



华北中强

HUABEI ZHONGQIANG
DIZHEN
QIANZHAO TEZHENG YANJIU

地震

前兆特征研究

宋治平 薛 艳 编著



上海科学技术出版社

华北中强地震前兆特征研究

宋治平 薛 艳 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

华北中强地震前兆特征研究 / 宋治平, 薛艳编著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-5323-9637-5/P·81

I. 华… II. ①宋…②薛… III. 地震—地质力学—研究 IV. P315.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 144920 号

地图批准号: 沪 S(2008)147 号

上海世纪出版股份有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行

(上海钦州南路 71 号 邮政编码: 200235)

新华书店上海发行所经销

上海书刊印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.75

字数: 257 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—1250

定价: 65.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

序

我国是世界上地震灾害最严重的国家之一,通过地震的预测预报以减轻地震灾害一直是人们的美好愿望和追求目标。我国的地震预报研究经过长时间的努力,尤其是1966年邢台地震以来的各阶段的深入探索 and 大规模发展,建立了多学科地震观测系统的监测基础;积累了大量的震例资料;建立了经验性的地震预报基础;通过对大陆强震孕育环境和孕育过程的探索初步建立了地震预报的理论基础;取得一定有减灾实效的预报实例。这些进展离地震预报的突破尚有很大的距离,还需要继续长期艰苦的探索。要观测地震孕育过程并揭示其科学规律,抓住地震孕育、发生的根本,寻求来自震源的信息(“以本求源”的战略),首要任务是对地震孕育过程中表现出的共性特征进行提炼与归纳,才能逐步实现以物理模型为基础的概率性预测。

地震预报是一个公认的科学难题,尚处于探索阶段。地震预测的难点主要决定于三方面因素。第一是地球的不可入性。上天容易入地难,由于探测手段的限制,人类对地下发生的变化,目前还只能靠地表的观测进行推测,地震发生在几十公里的地下,但我们对地球的深部探测也不过是十公里左右。第二是地震规律的复杂性。经过多年的研究,地震专家逐渐认识到,地震孕育、发生和发展的过程相当复杂,不同的地质构造环境、不同的时间阶段、不同震级的地震都显示出各不相同的规律。第三是地震发生的小概率性。地球每年都有比较大的地震发生,但是就一个地区而言,地震发生的重复时间相对较长,属于突发事件,会是几十年、几百年甚至上千年。因此,地震预报的攻克并非一朝一夕所能实现,急于求成只能事倍功半。但是地震终究有自己的规律,人类也总要想办法对付地震给人们带来的灾难,悲观地认为地震预报不可能也是不科学的,它应当被视为一个长期努力目标。

地震预测分为长期、中期、短临预测。长期预测指震前几十年尺度的预测,为国家防震减灾规划服务;中期预测为震前几年,为制订应急预案和救灾计划服务;而短临预测为震前几月到几天的预测,为实施应急和救灾服务。但是在地震的中、短期预测过程中,对地震的活跃期与平静期的估计尤其重要,关系着地震趋势的估计。对中国大陆地区20世纪以来的地震活动的活跃期与平静期研究表明,1988—2001年为第五活跃期。2008年5月12日四川省汶川8级地震的发

生,使得对该活跃期的起始与结束时间还需要进一步研究。在该活跃期间,华北地区发生了5次6级左右的中强地震(1989年大同6.1级、1991年大同5.8级、1996年包头6.4级、长江口6.1级、1998张北6.2级),比较第四活跃期(1966—1976年),华北地区的地震活动较弱,系统研究这5次中强地震是有价值的。

在1998年1月10日河北省张北地震后,本书作者申请到一项地震科学联合基金课题,针对华北北部地区的张北、包头、大同地震开展综合研究。在研究过程中,作者又增加了长江口地震,对这些地震的构造环境、地震活动、地震前兆、综合特征的总结与理解、预测与应急处置等多方面进行了综合研究,对大华北地区未来发生强震的可能性提出了一些认识。

在该著作撰写期间,发生了汶川8级地震,这次地震是我国继1976年唐山大地震以来,最为严重的一次地震灾害,震级之高,破坏之大,波及之广,营救之难,均超过了唐山地震。汶川大震后,大华北地区出现了大量异常,这些异常的性质究竟是前兆或后效是摆在人们面前亟待研究的问题,本书总结的一些认识对未来大华北地区强震趋势估计将是很有帮助的。

梅世蓉

2008年10月于北京

前 言

自 1976 年唐山 7.8 级地震以来,华北地区 6 级以上地震主要分布在阴山地震带,在近 10 年的时间内相继发生 4 次中强震(1989 年大同 6.1 级地震,1991 年大同 6.0 级地震,1996 年包头 6.4 级地震,1998 年张北 6.2 级地震),这一系列中强地震的发生是否标志着一个强烈地震正在孕育?地震的客观形势向我们提出了尖锐的问题。如果答案是肯定的,随之而来的问题是这个正在孕育的大地震在何处、何时发生,是否会威胁到首都北京的安全,这是各级领导和人民群众都很关注的问题。历史上的地震研究表明,首都圈地区的地震活动存在由西向东定向迁移的特征,大同、张北地震发生后,北京及附近地区则为下一次强震的危险地区,其可信度如何?阴山带上的下一个强震如果真在北京附近孕育,如何做好短临预报,这是摆在面前的又一尖锐问题。必须指出,在以往的震例中,虽然震前都有一些异常,但是确切的三要素预报都没有实现。考虑到首都圈的极端重要性,短临预报必须尽量准确,所以寻找可靠的短临预报判据和指标是迫切问题。尽管以往已做了不少研究,但是对震例总结限于当时资料和工作深度不够,离要求仍然相差甚远。如果还只停留在每次地震后的工作总结,不去追究其机制,那么等到下一次强震的发生,即使出现许多趋势和短期前兆,也还会重演几次地震前短临预报的失败。

在华北地区特别在阴山带上,20 世纪 90 年代先后发生 4 次中强震,由于有了较以往更好的台网观测,积累了比以往更多、更细的前兆和微震观测资料,又有“八五”、“九五”攻关研究取得的新成果作为指导,有可能取得新的进展。因此申请了一项地震科学联合基金课题“张北、包头、大同地震的异常特征及其连发机制的综合研究”(1998—2000 年),将 4 次地震作为一个整体,系统研究几次地震的共性、特性及其相互的相关性,深究其孕震机理。

自 1988 年至 21 世纪初,中国大陆地区的地震活动进入第五活跃期。该期间,华北地区连续发生 1989 年大同 6.1 级、1991 年大同 5.8 级、1996 年包头 6.4 级、长江口 6.1 级、张北 6.2 级 5 次强震。有关大同、长江口、张北的地震均出版了震例总结专著,并且在“九五”期间,对这些地震的时空演化、地震孕育理论等方面又有一批新成果,但关于华北地区的本活跃期 5 次强震的综合分析以及理论分析方面的系统论述比较欠缺。

为了给地震科学联合基金课题“张北、包头、大同地震的异常特征及其连发机制的综合研究”一个满意的结题,在该课题研究成果的基础上,加入1996年长江口6.1级地震,借鉴马宗晋等著《1966—1976年中国九大地震》(1982)的思路,对大华北地区本活跃期的5次强震的综合特征、物理模型、力学机理、实验研究等进行系统归纳、提炼,形成本专著。

本书收集了近几年来国内对华北地区强震研究的最新成果,同时将国内外对地震孕育模型的理论及实验研究的最新成果归纳在一起,对观测资料进行分析,并汇集了近几年对地震前兆与孕育过程的最新成果。

本书以“观测资料—特征总结—解释”为主线,首先在分析孕震环境的基础上,分别分析各地震的异常,然后综合、提炼、归纳共性特征。在分析孕震模型的物理与力学过程的基础上,再对观测特征进行解释。既有各学科各自独立的演化特征,又有综合演化过程;既有理论分析结果,又有观测资料的解释。

在地震预报领域,如何将地震前兆与理论模型相结合,或者说,如何将预报人员与理论研究人员相结合,这是现在中国预报领域存在的一大问题。本书将地震前兆分析与理论研究相结合,由统一的观点、统一的思路贯穿其中,这是提高地震预报水平的方向之一。

由于本书是华北地区近几年地震预报的最新成果的集成,并且有理论分析结果的应用,这对实现物理预报将起到积极的作用。

综上所述,本书以华北地区1989年至1998年连续发生的5次强震的基本资料为素材,按照统一的思路,以“观测资料—特征总结—解释”为主线。首先对地震序列特征、华北地区的构造环境、地震活动、地壳形变异常、地震电磁异常、地下流体异常特征以及前兆异常的时空变化过程进行了归纳提炼,提取共性特征及地区特性。应用地震孕育的理论分析结果对地震活动增强区及异常特征,前兆的形态特征、地区差异性、象限性、阶段性,以及短临前兆的突发性、多变性、外因相关性等现象进行了不同程度的分析。从而为华北地区的强震预测及物理预报方法的建立提供一定基础。

在本书撰写期间,得到两位恩师梅世蓉研究员和尹祥础研究员的精心指导。张国民研究员、王炜研究员、朱元清研究员、林命周研究员、刘文龙研究员、王建军高级工程师等专家和同事们提出了宝贵的建议,在此表示衷心的感谢!

宋治平

2008年10月

目 录

第 1 章 地震序列特征	1
1.1 5 次地震的基本参数	2
1.2 余震活动序列特征	2
1.3 地震序列特征的综合分析	7
第 2 章 华北地区的构造环境	9
2.1 地质构造环境	9
2.2 华北地区地球物理场	16
2.3 构造条件与发震断层	24
第 3 章 地震活动	34
3.1 中国大陆及邻区的地震活动格局	34
3.2 华北地震区地震活动格局	38
3.3 华东及黄海地区地震活动背景	43
3.4 地震活动性异常特征	51
3.5 地壳介质特性参数的变化	77
第 4 章 地壳形变异常	84
4.1 强震前形变场的演化特征	84
4.2 成组地震的形变异常	92
4.3 地震孕育过程中形变异常的时空演化特征	96
第 5 章 地震电磁异常	103
5.1 电磁异常的空间象限性分布	103
5.2 强震前的电磁空间演化特征	105
5.3 成组强震的电磁异常	113
5.4 电磁波辐射异常特征	117
第 6 章 地下流体异常特征	125
6.1 流体异常的空间演化特征	125
6.2 成组地震前流体异常特征	128

6.3 流体异常的时空演化特征	130
第7章 地震前兆的时空演化特征	137
7.1 地震活动的时空演化特征	137
7.2 前兆异常的空间特征	138
7.3 成组地震的前兆异常特征	139
7.4 前兆异常的时空演化过程	140
第8章 地震前兆的综合物理力学分析	150
8.1 内陆地震孕育、发生条件与机制讨论	150
8.2 强震孕育过程中地震活动异常特征的解释	151
8.3 地震活动增强区范围的理论分析	152
8.4 前兆形态特征的力学分析	153
8.5 前兆象限性的力学分析	156
8.6 地震前兆阶段性的力学分析	159
8.7 短临前兆突发性、多变性及与外因相关性的理解	161
第9章 地震预测与应急处置	162
9.1 有短临预测的地震应急处置	162
9.2 有中期预测的地震应急处置	164
9.3 无中短临预测的地震应急处置	168
参考文献	172

第 1 章 地震序列特征

20 世纪中国大陆地区的第五活跃期,即自 1988 年 11 月 6 日云南澜沧 7.4 级地震至 2001 年 11 月 14 日新疆青海交界区域 8.1 级地震,共发生 8 次 7 级以上地震(表 1.1,图 1.1),主要集中在西部地区。而大华北地区相继发生 5 次 6 级左右强震(表 1.2)。本章主要对华北地区的张北、大同、包头以及长江口 5 次强震的序列特征进行对比分析。

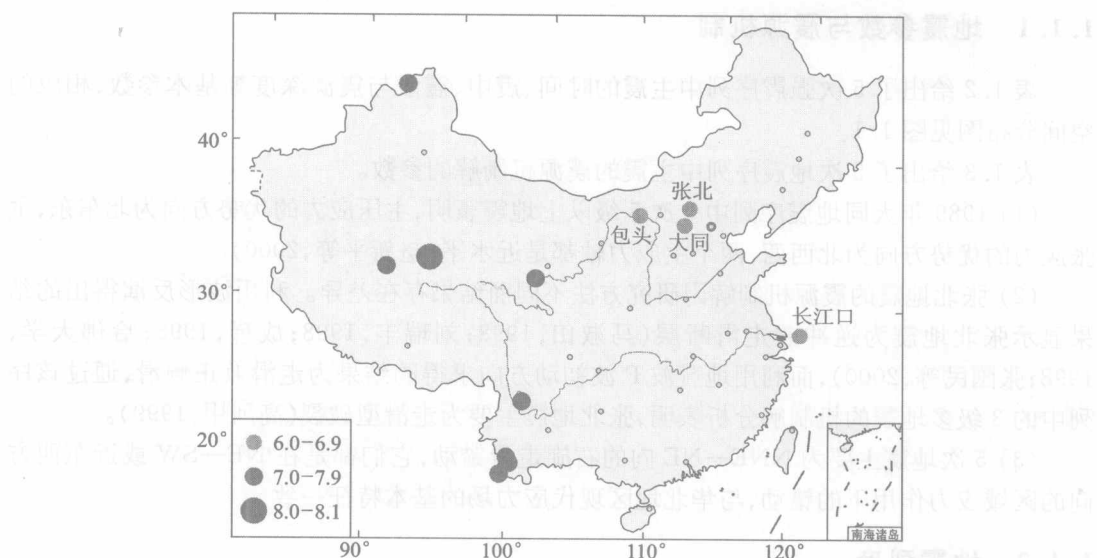


图 1.1 20 世纪中国大陆第五活跃期西部地区 7 级与华北地区 6 级地震分布

表 1.1 20 世纪第五活跃期中国大陆地区发生的 7 级以上地震参数

编号	地震日期 (年.月.日)	震中位置		参考地名	震级	震源深度 /km	资料来源
		北纬	东经				
1	1988.11.6	22°55'	99°48'	云南澜沧	7.4	13	中国强震目录,1999
2	1988.11.6	23°10'	99°33'	云南耿马	7.2	16	中国强震目录,1999
3	1990.4.26	36°04'	100°20'	青海共和	7.0	9	中国强震目录,1999
4	1990.6.14	47°54'	85°05'	新疆吉木乃	7.2	57	中国强震目录,1999
5	1995.7.12	22°00'	99°18'	云南孟连	7.3	10	中国地震信息网
6	1996.2.3	27°12'	100°18'	云南丽江	7.0	10	中国地震信息网
7	1997.11.8	35°12'	87°18'	西藏玛尼	7.5		中国地震信息网
8	2001.11.14	36°24'	90°54'	昆仑山口西	8.1	11	中国地震信息网

表 1.2 中国大陆 20 世纪第五活跃期在大华北地区发生的 6 级左右强震参数

编号	地震日期 (年.月.日)	发震时刻 (时-分)	震中位置		参考地名	震级	震源深度 /km	资料来源
			北纬	东经				
1	1989.10.19	1-1	39°58'	113°50'	大同	6.1	14	赵新平等,2000
2	1991.3.26	2-2	39°52'	113°50'	大同	5.8	11.8	刘巍等,2000
3	1996.5.3	3-32	40°48'	109°36'	包头	6.4	24	薛丁等,2001
4	1996.11.9	21-56	31°42'	123°06'	长江口以东	6.1	7	章纯等,2001
5	1998.1.10	11-50	41°06'	114°18'	张北	6.2	10	张国民等,1999

1.1 5 次地震的基本参数

1.1.1 地震参数与震源机制

表 1.2 给出了 5 次强震序列中主震的时间、震中、震级与震源深度等基本参数,相应的空间分布图见图 1.1。

表 1.3 给出了 5 次地震序列中主震的震源机制解的参数。

(1) 1989 年大同地震序列中 5 次 5 级以上地震表明,主压应力的优势方向为北东东,主张应力的优势方向为北西西,两个主应力轴都是近水平(赵新平等,2000)。

(2) 张北地震的震源机制解因研究方法不同而结果存在差异。利用波形反演得出的结果显示张北地震为逆冲兼走滑断层(马淑田,1998;刘瑞丰,1998;成瑾,1998;哈佛大学,1998;张国民等,2000),而利用地震波 P 波初动方向求得的结果为走滑兼正倾滑,通过该序列中的 3 级多地震的机制解分析表明,张北地震主要为走滑型破裂(高阿甲,1999)。

(3) 5 次地震主要为 NNE—NE 向的右旋走滑错动,它们都是在 NE—SW 或近东西方向的区域应力作用下的错动,与华北地区现代应力场的基本特征一致。

1.1.2 地震烈度

表 1.4 给出了每次地震烈度区的参数。可见,除长江口地震位于海中无法确定震中烈度外,其他 4 次地震的最高烈度为Ⅶ至Ⅷ。

1.1.3 地表裂缝与震害情况

5 次地震的地表裂缝的水平与垂直位移和震害情况列入表 1.5。可见,张北地震的地表裂缝较发育,水平位移达 20~30 cm(张国民等,2000)。人员伤亡最严重的是张北地震,而经济损失最严重的是包头地震。长江口地震由于发生在海中,因而几乎没造成人员伤亡与经济损失。

1.2 余震活动序列特征

强震发生后,余震活动的时间、频度、空间分布等特征对强余震的预测与震源介质的研究均具有参考价值,表 1.6 给出了 5 次地震序列余震活动的参数。

表 1.3 5 次地震序列的震源机制解

序 号	地 震	节面 A			节面 B			轴 X_A		轴 Y_B		轴 P		轴 T		轴 N		节面 A 的运动性质	资料来源
		走向 /度	倾向 /度	倾角 /度	走向 /度	倾向 /度	倾角 /度	方位 /度	仰角 /度	方位 /度	仰角 /度	方位 /度	仰角 /度	方位 /度	仰角 /度	方位 /度	仰角 /度		
1	10 月 19 日 01 时 01 分 (6.1)	24	SEE	74	112	NNE	81	22	9	113	15	67	17	158	4	263	73	右旋走滑	赵新平等, 2000
	10 月 18 日 22 时 57 分 (5.7)	33	SE	85	121	NE	75	32	16	122	5	77	15	346	7	230	74		
	10 月 19 日 02 时 02 分 (5.6)	23	NEE	78	109	SSW	70	199	20	293	12	247	24	155	6	53	62		
	10 月 19 日 18 时 29 分 (5.2)	23	NWW	77	109	SSW	70	198	20	294	16	247	25	155	3	53	63		
2	10 月 23 日 21 时 19 分 (5.3)	23	NWW	79	110	SSW	75	199	15	292	12	247	19	155	3	59	72	右旋走滑	刘巍等, 1993
	1991 年大同地震	34	NW	82	123	NE	85	34	4	303	2	79	1.5	340	4.5	186	85		
3	1996 年包头地震	32	NW	55	295	SW	80	206	10	303	35	49.8	32.5	351	17.5	1.5	53	右旋走滑	薛丁等, 2001
4	1996 年南黄海地震	62.3	NW	57.2	307.7	SW	57.2	217.7	32.8	332.3	32.8	275	50	185	0	95	40	右旋走滑	章纯等, 2001
5	1998 年张北地震	186	71	49	296	44	27					16	247	47	139	38	351	右旋逆断层兼走滑	张国民等, 1999

注: 轴 X_A 为节面 A 上的错动力轴; 轴 Y_B 为节面 B 上的错动力轴; 轴 P 为主压应力轴; 轴 T 为主张应力轴; 轴 N 为中等应力轴。

表 1.4 5 次地震烈度区的参数

编号	地 震	形状	长轴走向	IV		V		VI		VII		VIII		最高烈度
				长/km	短/km	长/km	短/km	长/km	短/km	长/km	短/km	长/km	短/km	
1	1989 年大同	椭圆形*	NE			64	50	18	12	9.8	8.6			VIII
2	1991 年大同	椭圆形	NE			44	23	13.8	7.3	4.6	2.0			VII
3	1996 年包头	椭圆形	EW			130	90	90	60	26	17			VIII
4	1996 年长江口	椭圆形	NE	315	315									**
5	1998 年张北	近方形	NS					63	57	30	28	18	16	VIII

注：* 表示赵新平等(2000)认为是扇形；** 表示震中位于海中，震中烈度无法确定。

表 1.5 5 次地震的地表裂缝与震害情况

编号	地 震	地表裂缝最大位移		房 屋 损 坏			人员伤亡/人		经济损失/亿元
		水平/cm	垂直/cm	倒塌	严重破坏	中等破坏	死亡	伤	
1	1989 年大同	10		10 185	37 134	45 937	15	145	3.65
2	1991 年大同	5~10				23 000	1	数百	0.60
3	1996 年包头	2				44.6 万户	26	453	26.83
4	1996 年长江口								
5	1998 年张北	20~30	6~7	47 976	51 739	76 848	49	11 439	8.0

表 1.6 5 次地震序列余震活动的参数

编号	地 震	余 震 区			最大余震			余震序列			
		长轴/km	短轴/km	面积/km ²	优势深度/km	震级 M _L	时间差/天	类型	a	b	P
1	1989 年大同	20	12	250	12~16	5.7	1	震群	3.58	0.59	1.1
2	1991 年大同	15	6.5	100	10~15	4.3	5	主余	3.60	0.77	1.2
3	1996 年包头	30	20		15~24	4.8	2	主余	2.45	0.41	1.5
4	1996 年长江口	40	30		5~8	4.4	95	孤立	3.61	0.72	1.2
5	1998 年张北	18	16	135		5.6	420	主余	3.88	0.64	1.0

1.2.1 余震的空间分布

1. 余震区分布特点

图 1.2 给出了 5 次地震序列的余震分布图,可见余震分布图像主要呈椭圆形分布区,长轴与短轴之比为 1/3~1/2。余震的空间分布受震源区主破裂方向或发震断层的制约,并且受区域交叉断裂的分布影响较大。如张北地震,在震后 1 天的 3 级以上地震主要在 NE30° 的方向分布,但在震后 2~5 天的 3 级以上地震却在 NW30° 的方向分布,说明余震的发生与分布是受区域断裂控制。

2. 主震位置与余震区

松泽武雄(1979)认为,主震的震中往往在余震震中区的一端或靠近余震区。但马宗晋等(1982)的研究表明,在 1966—1976 年中国大陆的 7 级以上地震的主震多数靠近震中区的中央,而不是端点附近。对 5 次强震的研究表明,位于余震区中央的地震只有 1989 年的大同地震,1991 年大同、包头、长江口 4 次地震属于在余震区边缘,而张北地震属于在断层的

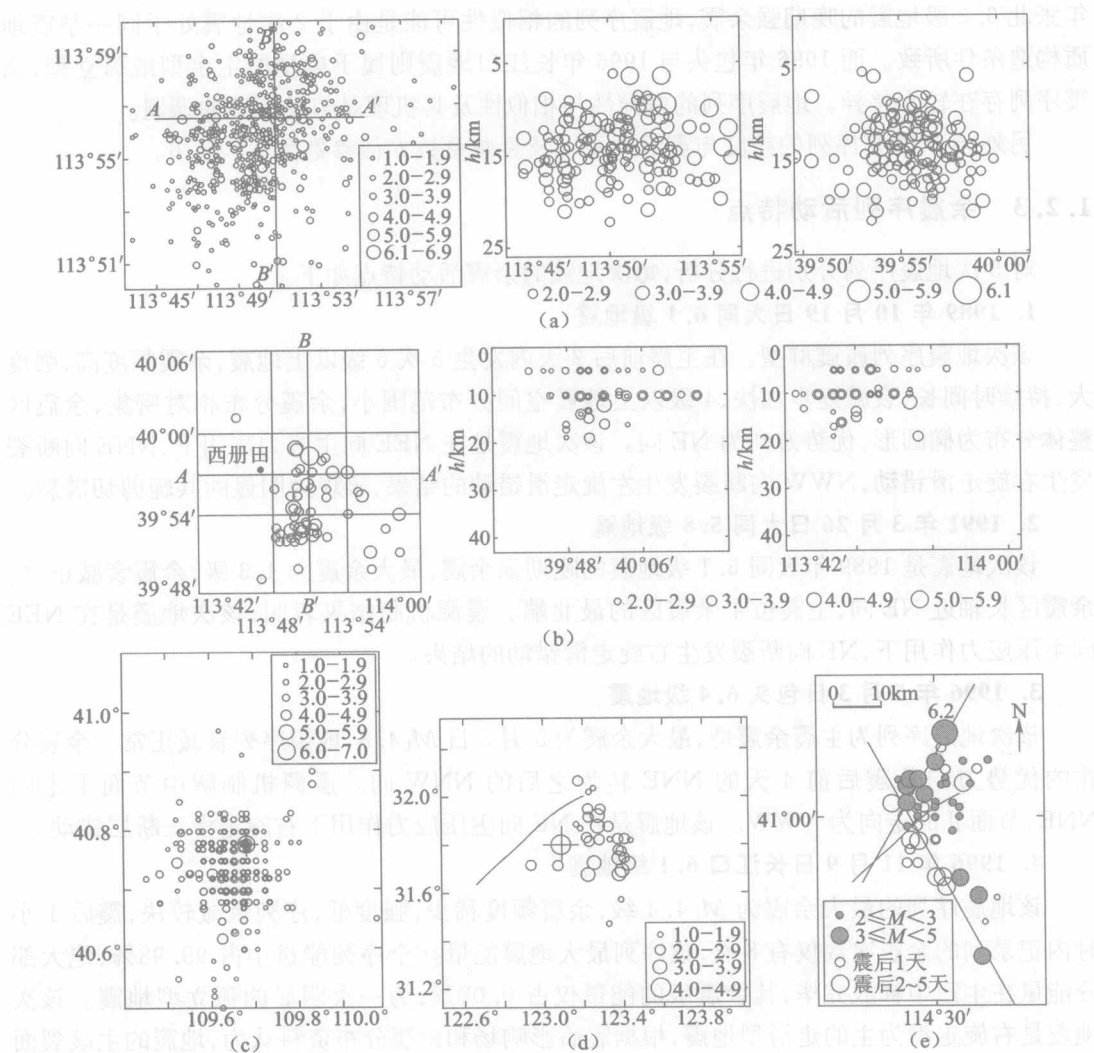


图 1.2 5 次地震序列的空间分布 (a) 1989 年大同地震; (b) 1991 年大同地震; (c) 1996 年包头地震; (d) 1996 年长江口地震; (e) 1998 年张北地震。

一端。从断层角度看,主震位于余震区的中央或断层端部的可能性都可能存在,主要是由于发震断层与地震的起始(地震成核)等因素控制。如果把孕育体作为一个整体看,地震的破裂起始点(成核)一般在孕震体的边缘,则主震就表现为在余震区的边缘。如果在孕震体内存在发震断层,主震就表现为在余震区内部;如果发震断层与孕震体相交,则有可能表现为主震在震源体外或断层端部。

1.2.2 余震的时间序列

地震发生之后,余震活动将持续一段时间,逐步衰减。由 5 次地震与张北晚期强余震后 1 年 3 级以上地震的 $M-t$ 图与蠕变曲线表明,1989 年大同地震与 1998 年张北地震序列的频度、强度、持续时间均具有一定相似性,并且 2 次地震均发生了晚期强余震,即 1991 年 3 月 26 日大同 5.8 级和 1999 年 3 月 11 日张北 5.6 级地震分别是 1989 年大同 6.1 级和 1998

年张北 6.2 级地震的晚期强余震,地震序列的相似性可能是由于 2 次地震处于同一孕震地质构造条件所致。而 1996 年包头与 1996 年长江口地震则属于典型的主余型或孤立型,余震序列存在较大差异。地震序列的差异性与相似性及其机理是值得研究的课题。

另外,5 次强震序列的频度与震级关系以及衰减系数 h 值参数列入表 1.6。

1.2.3 余震序列活动特点

对 5 次地震序列分别进行分析,每次地震的余震活动特点如下。

1. 1989 年 10 月 19 日大同 6.1 级地震

该次地震序列属震群型。在主震前后 2 天内发生 5 次 5 级以上地震,余震频度高,强度大,持续时间长,衰减逐步加快,4 级以上地震空间分布范围小,余震分布相对密集,余震区整体分布为椭圆形,优势方向为 NE 向。该次地震是在 NEE 向主应力作用下,NNE 向断裂发生右旋走滑错动,NWW 向断裂发生左旋走滑错动的结果,表现为明显的共轭剪切破裂。

2. 1991 年 3 月 26 日大同 5.8 级地震

该次地震是 1989 年大同 6.1 级地震的晚期强余震,最大余震为 4.3 级,余震衰减正常,余震区长轴近 NE 向,主震位于余震区的最北端。震源机制结果表明,该次地震是在 NEE 向主压应力作用下,NE 向断裂发生右旋走滑错动的结果。

3. 1996 年 5 月 3 日包头 6.4 级地震

该次地震序列为主震余震型,最大余震为 5 月 5 日 $M_L 4.8$,地震序列衰减正常。余震分布的优势方向从震后前 4 天的 NNE 转为之后的 NNW 向。震源机制解中节面 I 走向 NNE,节面 II 的走向为 NWW。该地震是在 NE 向主压应力作用下右旋走滑正断层错动。

4. 1996 年 11 月 9 日长江口 6.1 级地震

该地震序列的最大余震为 $M_L 4.4$ 级,余震频度稀少,强度低,序列衰减较快,震后 1 小时内记录到的余震次数仅有 8 次,该序列最大地震能量在全序列能量中占 99.98%,绝大部分能量在主震中释放完毕,其余震级的能量仅占 0.02%,为一次明显的孤立型地震。该次地震是右旋走滑为主的走滑型地震,根据震后影响场和余震分布资料认为,地震的主破裂面为 NE 向。

5. 1998 年 1 月 10 日张北 6.2 级地震

该次地震为主余型地震,最大余震为 1999 年 3 月 11 日 $M_S 5.6$ 级地震。该序列余震比较丰富,与大多数 6 级左右地震的持续时间相比,其持续时间明显偏长,能量释放经历了三次较大的起伏。震中分布的优势方向为 NNE 向,主震与余震主要发生在优势方向的发震构造上。该次地震主要是受 NNE 向断裂的控制,加之该地区为第三纪玄武岩构造,导致余震过程出现衰减缓慢和余震活动时间相对较长的现象。

以上分析表明,大同与张北地震的余震序列丰富,持续时间较长,而包头、长江口地震的余震活动不发育。大同与张北地震同处于第三纪玄武岩出露的地质构造条件,而包头地震发生在河套断裂带的次级构造单元——临河凹陷东端,该盆地沉积了 2 400 m 厚的第四系地层;长江口地震位于崇明东凹陷边缘,这两次地震的地质构造年代比大同、张北地震的年轻,可能这是影响地震序列活动与持续时间的因素之一。因此,地质构造条件、发震构造的不同对地震类型的关系的影响应该从观测特征、实验、理论等方面开展研究。

1.3 地震序列特征的综合分析

将《1966—1976 年中国九大地震》的地震序列参数与本研究的 5 次强震的序列参数相结合进行分析,具体参数见表 1.7。

表 1.7 1966—1976 年的中国的九大地震与 1989—1998 年华北地区的 5 次强震序列参数

序号	地 震	震级	余震区长轴/km	余震区短轴/km	最大余震震级	余震活动水平 a 值	余震序列 b 值	主破裂方向
1	1966.3.22 邢台	7.2	90	30	6.2	5.56	0.75	NE11°
2	1969.7.18 渤海	7.4	60	25	5.1	5.34	0.86	NE20°
3	1970.1.5 通海	7.7	85	35	5.5	3.79	0.72	NW54°
4	1973.2.6 炉霍	7.9	110	50	6.3	3.33	0.48	NW29°
5	1974.5.11 昭通	7.1	22	10	5.7	4.26	0.68	NW40°
6	1975.2.4 海城	7.3	70	30	6.0	6.00	0.95	NW70°
7	1976.5.29 龙陵	7.4	90	45	6.8	5.48	0.76	NW11°
8	1976.7.28 唐山	7.8	145	50	7.1	7.04	0.98	NE41°
9	1976.8.16 松潘	7.2	80	25	6.7	4.56	0.69	NW35°
10	1989.10.19 大同	6.1	20	12	5.7	3.58	0.59	NE24°
11	1991.3.26 大同	5.8	15	6.5	4.3	3.60	0.77	NE34°
12	1996.5.3 包头	6.4	30	20	4.8	2.45	0.41	NE32°
13	1996.11.9 长江口	6.1	40	30	4.4	3.61	0.72	NE62.3°
14	1998.1.10 张北	6.2	18	16	5.6	3.88	0.64	NE6°

1.3.1 余震区大小与主震的关系

1. 余震区长轴

所有地震(中国大陆地区)及华北地震的地震序列余震区长轴 L (单位 km)与主震震级的线性拟合关系为:

$$L = -273.0 + 48.1M \quad (\text{相关系数 } R=0.85, \text{中国大陆地区})$$

$$L = -300.0 + 52.9M \quad (\text{相关系数 } R=0.89, \text{华北地区})$$

2. 余震区短轴

所有地震(中国大陆地区)及华北地震的地震序列余震区短轴 D (单位 km)与主震震级的线性拟合关系为:

$$D = -79.0 + 15.3M \quad (\text{相关系数 } R=0.76, \text{中国大陆地区})$$

$$D = -72.5 + 14.5M \quad (\text{相关系数 } R=0.81, \text{华北地区})$$

1.3.2 余震区活动强度与主震的关系

1. 最大余震

最大余震与地震类型关系密切,研究表明,华北地区的地震序列中最大余震与主震的关系拟合相关系数为 0.74,具体如下: