

后续地震类型及其特征分析

肖和平

(湖南省地震局, 湖南 长沙 410001)

摘要:对中国大陆 5.0 级以上强震的后续地震进行了分析, 按成因将其划分为剩余型、诱导型和后生型 3 类, 讨论了 3 种后续地震的主要特征及其在大震震源机理研究和地震预报中的意义。

主题词:地震类型; 后续地震; 地震趋势判定

中图分类号: P315.5, P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)03-0261-06

0 引言

大震发生后在震区及附近均有大量的余震发生, 但是这些余震发生的背景与主震不同, 在机理上与主震存在一定的差异, 另外, 主震发生后几十年或跨越 2 个地震活动幕发生的地震能否称为余震, 震源机理与主震不相同的余震是否与主震同属于一个震源系统, 这些问题按余震的定义是无法解释的, 为此, 笔者将主震发生后的地震统称为后续地震, 后续地震包括余震, 但二者不能等同, 本文从后续地震的成生机理和特征分析入手, 对后续地震进行了定义和类型划分, 旨在为强震序列类型和震后趋势判定提供一定的依据。

1 后续地震定义

根据后续地震的强度、频度和特征可以确定地震序列类型, 如主震与一个后续地震的强度几乎相等则该地震序列称为双震型; 主震与后续地震震级相差 0.5 级, 地震次数 $N \geq 3$ 次, 则该地震序列属于震群型。

对后续地震的成生机理有不少学者进行了研究, 并提出了一些模式, 如层间解缚模式^[1]、断面烧结再断机制^[2]等等, 无论那种模式都是基于主震发生改变了震源区或附近乃至整个构造单元内的应力状态这一认识, 后续地震就是震源体失稳后应力的平衡调整过程和震源体失稳向周围介质中扩展引起的效应, 为此, 可将后续地震定义为: 某一强震序列主震发生之后, 陆续在震区和附近发生的与主震震源系统具有成生联系的并且与原地震背景和活动水平不同的一系列地震, 它的震源可与主震同属一个震源系统或隶属次级震源体, 也可以是附近的在同一构造单元控制下的震源体, 还可以是与强震系列有关联的后生震源体, 其中包括主震震源系统在震后阶段向新的平衡态过渡过程中发生的一系列地震。

2 后续地震类型及其特征

根据震源力学、时空分布特征和与主震的关系可将后续地震划分为剩余型(即余震)、诱导

收稿日期: 1999-09-14

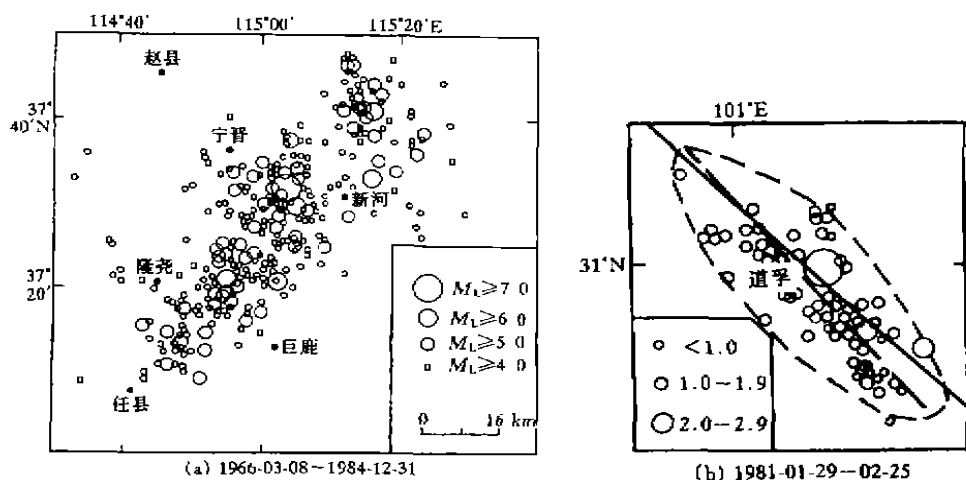
作者简介: 肖和平(1952-), 男(汉族), 湖南新化人, 高级工程师, 现从事地震预报与地震地质工作

型和后生型3类。

2.1 剩余型后续地震

剩余型后续地震指主震后震源体内剩余能量释放引发的地震和沿地震波辐射或震源破裂方向上发生的地震,也就是余震。原则上这些余震与主震同属一个震源系统或同位于一个有效的释放应变能的空间区域内。然而,震源体从失稳到实现新的平衡的过程还要借助于周围边缘次级震源体。震源体破裂的瞬间辐射出地震波,在地震波传播路径上震源体内和周边较薄弱结构面或易被触动的力学奇异点发生破裂,从而形成辐射型余震分布。因此将主震震源体剩余能量释放产生的地震和沿地震波辐射方向上发生的地震称为剩余型后续地震。由于各主震震源体所处的地质构造环境及地球物理场的差异,致使辐射余震的时空分布不尽相同。余震的空间分布图像可以分为3种类型:

(1) 余震沿发震构造呈椭圆形分布。如1966年3月8日和22日河北省邢台6.8、7.2级地震的余震在空间上沿着南智丘、百尺口东断裂、牛家桥、艾辛庄、南汪店和永福庄等断裂呈椭圆形分布(图1a),其长轴方向为 $N35^{\circ}E$,长约110 km,短轴长约60 km,面积约 $5\,000\text{ km}^2$ ^[3]。再如1981年1月24日四川省道孚6.9级地震的余震沿发震构造——鲜水河断裂呈 $N40^{\circ}W$ 方向展布(图1b),长轴约50 km,短轴约20 km,3级以上余震主要位于主震震中东南侧^[4]。



(a) 邢台地震的余震($M_1 \geq 4.0$)分布; (b) 道孚地震的余震分布

图1 1966年邢台地震和1981年道孚地震的余震分布

Fig. 1 Distribution of aftershocks of the 1966 Xingtai earthquake and the 1981 Daofu earthquake.

(2) 余震向主震震源体深部延展。典型的例子是1966年邢台7.2级地震,该次地震发生后大部分3级以上余震的震源深度大于7.2级主震的震源深度,余震集中分布在10~25 km深度范围内(图2a)。

(3) 余震向主震震源表层延展。典型的例子是1981年道孚地震,其余震多分布在5~16 km深度,以7~12 km深度最为集中(图2b),而主震的震源深度比大多数余震震源深度大。又如1982年2月25日江西省龙南5.0级地震的余震的震源深度由深到浅呈放射状分布(图2c)^[5]。

余震沿垂直方向的展布特征说明,余震与震区的地质构造、地球物理环境密切相关。如图3所示,邢台地震及余震主体发生在温度和压力相对较低的地壳中上部,即密度和硬度较大的脆性层(坚固体或易震层)内^[6]。

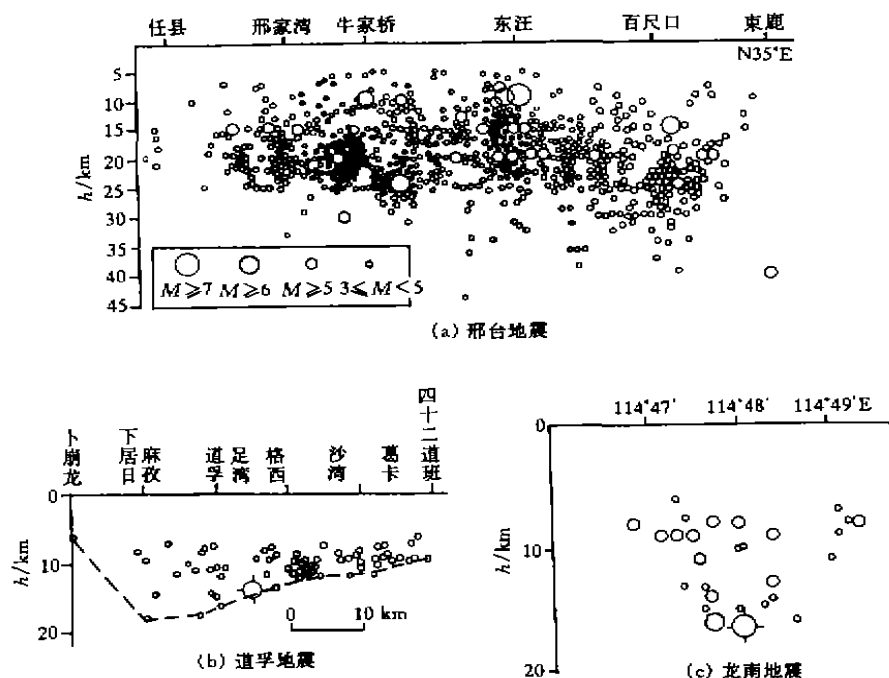


图2 邢台、道孚和龙南地震的震源深度剖面

Fig.2 Profiles of focal depth for the Xingtai, Daofu and Longnan earthquakes.

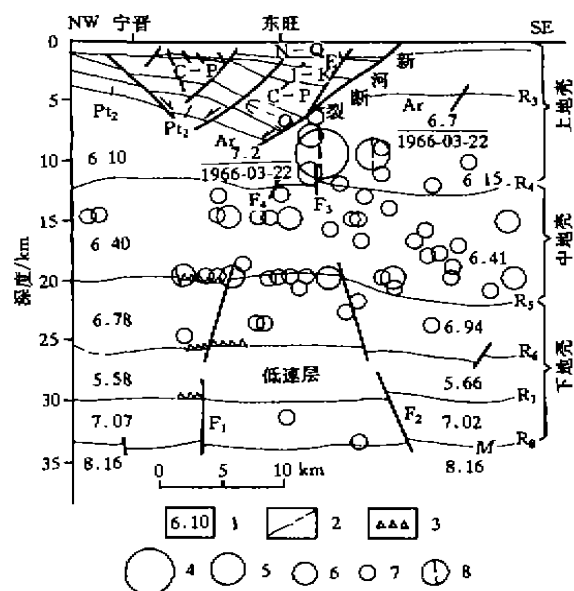
2.2 诱导型后续地震

诱导型后续地震指在一个强震序列中由于主震的发生,诱导和触动所处构造单元或相邻地块内的一些特殊构造部位发生的地震,甚至是远程地震。也就是说,一次地震的发生增加了其它正在孕育但尚未发震的地区的应力强度,进而导致后续地震的发生。其地震序列往往呈现双震、震群型或主震-余震型。同时,后续地震的分布随地震构造类型而异,震源机制也往往存在差异。

2.2.1 后续地震的共轭分布

1970年1月5日云南省通海7.7级地震发生在走向 $N60^{\circ}W$ 的曲江断裂上,其等震线长轴方向和余震的空间分布均受曲江断裂控制,呈NW向展布。主震后在曲江断裂的NW和SE二端出现后续地震呈丛集分布(图4)^[7],即在峨山和曲溪二地分别发生了5.0和5.5级强烈后续地震,形成2个明显的地震活动密集点。同时,在主震NE侧的江川发生了一次5.0级强余震,它的等震线长轴方向和次生地震活动均呈NE向。

2.2.2 远离主震区的远程相关性



1 纵波速度(单位:km/s); 2 断裂和推测断裂; 3 破碎带;
4 $M = 7.2$; 5 $M = 6.7$; 6 $M = 5 \sim 5.9$;
7 $M = 4 \sim 4.9$; 8 震源断面

图3 邢台地区地壳内界面结构
(徐杰等, 1988)

Fig.3 Crustal structure of Xingtai area.

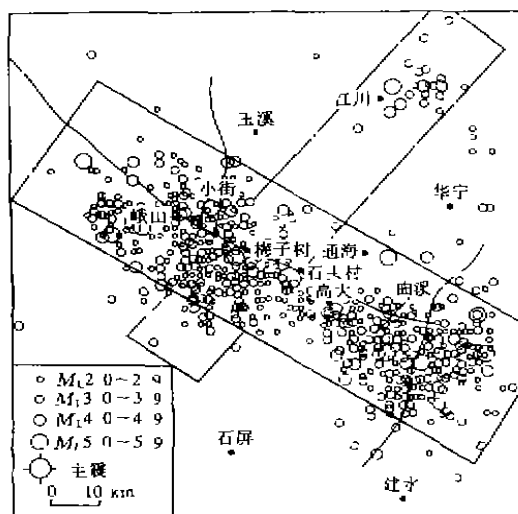


图4 通海地震的后续地震分布
Fig. 4 Distribution of following shocks of the Tonghai earthquake.

1985年11月30日在河北省邢台地震区南部的任县发生5.3级地震,其余震活动围绕主震分布。然而,在主震区的NW侧较远处出现一条NNE向的后续地震活动条带(图5)^[8]。这可能是主震的发生触动了邻近的NNE向构造上处于临界状态的震源体发展的结果。

1976年8月16日,21日和23日在松潘地区先后发生了 $M_S7.2$ 、 $M_S6.7$ 和 $M_S7.2$ 地震。这3次地震沿虎牙断裂发生^[9],表明虎牙断裂由北向南逐次破裂。但是各次地震的震源机制存在差异(表1)。8月16日地震的震源断层发生逆冲错动,而另2次地震的震源断层为平推断层、反时针错动。说明它们在发震机理上存在某些差异。这可能是由于在虎牙断裂上存在多个障碍物,即闭锁段,一次地震的发生触动其他闭锁段解体,从而相继发生地震。再如1975年海城和1976年唐山地震的震源断层以平推为主,而它们的后续地震中有相当一部分地震的震源断层属倾滑型,海城地震后发生的倾滑型后续地震占后续地震总数的47%,唐山地震为70%,对此很难用主震后的剩余能量释放来解释。作者认为这可能是主震发生后,由于应力的调整及地震波的辐射触动了主震断层或次级构造上或者与主震断层相邻的具有成生联系的构造上的震源体,从而诱发了地震。

2.3 后生型后续地震

后生型后续地震指由于强震活动引起震区和附近地质体、地球物理场变化从而生成新震源而发生的地震。这类地震一般与主震的间隔时间较长,因此有学者将其称为超晚期余震。有学者认为,这类超晚期强余震是在区域应力增强的背景下发生的,因此,不宜将超晚期强余震看作是震源区剩余能量释放的结果,它的主要能量似乎是外部补给的^[6]。由于新的震源体的孕育和发展需要一定的时间,所以,后生型后续地震一般滞后强震序列的地震几年以上。例如1975年2月4日海城7.3级地震发生后,1978年5月该地区发生的5.9级地震、1989年10月18日大同几次6级地震发生后,1991年3月在该地区发生的5.8级地震以及1990年4月共和7.0级地震发生后,1994年1月该地区发生的6.0级地震和2月4日发生的5.8级地震均属于此类地震。

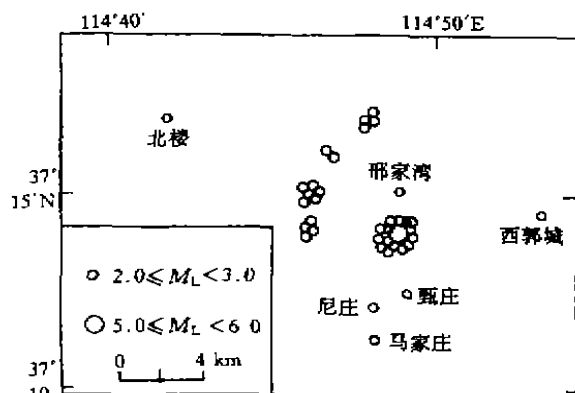


图5 任县地震的后续地震分布
(1985-11-30~12-09)
Fig. 5 Distribution of following shocks of the Renxian earthquake from Nov. 30 to Dec. 9, 1985.

表1 1976年松潘地震震源机制解

发震时间	震级 (M_S)	节面I			节面II			P轴		T轴		N轴	
		走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角
1976-08-16	7.2	148°	NE	45°	175°	SW	48°	252°	3°	156°	76°	342°	14°
1976-08-21	6.7	148°	NE	58°	58°	垂直	0°	287°	22°	188°	22°	58°	58°
1976-08-23	7.2	178°	W	58°	215°	SE	40°	282°	10°	34°	67°	188°	2°

1976年7月28日唐山7.8级地震发生后,间隔22年于1998年4月14日在唐山市东北发生了4.7级地震,有学者将其归属于唐山地震的晚期余震。但是,从中国大陆20世纪强震活动的规律来看,1976年7.8级地震属于第4个强震活跃幕,而1998年4.7级地震已属于从80年代中后期开始的第5个强震活跃幕,将这种跨越2个强震活跃幕的地震事件归属于同一震源体的能量释放过程是不合适的。再如1966年3月河北省邢台发生了6.8和7.2级地震,时隔15年,即1981年11月9日在隆尧发生了5.8级地震,时隔19年,即1985年11月30日在任县发生了5.3级地震。文献[8]和[10]将该2次地震归属于邢台地震序列的晚期强余震。然而,从表2和表3可以看出,任县地震、隆尧地震与邢台地震的基本参数和震源机制存在差异。邢台2次地震的节面I走向皆为NNE,而任县地震为NEE向,隆尧地震为NE;邢台地震的主压应力轴(P 轴)为NEE向,而任县地震为NW向,隆尧地震为近EW向。因此,隆尧地震、任县地震不可能是邢台地震的晚期强余震,应属于2个不同的系统。综上所述,应当将滞后强震序列较长时间,并且震源力学性质与主震不同的后续地震归属为后生型后续地震。

表2 邢台和任县地震基本参数

发震时期	震中位置		震级 (M_S)	震源深 度/km	地点
	北纬	东经			
1966-03-08	37°21′	114°55′	6.8	10	隆尧
1966-03-22	37°32′	115°03′	7.2	0	宁晋
1981-11-09	37°32′	114°58′	5.8	20	隆尧
1985-11-30	37°14′	114°49′	5.3	15	任县北

表3 邢台和任县地震震源机制解

发震时间	震级 (M_S)	节面I			节面II			P 轴		T 轴	
		走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	仰角	方位	仰角
1966-03-08	6.8	27°	SE	80°	119°	SW	80°	73°	1°	163°	13°
1966-03-22	7.2	19°	垂直	0°	109°	垂直	0°	64°	2°	334°	0°
1981-11-09	5.8	36°	垂直	0°	126°	NE	83°	81°	5°	345°	5°
1985-11-30	5.3	56°	NW	88°	147°	NE	72°	103°	12°	10°	14°

3 讨论与认识

综上所述,可得出如图6所示的后续地震演化过程。现就后续地震的有关问题讨论如下:

(1) 剩余型后续地震具有对主震震源体协调平衡的作用。剩余型后续地震是震源区及其附近应力调整过程的产物。后续地震的发生使剩余应变能得到释放,从而使震源及周围介质应力达到新的平衡。

(2) 剩余型后续地震对于诱导型后续地震和后生型后续地震具有前兆意义。余震活动特征及空间分布可以反映主破裂震源体剩余能量释放过程中内部及邻近未破裂障碍体的发展状况,因此剩余型后续地震的基本参量(地震能量积累和释放、地震频度、地震矩等)的加速现象是最大余震、双震或震群和后续大震的前兆。此外,可以通过对大震的震源位置、早期剩余型后续地震的分布、震源区的构造条件及其区域构造环境等的综合研究,对后续强震进行预测。因此,剩余型后续地震对主震是余震,而对诱导型后续地震或强余震它又是前震。

(3) 后续地震具有复合重叠性。剩余型和诱导型后续地震往往相伴随,因此低序次剩余型后续地震叠加在主震剩余型后续地震背景之上。这种复合叠加具有多重性,如图2a所示。

(4) 后续地震是强震成组活动^[11]或地震迁移^[12]的媒介。后续地震的活动沿着控震和发

震构造向主震震源外围迁移,对块体内破裂的贯通和扩展起了促进作用,同时还可以协调构造块体内各震源区应力状态的调整变化和重新分布。

关于后续地震在实际地震预测中的应用问题作者目前正在进行研究。

[参考文献]

- [1] 郭增建,秦保燕.地震成因和地震预报[M].北京:地震出版社,1979.
- [2] 安欧.古构造残余应力场对古今和未来地震的控制作用[A].见:地震科学联合基金会办公室(编).地震科学联合基金全资助课题成果汇编(1985~1989)[C].北京:地震出版社,1993.428—434.
- [3] 曾矩,罗兰格,侯建明.1966年3月8日、22日河北省邢台6.8、7.2级地震[A].见:张肇诚主编.中国震例(1966~1975)[C].北京:地震出版社,1988.1—18.
- [4] 程式,任昭明.1981年1月24日四川省道孚6.9级地震[A].见:张肇诚主编.中国震例(1981~1985)[C].北京:地震出版社,1988.1—14.
- [5] 冯绚敏,魏柏林,潘琴龙.1982年2月25日江西省龙南5.0级地震[A].见:张肇诚主编.中国震例(1981~1985)[C].北京:地震出版社,1988.42—60.
- [6] 中国地震局观测预防司.中国“八五”地震预报研究进展[M].北京:地震出版社,1998.
- [7] 陈立德.1970年1月5日云南省通海7.7级地震[A].见:张肇诚主编.中国震例(1966~1975)[C].北京:地震出版社,1988.57—76.
- [8] 曾矩,罗兰格,侯建明.1985年11月30日河北省任县5.0级地震[A].见:张肇诚主编.中国震例(1981~1985)[C].北京:地震出版社,1988.283—294.
- [9] 陈天长,江道崇,陈农,等.松潘-平武地震的地震活动特征[A].见:丁国瑜,马宗晋主编.国际地震预报讨论文选[C].北京:地震出版社,1981.33—39.
- [10] 曾矩,罗兰格,侯建明.1981年11月9日河北省隆尧5.8级地震[A].见:张肇诚主编.中国震例(1981~1985)[C].北京:地震出版社,1988.29—41.
- [11] 张国民,李丽.强震成组孕育、成组发生过程中相互间影响的研究[J].地震,1997,17(3):221—230.
- [12] 赵振才,王继英.青藏块体近期地震活动特征[J].地震研究,1999,22(1):9—16.

ANALYSIS ON TYPES AND CHARACTERISTICS OF THE FOLLOWING SHOCKS

XIAO He-ping

(Seismological Bureau of Hunan Province, Changsha 410001, China)

Abstract: Following shocks of earthquakes ($M_S \geq 5.0$) of Chinese continent are studied. The following shocks can be divided into three types: residual, induced and newborn, according to mechanism of the events. The mechanism and major feature of the following shocks and its significance in study of seismogenesis and in prediction of earthquake trend after major earthquake are discussed.

Key words: Seismic type; Following shocks; Determination of earthquake trend

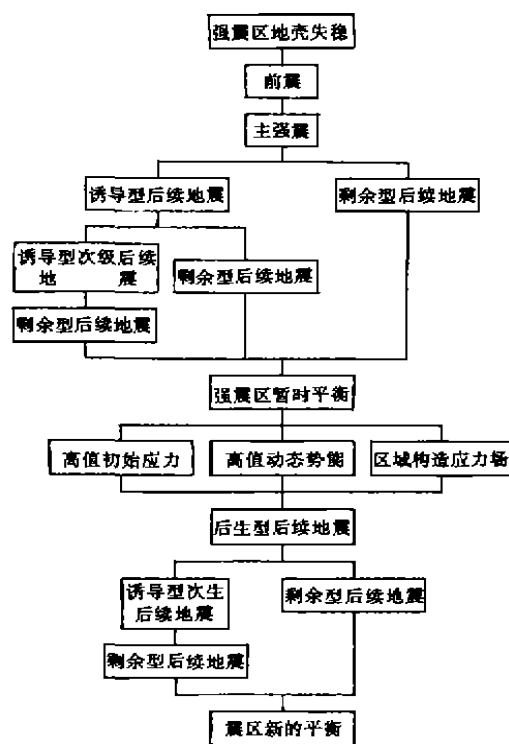


图6 后续地震演化过程

Fig.6 The evolution of following shocks.