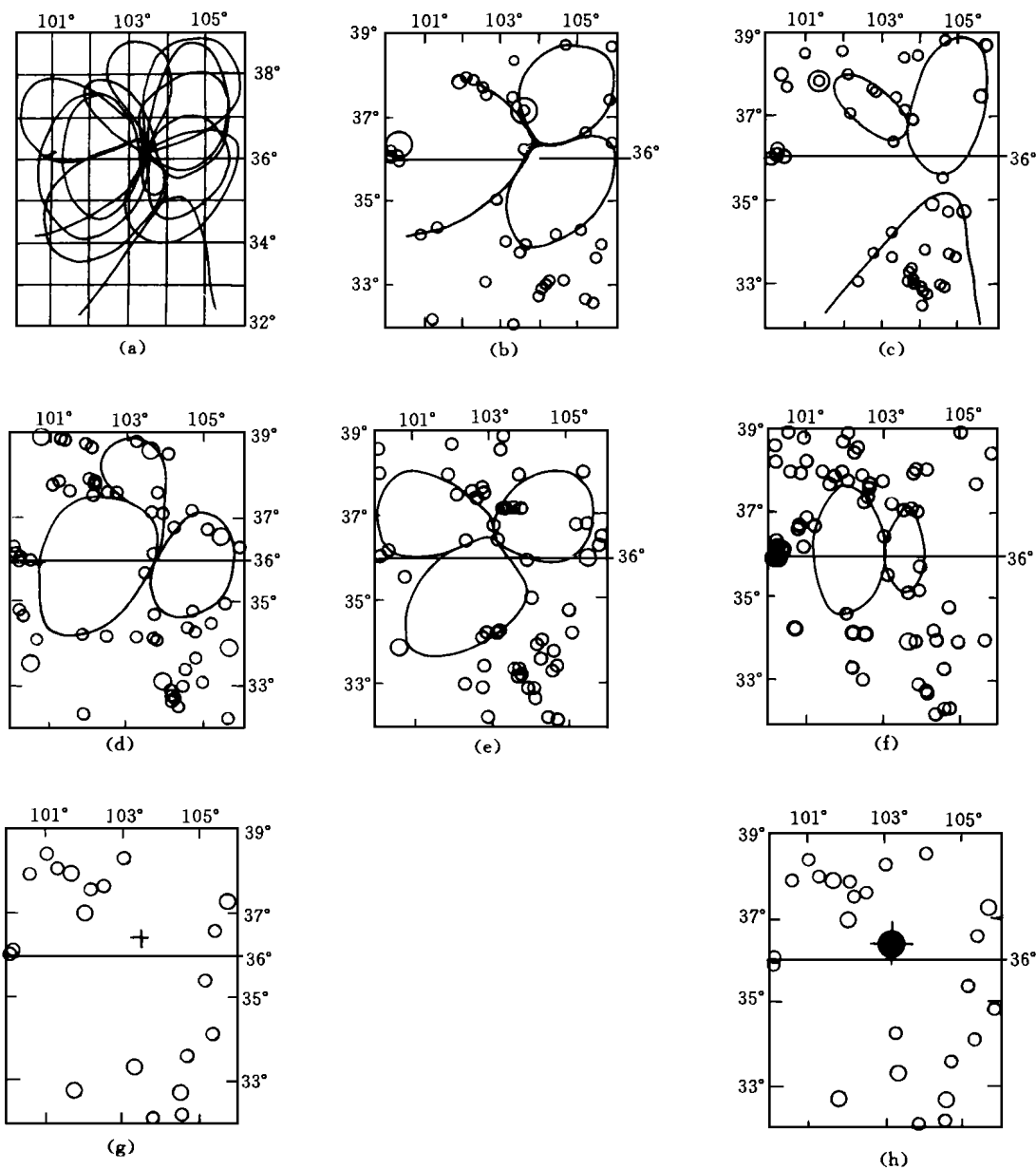


图 4 永登 5.8 级地震动态空区交汇图

Fig. 4 The dynamic seismic gaps before the Yongdeng Ms 5.8 earthquake.

- (a) 1990—1994 年动态空区轨迹交汇图; (b) 1990 年动态空区图;
 (c) 1991 年动态空区图; (d) 1992 年动态空区图;
 (e) 1993 年动态空区图; (f) 1994 年动态空区图;
 (g) 震中位置预测图; (h) 永登 5.8 级地震震中图

4.2 发震时间及震级预测

4.2.1 由动态空区法确定永登地震致锁开始时间 t_0 和解锁开始时间 t_u , 并由此预测发震时间和震级

根据文献 [1] 的研究,在活动断层的致锁和孕震断层的解锁阶段,由于构造调整运动的加剧,可引起动态空区的频繁活动,以年为单位的动态空区往往连续出现(用 $M \geq 4.0$)。由于本文做动态空区时震级下限降到了 3 级,故动态空区较多。从图 4 中可以看出,1990 年景泰地震之后,从 1991 年开始至 1994 年,连续 4 年多出现了三动态和双动态空区图,根据动态空区法的判定原理,1991 年可作为致锁开始时间,而解锁时间不好判定,但 1994 年为三动态空区转为双动态空区的时间。此外,根据秦保燕教授的研究,在解锁阶段还可用地震活动性异常起伏加剧配合进行解锁开始时间 t_n 的判定,由于小震频次起伏加剧时间也在 1994 年,故以 1994 年作为解锁开始时间,即 t_0 为 1991 年, t_n 为 1994 年。由于致锁时间较短,这样永登地震的孕震时间 T 为:

$$T = t_n - t_0 + \Delta T \tag{1}$$

为此,将解锁开始时间到发震时间 ΔT 减小为 1—2 年(文献 [3] 中总结的大震 $\Delta T = 1-4$ 年),并将上述数据代入 (1) 式则得出, $T = 4-5$ 年。根据文献 [3] 对强震 ($M \geq 7.0$) 的统计,孕震时间 T 与震级 M 以及发震时间 t_x 有如下关系:

$$M = 1.308 \log T(\text{年}) + 5.06 \tag{2}$$

$$T = t_n - t_0 + (1-2 \text{ 年}) \tag{3}$$

$$t_x = t_n + (1-2 \text{ 年}) \tag{4}$$

将孕震时间 $T = 4-5$ 年代入 (2) 式,则得到未来主震震级 $M = 5.86-5.99$ 。将解锁时间 $t_n = 1994$ 年代入 (4) 式,则得到 $t_x = 1995 \text{ 年} - 1996 \text{ 年} (\Delta T = 1-2 \text{ 年})$ 。

这显然是一种中期预报。

4.2.2 由地震频次异常讨论致锁开始时间 t_0 ,解锁开始时间 t_n ,发震时间 t_x 和震级 M

为了提高预报精度,围绕永登震中区分别作背景区 ($7^\circ \times 6^\circ$) $M \geq 3.0$ 地震频次时程曲线图和以年为单位频次直方图(图 5 图 6),以及永登地震震中北区和南区 ($3^\circ \times 2^\circ$) $M \geq 1.0$ 地震频次曲线图(图 7 图 8)。

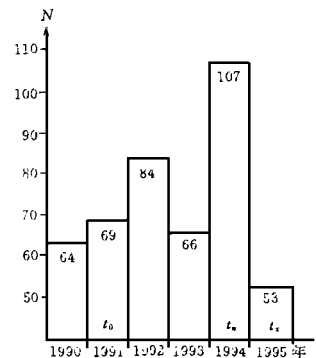
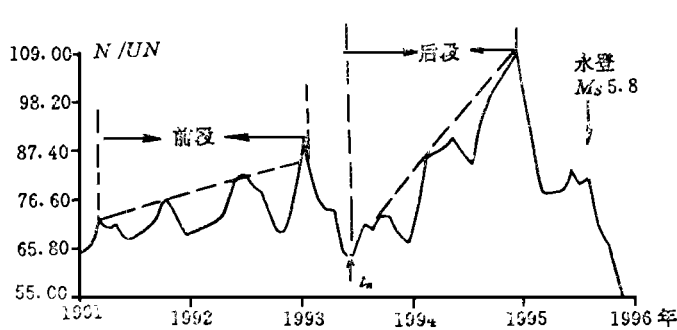


图 5 永登地震背景区 $M \geq 3.0$ 地震频次曲线图

Fig. 5 The seismic frequency curve ($M \geq 3.0$) in background region of the Yongdeng earthquake.

图 6 永登地震背景区 $M \geq 3.0$ 地震频次直方图

Fig. 6 The seismic frequency histogram ($M \geq 3.0$) in background region of the Yongdeng earthquake.

从图 7 可以确定孕震时间 t_0 大致在 1991 年初,因为在 t_0 之前是景泰地震后出现的频次

正常下降,而在 t_0 之后即 1991 年初至 1992 年突然出现地震活动回升,此后地震频次持续下降达 2 年之久,说明永登地区活动断层从 1991 年出逐渐锁住

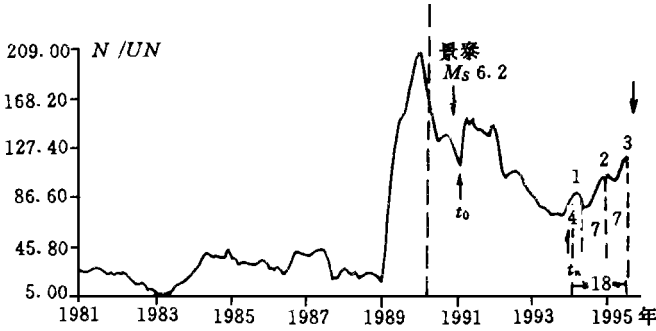


图 7 永登震中北区 $M \geq 1.0$ 地震频次曲线图

Fig. 7 The frequency curve of $M \geq 1.0$ shocks in the north of the Yongdeng earthquake epicenter.

此外,在背景场上(图 5)也可以看到两个阶段的起伏加剧现象,前一阶段速率较小,而从 1993 年中起伏加剧明显加大,后一阶段起伏加剧的开始时间约比北区(图 7)早半年左右。北区出现明显起伏加剧的时间为 1994 年初,这与背景区小震频次从 1993 年的 66 次,至 1994 年突然上升为 107 次的现象(图 6)相一致。文献[4]提出可利用小震调制比起伏加剧的前两个周期来预测第三次起伏加剧的峰值时间。对于永登地震来说,其北区(图 7)的前两个起伏

加剧的峰值的时间间隔为 7 个月,由此可预测第三次起伏加剧的峰值时间即为发震时间 t_s 为 1995 年 7 月。

将求得的起伏加剧时间 $t = 18$ 个月代入(1)式中的 ΔT ,求出孕震时间 T 为 4.5 年。

将 $T = 4.5$ 年代入(2)式,求得震级 M 为 5.75

计算结果表明,预测的发震时间和震级与实际永登地震的发震时间和震级十分接近

值得指出的是,1995 年 1 月—6 月在原来空区频繁出现的地区,小震活动十分平静,在震中分布图上呈现出一片空白(图 4g),这是否是临震前的一种震兆反映,是值得进一步研究的。此外,根据文献[5]的研究,这种静态的大空区也可能是震中区及其附近深部有垂直隆起运动导致的后果,即为垂直向上的力作用到地壳底部时可使其上部地壳中的倾向断层面的正压力提高,导致小震活动受到抑制。事实是,当月在预测地点发生了永登 5.8 级地震。从背景场来看,永登 5.8 级地震后小震频次曲线已基本恢复(图 2a),从分区上来看,北区小震频次已下降但南区(图 8)仍维持异常状态,这是应该注意的。

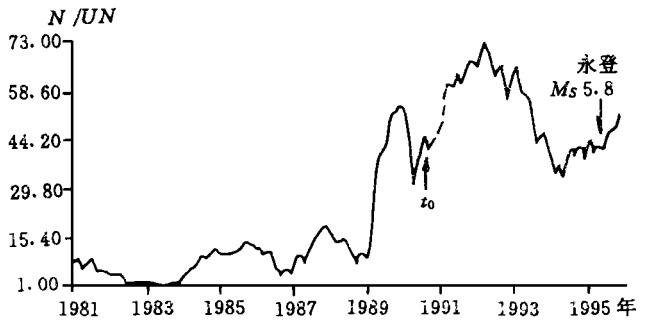


图 8 永登震中南区 $M \geq 1.0$ 地震频次曲线图

Fig. 8 The frequency curve of $M \geq 1.0$ shocks in the south of the Yongdeng earthquake epicenter

综上所述,应用动态空区法对中、强地震位置进行预测并进行跟踪,不仅可以清楚地看到未来主震的整个孕震过程,配合前兆的起伏加剧还可以较准确的确定未来主震的发震时间和强度。因此,动态空区法在今后的预测预报工作中值得推广、使用。

作者感谢秦保燕教授给予本文的指导。

参考文献

1 秦保燕.地震动态空区法与中、强震预报.地震研究,1995,18(2): 109- 116.
2 张必敖,廖元模,等.甘肃省地震危险区划研究.兰州:兰州大学出版社,1993.88,149.
3 秦保燕,等.我国大陆活动断层锁住、解锁指标与大震预报问题讨论.西北地震学报,1989,11(增刊): 8- 16.
4 秦保燕,等.震源系统小震调制比(r_m)和异常面积(Sr_m)起伏加剧的时空特征与强震的中、短期预报.西北地震学报,1994,16(3): 1- 13.
5 郭增建,秦保燕.地震成因和地震预报.北京:地震出版社,1991.112.

THE APPLICATION OF DYNAMIC GAP METHOD TO THE REVIEWED
PREDICTION OF THE YONGDENG M_s 5. 8 EARTHQUAKE

Bi Qiujia

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou,SSB,Lanzhou 730000*)

Abstract

In this paper, the principle and formula of dynamic gap method raised by prof. Qin Baoyan are applied to study the earthquake-generating process and to determine the three elements of earthquake prediction about the Yongdeng M_s 5. 8 earthquake in 1995. The results are very close to reality.

Key words Seismic gap, Seismic activity, Seismogenic process, Earthquake prediction, Dynamic gap method