

震后趋势判定参考指南

蒋海昆 杨马陵 付虹 高国英 田勤俭 编著

$$\frac{M_0}{R^3}$$

$$\lg N = a - bM$$

$$N(t) = \frac{K}{(t+c)^p}$$

地震出版社

震后趋势判定参考指南

蒋海昆 杨马陵 付虹 高国英 田勤俭 编著



地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

震后趋势判定参考指南/蒋海昆等编著. —北京:地震出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-5028-4649-7

I. ①震… II. ①蒋… III. ①地震研究—指南 IV. ①P315.0-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 174975 号

地震版 XM2928

震后趋势判定参考指南

蒋海昆 杨马陵 付虹 高国英 田勤俭 编著

责任编辑:张友联

责任校对:凌樱

出版发行:地震出版社

北京市海淀区民族大学南路9号

发行部:68423031 68467993

门市部:68467991

总编室:68462709 68423029

专业部:68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编:100081

传真:88421706

传真:68467991

传真:68455221

经销:全国各地新华书店

印刷:北京地大天成印务有限公司

版(印)次:2015年8月第一版 2015年8月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:231千字

印张:9.25

书号:ISBN 978-7-5028-4649-7/P (5342)

定价:30.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

中强及以上地震发生后,正确的震后趋势判定及强余震预测结果,是地震应急、抗震救灾及恢复重建等工作的决策依据,对平息社会公众的恐震情绪,维护社会生活的稳定具有重要作用。

对地震序列的认识与研究,在我国地震预报科学的发展过程中具有特别重要的意义。中国的地震预报研究始于对1966年邢台7.2级地震序列的认识,中国地震预报首次取得的突破(1975年2月4日海城7.4级地震的成功预报)也得益于对序列前震活动特征的把握。由于地震预测的实际需要,我国对地震序列性质判定及余震预测开展了持续、广泛的统计研究,主要着重于余震趋势预测的指标及判据,在一定程度上形成了具有中国特色的序列统计研究成果,在中强地震序列趋势判定、强余震预测等工作中发挥了重要的作用。

依托于国家“八·五”科技攻关,对地震序列的研究成果主要体现在国家地震局(中国地震局的前身,下同)预测预防司组织编著出版的《地震短临预报的理论与方法——“八·五”攻关三级课题论文集》(李宣珣主编,1997)及《大陆地震预报的方法和理论——中国“八·五”地震预报研究进展》(陈章立主编,1998)两本论文集中。在此基础上,序列类型判定及强余震预测方法等内容在由国家地震局组织编著出版的《地震学分析预报方法程式指南》(许绍燮等执笔,1990)及中国地震局组织编著出版的《地震现场分析大纲及技术指南》(郭大庆等执笔,1998)中得到系统体现。同一时期由吴开统等编著出版的《地震序列概论》(1990)是我国地震序列综合研究的重要著作。“十·五”期间,在国家“十·五”科技攻关计划延续项目中又设置专题对地震序列及强余震预测方法进行系统研究。在此基础上出版的《中国大陆地震序列研究》(蒋海昆等,2007),对此前的相关研究进行了系统的总结。总体来看,国内地震序列研究的特点是以实际震例的统计研究为主,强调实用,对序列性质、强余震机理以及预测基础理论等讨论相对较少。

在此前研究的基础上,国家“十二·五”科技支撑计划项目专门设置子专题(2012BAK19B02-05-02),编制《震后趋势判定参考指南》。

本参考指南共分六章,第一章对震后趋势判定及余震预测工作中涉及的主要基本概念进行厘清和约定。第二章为震后趋势判定规程,重点在于告诉读者,

针对不同大小的地震，在震后不同时段，应该开展哪些工作，应该做出哪些相对明确的判定。第三、四、五、六章主要从方法的角度，分别介绍序列类型判定、最大强余震震级估计、强余震发生时间预测及强余震地点判定等内容，是第二章工作内容的技术支撑。

本参考指南强调实用。与以往以方法介绍为主的类似书籍不同，本参考指南以需求为导向，一方面按时间，与震后应急应工作过程相吻合，偏重于工作层面，告诉读者在震后不同阶段的工作重点、工作内容及需要回答的主要问题；另一方面按需求，围绕序列类型判定、强余震震级估计、强余震发生时间预测等不同的工作目标，较系统地介绍相关方法，针对性较强。

读者若关注震后不同时期到底该开展哪些工作，可重点阅读第二章。若关注各项工作的技术细节、不同方法的基本原理及适用条件，可分别阅读第三至第六章。

本参考指南的另一个特点是对近些年新提出的基于数字地震资料的序列类型判定和余震预测方法也尽可能地进行了初浅的介绍，这是今后的一个重要发展方向。但目前来看，这些方法尚不成熟，绝大多数方法缺乏必要的统计检验和震例验证，从预测的角度，这不能不说是一个缺憾。更有甚者，部分方法是从物理概念或模型出发，认为“应该”如何而提出来的，其中包含诸多的人为设定条件，但事实是否如此尚待进一步研究和检验。此外，基于数字地震资料的震源及介质参数的计算方法本身的测量或计算误差也是一个需要认真讨论的问题。因而，在具体使用该部分给出的方法或认识时需要慎重对待。

需要指出的是，震后趋势判定涉及许多尚未解决的科学问题，是一个十分复杂的工作过程。本参考指南中给出的各种震后趋势判定方法和指标，大多是基于震例和经验总结得到的结果，这也是目前和今后一段时间震后趋势判定的主要手段。在实际工作中，对一个地震序列，用不同的判定方法所得到的结果可能有差异甚至大相径庭，因此，根据多种方法和基础资料的综合分析和判定，是做出正确的震后趋势判定的关键，切忌生搬硬套。

此外，对于一些既无法条理化、系统化，又无法作为“规程”或“指南”进行规范性叙述，但确实有一定实际参考价值的内容（类似于工作心得、实践经验等），将以“Tips”的方式提示读者多加注意。

目 录

第1章 基本约定	1
1.1 地震序列	1
1.2 主震	1
1.3 前震	1
1.4 余震	1
1.5 最大强余震	2
1.6 余震活动持续时间	2
1.7 序列类型	2
第2章 震后趋势判定规程	4
2.1 7级以上地震的震后趋势判定	5
2.2 6.0~6.9级地震的震后趋势判定	12
2.3 5.0~5.9级地震的震后趋势判定	19
第3章 序列类型判定	23
3.1 基于构造及历史地震活动类比的序列类型判定	23
3.2 依据地震事件性质分析判定序列类型	24
3.3 依据历史地震及区域地震活动背景判定序列类型	26
3.4 基于地震目录的序列类型判定	36
3.5 部分多震型序列类型的早期判定	68
3.6 主震震级、主震破裂形式与序列类型判定	70
3.7 基于数字地震波形资料的序列类型判定	71
第4章 强余震震级估计	87
4.1 最大余震震级分布	87
4.2 b 值方法	88
4.3 h 值方法	91
4.4 序列最大余震与主震震级的统计关系	91
4.5 强震序列的中强余震频次	93
4.6 余震空间分布与余震活动水平	95
4.7 震区背景地震活动与余震活动水平	98
4.8 潜在破裂单元尺度与强余震活动水平	99
第5章 强余震发生时间预测	100
5.1 密集-平静现象	100
5.2 频度曲线	103
5.3 b 值随时间的变化	103

5.4	平均震级	104
5.5	h 值方法	104
5.6	等待时间方法	104
5.7	最大余震识别	104
5.8	主震与强余震之间的时间间隔	106
5.9	较强余震活动的对数准周期特征	110
5.10	固体潮对余震活动的调制与触发	112
5.11	余震发生概率	116
5.12	短临前兆异常的重复性	119
5.13	晚期（超晚期）强余震预测	120
第 6 章	强余震地点判定	122
6.1	断层端部	123
6.2	断层交汇区域	125
6.3	历史地震破裂空段	126
6.4	低滑移区或高、低滑移转换部位	128
6.5	余震分布的定向扩展区域或反方向的断层端部	129
6.6	库伦应力变化增加的区域	130
6.7	高应力降或高视应力区域	131
参考文献		133
附录一	地震预报管理条例	139
附录二	震后地震趋势判定公告规定	142

第 1 章 基本约定

1.1 地震序列

具有时、空丛集特征的许多地震总称为地震序列 (earthquake sequence, 以下简称序列), 这些地震在时间上相对密集、空间上相对集中, 成因上具有某种有机的物理关联。

狭义来说, 地震序列是指一次较显著地震发生前后, 在震源区及附近发生的一系列地震的时空群集。

1.2 主震

地震序列中的最大地震称为“主震”(mainshock)。少数地震序列具有 2 次或 2 次以上且震级大体接近的主震, 称为“多震”(multiplets) (Felzer et al., 2004)。

1.3 前震

在部分较大地震(主震)发生前的短时间内, 在震源区及邻近区域发生的震级低于此后主震的地震称之为前震(foreshock)。

1.4 余震

一次较大地震(主震)发生后, 在其震源区及邻近区域会观测到地震频次的明显增加, 相对于背景地震活动而言, 这些地震具有明显的时、空丛集特性, 这些频次明显增加但震级低于此前主震的地震称之为余震(aftershock), 余震活动频次及强度随时间逐渐减弱。

根据地震空间分布, 余震一般分为三类 (Kisslinger, 1996): 第一类余震发生在主震破裂面上, 通常是在主震后 24 或 48 小时内的早期余震, 利用早期余震的空间分布可粗略勾划出主震破裂面的几何形状; 第二类余震同样发生在主震破裂断层上, 但可以位于初始滑动段落之外, 表征了初始余震区的扩展; 第三类余震发生在主震断裂之外比主震破裂尺度大得多的较远处, 是由于主震的远程触发而产生。根据余震预测的实际需求, 本参考指南中涉及的“余震”限于上述第一、二类。

1.5 最大强余震

对于主震震级较大的地震序列，主震之后可能发生多次较强余震，其中震级最大的余震称为最大强余震（maximum aftershock）。最大强余震的认定，与所选取的震后时间长短有关。

1.6 余震活动持续时间

研究时段内最后一次指定震级下限以上的余震与主震之间的时间间隔，称为余震活动持续时间（duration of aftershock activity）。余震活动持续时间与指定的余震震级下限及研究时段有关。

1.7 序列类型

序列类型（sequence type）的命名及划分，依不同作者的研究重点而有差异。

从序列活动特点来看，序列类型以往通常被划分为“主震-余震型”“前震-主震-余震型”及“震群型”三类（参见 Utsu, 2002；吴开统等, 1990）。Mogi (1963) 曾利用均匀程度不同（均匀、稍微不均匀和极不均匀）的三种脆性样品材料进行岩石破裂实验，发现声发射时间序列在形式上与上述三种地震序列类型相对应。在“震群型”序列中，还有一种连续发生类似规模的“主震-余震型”序列的情形，这种类型序列所占比例极少，被称为第二类震群（Utsu, 2002），如 1997~1998 年新疆伽师 6 级强震群即属此类。

从定量研究的角度，以序列中最大地震释放的能量 $E_{\max}$ 占全序列地震释放总能量 E_{total} 的比，即 $R_E = E_{\max} / E_{\text{total}}$ 来划分序列类型，具体标准是（周惠兰等, 1980）：①孤立型： $R_E \geq 99.9\%$ ；②主震-余震型： $90\% \leq R_E < 99.9\%$ ；③震群型： $R_E < 90\%$ 。

这种方法具有较清晰的物理含义，但其困难之处首先在于如前所述的序列活动截止时间的确定，其次还在于在序列活动未结束之前无法计算得到全序列所释放的总能量，因而对序列早期判定并不十分适用。另一种更为常用的序列类型划分是基于序列最大地震与次大地震的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$ 来进行，这种方法使用起来更为方便、简洁（吴开统等, 1971）。

在中国地震局编著出版的《地震现场工作大纲和技术指南》（郭大庆等执笔, 1998）中，根据地震学研究成果、人们对地震序列类型的传统称谓、我国地震序列的实际情况以及序列类型划分的预测意义，将 $M \geq 5.0$ 地震序列分为孤立型、主震-余震型、双震型和震群型 4 类，划分标准分别为：①孤立型： $\Delta M > 2.4$ 且余震次数少；②主震-余震型： $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$ ；③双震型： $\Delta M < 0.6$ 且两次主要地震相隔时间在 2 分钟以上；④震群型： $\Delta M < 0.6$ 的地震次数在 3 次或 3 次以上。

双震型和震群型地震序列的相同之处在于，后续都还有较大地震发生。不同之处在于，后续类似强度地震的次数不同，双震型是 2 次，震群型是 3 次或 3 次以上。而实际上，在序列未完成之前，尤其是在序列初期阶段，究竟是双震型还是震群型几乎无法判定。

在本参考指南中,根据余震预测的实际需求并力求简化操作,依据最大与次大地震震级差将序列类型分为三类(蒋海昆等,2006a):

(1) 孤立型 (isolated earthquake): $\Delta M > 2.4$ 。

(2) 主震-余震型 (mainshock-aftershock, 下同简称主-余型): $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$ 。

(3) 多震型 (multiplet mainshocks): $\Delta M < 0.6$ 。

“主-余型”包括“前震-主震-余震型”。“多震型”包括以往文献中经常提及的“双震型 (doublets)”及“震群型 (swarms)” (Felzer et al., 2004)。

Tips

(1) 当假定整个序列能量主要来源于最大及次大地震的贡献,并取 M_L 震级标度时,前述基于能量及基于震级差的序列分类标准等价(蒋海昆等,2006a)。

(2) 序列类型的认定与所选定的震后时间长短有关。

(3) 序列分类的背后有非常复杂的物理内涵。简单而言,余震主要缘于主震破裂所导致的应力变化的触发影响(尤其是早期阶段),多震型地震和前震的发生机理可能与此有所不同,多震型地震只能发生于包含多个较大的单一凹凸体的地震带(Lay and Kanamori, 1980),前震则可能缘于即将发生的主震的成核过程的影响(Ohnaka, 1993; Dodge et al., 1995; Hurukawa, 1998)。

(4) 也有研究认为,被触发地震的大小与触发地震的大小无关,因此人们所看到的余震、多震型地震或前震,实际上均是一个单一的触发过程。在这一类模型中,所发生的地震均可能触发震中周围小断层凹凸体 (small fault patches) 的滑移,从而导致地震。

(5) 在文字表达层面,根据新华字典解释,“多”表示数量大,与“少”、“寡”相对,数目在二以上。“群”古意为三个以上的禽兽相聚而成的集体,《国语·周语》曰“兽三为群”,与“群”相对应的是“众”,古语解释“众从三人”,康熙字典【徐曰】“國語三人為眾,數成於三也”。因而,从汉文字字面上理解“多震型”确实可以涵盖以往“双震型”和“震群型”。

(6) 在科学层面,尽管以往“双震型”、“震群型”的表述在震后的震例总结研究中较为准确,也非常形象,但在实际序列跟踪及强余震预测工作中,在当前理论及技术条件下,要明确判断后续类似大小地震究竟是2次(双震型)还是2次以上(震群型),实际上非常困难,甚至于不可能。因而在实际应用及服务社会公众的时候,“多震型”的定义既是对序列类型的较好描述,同时又可避免当前由于理论及技术的欠缺所带来的尴尬,在一定程度上弥合了科技水平与社会需求之间的不吻合。

第2章 震后趋势判定规程

震后趋势判定，是指有影响的地震事件发生后，对地震影响地区近期地震活动形势的分析。

震后地震事件的预报按《地震预报管理条例》（中华人民共和国国务院令第255号，1998年12月17日颁布实施）执行。

震后趋势判定意见的发布按《震后地震趋势判定公告规定》（中国地震局令，第2号，1998年12月29日发布实施；2009年5月14日修订）执行。

震后趋势判定工作，包括序列类型判定、最大强余震震级估计、强余震发生时间预测、强余震地点判定等主要内容。

震后趋势判定意见，是对震后趋势判定工作内容的综合判定结论，一般通过震后应急会商会产出。

震后应急会商由震后首次会商和一系列后续会商组成。

震后应尽可能快地召开首次会商，粗略判定震后序列发展趋势，以服务于震区地方政府的应急响应行动。

是否开展后续会商、后续会商时间安排、后续会商何时停止等，应根据主震大小、余震活动情况、社会需求及上级要求等由各单位自行确定。

大地震发生后，政府、社会公众及上级管理部门迫切需要了解关于震后趋势的相关信息。但震后短时间内由于序列资料记录较短，无法依据序列参数进行序列类型判定及余震预测。换言之，震后早期一般只能依据历史地震和构造类比来初步判定后续趋势。因而，震后首次会商的主要工作内容和目标是：分析地震发生地区的地质构造及历史地震类型，结合地震发生区域及周边地区存在的中短期异常，初步判定地震序列类型，粗略预测近几日余震活动趋势，重点关注预测时段内最高余震活动水平的估计。

随震后时间的增加，余震记录逐渐丰富，一些基于地震记录的数据产品逐渐产出。因而，后续各时段的会商工作应重点对地震序列进行跟踪，依据余震时空演化、序列参数变化、历史序列类比、历史地震统计、震源及介质参数变化、库伦应力变化以及其它可能的模型及参数计算结果，跟踪预测近期（数天至3个月）的余震活动趋势，对序列类型、可能的最大余震震级、强余震发生时间等进行进一步的预测或确认。对破裂尺度较大的地震，在可能的情况下还应分析强余震的可能发生区域。在这一时段，前兆各学科应系统清理主震震中附近不同区域范围内的各类前兆异常，一方面判定该次地震后区域范围内的地震趋势，另一方面根据前兆短临变化对序列强余震进行预测。根据需要，还需针对该次地震对震中附近及构造相关区域在月时间尺度范围内未来地震活动趋势的影响开展研究。

序列后续地震活动强弱及序列地震活动持续时间与主震的大小有关。

本参考指南依据已发生地震的震级大小,分7级以上、6.0~6.9级和5.0~5.9级三档,对相关震后趋势判定工作进行叙述。

在震级分档的前提下,按照震后趋势判定工作的时间流程,又进一步细分为多个时段,叙述每个时段内所需开展的主要工作内容、工作目标及相关判据。具体计算方法及判定指标将在后续各章节中分别叙述。

震级分档及震后不同时段的划分依据,主要根据《地震现场工作管理规定》(中震救函〔2013〕42号)等文件中相关时间节点及以往震后趋势判定经验确定。

通常情况下,分震后首次、震后1~3天、震后4~7天、震后8~15天、震后16~30天及30天之后6个会商时段,各单位可根据序列活动情况及实际需求自行延长或缩短序列跟踪时间。

5级以下地震的震后趋势判定工作,由各单位视政府和社会需求情况自行决定。工作内容可参照本参考指南的相关部分。

2.1 7级以上地震的震后趋势判定

7级及7级以上地震发生后的整个序列跟踪过程中,一项重要的工作内容是序列类型判定。另一项重要的工作对占较大比例的主-余型序列而言,是强余震的震级估计及发生时间预测;对占较少比例的多震型序列,则重点是另一次或多次较大地震以及后续强余震的发生时间预测。

2.1.1 震后首次会商

震后数小时内的早期阶段,由于序列资料记录较短,无法开展序列参数计算等工作,震源破裂过程等数据产品亦未产出,这一时期主要依据历史地震活动及构造类比等方法来初步判定震后趋势。

2.1.1.1 目标

初步提出序列类型判定意见,预测近一、二天的序列活动趋势,重点关注预测时段内最高余震活动水平的估计。

2.1.1.2 工作内容

(1) 依据余震记录,给出序列 $M-t$ 图、频次 $N-t$ 图、序列地震空间分布图及主震震源机制。

(2) 描述主震基本情况(时间、空间、强度三要素),依据 $M-t$ 图及频次 $N-t$ 图,宏观描述截止到会商会时已知的余震活动情况。

(3) 依据对所发生的7级地震性质的分析,粗略判定序列类型(见3.2.1, p24)。

(4) 依据全国或构造片区已知的地震序列类型所占比例,统计判定本次地震可能的序列类型(见3.3.1, p26)。

(5) 利用历史地震数据,快速给出震中附近不同空间范围或构造相关区域的历史地震活动情况及历史地震序列类型统计结果。对7级及7级以上地震,通常应分别考虑震中附近

50、100、200km 范围内的情况。结合序列类型空间分布的区域特征,统计判定本次地震可能的序列类型(见 3.3.1, p26)。

(6) 利用现有地震构造数据,快速给出震中附近区域的构造概况。结合震源机制、历史地震活动及区域地震地质等资料以及早期余震空间分布,初步讨论可能的发震构造。依据发震区域构造特征分析,初步判定本次地震可能的序列类型(见 3.1.1, p23)。

针对发震构造的详细分析,对判定是否具备发生多震型地震的构造条件具有重要作用。

(7) 简单介绍地震所在区域现有的年度及短临预测意见。依据震中附近一定区域范围内的趋势及前兆短期异常(来源于年度及日常周、月会商),结合以往震例及本次地震震级和震中距等参数,初步判定本次地震是否能够全部或部分解释所存在的趋势及短期异常,确认本次地震是否即是所预期的地震,进而粗略判定震后趋势。

(8) 综合(1)~(6),给出本次地震序列类型和震后趋势的初步判定结果。

Tips

(1) 7 级以上地震发生后几个小时之内的首次会商,在基本无序列参数的情况下,主要分析地震发生地区的地质构造及历史地震类型,依据大区域范围内的地震序列类型统计结果及震中附近区域历史地震活动的类比分析,初步判定该地震可能的序列类型。

(2) 中国大陆 7 级以上地震序列类型为主-余型或孤立型的比例合计高达 92%,即使震中及附近区域历史上曾发生过 7 级以上的多震型地震,在首次会商没有更多依据的情况下,也宜先以主-余型地震的判定意见进行应对,再依据对序列演化的追踪分析,对判定意见进行动态修正。

(3) 复杂构造区域的发震断层分析,要尽可能结合震后数小时的余震分布来进行。

2.1.2 震后 1~3 天的序列跟踪分析

震后 1~3 天仍处于序列演化的初期阶段,序列资料仍然有限,基本上还只能给出初步的序列参数计算结果。在这一阶段的震情判断中,仍然主要依据震中周围构造及历史地震活动类比,结合有关“静态”统计结果和部分序列参数判定指标,将本次地震早期序列特征及序列参数与以往该区域不同类型序列进行对比,初步分析该次地震序列特征是与主-余型还是与多震型更为接近。

为密切跟踪序列发展和震情变化,在此期间建议每天召开震情会商会。

2.1.2.1 目标

重点关注震中附近区域的地震活动,进一步明确序列类型和后续震情发展趋势,提出较明确的趋势判定意见。

2.1.2.2 工作内容

(1) 震中附近区域构造及历史地震活动类比工作的进一步深化。

(2) 持续更新数据,给出不同震级下限的序列 $M-t$ 图及不同震级下限、不同统计时间间隔的余震频次 $N-t$ 图、应变释放 $\Sigma\sqrt{E}-t$ 图及序列地震空间分布图。

依据上述基础图件,宏观描述截止到会商时止的余震活动概况,总结震后早期阶段余震时、空演化特征。

(3) 开展序列类型判定及后续活动趋势估计。

①依据以往类似地震序列的类比分析,定性判定序列类型。此处所言的“类似”是一个相对定性、模糊的概念,可体现在同一区域、相似的发震构造、相似的主震震源机制、相近的主震震级等多方面。

②依据3、4级以上余震的 $M-t$ 图、 $N-t$ 图及 $\sum\sqrt{E}-t$ 图,分析序列随时间的衰减,重点考察不同震级下限余震活动是否具有密集-平静(见5.1, p100)或应变释放加速等现象(见3.4.7, p51)。

③根据不同时间尺度(例如0.5天或1天,依据实际余震活动情况确定)、不同震级下限的余震空间分布,重点关注余震分布图像形态,余震活动的空间迁移、扩散或丛集现象(见4.6, p95; 见6.5, p129)。

④计算 h 值,依据 h 值判定序列趋势(见3.4.2, p38)。震后早期,计算 h 值可先采用4小时、6小时、12小时等作为最小的时间统计单元,但须换算成以24小时为时间统计单元的计算结果之后再行判定。

⑤计算蠕变曲线 $\sum\sqrt{E_i}-\lg t_i$,依据蠕变曲线 $\sum\sqrt{E}-\lg t_i$ 的变化形态判定序列类型(见3.4.7, p51)。

⑥资料许可的情况下,计算 $G-R$ 关系及其比例系数 b 值,通过震级-频度关系曲线及序列 b 值与区域背景地震活动 b 值的比较,分析判断地震类型(见4.2, p88)。

⑦计算序列最大地震与次大地震的震级差 ΔM ,根据震后早期阶段 ΔM 的数值分布,判定可能的序列类型(见3.4.6, p51; 表3.11, p51)。同时,依据以往序列最大地震与次大地震之间的统计关系,判定最大强余震是否已经发生(见4.4, p91)。

⑧计算序列最大地震(震级为 M_0)的能量 E_0 ,以及最大地震后2天内与 M_0 震级差 ≤ 3.5 的所有地震能量之和 E_2 之比,依据 E_2/E_0 判定序列类型(见3.4.9(1), p54)。

⑨利用序列当前最大地震震级 M_0 、 M_0 后3天内的最大余震震级 M_3 、以及该时段内与 M_0 震级差小于2的地震次数 N_3 进行序列类型判定(见3.4.9(2), p54)。

⑩计算序列最大地震能量 E_0 与最大地震后3天内余震总能量 $\sum E$ 之比,依据 $E_0/\sum E$ 判定序列类型(见3.4.9(3), p54)。

⑪计算序列归一化能量熵 K 值,依据 K 值分布判定序列类型(见3.4.4, p50)。

⑫资料许可的情况下,利用等待时间方法判定序列类型(见3.4.3, p46)。

⑬计算主震及较大余震震源机制,考察震源机制一致性(见3.7.3, p72)。如无法计算震源机制,可选择震中附近观测及记录情况良好的地震台,考察其垂直向记录的P波初动方向的一致性。依据震源机制或初动方向的一致性,定性判断序列的后续趋势(见3.7.5, p75)。

⑭计算序列震源谱振幅相关系数,依据震源谱振幅相关系数间接判定震源区应力水平的高低,进而评估是否具备发生较强地震的可能(见3.7.4, p72)。

⑮计算主震及较大余震的应力降和视应力,依据应力降及视应力计算结果,定性评估序列后续活动趋势(见3.7.6, p75; 见3.7.7, p81)。

⑩资料许可的情况下, 计算主震释放效率 η , 依据 η 值大小, 判定序列类型 (见 3.7.8, p83)。

⑪资料许可的情况下, 分析主震震源错动方式 (见 3.7.9, p85), 结合震源错动方式、应力降及视应力计算结果, 综合判定序列类型 (见 3.7.10, p86)。

⑫依据余震分布或主震破裂过程反演结果, 确定主震破裂尺度。根据主震震级与主震破裂尺度的研究结果, 定性判定序列后续活动趋势 (见 3.6, p70)。

⑬当余震深度普遍较浅时, 后续发生更大地震的可能性不大 (见 3.4.14, p67)。

(4) 估计强余震或后续较大地震震级。

①依据以往类似地震序列的对比分析, 类比判定本时段可能的余震活动水平, 预测可能的最大强余震震级。此处所言的“类似”, 同样可体现在相同的区域、相似的发震构造、相似的主震震源机制、相近的主震震级、以及相同的序列类型等多个方面。

②拟合余震序列 $G-R$ 关系, 依据 $G-R$ 关系考察序列在某个震级段是否缺震, 判定序列可能的最大余震震级 (见 4.2, p88)。

③计算 h 值, 若 $h > 1$ 则可依据序列 h 值和 b 值计算后续最大强余震震级 (见 3.4.2.6, p40)。由于 h 值计算依赖于震后第一天的地震频次, 因而计算 h 值之前, 应首先确定序列的完备震级 (见 3.4.1, p36)。

④若已判定为主-余型序列, 则可取主震后 3~5 天的 $\sum \sqrt{E_i} - \lg t_i$ 曲线上某些高值点的连线作线性外推, 根据实测点与外推曲线的偏离程度粗略估计未来的地震强度 (见 3.4.7, p51)。需注意的是, 余震活动后期由于曲线斜率减小, 外推结果不可靠。

⑤若已初步判定了序列类型, 可依据以往序列最大地震与最大强余震震级之间的统计关系 (见 4.4, p91), 依据已发生的最大地震震级, 预测可能的最大强余震震级。

(5) 预测强余震或后续较大地震发生时间。

①依据以往类似地震序列的对比分析, 粗略判定余震活动的可能起伏时段。“类似”可体现在相同的区域、相似的发震构造、相似的主震震源机制、相近的主震震级、以及相同的序列类型等多方面。

②依据 h 值、 b 值以及其他经验性方法, 识别序列可能的最大余震 (见 5.7, p104), 一旦判定最大余震已经发生, 则可预测后续发生更大地震的可能性已经不大。

③计算序列最大地震与次大地震间的时间间隔, 依据以往序列强余震活动持续时间统计结果, 判定最大强余震或 5、6 级以上强余震是否已经发生, 或者预测最大强余震或 5、6 级以上强余震的可能发生时段 (见 5.8, p106)。

④计算序列 $G-R$ 关系比例系数 b 值随时间的变化, 依据 $b-t$ 图预测较大余震的可能发震时间 (见 5.3, p103)。

⑤计算序列余震的平均震级, 依据平均震级随时间的变化, 预测较大余震的可能发震时间 (见 5.4, p104)。

⑥依据震源机制一致性变化或 P 轴偏转等方法, 开展强余震发生时间预测 (见 3.7.3~3.7.5, p72~75)。

⑦在资料许可的条件下, 利用等待时间方法预测强余震发生时间 (见 5.6, p104; 见 3.4.3, p46)。

⑧关注较大余震发生时间的潮汐调制现象（见 5.10, p112）。

⑨关注余震深度的变化。当余震深度向深部发展时，有可能发生强余震。当判定为多震型序列时，有可能发生另一个或多个强震（见 3.4.14, p67）。

Tips

（1）无论哪一个时段，对序列资料的及时追加和补充，对序列基本图件的及时更新等基础性工作，是震后趋势判定工作的最基本要求，也有利于与会者对序列动态资料的掌握。

此外，震后首次会商即已开始的震中附近区域构造及历史地震活动类比分析等工作，在本时段及后续时段仍需持续开展。

（2）若前 3 天 $M-t$ 图、 $N-t$ 图和蠕变曲线 $\sqrt{E}-t$ 均显示序列“正常”衰减，余震空间分布未有异常显示， $h > 1$ ，序列多种参数判据分析与主-余型地震序列特点相符，震中周围历史上无 7 级的多震型地震发生，则可综合判断序列衰减基本正常，初步确认本次 7 级地震类型为主-余型，但对震区后续强余震仍需继续关注。

（3）若前 3 天 $M-t$ 图、 $N-t$ 图和蠕变曲线 $\sqrt{E}-t$ 均显示序列衰减不明显，特别是 4 级以上地震频次高，蠕变曲线有加速趋势， $h \leq 1$ ，其他各项参数与主-余型序列类型相比有差异，多项判据显示多震型特征，震源区历史上有 7 级的多震型震例，则该时段综合判定不宜排除属于多震型地震的可能。

（4）若主震震级达到 8 级或 8 级以上，一般可直接判定为主-余型序列。

（5）根据以往震例统计结果，序列最大强余震发生在震后 1~3 天的比例在 65% 以上，因而震后 1~3 天内，随时都有发生最大强余震的可能（见 5.8.1, p106）。

2.1.3 震后 4~7 天的序列跟踪分析

震后 4~7 天，序列资料逐渐完备，序列参数计算结果的可信度也逐渐提高，震源破裂过程、余震重新定位、应力降等可用于震后趋势判定的数字资料产品也已基本产出。在此期间，主要针对序列本身特点，结合各种方法得到的预测判据和分析意见，综合判定序列后续趋势，并对在此期间发生的中强以上余震开展粗略的跟踪预测。

震后 1 周左右的时间，对各项应急工作安排是一个重要的时间节点。中国大陆大量震例的回顾性检验结果也显示，利用震后 7 天的序列资料所进行的序列类型判定，孤立型、主-余型、多震型序列的判别正确率分别可达 90%、80% 及 70%。

该时段若序列演化较为平缓、各类序列参数基本正常且未发现明显的短临异常，则震情会商的时间间隔可适当增长。

2.1.3.1 目标

基本确定序列类型，给出序列最大强余震震级及发震时间的粗略估计；根据序列演化，预测较强余震的发生时间。

2.1.3.2 工作内容

(1) 前述 2.1.2.2 节各项工作的继续和深化。

(2) 由于该时段序列资料已较为丰富，基本上已经可以计算各种序列参数。因而在有条件的情况下，可依据震后前 7 天的序列参数计算结果，开展序列类型的综合判定（见 3.4.13, p58）。

(3) 震后 1 周，前兆观测的同震响应或影响已较为明显，震前短临异常是否恢复或转折、震后是否出现新的短临变化等在一定程度上已初现端倪，此时前兆短临异常变化可用于强余震的短临跟踪预测（见 5.12, p119）。

Tips

(1) 根据以往统计，对主-余型序列而言，最大强余震发生在震后前 10 天的比例最高，因而在震后 1 周的序列跟踪过程中，随时都有发生最大强余震的可能。

(2) 若前 7 天序列衰减基本正常，特别是余震强度和频次随时间衰减明显且 $h > 1$ ，序列多种参数分析显示主-余型特点，其他多种方法判据多数符合主-余型地震的类型，震前前兆观测中短临异常逐步恢复，震源区及附近相关构造历史上没有 7 级多震型震例，结合前述 1.2 中的相关静态统计结果，可基本判定该次 7 级地震为主-余型序列，后续原震区发生类似大小或更大地震的可能性不大，但需继续关注发生较强余震的可能。

(3) 若前 7 天序列衰减不明显，4 级以上地震频次起伏变化且 $h \leq 1$ ，蠕变曲线显示加速特征，序列参数和其他判据部分指标显示多震型特征，序列中等强度余震震源机制趋于一致或小震 P 波初动一致性较好，序列地震部分震源参数计算结果与主-余型序列有差异，震前出现的短临前兆异常震后没有恢复或又出现新的短临异常，震源区及附近相关构造历史上有 7 级多震型地震发生，则倾向于预测未来一周内震源区及周围仍有发生 7 级左右地震的可能。但需要指出的是，无论是在震例回顾还是在实际 7 级震情跟踪和趋势判定工作中，明确判定为 7 级多震型地震的实例非常少。

(4) 对于 7 级以上地震，震后数天是余震最为活跃的时段，其间一般会有多次较强余震发生。在某些中强余震发生前，往往有中小余震活动的平静现象，但“平静”的表现形式千差万别，诸如“密集—平静—发震”“平静—密集—发震”“平静—密集—平静—发震”等等不一而足，切不可生搬硬套。与平静之后的“密集”相关联的现象是，一些较强余震前会出现应变释放的明显加速现象。还应当注意的是，序列前期这种异常平静现象的持续时间较短，而随着序列发展，强余震前的平静时间会相应延长，异常特征也不如前期明显。此时要注意区分究竟是异常平静还是正常衰减，这项工作在技术上较为困难。

(5) 7 级以上地震发生后 1 周，地震序列已基本成型。在这一过程中，部分序列参数可能会给出不一致甚至相反的预测结论，这是非常正常的现象，这时综合分析的预测思路尤显重要。更为重要的是，在震后早期序列跟踪过程中，要注意总结本序列较强余