

中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征^{*}

蒋海昆^{1),*} 李永莉²⁾ 曲延军³⁾ 华爱军¹⁾
代 磊¹⁾ 郑建常¹⁾ 侯海峰¹⁾

1) 中国济南 250014 山东省地震局

2) 中国昆明 650041 云南省地震局

3) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

摘要 利用中国大陆 1970 年以来记录相对完备的 294 次 5.0 级以上的地震序列, 研究地震序列类型的空间分布特征. 结果表明: 在西南地区, 川滇菱形地块及其所控制的鲜水河—安宁河—小江地震带及金沙江—红河地震带以主余型序列活动为主, 滇西和怒江—澜沧江断裂带以西腾冲—保山块体的龙陵、澜沧等地分布着较多的多震型地震, 极少数孤立型地震主要分布于川西北地区, 云南地区无孤立型地震. 在西北地区, 新疆南天山西段以主余型为主, 其中柯坪块体与普昌断裂交汇区发生过多震型地震, 天山中段则以孤立型地震居多; 祁连山地震带以主余型序列活动为主; 青海地区以主余型地震居多, 但序列类型的区域特征不明显. 在华北地区, 阴山—燕山—渤海地震带、河北平原地震带及下扬子断块以主余型地震为主, 山西地震带北段与 NW 向阴山—燕山地震带的交汇部位发生过 5~6 级多震型地震, 华北地区南部北纬 35°线附近以孤立型地震居多. 序列类型空间分布与区域构造运动形式有关, 断层内部闭锁单元或障碍体的破裂以及新生的、彼此分离的断裂段的破裂, 大多产生主余型序列; 多震型地震往往与共轭构造或多组构造交汇相联系; 简单断层端部的进一步扩展一般产生孤立型地震. 序列类型空间分布与区域深部介质环境也有一定关系, 主余型地震大多发生在上地壳高速区或高、低速过渡带内, 而多震型地震则较多地发生在上地壳低速区内.

关键词 序列类型 空间分布 孤立型 主余型 多震型 构造运动形式 深部介质环境
中图分类号: P315.75 **文献标识码**: A

引言

通过研究板缘消减带及板内逆冲带上逆断型和走滑型地震的“前震”及其序列特征, Reasenber(1999)认为主震的破裂性质与其前兆表现及余震性质关系密切, 这表明主震破裂特征可能是影响余震序列性质的重要因素之一, 即不同破裂形式的主震, 其后续余震序列的类型可能会所有差异. 另一方面, 依据中国大陆及邻区部分 5 级以上地震的震源机制

^{*} 国家“十五”科技攻关计划延续项目子专题(2004BA601B01-04-02)和地震科学联合基金(105076)共同资助.
2005-09-06 收到初稿, 2006-03-07 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者. E-mail: jianghaikun@sohu.com

结果(许忠淮, 2001), 张晓东等^①指出, 中强地震的破裂特征主要受制于先存构造及其与区域应力场的相互作用; 中国大陆中强地震的破裂特征具有一定的区域差异, 而就某确定区域而言, 地震破裂形式则显示出一定程度的统计稳定性. 综合上述两方面的基本观点可以推想, 中国大陆中强地震序列类型可能具有一定的区域分布特征. 而对序列类型空间分布特征的深入认识, 将有助于中强地震后序列性质的早期判定. 基于此, 本文将依据中国大陆 1970 年以来记录相对完备的 $M_0 \geq 5.0$ 地震序列资料(M_0 表示序列主震震级, M_s 震级标度), 对中国大陆及各构造大区范围内中强地震序列类型的空间分布特征进行统计研究, 并对其与构造的可能关系进行初步探讨.

1 序列特征及其类型约定

1.1 余震序列类型的划分

余震活动是中强地震发生后普遍观测到的一类序列活动, 余震序列的定义及序列类型的划分, 依不同的研究重点而有所差异. 从活动特点来看, 余震序列通常划分为主余型、前主余型及震群(多震)型三类(Utsu, 2002; 吴开统等, 1990). Mogi(1963)利用不同均匀程度(均匀、稍不均匀和极不均匀)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大小的主余型序列的情形, 这种类型的序列所占的比例极小, 称之为第二类震群(Utsu, 2002), 如 1997—1998 年新疆伽师 6 级强震群即属此类.

1.2 余震活动持续时间及空间分布

序列余震活动持续时间的确定是一个迄今仍未完全解决的问题. 目前通常定义余震活动持续时间为余震活动减弱到与背景地震活动水平相当所需要的时间, 然而由该定义难以确定震中区后续起伏究竟属于余震的持续活动还是视为新的地震活动. 鉴于不同区域背景活动水平不同, 为了避免这种依赖关系, 周惠兰等(1982)定义余震活动持续时间为活动速率减小到某一固定水平的时间, 傅征祥(1982)则将其定义为序列地震震级为 $(M_0 - C)$ 的最后一次事件的时间(C 为正的常数值). 而上述两种定义仍不可避免地会导致所谓“晚期强余震”的问题. “晚期强余震”指当余震活动明显衰减之后, 余震区又发生的异常大的地震(Richter, 1958), 而且“晚期强余震”通常有自己的余震. 除少数具有“晚期强余震”的序列之外, 绝大多数序列的最大余震一般发生在主震后 3 个月内(刘蒲雄等, 1996).

由序列主、余震之间的空间位置关系, Kisslinger(1996)将余震划分为如下三类: 第一类发生在主震破裂面上, 是主震后短时间内的早期余震, 其分布已能勾划出主震破裂面的基本特征; 第二类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; 第三类余震发生在比主震破裂尺度大得多的较远处, 从机理上讲产生于主震的远程触发.

1.3 本文关于序列类型的约定

由于本文着重于中强地震序列类型空间分布特征的研究, 其最终目的是为序列类型的早期判定提供统计性的参考依据, 因而前面述及的“第二类震群”(Utsu, 2002)、“晚期强余

^① 张晓东, 郭铁栓, 蒋淳, 等. 2005. 中国大陆强震短期综合预测方法研究. 国家十五科技攻关(3+2)延续项目子专题研究报告(子专题编号: 2004BA601B01-01-04).

震”(Richter, 1958)及第三类余震(Kisslinger, 1996)等问题均不属于本文的研究重点.

通常以序列主震所释放能量占全序列所释放能量的比例 R_E 来对序列类型进行定量划分. 一般约定 $R_E \geq 99.99\%$ 为孤立型, $R_E < 90\%$ 为震群型或双震型, $90\% \leq R_E < 99.99\%$ 为主余型(周蕙兰等, 1980). 而这一约定方式如前所述难以确定序列活动的截止时间, 其次在序列活动未结束之前无法计算得到全序列所释放的能量, 因而对序列早期判定并不十分适用.

已知地震震级 M_i 与所释放弹性能 E_i 之间的统计关系为(傅淑芳, 刘宝诚, 1991):

$$E_i = 10^{A+BM_i} \quad (1)$$

式中, M_i 和 E_i 分别是序列第 i 次地震的震级及相应的弹性波能量; A, B 为常数, B 与序列震级标度有关. 若 M_i 以 M_L 为震级标度则 $B = 1.695$, 若 M_i 以 M_S 为震级标度则 $B = 1.5$. 由 R_E 的定义及式(1)有

$$R_E = \frac{E_0}{\sum_{i=0}^n E_i} = \frac{10^{A+BM_0}}{\sum_{i=0}^n 10^{A+BM_i}} = \frac{10^{BM_0}}{\sum_{i=0}^n 10^{BM_i}} \quad (2)$$

由于序列释放的能量主要由序列中的较大地震提供, 因此考虑极端情形, 粗略地以序列中最大两次地震的能量代替序列总能量, 则式(2)可简化为

$$R_E \approx \frac{10^{BM_0}}{10^{BM_0} + 10^{BM_1}} \quad (3)$$

令序列最大地震与次大地震的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$, 代入上式, 则

$$R_E \approx \frac{10^{BM_0}}{10^{BM_0} + 10^{B(M_0 - \Delta M)}} = \frac{1}{1 + 10^{-B\Delta M}} \quad (4)$$

化简得

$$\Delta M \approx \frac{\lg R_E - \lg(1 - R_E)}{B} \quad (5)$$

鉴于中国大陆地震序列一般以 M_L 为震级标度, 因而取 $B = 1.695$. 由式(5)可得, 当 $R_E = 99.99\%$ 时 $\Delta M = 2.4$; 当 $R_E = 90\%$ 时 $\Delta M = 0.56 \approx 0.6$.

考虑到本文序列类型早期判定的需要, 为简便起见, 统一以序列主震 M_0 与 12 个月内最大余震 M_1 之间的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列类型划分, 划分标准为: ① 孤立型, $\Delta M \geq 2.5$ 且余震次数较少; ② 主余型, $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$; ③ 多震型, $\Delta M < 0.6$, 此处的多震型序列包含了以往研究所提到的双震型及震群型序列.

2 中国大陆序列类型的空间分布特征

2.1 序列总体特征

收集整理了 1970 年以来中国大陆所发生的主震震级 $M_S \geq 5.0$ 且依据上述约定可以明确区分序列类型的 294 次地震序列. 从序列主震震级来看, 其中 $M_S 5.0 \sim 5.9$ 地震 192 次, $M_S 6.0 \sim 6.9$ 地震 81 次, $M_S 7.0 \sim 7.9$ 地震 20 次, $M_S 8.1$ 地震 1 次; 从序列类型来看, 孤立型 68 次、主余型 174 次、多震型 52 次, 分别占 23.1%, 59.2% 及 17.7%. 这些序列资料, 构成了本研究的基础数据. 与以往 143 次序列得到的统计结果(郭大庆等, 1998)相比较, 主余型所占比例完全一致, 孤立型比例有所增加, 而多震型比例有所减少.

需要说明的是, 中国大陆不同区域的地震监控能力具有较大差异, 且相同区域不同时

期的地震监控能力也有所不同,因而本文所使用的序列资料并不是该时段内中国大陆发生的全部 5.0 级以上的地震序列,而是主要分布在监控能力相对较强的华北、西南、新疆及西北地区的地震序列. 尽管青藏高原是中国大陆中强地震最为活跃的区域之一,但由于监控能力较弱,该区域中强地震除主震外一般记录不到完整的序列,无法准确确定序列类型,因而该区域地震序列的空间分布特征不在本文的讨论范围之内.

图 1 给出 1970 年以来中国大陆 $M_0 \geq 5.0$ 地震序列类型的空间分布. 就序列资料较为完整的华北、西南、新疆及甘宁青地区而言,主余型序列在大陆西部地震多发区基本上均有分布,在东部地震相对较少的地区,主要分布于阴山—燕山地震带、郯庐地震带及下扬子地区(图 1a);孤立型序列主要分布于新疆天山中段及青海地区(图 1b);多震型序列主要分布于云南西南部、青海东部、新疆南天山西段、华北地区的山西地震带与阴山—燕山地震带交汇部位及河北平原带中段(图 1c).

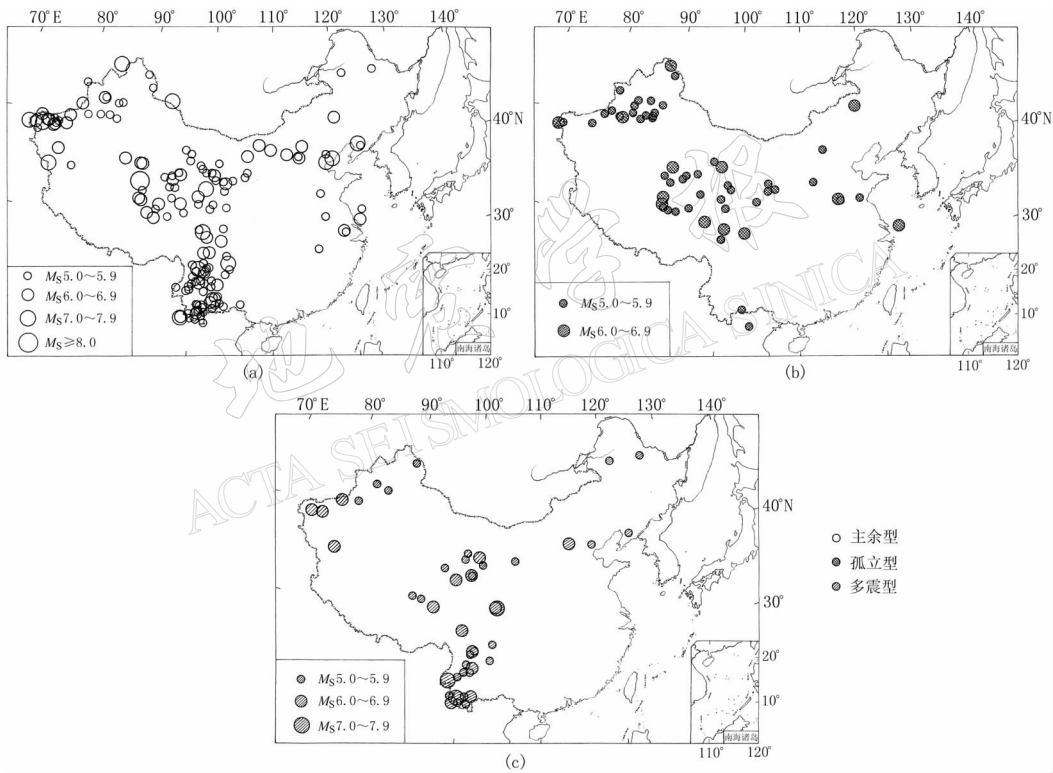


图 1 中国陆地 $M_0 \geq 5.0$ 地震序列类型的空间分布(1970 年以来)
(a) 主余型; (b) 孤立型; (c) 多震型

2.2 序列分布特征

为尽可能详细地考察序列分布的地域特点及与构造的可能关联,结合构造分区及地震序列分布,分别就西南、新疆、西北及大华北地区 4 个主要构造活动区进行叙述.

2.2.1 西南地区

西南地区主要包括四川、云南两省,是中国大陆最显著的强震活动区. 该区内分布有鲜水河—安宁河—小江地震带、金沙江—红河地震带及腾冲—澜沧地震带等 3 条中强地震活动带(苏有锦, 秦嘉政, 2001). 本文收集到 1970 年以来西南地区所发生的 $M_0 \geq 5.0$ 地震

序列共 89 次, 其中主余型 67 次, 多震型 18 次, 孤立型仅 4 次. 从序列空间分布来看, 不同构造区序列类型有一定差异. 川滇菱形地块及其所控制的鲜水河—安宁河—小江地震带及金沙江—红河地震带以主余型序列活动为主, 滇西南思茅、普洱一带也有较多的主余型地震发生(图 2a); 仅有的几次孤立型地震主要发生在川西北及川北的甘孜、小金、白玉等地, 云南地区无孤立型地震发生(图 2b); 滇西的下关和姚安一带、怒江—澜沧江断裂带以西腾冲—保山块体的龙陵、澜沧等地有较多的多震型地震发生, 滇东鲁甸、川滇交界的盐源、川西巴塘、川东马边、川东北松潘—龙门山断裂带的松潘等地也有多震型地震发生(图 2c).

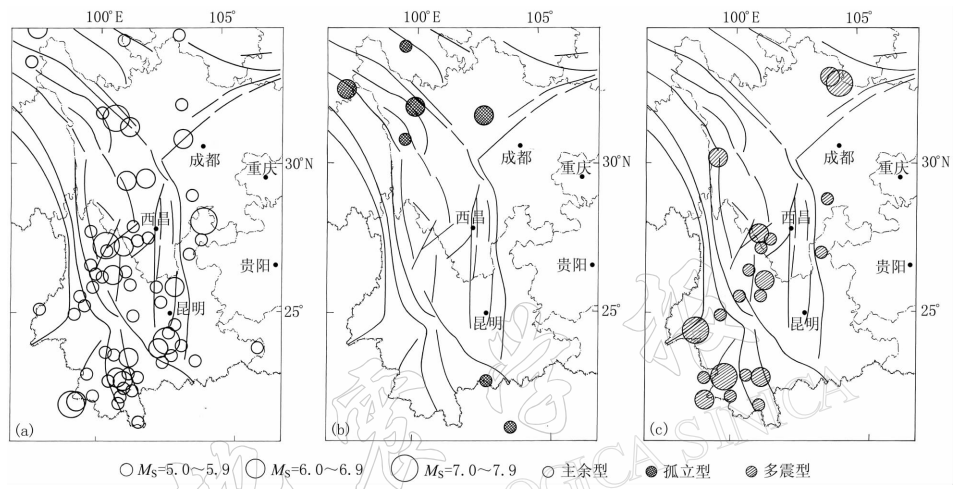


图 2 西南地区 $M_0 \geq 5.0$ 地震序列类型的空间分布(1970 年以来)

(a) 主余型; (b) 孤立型; (c) 多震型

2.2.2 新疆地区

共收集了 1970 年以来新疆地区可明确判定序列类型的地震序列 63 次, 其中主余型 35 次, 孤立型 20 次, 多震型 8 次. 从序列主震震级分布来看, 孤立型及多震型序列的主震震级一般小于 6.5, $M_0 \geq 6.5$ 的序列均为主余型(表 1). 从序列空间分布特征来看, 南天山西段及乌恰地区以主余型为主(图 3a); 天山中段以孤立型地震居多(图 3b); 南天山西段柯坪块体与普昌断裂交汇区的乌什、疏附、伽师及拜城等地发生过多震型地震, 天山中段的乌苏、石河子等地也有个别 5 级左右的多震型地震发生(图 3c).

新疆地区多震型序列的空间分布不但与活动构造有关, 而且可能还与其周围的历史地震活动有关. 8 次多震型序列中有 5 次震中附近(100 km 范围内)历史上曾发生过 7.7 级以上大震, 1 次 6.0 级多震型序列距 1911 年 1 月 4 日吉尔吉斯斯坦伊塞克湖(42.9°N, 76.9°E) 8.2 级大震 260 km, 另外 2 次多震型地震震中附近历史上未发生过 7.7 级以上大震, 但这两次地震均发生在多组构造的交汇部位或构造转折部位(表 2).

表 1 新疆地区序列类型按震级分档的统计结果

M_0	孤立型	主余型	多震型	合计
$5.0 \leq M_0 < 6.5$	20	25	8	53
$M_0 \geq 6.5$	0	10	0	10
合计	20	35	8	63

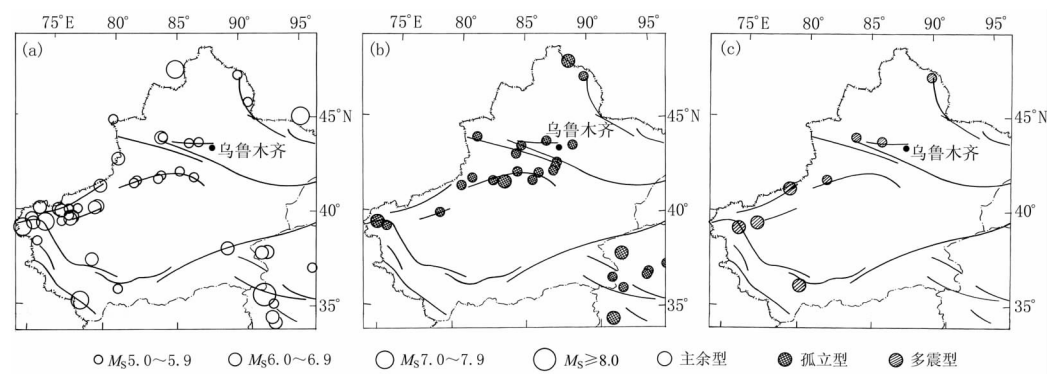


图 3 新疆地区地震 $M_0 \geq 5.0$ 序列类型的空间分布(1970 年以来)
(a) 主余型; (b) 孤立型; (c) 多震型

表 2 新疆多震型序列分布与新疆周边历史强震的空间距离关系

多震型地震参数				历史强震参数				距离 /km
发震时间 年-月-日	震中位置		M_S	发震时间 年-月-日	震中位置		M_S	
	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$			$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$		
1971-03-23	41.43	79.25	6.0	1911-01-04	42.90	76.90	8.2	260
1975-04-28	36.26	80.15	6.1	1924-07-03	36.80	83.80	7.2	320
1986-04-23	47.50	89.58	5.4	1931-08-11	46.75	89.90	8.0	90
1990-10-25	44.23	83.90	5.2	1906-12-23	43.51	85.00	7.7	100
1993-12-01	39.32	76.64	6.2	1902-08-22	39.90	76.21	8.2	80
1997-01-21	39.60	77.04	6.0	1902-08-22	39.90	76.21	8.2	80
1999-06-17	41.87	81.80	5.0	1949-02-24	42.00	84.00	7.2	180
2003-02-14	43.98	85.85	5.4	1906-12-23	43.51	85.00	7.7	90

2.2.3 甘宁青地区

甘宁青地区中强地震序列的空间分布如图 4 所示. 甘肃地区 14 次序列中主余型 11 次、孤立型 1 次、多震型 2 次, 中强地震主要发生在祁连地块与阿拉善地块近 NW 向的交汇区域. 从序列类型的空间分布来看, 沿祁连山地震带分布的中强地震活动以主余型为主, 有个别多震型地震发生, 如 2003 年 10 月 25 日民乐山丹 6.2 级、5.8 级双震型序列; 甘肃南部少震地区也发生过个别 5 级左右的孤立型地震, 如 2003 年 11 月 23 日岷县 5.2 级地震. 宁夏地区 7 次序列中主余型 4 次, 主要发生在北部; 孤立型 3 次, 主要发生在南部, 其中银川曾发生过 1 次 5 级的多震型地震. 青海地区 58 次地震序列中主余型 30 次、孤立型 20 次、多震型 8 次. 总的来看, 主余型地震序列居多, 其次是孤立型和多震型, 但序列类型的区域分布特征不明显. 由于地震监控能力较弱, 青海西部许多中强地震序列可能漏记较多, 这有可能使序列显示“孤立”型的特征, 但究竟是否确实如此, 还需进一步确认.

2.2.4 大华北地区

传统意义上的大华北地区通常为 $30^{\circ}\text{N} \sim 42^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E} \sim 124^{\circ}\text{E}$ 范围. 由于 2005 年 11 月 26 日九江 5.7 级地震发生在郯庐带南端, 与大华北地区关系密切, 因而未将其一并考虑, 将大华北地区的纬度范围向南扩展至 29°N . 大华北地区序列类型的空间分布如图 5 所示. 总体来看, 华北北部 NW 向的阴山—燕山—渤海地震带及下扬子断块中强地震活动以

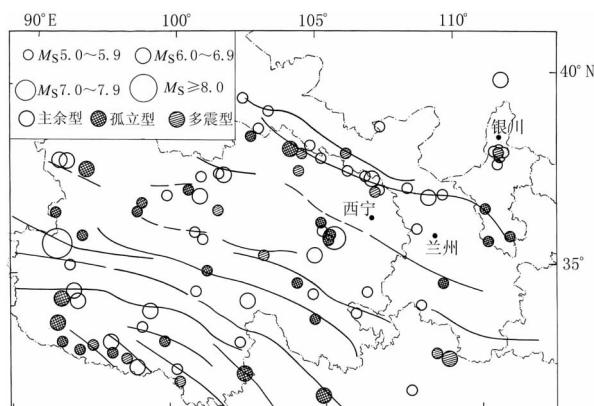


图4 甘宁青地区 $M_0 \geq 5.0$ 地震序列类型的空间分布(1970 年以来)

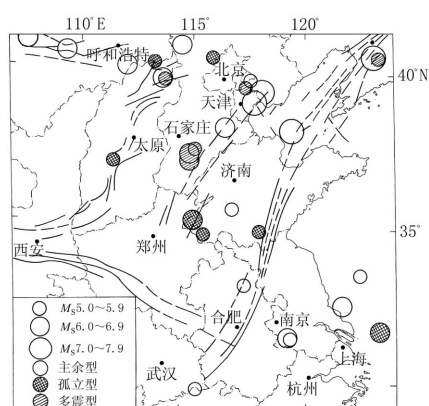


图5 华北地区 $M_0 \geq 5.0$ 地震序列类型的空间分布(1970 年以来)

主余型为主(如图5中○所示)。山西地震带北段与阴山—燕山—渤海地震带的交汇部位有多次5~6级多震型地震发生,如1989年大同5.8级地震序列;河北平原地震带中段及郅庐地震带北段也发生过1966年邢台7.2级多震型序列及1999年岫岩5.4级多震型序列(如图5中●所示)。华北南部35°N线附近(沂沭断裂带南段及聊考断裂带南段)以5~6级中等强度的孤立型地震活动为主(图5中●所示)。这些区域历史上都曾发生过7级以上大地震,如1983年菏泽5.9级地震发生在1937年菏泽7.0级地震老震区,1995年苍山5.2级地震位于1668年郅城8.5级地震老震区。

3 讨论和结论

在给出序列类型划分约定的基础上依据中国大陆1970年以来记录相对完备、可以确定序列类型的294次 $M_0 \geq 5.0$ 地震序列资料,开展了序列类型空间分布特征的统计研究,初步探讨了序列类型空间分布特征与区域介质及构造的关系。研究结果对序列早期趋势判定具有一定的参考意义。

1) 序列类型空间分布具有统计意义上较明显的区域性特征。总体而言,西南地区川滇菱形地块及其所控制的鲜水河—安宁河—小江地震带及金沙江—红河地震带以主余型序列活动为主,滇西南思茅、普洱一带也有较多的主余型地震发生;滇西下关和姚安一带、怒江—澜沧江断裂带以西腾冲—保山块体的龙陵、澜沧等地有较多的多震型地震发生;滇东鲁甸、川滇交界的盐源、川西巴塘、川东马边、川东北松潘—龙门山断裂带的松潘等地也发生过多震型地震。川滇地区较少分布有孤立型地震,其中云南无孤立型地震发生,川西北的甘孜、小金、白玉等地发生过个别孤立型地震。新疆地区南天山西段及乌恰地区以主余型为主,其中柯坪块体与普昌断裂交汇区的乌什、疏附、伽师及拜城等地发生过多震型地震;天山中段则以孤立型地震居多,但乌苏、石河子等地也发生过个别5级左右的多震型地震。西北地区祁连山地震带以主余型序列活动为主,有个别多震型地震序列发生;宁夏南部及北部分别以孤立型及主余型为主;青海地区主余型居多,其次是孤立型和多震型,但序列类型的区域特征不明显。华北北部阴山—燕山—渤海地震带及下扬子断块中强地震活动以主余型为主;山西带北段与NW阴山—燕山地震带的交汇部位发生过5~6级

的多震型地震；华北平原带同样以主余型活动为主，但其中段发生过 7 级以上的多震型序列；华北南部 35°N 线附近孤立型地震居多，其震中附近历史上曾发生过 7 级以上大地震。

2) 序列类型空间分布与区域构造运动形式有关，主余型序列能够在各类形式的构造运动中产生，特别是先存断层内部闭锁单元或障碍体的破裂、或新生的相互分离的断裂段的破裂等，大多产生主余型序列；多震型序列往往与共轭构造或多组构造交汇相联系；简单断层端部的进一步扩展一般产生孤立型地震。例如滇西南龙陵—澜沧新生断裂带的地震活动频度高、强度大、周期短，有许多主余型序列发生，而多震型(双震或震群)序列活动在该区域也最为突出。据虢顺民等(2002)的研究，该构造带由多条次级新生断层组成，呈斜列或共轭展布，共轭构造活动可能是该区多震型地震频繁发生的一个主要因素。

3) 序列类型空间分布与区域深部介质环境有一定关系，主余型地震大多发生在上地壳高速区或高、低速过渡带内，而多震型序列则较多地发生在上地壳低速区内。尽管川滇地区强震震源深度大多分布在 10~20 km 的上地壳内，但实际上川滇强震发生的深部介质环境存在较大差异。鲜水河—安宁河—小江地震构造带和金沙江—红河地震构造带上的强震主要发生在上地壳的高速区或高、低速过渡带内，其下的中地壳普遍发育低速层(刘建华等，1989；陈培善等，1990)；而滇西的澜沧—耿马强震区则为上地壳低速区(苏有锦等，1999)。对比前述研究可见，上地壳高速区或高、低速过渡带可能以主余型序列活动为主，上地壳低速区则可能有较多的多震型地震发生。

4) 序列类型与序列主震震级及历史地震活动有一定关系。从中国大陆范围来看，约 80% 的孤立型序列的主震震级小于 6 级，无 7 级以上的孤立型序列；从相同震级区间、不同类型序列数目占全部序列的比例来看，随着主震震级的增加，孤立型地震所占比例减少，主余型及多震型地震所占比例增加。就新疆地区序列主震震级分布而言，孤立型及多震型序列的主震震级均小于 6.5， $M_0 \geq 6.5$ 的序列均为主余型。新疆及西北地区的统计结果还表明，多震型序列大多分布在历史大震震中区附近，而华北南部现代记录的孤立型地震则发生于历史地震老震区，两者的差异可能与现代构造活动的强弱差异有关。

张晓东、杨立明、孙佩卿、赵卫明、王安东、曹井泉帮助收集了部分序列目录。张国民、傅征祥、罗兰格、高旭、韩渭宾、陆远忠等在“十五”科技攻关各次阶段检查中的点评及建议为本文的顺利完成提供了重要保证。谨此致谢！

参 考 文 献

- 陈培善, 刘福田, 李强, 等. 1990. 云南地区速度结构横向不均匀性[J]. 中国科学, B 辑, **20**(4): 431~438
- 傅征祥. 1982. 强余震活动持续时间[J]. 地震学报, **4**(4): 389~394
- 傅淑芳, 刘宝诚. 1991. 地震学教程(第 2 版)[M]. 北京: 地震出版社, 1~578
- 郭大庆, 刘蒲雄, 袁一凡, 等. 1998. 地震现场工作大纲和技术指南[M]. 北京: 地震出版社, 25
- 虢顺民, 徐锡伟, 向宏发, 等. 2002. 龙陵—澜沧新生断裂带地震破裂分段与地震预测研究[J]. 地震地质, **24**(2): 103~114
- 刘建华, 刘福田, 吴华, 等. 1989. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度图象[J]. 地球物理学报, **32**(2): 143~151
- 刘蒲雄, 陈修启, 吕晓健, 等. 1996. 地震序列的后续显著地震的预测研究[J]. 地震学报, **18**(1): 27~33
- 苏有锦, 秦嘉政. 2001. 川滇地区强地震活动与区域新构造运动的关系[J]. 中国地震, **17**(1): 24~34
- 苏有锦, 刘祖荫, 蔡民军, 等. 1999. 云南地区强震分布的深部地球介质背景[J]. 地震学报, **21**(3): 313~332
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 1990. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 97~114

- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报, **23**(5): 492~501
- 周蕙兰, 房桂荣, 章爱娣, 等. 1980. 地震震型判断方法探讨[J]. 西北地震学报, **2**(2): 45~59
- 周蕙兰, 房桂荣, 章爱娣, 等. 1982. 余震序列的持续时间[J]. 地震学报, **4**(1): 45~54
- Kisslinger C. 1996. Aftershock and fault-zone properties[J]. *Advances in Geophysics*, **38**: 1~36
- Mogi K. 1963. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms—The fracture of a semi-infinite body caused by inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (3)[J]. *Bull Earthq Res Inst Univ Tokyo*, **41**: 615~658
- Reasenber P A. 1999. Foreshock occurrence before large earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **104**(B3): 4 755~4 768
- Richter C F. 1958. *Elementary Seismology*[M]. San Francisco: Freeman, 768
- Utsu T. 2002. Statistical Features of Seismicity[A]. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P, *et al* eds. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, 81A[M]. Amsterdam: Academic Press, 719~731

SPATIAL DISTRIBUTION FEATURES OF SEQUENCE TYPES OF MODERATE AND STRONG EARTHQUAKES IN CHINESE MAINLAND

Jiang Haikun¹⁾ Li Yongli²⁾ Qu Yanjun³⁾ Hua Aijun¹⁾
Dai Lei¹⁾ Zheng Jianchang¹⁾ Hou Haifeng¹⁾

1) *Earthquake Administration of Shandong Province, J'nan 250014, China*

2) *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, China*

3) *Earthquake Administration of Xinjiang Autonomous Region, Ürümqi 830011, China*

Abstract: Based on 294 earthquake sequences with magnitude greater than or equal to 5.0 occurred in Chinese mainland since 1970, the spatial distribution features of sequence types have been studied. In southwestern China, it takes mainshock-aftershock sequence type (MAT for short) as the major in Sichuan-Yunnan rhombic block and concerned Xian-shuihe-Anninghe-Xiaojiang seismic belt, as well as in Jinshajiang-Honghe seismic belt. Multiple mainshock type (MMT for short) mainly distributes in western Yunnan, and Longling and Lancang areas in Tengchong-Baoshan block to the west of Nujiang-Lancangjiang fault zone. A few isolated earthquake type (IET for short) mainly occurred in northwestern Sichuan and there is no IET in Yunnan region. In northwestern China, it takes MAT as the major in west segment of south Tianshan in Xinjiang region, and some MMT also occurred in this area in intersection of Kalpin block with the Puchang fault zone. It takes IET as the major in middle Tianshan in Xinjiang. Along the Qilianshan seismic belt, most of sequences are MAT. In Qinghai region, it takes MAT as the major, but the regional feature of the spatial distribution of sequence types is not very clear. In North China, it takes MAT as the major in Yinshan-Yanshan-Bohai seismic belt, Hebei plain seismic belt and sub-plate of lower river area of Yangtze river. In intersection of north segment of Shanxi seismic belt and the NW-trending Yinshan-Yanshan-Bohai seismic belt, there were several moderate or strong MMTs with magnitude 5.0 to 6.0. In south of

North China around the latitude line of 35°N , it takes IET as the major. The spatial distribution of sequence types is related to the modes of tectonic movements. MAT is mostly resulted from the ruptures of locked units or asperities or the neonatal separated segments inside the fault zones. MMT is generally related to the conjugate structures or intersection of more than two tectonic settings. Further extension of end of simple fault often produces IET. Spatial distribution of sequence types is also correlative to the regional deep environment of crustal medium to some extent. MAT mainly distributes in high velocity area in upper crust or in the transitional zone between high velocity area and low velocity area; MMT mostly occurred in the low velocity area in upper crust.

Key words: sequence type; spatial distribution; isolated earthquake type; mainshock-after-shock sequence type; multiple mainshock type; mode of tectonic movement; medium environment in depth of the earth

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA