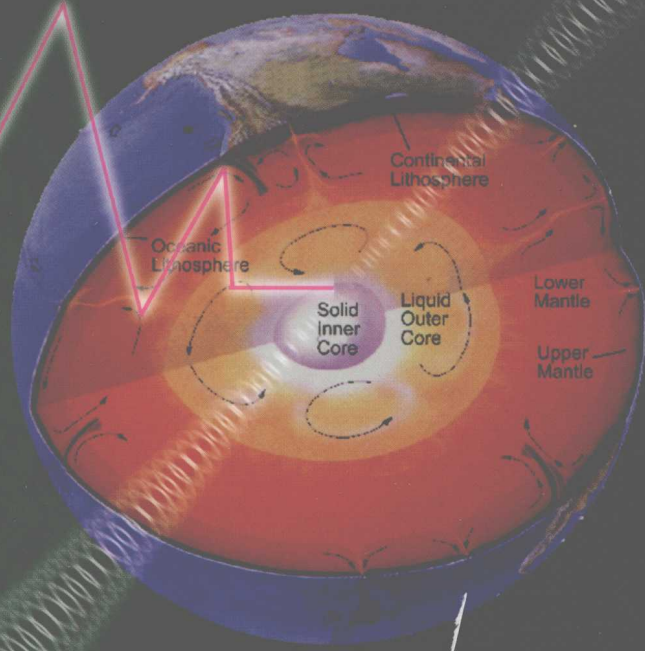




“十五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

# 中国大陆地震序列研究

中国地震局监测预报司



地震出版社

“十五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

# 中国大陆地震序列研究

中国地震局监测预报司

地震出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

中国大陆地震序列研究/中国地震局监测预报司. 北京: 地震出版社, 2007. 7  
(“十五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书)

ISBN 978-7-5028-3143-1

I. 中... II. 中... III. 地震—序列—研究—中国 IV. P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 092166 号

**地震版 XT200500234**

中国大陆地震序列研究

中国地震局监测预报司

责任编辑: 薛广盈

责任校对: 宋 玉

---

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

---

版(印)次: 2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 365

印张: 14.25

印数: 001~800

书号: ISBN 978-7-5028-3143-1/P·1332 (3832)

定价: 42.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

## 丛书编委会

主 任：岳明生

副主任：李 克 车 时

委 员：张晓东 江在森 刘 杰 蒋海昆  
刘耀炜 刘桂萍 李永林 黄蔚北

编 著：蒋海昆 傅征祥 刘 杰 吕培苓

## 序 言

地震预报，尤其短时间尺度的预报作为当代自然科学领域里一个难度很大而富有魅力的前沿课题吸引着一代又一代的地震科技工作者为之奋斗不息。其魅力不仅在于地震孕育、发生的许多奥秘有待我们去揭示，更重要的是在于成功的预报可以使许多国人免遭罹难。自从1966年我国正式开展地震预报研究与实践以来，我们既有过不少预报成功的欣慰，也经历了许多遭受挫折的悲痛与沉思。但成功与挫折都给我们以有益的启示，说明地震预报决不是“占星术士”的卜算。在现阶段对某些大地震在震前作出一定程度、乃至较成功的科学预报是有可能的，但要对多数大震作出准确的预报，还需要我们长期坚持不懈、坚韧不拔的努力。在人类历史的长河中，人们对任何复杂事物的认识都有一个从不怎么全面、不怎么深入、不怎么准确到逐渐全面些、深入些的过程。毫无疑问，对认识地震孕育发生过程来说，也是如此。只要认真查阅一下近几个五年计划地震预报攻关研究的成果，必然会得出这样的结论，只要认真研读一下国家“十五”科技攻关项目“强地震短期预测及救灾技术研究”成果，就可以看出，我们的认识又有了新的提升。

“强地震短期预测及救灾技术研究”坚持“研、用”结合的原则，既及时地把研究所得到的新认识应用于地震预报实践，又把预报实践中遇到的新问题、发现的新现象作为攻关研究的重要内容；坚持把普遍性寓于特殊性之中的思想方法，在华北、西南、西北、东南等地区强地震短期前兆特征研究的基础上进行归纳和综合分析，既重视强地震短期前兆的共性表现，又注意不同地质构造之间的差异；坚持在继承基础上的创新，既重视已有研究成果预报经验的应用和常规方法的完善，又立足于创新，通过数值模拟、岩石力学实验和数字化观测资料的应用等，加强强震孕育物理过程和前兆机理及相应的预报新理论、新方法的探索。从而取得了一批既在科学认识上富有新意，又有重要实用价值的研究成果。所编印、出版的这套丛书正是“十五”攻关的这些阶段性成果的集

中体现。它既是广大地震科技工作者集体智慧的结晶，又可将为广泛地震科技工作者深入的地震预报研究与实践提供新的借鉴与思考。

这套丛书为“十五”期间地震预报攻关研究阶段性成果的总结，既为我们提供了许多新的认识，也为我们留下和提出许多新的问题。这意味着“十五”预报攻关研究的总结是新的深入研究的开始。面对地震灾害的威胁，广大同行一定会继续以严谨的科学态度，扎扎实实的工作作风，坚韧不拔的精神，立志地震预报理论、技术、方法的创新，在未来地震预报实践中谱写新的篇章，铸造成功预报的新的辉煌，更好地服务于国家、造福于人民。

陈章立

2004年9月1日

# 目 录

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 绪 论                              | (1)  |
| 第一章 中国大陆余震序列活动特征                 | (5)  |
| 1.1 余震活动的时间分布特征                  | (5)  |
| 1.1.1 大森(Omori)余震衰减规律            | (5)  |
| 1.1.2 修改的大森公式                    | (6)  |
| 1.1.3 传染型余震序列模型(ETAS 模型)         | (7)  |
| 1.1.4 中国大陆中强地震序列早期 ETAS 模型参数统计特征 | (11) |
| 1.2 余震活动的空间分布特征                  | (15) |
| 1.2.1 余震活动空间分布的不均匀性              | (15) |
| 1.2.2 余震分布范围的变化(余震区扩展)           | (18) |
| 1.2.3 主震断裂带之外的余震活动               | (18) |
| 1.2.4 远余震活动                      | (19) |
| 1.2.5 前震、余震分布深度                  | (19) |
| 1.3 余震活动的强度分布特征                  | (20) |
| 1.3.1 余震活动的震级-频度关系               | (20) |
| 1.3.2 前震和余震序列的 $b$ 值差异           | (21) |
| 1.3.3 序列最大余震震级                   | (22) |
| 1.3.4 序列主震震级 $M_0$ 与主震断层类型之间的关系  | (23) |
| 参考文献                             | (24) |
| 第二章 余震序列类型划分及序列类型判定的时序方法         | (29) |
| 2.1 序列分类                         | (29) |
| 2.2 余震序列分类及主要特征                  | (30) |
| 2.3 地震性质及序列类型判定的定性方法             | (33) |
| 2.3.1 地震事件性质分析                   | (33) |
| 2.3.2 地震活动背景分析                   | (35) |
| 2.3.3 震后区域性地震趋势分析                | (37) |
| 2.4 基于序列演化特征的序列类型判定              | (38) |
| 2.4.1 $h$ 值方法                    | (38) |
| 2.4.2 归一化能量熵 $k$ 值方法             | (44) |
| 2.4.3 蠕变曲线                       | (44) |

|            |                            |             |
|------------|----------------------------|-------------|
| 2.4.4      | 频度曲线                       | (45)        |
| 2.4.5      | $F$ 值                      | (45)        |
| 2.4.6      | 地震波形线性度                    | (45)        |
| 2.4.7      | 前、余震识别的单键群方法               | (47)        |
| 2.4.8      | 基于序列地震间时间间隔分布的前余震序列类型判定    | (48)        |
| 2.4.9      | 部分多震型序列类型的早期判定             | (51)        |
| 2.5        | 余震序列类型判定单参数判据的统计评价         | (52)        |
| 2.5.1      | 余震序列类型的单参数判据               | (54)        |
| 2.5.2      | 余震序列类型判定单参数判据的统计评价         | (58)        |
| 2.6        | 中国大陆余震序列类型的综合判定            | (59)        |
| 2.6.1      | Fisher 判别分析方法简介            | (60)        |
| 2.6.2      | 判别函数自变量选择及序列单参数计算          | (60)        |
| 2.6.3      | 中国大陆序列类型综合判别函数             | (61)        |
| 2.6.4      | 统计检验结果                     | (67)        |
|            | 参考文献                       | (68)        |
| <b>第三章</b> | <b>中国大陆中强地震序列类型空间分布特征</b>  | <b>(71)</b> |
| 3.1        | 西南地区序列类型空间分布特征             | (74)        |
| 3.2        | 新疆地区序列类型空间分布特征             | (75)        |
| 3.3        | 西北地区序列类型空间分布特征             | (76)        |
| 3.4        | 大华北地区序列类型空间分布特征            | (77)        |
| 3.5        | 序列类型空间分布与构造及深部介质特征之间的关系    | (78)        |
| 3.6        | 讨论                         | (79)        |
|            | 参考文献                       | (80)        |
| <b>第四章</b> | <b>中国大陆中强地震余震分布尺度的统计特征</b> | <b>(81)</b> |
| 4.1        | 序列余震分布尺度及优势破裂方位的确定         | (81)        |
| 4.2        | 序列主震破裂形式及破裂方位              | (82)        |
| 4.3        | 余震分布尺度与主震震级的关系             | (83)        |
| 4.4        | 序列余震分布尺度与主震断层性质的关系         | (85)        |
| 4.5        | 讨论                         | (87)        |
|            | 附录                         | (88)        |
|            | 参考文献                       | (95)        |
| <b>第五章</b> | <b>余震活动持续时间及后续显著地震预测</b>   | <b>(97)</b> |
| 5.1        | 余震活动持续时间研究概述               | (97)        |



|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| 5.2 不同类型序列 1 年内强余震活动的持续时间 .....           | (100)     |
| 5.2.1 全序列最大余震与 1 年内最大余震之间的关系 .....        | (101)     |
| 5.2.2 序列 1 年内 6 级以上余震活动持续时间 .....         | (101)     |
| 5.2.3 序列 1 年内 $M \geq 5.0$ 余震活动持续时间 ..... | (102)     |
| 5.2.4 震后 1 年内最大余震与主震之间的时间间隔 .....         | (103)     |
| 5.2.5 序列活动期间不同层次余震时间分布的准周期或自相似特性 .....    | (104)     |
| 5.3 后续强余震预测 .....                         | (105)     |
| 5.3.1 最大余震震级 $M_m$ 的估计 .....              | (105)     |
| 5.3.2 最大余震的识别 .....                       | (106)     |
| 5.3.3 强余震时间预测 .....                       | (107)     |
| 5.3.4 强余震地点预测 .....                       | (108)     |
| 5.4 晚期强余震及其活动时间 .....                     | (109)     |
| 5.5 基于大森衰减公式的余震发生概率估计 .....               | (110)     |
| 5.6 中国大陆基于 ETAS 模型的余震发生概率预测 .....         | (114)     |
| 5.6.1 方法简介 .....                          | (114)     |
| 5.6.2 预测实例 .....                          | (115)     |
| 5.6.3 预测能力评价 .....                        | (116)     |
| 参考文献 .....                                | (121)     |
| <br>第六章 数字化资料在地震序列中的应用研究 .....            | <br>(123) |
| 6.1 地震序列的精定位 .....                        | (123)     |
| 6.1.1 2003 年云南大姚 6.2 级、6.1 级地震序列精定位 ..... | (124)     |
| 6.1.2 姚安地震序列精定位 .....                     | (127)     |
| 6.1.3 永胜地震序列精定位 .....                     | (129)     |
| 6.2 震源参数分析 .....                          | (131)     |
| 6.2.1 应力降与拐角频率的分析 .....                   | (132)     |
| 6.2.2 环境背景剪应力和视应力的变化特征分析 .....            | (139)     |
| 6.3 震源机制分析 .....                          | (144)     |
| 6.3.1 余震序列震源机制的时间变化 .....                 | (144)     |
| 6.3.2 地震序列的震源机制变化特征 .....                 | (147)     |
| 6.3.3 采用体波谱振幅相关系数方法研究地震序列的震源机制变化 .....    | (150)     |
| 6.4 尾波 $Q_e$ 值分析 .....                    | (154)     |
| 6.4.1 1999 年岫岩地震序列尾波 $Q_e$ 特征分析 .....     | (155)     |
| 6.4.2 姚安地震序列尾波 $Q_e$ 特征分析 .....           | (157)     |
| 6.4.3 施甸地震序列尾波 $Q_e$ 特征分析 .....           | (158)     |
| 6.4.4 永胜地震序列尾波 $Q_e$ 特征分析 .....           | (158)     |

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| 6.4.5 大姚地震序列尾波 $Q_e$ 特征分析 .....     | (160)        |
| 6.4.6 小结 .....                      | (160)        |
| 6.5 S波分裂 .....                      | (161)        |
| 6.5.1 大姚地震序列 S波分裂特征 .....           | (161)        |
| 6.5.2 姚安地震序列 S波分裂特征 .....           | (165)        |
| 6.5.3 小结 .....                      | (168)        |
| 6.6 波速比分析 .....                     | (170)        |
| 6.6.1 岫岩地震序列波速比特征分析 .....           | (170)        |
| 6.6.2 大姚地震序列波速比特征分析 .....           | (171)        |
| 6.6.3 施甸地震序列波速比特征分析 .....           | (171)        |
| 6.6.4 姚安地震序列波速比特征分析 .....           | (173)        |
| 6.6.5 小结 .....                      | (175)        |
| 参考文献 .....                          | (175)        |
| <b>第七章 地震序列机理研究 .....</b>           | <b>(177)</b> |
| 7.1 岩石实验研究 .....                    | (177)        |
| 7.1.1 岩石实验地震学 .....                 | (177)        |
| 7.1.2 地壳构成物质的形变和破裂特性的物理实验 .....     | (178)        |
| 7.1.3 地震序列发生特性的实验 .....             | (179)        |
| 7.2 凹凸体模型 .....                     | (181)        |
| 7.3 流变学模型 .....                     | (183)        |
| 7.4 黏弹性介质裂纹扩展模型 .....               | (187)        |
| 7.4.1 在非均匀应力影响下具有滑动弱化区的静态剪切裂纹 ..... | (187)        |
| 7.4.2 在非均匀应力影响下裂纹准静态扩展 .....        | (188)        |
| 7.4.3 地震序列模拟 .....                  | (189)        |
| 7.5 黏弹介质非均匀摩擦模型 .....               | (192)        |
| 7.6 流变-断裂模型 .....                   | (195)        |
| 7.7 脆性-韧性模型 .....                   | (196)        |
| 7.8 孔隙流体扩散模型 .....                  | (199)        |
| 7.9 成核模型 .....                      | (203)        |
| 7.10 应力腐蚀模型 .....                   | (207)        |
| 7.11 应力变化触发模型 .....                 | (210)        |
| 参考文献 .....                          | (214)        |

## 绪 论

一次较大地震发生后,在其震源区及邻近区域会观测到地震活动的明显增加,这些明显增加的地震一般称之为余震,将此前发生的较大地震称之为主震。同时,在有些情况下,在该主震发生前,震中附近有时会记录到突然增强的小震活动,此即通常所说的前震。这样一个由前震、主震、余震或仅由主震和余震(没有前震)构成的时空群集称作地震序列。前震、主震、余震分别是中强地震孕育、发生、发展整个过程中一个极其重要组成部分,其中余震序列是最频繁观测到的中强震的后效。本书重点描述和研究的“地震序列”,主要指一次主震发生后,在其震源区及邻近地区发生的地震的时空群集特征。

地震序列观测和研究的历史相当久远。在 19 世纪末,由于近代地震仪研制成功及其往后的发展,奠定了现代地震学和地震活动性研究的重要基础。在这之前,对地震序列的认识主要是依赖于地震区居民对震动及其破坏的感知,并以文字材料记载下来。据吴开统等 1990 年的研究,我国第一条有余震活动的人感宏观记录资料,是公元前 186 年 2 月 22 日甘肃武都东北烈度为Ⅷ度强的地震,记录称“武都山崩,死 760 人,地震至八月乃止”,这一记录形象地描述了主震大小、伤亡情况及序列活动持续时间。之后的记录如公元 1627 年夏山西平定Ⅶ度地震,“余震或一日两次,或三五日一次,经两月余方止”,描述了序列的起伏活动特征及持续时间;1709 年 10 月 14 日宁夏中卫Ⅸ到Ⅹ度地震,“辰时大震,巳时又震,自是连震五十余日,日夜十余次或二三次,年余始定”,描述了类似双震型地震的活动特征以及序列起伏衰减、活动持续时间等序列基本情况。1811~1812 年初,在美国沿密西西比河密苏里州南部的圣马德里斯地区,连续发生三次特大地震(1811 年 12 月 16 日 8.6 级,1812 年 1 月 23 日 8.4 级和 1812 年 2 月 7 日 8.7 级),当时的有感情况记载是,在此期间发生了“约 187 次震动,其中有 8 次强烈震动”。

地震序列一方面时空分布高度丛集,活动水平逐渐衰减,在一定程度上具有对研究对象“简化、降维”的特点;另一方面由于地震序列发生在一个狭小的空间范围内,并在一个特定的时段内连续发生,其发震构造环境及环境应力场具有相似特性,发震机制具有某种内在联系。由于余震活动频繁,具有大量可研究的观测资料,余震时、空、强分布特征包含了余震自身孕育、发展、发生过程的规律及特点,携带有大量涉及主震破裂过程的信息,可能与主震破裂过程和断裂面的几何性质有密切关系,反映了地壳内断裂面及周围环境的物理属性。因而对地震序列观测现象及其物理机制的研究,是理解地震过程的重要途径,从而使地震序列成为一个经久不衰的研究领域。

在全球,每当一次有影响的地震事件发生,相关国家的专家都十分注意观测、分析和整理各方面的资料,包括地震的地质构造背景、历史地震活动、震源过程、深部结构、介质参数、震源机制及前兆异常等内容,其中地震序列研究是不可缺少的重要组成部分,出版的专著、专辑、专刊和发表论文数量非常之多。1906 年美国旧金山、1923 年日本东京和 1976 年中国唐山大地震等都有专著出版。同时由于强余震活动会对主震后已经受损的地震区再次造成严重的人员伤亡和财产损失,进一步影响到社会的安定,因此地震序列的观测、序列活动

规律、序列形成机理以及强余震预测的研究,具有重要的理论研究价值、应用价值和显而易见的社会意义。国际上对地震序列的研究大多着重于序列形成机理、物理演化模式及统计模型研究等方面。

正确的序列性质判定、序列趋势估计及强余震预测,有助于政府开展地震应急、抗震救灾及恢复重建的正确决策。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级的成功预报)也得益于对序列前震活动特征的把握。

总的来看,国内对地震序列性质判定指标及方法开展了广泛的统计研究,在一定程度上形成了具有中国特色的序列研究成果,在国内中强地震序列趋势判定、强余震预测等工作中发挥了极其重要的作用。具体来看,依托于“八五”科技攻关项目,刘蒲雄等对地震序列的重要研究成果主要体现在1997、1998年由国家地震局监测司组织编著出版的《地震短临预报的理论与方法——“八五”攻关三级课题论文集》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》两本书中。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编著出版的《地震学分析预报方法程序指南》(1990)及中国地震局编著出版的《地震现场分析大纲及技术指南》(1998)中得到系统体现。同一时期,由吴开统等人编著出版的《地震序列概论》(1990)成为我国地震序列综合研究的最重要著作之一。国内地震序列研究的特点是以实际震例的统计对应研究为主,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较少。

中强地震序列特征及序列性质判定研究,属地震短期预测研究的重要组成部分。作为地震短期预测的重要内容之一,在“十五”科技攻关计划延续项目中设置专门的专题对地震序列统计特征及强余震预测进行研究(地震序列统计特征与强余震短期预测方法研究,专题编号:2004BA601B01-04),该专题下设三个子专题,分别是王海涛研究员承担的04-01子专题“巴楚-伽师强震序列的深入研究”、蒋海昆研究员承担的04-02子专题“余震序列统计特征及强余震预测研究”以及刘杰研究员承担的04-03子专题“数字化资料在地震序列中的应用研究”。其中,04-01子专题从各个方面对巴楚-伽师强震群序列进行系统的研究,类似于典型序列的深入解剖;04-02子专题在占有更多统计样本的基础上,重点研究余震序列统计特征及强余震预测方法,重点是对以往认识的系统检验、优化及新方法的探索;04-03子专题着重于探索数字地震波形资料在序列研究中的应用。

本书共分七章,主要涉及地震序列统计特征、序列类型判定与强余震预测、数字化地震波形资料在序列研究中的应用探索、序列研究机理等内容。第一章从时、空、强三个方面,系统介绍了中国大陆余震序列活动特征;第二章主要涉及余震序列类型划分及序列类型判定,包括序列类型判定的定性方法、基于序列时间演化特征的序列类型判定、序列参数的统计评价及综合判定等内容;第三章按不同区域重点讨论了中国大陆中强地震序列类型空间分布特征,以及序列类型空间分布与构造及深部介质特征之间的关系;第四章重点研究了中国大陆中强地震余震分布尺度的统计特征,包括序列主震破裂形式及破裂方位、余震分布尺度与主震震级及与主震断层性质之间的关系等内容;第五章主要述及余震活动持续时间及后续显著地震预测;第六章主要表述数字化地震观测资料在地震序列中的应用研究,包括序列精定位、震源参数变化、震源机制、尾波 $Q_v$ 值、S波分裂及波速比变化等内容;第七章较系

统地介绍了国内外地震序列机理研究成果，内容涉及岩石实验研究及一系列物理（统计）模型及其数值模拟结果。

中国地震局监测预报司各级领导非常关注本书的编撰和出版，在 04-02 子专题中单列出版经费给予支持。本书主要在 04-02、04-03 子专题研究的基础上写成，但本书中内容绝不仅仅局限于上述两个子专题的研究成果。写作之初的想法即是不想使其成为一项目研究的“结题报告”，力争向“引论”或“概论”性质的书籍靠拢。因而如上所述，书中除介绍我们近年来在地震序列方面的研究进展外，还用较大篇幅系统地介绍了前人在相关领域的研究成果，尤其是较全面地介绍了国内外地震序列机理研究成果，我们觉得这方面研究内容是国内序列研究人员涉猎相对较少的部分。

参与 04-02 项目研究的人员有蒋海昆、曲延军、李永莉、彭克银、郑建常、华爱军、代磊和侯海峰，参与 04-03 项目研究的人员有刘杰、付虹、刁桂苓、王琳瑛、朱航、刘丽芳、刘红桂。

在 04-02 及 04-03 子专题实施过程中，得到“十五”项目顾问专家张国民研究员、傅征祥研究员、罗兰格研究员、高旭研究员、韩渭宾研究员、陆远忠研究员、课题负责人张晓东研究员等的指导，他们在各次阶段检查会议上的点评及提出的具体意见，为子专题的顺利完成提供了重要保证。

在 2004 年 11 月香山“预报战略研讨会”期间，许绍燮院士就序列参数计算问题曾给予指导；与刁桂苓研究员讨论了有关序列主震的破裂机制问题；万永革教授提供了滑动角计算程序的源代码供作者参考；张晓东研究员、杨立明研究员、孙佩卿研究员、赵卫明研究员、王安东副研究员、曹井泉副研究员帮助收集了部分序列资料；中国地震台网中心情报信息部吴琼副教授帮助整理了诸多文字、图表及参考文献。

所使用的震源机制结果大量来源于张肇成、陈棋福等主编的《中国震例》，部分较新的结果来源于相关省地震局的年度会商报告。限于篇幅，参考文献中不能一一列举。

中国地震局监测预报司车时副司长、预报管理处刘桂萍处长、李永林副处长、黄蔚北副处长对该书的编撰和出版给予诸多关注及支持。

借本书出版之际，对以上各位的指导和帮助致以衷心的感谢！

本书第一、二章由蒋海昆、傅征祥、吕培苓撰写，第三、四、五章由蒋海昆撰写，第六章由刘杰撰写，第七章由傅征祥撰写，全书由蒋海昆统稿。

需要说明的是，尽管我们付出了巨大的努力，但由于水平所限及时间仓促，该书与我们预先的设想尚有较大距离，与地震管理部门的要求仍是相差较远。正是基于这一考虑，也将书名叫做《中国大陆地震序列研究》，因为“研究”深度可深可浅，“研究”领域可宽可窄，而不像“概论”或“引论”类书籍那样具有非常高的定位，以免给读者以“名不副实”之感。这样的处理方式，给作者留有余地的同时，也给我们留有了希望，期望在足够长的时间之后，我们有能力再写一本类似的书籍。



# 第一章 中国大陆余震序列活动特征

余震序列活动特征主要包括序列时间分布特征、空间分布特征及强度分布特征等三方面。修改的大森公式一直是余震序列频次随时间衰减的最好描述。20 世纪 80 年代以来, 随着非线性思想及非线性理论的发展, 针对“余震激发余震”的问题及部分余震序列对修改的大森公式的偏离, 基于自相似理论提出的传染性余震序列模型 (ETAS 模型) 得到广泛应用。从理论上, 修改的大森公式是 ETAS 模型的特殊形式。余震空间分布特征研究涉及的问题首先是余震活动空间分布的不均匀性及其制约因素。归纳余震易于发生的区域, 从主震滑移来看, 主要是主震滑移终止区域、高、低滑移区转换部位、未破裂障碍体边缘及低滑移区; 从主震断层几何特征来看, 主要是叠瓦构造区域、断层走向改变部位及与其它断层的交汇部位, 在远离主震断层的区域, 要关注特殊构造部位及弯曲断层的凹入一侧。余震空间分布特征研究的另一个重要内容, 是余震分布范围的变化及余震分布尺度的扩展, 而破裂尺度与地震应力降或应变释放程度等物理过程有关。根据近期的一些理论及震例研究, 在一个应力加载循环中, 随着时间的推移, 构造应力逐步增强, 发生地震的部位将逐步向深处迁移。据此, 前震序列与普通震群序列的显著差别之一应该是, 前者震源深度分布有一个持续下迁的趋势, 而后者则可能集中在某一范围内发生。因而从震情跟踪的需要出发, 前、余震分布深度的变化是值得关注的一个问题。序列强度分布特征主要由  $G-R$  关系体现。从机理探讨与实际预测应用的角度来看, 前、余震序列的  $b$  值差异与序列最大余震是值得仔细研究的问题。

## 1.1 余震活动的时间分布特征

### 1.1.1 大森 (Omori) 余震衰减规律

日本地震学家大森 (Omori, 1894a、b) 研究了 1891 年日本中部 Nobi (美浓) 8 级大地震和其它两次日本地震的有感余震, 按半日和月频度衰减的情况, 指出单位时间内余震频度  $n(t)$  随时间  $t$  的变化可以很好地表达为

$$n(t) = K(t+c)^{-1} \quad (1.1)$$

式中,  $K$  和  $c$  为常数;  $t$  从主震发震时间算起,  $t=0, 1, 2, \dots$ , 为相应第 1、第 2、…单位时间间隔。

进一步指出美浓大地震的余震活动延续 10 年之久 (Omori, 1902)。图 1.1 是在美浓大地震余震区内的 Gifu 市感受到余震的发生率衰减曲线 (1891 年 10 月 28 日 18 时至 1899 年)。

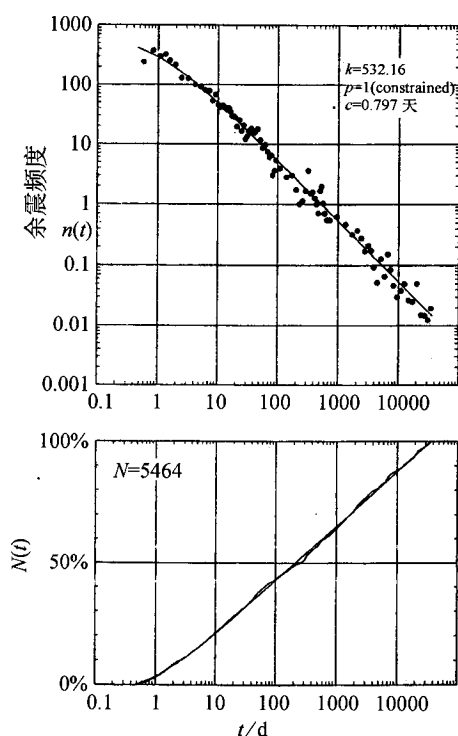


图 1.1 1891 年 10 月 28 日日本美浓 8 级大地震后在 Gifu 市感受到余震的发生率衰减曲线

Omori 余震随时间衰减的规律和 Gutenberg 与 Richter (1944) 提出的震级-频度关系，被誉为地震活动性研究的两大统计规律，它们形式简洁而又应用广泛。

### 1.1.2 修改的大森公式

在 Omori 提出余震衰减律后，许多研究表明，不同地震余震衰减律的指数往往不等于 1 (Hirano, 1924; Jeffereys, 1938; Utsu, 1957)。Utsu (1957) 强调，有些地震的余震活动衰减比 Omori 公式预期的要快。这种差别可能与区域构造条件有关 (Utsu *et al.*, 1995)。

Utsu (1957; 1961) 建议采用修改的 Omori 公式

$$n(t) = K(t + c)^{-p} \quad (1.2)$$

式中， $c$  为很小的正数； $p$  为衰减系数。

近百年来，基于修改的大森余震衰减规律，关于地震序列的研究成果不胜枚举，在第二章中将要介绍的  $h$  值方法即是大森余震衰减规律推广应用的一个典型例子。修改的大森余震衰减规律更多的应用在于对序列衰减特性的定量描述，Utsu (1961; 1969) 应用修正的 Omori 公式确定了不同地区的 51 个余震序列的  $p$  和  $c$  值，得到  $p$  在 0.9~1.8 之间变化，其中以 1.1~1.4 最多。1995 年 Utsu 等撰写了一篇纪念 Omori 余震衰减律发表 100 周年的文



章,对1962~1995年间全球已发表的200多个 $p$ 值计算结果进行分析,其结果表明 $p$ 值分布在0.6~2.5之间,均值是1.1。王碧泉等(1983)认为中国大陆东部多数大地震( $M \geq 7$ )的 $p$ 值较低(0.56~0.99)。赵志新等(1992)的研究指出,中国大陆的32个序列的 $p$ 值在0.63~1.54之间变化,均值为0.95。 $p$ 值似乎与主震震级大小和使用资料的震级下限没有相关关系(Utsu, 1962; Lomnitz, 1966a, b; Papazachos, 1974; Eaton, 1990)。

Mogi (1962a)研究了日本31个余震序列 $p$ 的地理分布,通常在日本海一侧 $p$ 值高,在太平洋一侧的 $p$ 值低。这样的分布,似乎是与表面热流值分布大体一致。余震衰减较快( $p \geq 1.3$ )的余震活动位于地壳温度较高的地区,那里的应力松弛快(Mogi, 1967)。Kisslinger和Jones (1991)的研究也得到类似的结论。这里所显示的 $p$ 值的区域分布特征实际上与序列类型的区域分布特征相关联,而序列类型的区域分布特征又与区域地下介质状况有关。

许多地震后仅记录到少量余震,不足以计算 $p$ 值和 $c$ 值。但有可能将一个区域多次余震序列叠加起来,去研究其衰减特征(Utsu, 1969)。Papazachos (1974)对希腊地区37个序列叠加得到 $p=1.13$ ; Davis和Frohlich (1991)对全球资料研究得到,浅源消减带的 $p=0.89$ ,洋脊转换带的 $p=0.93$ ,中深源地震的 $p=0.54$ 。还需要指出的是,根据Mogi (1962a)对日本及邻区、陆运忠等(1983)对中国近代大地震序列衰减所开展的研究,在余震活动的过程中, $p$ 值随时间会发生改变,即震后不同时期余震衰减率有差异。

除修改的大森公式外,还有一些学者提出不同的余震衰减公式,但应用并不普遍。例如, Otsuka (1985)提出过一种由修改的大森公式和指数函数相乘的复合公式:

$$n(t) = Ke^{-at}(t+c)^{-p}$$

在一些序列的晚期,余震活动亦可用指数衰减方式进行描述(Utsu, 1957; Mogi, 1962a; Watnanabe and Kuroiso, 1970; Kisslinger, 1993); Kagan和Knopff (1987)认为序列中早期余震活动按 $t^{-1.5}$ 方式衰减。也有一些学者应用Weibull分布、Gamma分布和Log-normal分布描述余震活动的时间过程(Souriau *et al.*, 1982)。

由于强余震常伴随有高阶余震的发生,部分余震序列并不按大森公式正常衰减,而是显示“余震激发余震”的特性,即较大余震本身能够激发自身的高阶余震。Utsu (1970)和Ogata (1986)曾用一系列修改的大森公式的和来表达这种含有高阶余震的序列的频次特征:

$$n(t) = K(t+c)^{-p} + H(t-T_1)K_1(t-T_1+c_1)^{-p_1} \cdots + H(t-T_n)K_n(t-T_n+c_n)^{-p_n}$$

式中, $H(t)$ 为阶跃函数; $T$ 为主震发生时间, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_n$ 为第1、2、 $\cdots$ 、 $n$ 次强余震的发生时间。上式所表达的余震序列,是由主震引发的余震活动和强余震引发的高阶余震活动的合成。

### 1.1.3 传染型余震序列模型 (ETAS 模型)

针对“余震激发余震”问题(图1.2),Ogata (1988; 1989)将自相似思想引入大森公式,