

文章编号: 0253-3782(2007)02-0151-14

中国大陆中强以上地震余震分布尺度的统计特征*

蒋海昆^{1),*} 郑建常²⁾ 吴 琼¹⁾
曲延军³⁾ 李永莉⁴⁾ 代 磊²⁾

1) 中国北京 100036 中国地震台网中心

2) 中国济南 250014 山东省地震局

3) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

4) 中国昆明 650041 云南省地震局

摘要 依据 1970 年以来记录相对完备的 $M_s \geq 5.0$ 地震序列资料, 统计研究了中国大陆余震分布尺度与序列最大地震震级 M_0 及最大地震破裂形式之间的关系. 在 95% 置信概率下, 考虑主震破裂形式, 分序列类型给出了余震分布尺度与 M_0 之间的统计关系. 定性而言, 余震分布尺度的对数 $\lg R$ 与 M_0 正相关, 但数据分布较为离散. 分类型来看, 孤立型序列余震分布尺度与 M_0 之间统计相关程度低, 余震分布尺度介于 5~60 km 之间; 主余型序列 $\lg R$ 与 M_0 正相关; 多震型序列当 $M_0 \leq 6.2$ 时 $\lg R$ 与 M_0 之间相关性不显著, 余震分布尺度介于 5~70 km 之间, 当 $M_0 \geq 6.3$ 时 $\lg R$ 与 M_0 线性相关. 统计结果还表明, 走滑-近走滑及斜滑型主震所导致序列类型比例之间没有显著差异, 而倾滑-近倾滑型主震(主要为逆断层型破裂)所导致的主余型序列所占比例较高, 孤立型及多震型序列所占比例则相对较低. 对比研究显示, 当 M_0 较高时, 余震分布尺度主要取决于主震大小而与主震破裂形式关系不明显.

关键词 中国大陆 余震分布尺度 序列类型 主震破裂形式(主震断层性质)

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A

引言

依据余震与主震之间的空间位置关系, Kisslinger 和 Jones(1991)把余震划分为 3 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, 早期余震的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, 可能反映了断裂带性质的空间差异及破裂端部与力学障碍物之间相互作用的结果(Mogi, 1968a, b, 1969; Tajima, Kanamori, 1985); 第三类余震发生在比主震破裂尺度大得多的较远处, 从机理上讲是由于主震的远程触发而产生. 目前对余震分布尺度的研究, 主要针对上述第一、第二类余震. 例如, Utsu(1961)根据日本 $4.0 \leq M_0 \leq 8.5$ 主余型序列资料、吴开统等(1990)依据中国大陆 27 个主余型地震序列资

* 地震科学联合基金项目(105076)及国家“十五”科技攻关计划延续项目子专题(2004BA601B01-04-02)共同资助. 2006-08-14 收到初稿, 2006-12-13 决定采用修改稿.

* 通讯作者. e-mail: jianghaikun@sohu.com

料, 统计得到主余型地震余震区尺度与主震震级的关系.

研究余震分布尺度的科学意义在于, 许多具有明显地表破裂的大地震的对比研究结果显示, 余震分布尺度粗略地与主震破裂尺度相当, 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(Wells, Coppersmith, 1994; Biasi, Weldon, 2006), 并涉及到后续趋势估计问题(吴开统等, 1990). 大地震破裂尺度和破裂方位通常可由野外考察得到, 但对大量 5、6 级左右中强地震或更小的地震, 地表破裂痕迹不明显, 常常通过余震分布尺度粗略估计断层破裂尺度. 因而, 本文的主要目的是, 在更多统计样本(序列资料)的基础上, 参考已有的方法(Lutz, 1986; Lutz, Gutmann, 1995; Chapman *et al*, 1997), 基于余震序列空间分布, 在一定的置信水平下统计研究中国大陆的余震分布尺度及余震的优势分布方位(破裂扩展方位), 着重于不同类型序列(孤立型、主余型、多震型)余震分布尺度与主震震级及主震破裂形式(走滑-近走划、斜滑、倾滑-近倾滑)之间的关系讨论.

1 序列类型划分及资料简况

序列类型划分是本文分类余震分布尺度统计研究的基础. 序列类型主要依据主震所释放能量占全序列所释放总能量的比例 R_E 来进行划分(周蕙兰等, 1982). $R_E \geq 99.99\%$ 为孤立型, $R_E < 90\%$ 为震群型或双震型, $99.99\% < R_E \leq 90\%$ 为主余型. 粗略地以序列中两次最大地震的能量代替序列总能量, 可得与上述能量判据相对应的、以 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列分类的判据(蒋海昆等, 2006a): $\Delta M \geq 2.5$ 为孤立型(IET), $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$ 为主余型(MAT), $\Delta M < 0.6$ 为多震型(MMT), 多震型包含了以往不同研究者曾提及的“双震型”及“震群型”序列. M_0 和 M_1 分别为序列最大及次大地震震级.

收集整理了 1970 年以来中国大陆 294 个记录相对完备的 $M_s \geq 5.0$ 地震序列. 依据上述序列类型划分标准, 孤立型 68 个、主余型 174 个、多震型 52 个, 分别约占 23%、59% 及 18%. 294 个序列主要分布于川滇、甘青、新疆及华北, 以及地震活动强烈的青藏高原中西部地区. 由于监控能力较低基本没有收集到较为完整的序列目录(蒋海昆等, 2006a). 即使收集到的这 294 个序列, 大多也分布于监控能力相对较弱的大陆西部地区, 序列中较低震级小地震的遗漏在所难免. 由于余震分布尺度的确定是基于各个序列完备震级以上的余震分布来进行的, 因而少数低震级余震的遗漏, 在一定程度上会影响到序列余震分布尺度的确定; 由于本文序列类型划分仅用到序列最大及次大地震的震级, 因而少数小地震的遗漏对序列类型划分没有影响. 上述序列基本统计特征及序列类型空间分布参见蒋海昆等(2006a, b)文章.

在 294 个序列中, 能够用前述方法进行破裂尺度统计的有 224 个, 其中孤立型 41 个、主余型 143 个、多震型 40 个. 序列最大地震基本参数、序列类型、95% 置信概率条件下的序列余震分布尺度等见附录.

2 序列余震分布尺度及优势破裂方位的确定

从概率格点分布(probabilistic lattice point distribution)的概念出发, Lutz(1986)以及 Lutz 和 Gutmann(1995)提出了在有限空间范围内基于二维点分布(小地震位置)检测可能的线性构造(破裂迹线)、并测量其优势分布方位的定量方法. 在类似的工作中, Chapman 等(1997)进一步结合震源机制对断层方位进行物理约束. 如图 1 所示, 在二维空间中以主

震位置为原点，以正北方向为 0° ，顺时针方向统计不同方位内的余震频次 $n(\theta)$ ，给定置信水平 α ，统计相应方位范围内余震至主震间最大距离 $r_{\max}(\theta)$ ($\theta=0^\circ\sim 359^\circ$)。根据 $n(\theta)$ 随 θ 分布的峰值特征可粗略判定序列破裂形式： $n(\theta)$ 的单峰分布表征单侧破裂，双峰则可能是双侧破裂（两峰之间大约相差 180° ），也可能是共轭破裂（两峰之间大约相差 90° ），或其它更复杂的破裂形式。 $n(\theta)$ 峰值对应的 θ 即余震的优势分布方位，亦即优势破裂方位。为计算余震分布尺度，考虑破裂尺度可能最大的情形（共线双侧破裂），令 $N(\theta)=n(\theta)+n(\theta+180)$ 及 $R_{\max}(\theta)=r_{\max}(\theta)+r_{\max}(\theta+180)$ ($\theta=0^\circ\sim 179^\circ$)。通常情况下， $\max\{N(\theta)\}$ 所对应的 $R_{\max}(\theta)$ 即余震分布尺度，亦即地震破裂尺度。根据目前的地震定位精度，实际工作中 θ 以 10° 为间隔进行统计。

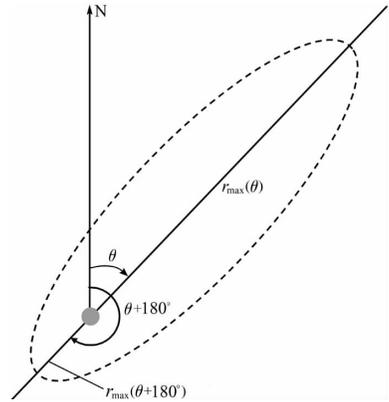


图 1 确定序列余震分布尺度及余震优势分布方位示意图
 ● 为主震位置，虚线表示余震分布范围；
 θ , $r_{\max}(\theta)$, $r_{\max}(\theta+180^\circ)$ 含义参见正文

3 主要结果

3.1 序列主震破裂形式及破裂方位

图 2 给出了几种典型主震破裂形式的序列余震震中分布及相应的 $n(\theta)-\theta$ 图。1996 年 2 月 3 日丽江 7.1 级属典型的单侧破裂，破裂方位约 170° (图 2a)；1970 年 1 月 5 日通海 7.7 级地震属双侧破裂，破裂方位分别约为 $120^\circ\sim 130^\circ$ 及 $290^\circ\sim 300^\circ$ ，两者大约相差 180° (图 2b)；1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震余震分布有两个扩展方向（资料截止于 1976 年 12 月 31 日），分别约为 70° 及 220° ，属双侧破裂，但不是同一条断层向两个相反方向的扩展，而是显示两条交会断层的活动特点，两者之间大约有 150° 的交角 (图 2c)。实际上，唐山 7.8 级地震后一天，余震主要沿 $N30^\circ E$ 的唐山断裂带分布，长度约 70 km。之后余震活动向两

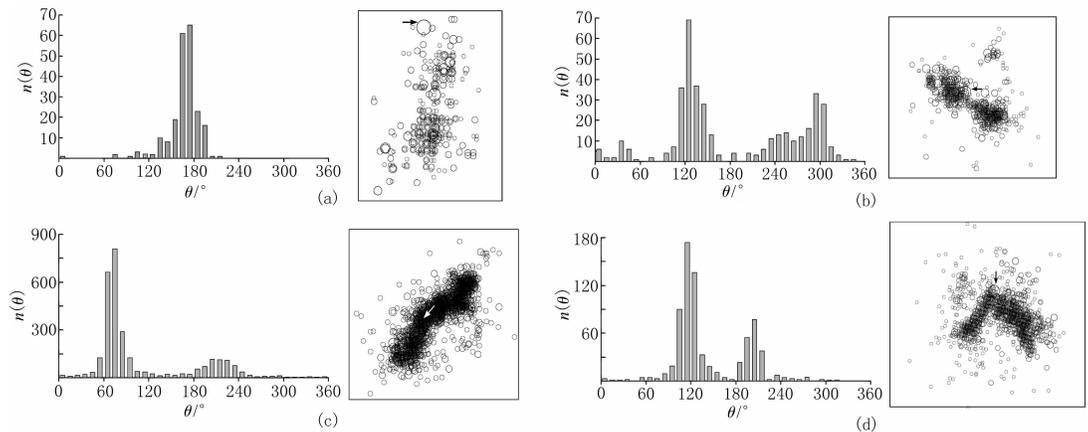


图 2 不同主震破裂形式序列的震中分布及 $N_\theta-\theta$ 图(箭头所指为主震位置)

- (a) 单侧破裂. 1996 年 2 月 3 日丽江 $M_s 7.1$;
- (b) 双侧破裂. 1970 年 1 月 5 日通海 $M_s 7.7$;
- (c) 交叉破裂. 1976 年 7 月 28 日唐山 $M_s 7.8$;
- (d) 共轭破裂. 2003 年 2 月 24 日巴楚 $M_s 6.8$

端扩展,至 11 月 15 日,余震区长度已达约 150 km. 11 月 15 日 6.9 级强余震发生在余震区的南端(张四昌,刁桂苓,1992),显示余震区扩展与后续强余震之间的可能联系. 2003 年 2 月 24 日巴楚 6.8 级地震是典型的共轭破裂,两个破裂方向基本上互相垂直,分别约为 120° 及 210° (图 2d). 对中国大陆余震较为丰富的 37 次 $M_s \geq 6.5$ 地震的 $n(\theta)-\theta$ 关系的统计结果显示,在 $\alpha=0.05$ 的置信水平下,总的来看主余型序列破裂形式、破裂方位能够从统计的角度进行较为清晰地判定,但多震型序列由于多次破裂的叠加,图象复杂,难于清晰地确定优势破裂方位. 事实上,如 1997—1998 年伽师那样的多震型序列,每一次大地震的破裂形式均有差异(单新建等,2002).

3.2 余震分布尺度与主震震级关系

关于序列宏观破裂尺度 R 与主震震级 M_0 关系的研究早已有之. 例如, Utsu(1961)假定余震区是一个长方形($L \times W$, $W=L/2$),根据日本 40 个主余型序列($6.0 \leq M_0 \leq 8.5$)资料得到 $\lg L = 0.5M_0 - 1.8$. 吴开统等(1990)依据中国大陆 27 个主余型序列得到 $\lg L = 0.51M_0 - 1.78$,与 Utsu(1961)的结果非常相似. 本文总共 294 个序列中,能够用上述方法进行破裂尺度统计的有 224 个,其中孤立型 41 个,主余型 143 个,多震型 40 个. 图 3 给出不同类型序列余震分布尺度 R 与序列最大地震震级 M_0 的关系,具体统计关系列于表 1.

表 1 不同条件下余震分布尺度 R 与序列最大地震震级 M_0 之间的统计关系

样本分类	统计关系	n	r	SD	公式编号	备注
孤立型(IET)	$R_{IET} = 10^{(0.175 \pm 0.143)M_0 + (0.254 \pm 0.804)}$	41	0.19	0.414	(1)	
I 主余型(MAT)	$R_{MAT} = 10^{(0.347 \pm 0.042)M_0 + (-0.622 \pm 0.253)}$	143	0.57	0.347	(2)	
	$R_{\min} = 10^{0.671M_0 - 3.186}$				(3)	
	$R_{\max} = 10^{0.199M_0 - 0.832}$					
多震型(MMT)	$R_{MMT} = 10^{(0.506 \pm 0.083)M_0 + (-1.658 \pm 0.572)}$	10	0.91	0.283	(4)	$M_0 \geq 6.3$
	$R_{MMT} = 10^{(0.303 \pm 0.069)M_0 + (-0.327 \pm 0.411)}$	40	0.58	0.283	(5)	
走滑-近 走滑(SS)	$R_{SS} = 10^{(0.402 \pm 0.046)M_0 + (-0.985 \pm 0.282)}$	89	0.68	0.325	(6)	
II 斜滑(OS)	$R_{OS} = 10^{(0.442 \pm 0.103)M_0 + (-1.241 \pm 0.611)}$	42	0.57	0.396	(7)	
倾滑-近 倾滑(DS)	$R_{DS} = 10^{(0.272 \pm 0.087)M_0 + (-0.085 \pm 0.505)}$	23	0.57	0.281	(8)	

注: n 为统计样本数, r 为相关系数, SD 为拟合均方误差. I 为不同类型序列余震分布尺度与序列最大地震震级的统计关系; II 为不同主震断层性质序列余震分布尺度与序列最大地震震级的统计关系.

定性来看,余震区几何尺度与主震震级正相关,但主震震级较低时分布较离散,并且主震越小、离散程度越高. 关于统计关系的离散性问题, Жалковский 和 Мучная(1981)曾总结以往的统计结果后指出,余震区几何尺度 X 与主震震级 M_m 有关,大体上满足 $\lg X = aM_m + b$,但不同研究者给出的常数系数 a, b 有较大差别,他们认为系数 a, b 的分散性可能缘于原始资料样本相对较少等原因. 在本文中,针对图 2、图 3 中主震震级较小时离散程度相对较高这一现象,首先需要考虑余震震中定位误差的影响,在中国大陆目前的地震定位资料中, I, II, III 类定位精度分别为 5 km、10 km 和 20 km,而 5 级地震的破裂尺度一般也就是 10 km 量级,因而图 2、图 3 中主震震级较小时离散程度相对较高这一现象,与

定位精度不高有一定关系. 但由图 2、图 3 来看, 余震分布尺度在低震级段一般介于 5~70 km 之间, 分布范围大约是定位误差的数倍, 因而也无法完全归结为定位误差的影响.

分类型来看, 孤立型序列主震均小于 6.5 级, R 与 M_0 之间看不出明显的相关关系, 95% 置信概率下余震分布尺度总体上介于 5~60 km 之间(图 3a). 若进行拟合则统计关系如表 1 中式(1)所示. 其中 n 为统计样本数, r 为拟合相关系数, SD 为拟合均方误差(下同).

主余型序列 R 与 M_0 之间分布关系如图 3b 所示. 余震分布尺度的对数与主震震级正相关, 95% 的置信概率下, 两者统计关系如表 1 中式(2)所示. 亦可用余震分布尺度上、下限 R_{\max} 及 R_{\min} 对余震分布尺度随序列最大地震震级的变化范围进行限定, 95% 置信概率下 $R \in [R_{\min}, R_{\max}]$. R_{\min} 和 R_{\max} 由表 1 中式(3)表示.

多震型序列(图 3c)当 $M_0 \leq 6.2$ 时, R 与 M_0 之间看不出明显的相关特征, 95% 置信概率下余震分布尺度介于 6~70 km 之间. $M_0 \geq 6.3$ 时, $\lg R$ 与 M_0 线性相关, 统计关系如表 1 中式(4)所示. 若对图 3c 全部数据进行拟合则统计关系如表 1 中式(5)所示.

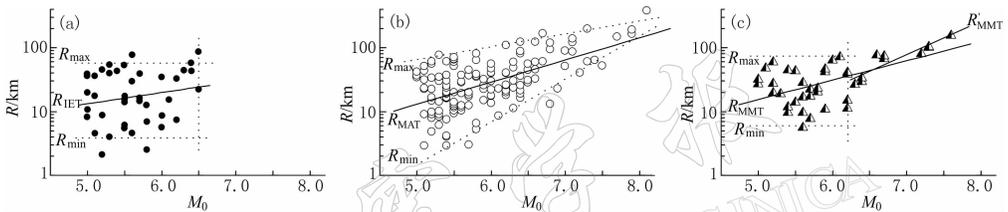


图 3 不同类型序列余震分布尺度与主震震级关系

(a) 孤立型, $n=41$; (b) 主余型, $n=143$; (c) 多震型, $n=40$. n 为参与统计的序列数目. 破裂尺度 R 依据 $M_L \geq 2.5$ 余震优势分布方位的余震间最大距离统计得到(95% 的置信概率下). 实线为破裂尺度分布的最佳拟合结果

3.3 序列余震分布尺度与主震断层性质的关系

Reasenber(1999)对比研究了板缘消减带及板内逆冲带上逆冲及走滑事件的“前震”及序列特征, 认为主震断层性质与其前兆表现及余震性质有一定关系. 这暗示, 主震断层破裂形式可能是影响序列特征的因素之一. 由滑动角 λ 对地震断层运动形式(走滑、斜滑、逆冲或正断)及断层错动方式(左旋或右旋)进行描述(许忠淮, 2003). 中国大陆具有张性正断性质的地震主要发生在地壳持续上升的青藏高原中西部地区^①(许忠淮, 2001). 而由于地震监控能力的不足, 本文所收集的中强地震序列在该区域基本没有分布(蒋海昆等, 2006a), 因而暂不考虑张性破裂($\lambda < 0^\circ$)的情形; 另一方面, 由于关注主震断层性质对余震序列的可能影响, 因而发震断层的错动方式(左旋或右旋)对本研究并不重要. 将 λ 限制在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 若 $\lambda > 90^\circ$, 则令 $\lambda = 180^\circ - \lambda$.

对滑动角 λ 与主震断层破裂形式之间的关系约定如下(周翠英等, 2005):

- 1) $0^\circ \leq \lambda < 30^\circ$ 为走滑-近走滑型破裂(strike slip, SS).
- 2) $30^\circ \leq \lambda < 60^\circ$ 为斜滑型破裂(oblique slip, OS).
- 3) $60^\circ \leq \lambda < 90^\circ$ 为倾滑-近倾滑型破裂(dip slip, DS).

① 张晓东等. 2005. 中国大陆强震短期综合预测方法研究. 国家“十五”科技攻关计划延续项目子专题研究报告(2004BA601B01-01-04).

如前所述, 总共 294 个序列中有 224 个能够用本文方法确定余震分布尺度, 而这 224 个序列中又仅有 154 个能够计算主震滑动角并确定主震破裂形式(张肇成等, 1988, 1990a, 1990b, 1999, 2000; 陈棋福等, 2002a, b, c). 其中走滑-近走滑型 89 个、斜滑型 42 个、倾滑-近倾滑型 23 个, 分别约占 58%、27%和 15%(附表). 表 2 给出这 153 个序列中, 不同破裂形式主震所导致的序列类型比例. 为便于对比, 同时给出 γ 和 $\gamma_{average}$ (具体含义见表 2 注释). 由表 2 前三行各列对比可见, 走滑-近走滑型及斜滑型主震所导致的余震序列中, 不同类型序列所占比例大体相同, 并与 294 个序列的统计结果 γ 相一致. 各数据群体之间统计差异不显著, 均分布于 95%置信概率条件下的置信区间范围内($\pm\gamma_{average}$). 而主震为倾滑-近倾滑型破裂(此处主要为逆断型破裂)时, 各类型序列所占比例均超出 95%置信概率下的置信区间. 其中主余型序列所占比例较高, 孤立型和多震型序列所占比例较低. 这意味着, 逆冲型地震所导致的序列类型比例与走滑-近走滑及斜滑型有较大不同, 而走滑-近走滑及斜滑型地震所导致的序列类型比例之间则没有显著差异.

表 2 序列最大地震破裂形式与序列类型统计

主震破裂性质		序列类型所占的比例		
主震破裂滑动形式	滑动角 λ	孤立型	主余型	多震型
走滑-近走滑	$0^\circ \leq \lambda < 30^\circ$	0.21%	0.58%	0.21%
斜滑	$30^\circ \leq \lambda < 60^\circ$	0.22%	0.60%	0.18%
倾滑-近倾滑	$60^\circ \leq \lambda < 90^\circ$	0.13%	0.74%	0.13%
γ		0.23%	0.59%	0.18%
$\gamma_{average}$		$0.198\% \pm 0.046\%$ (0.15%~0.24%)	$0.628\% \pm 0.075\%$ (0.55%~0.70%)	$0.175\% \pm 0.033\%$ (0.14%~0.21%)

注: γ 表示 294 个可确定类型的序列资料中, 不同类型序列所占比例; $\gamma_{average}$ 表示不同类型序列所占比例的平均值及 95%置信概率条件下的置信区间(列入统计).

图 4 给出了不同主震破裂形式所导致序列的余震分布尺度 R 与序列最大地震震级 M_0 之间的关系, 具体统计关系如表 1 第 II 部分所示.

对走滑-近走滑型地震(图 4a), $\lg R$ 与 M_0 之间总体正相关. 其中主余型及多震型序列的数据分布相对集中, 孤立型序列数据则较为离散. 具体统计关系如表 1 中式(6)所示.

对斜滑型地震, R 与 M_0 之间的关系如图 4b 所示, 孤立型序列数据分布仍然较为离散, 具体统计关系如表 1 中式(7)所示.

对倾滑-近倾滑型地震, R 与 M_0 之间的关系如图 4c 所示, 具体统计关系如表 1 中式(8)所示.

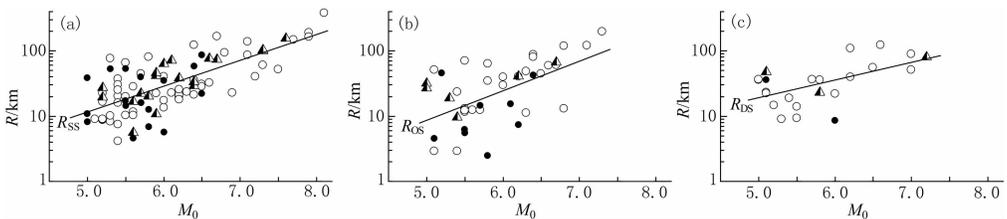


图 4 不同主震破裂形式序列余震分布尺度与主震震级关系

(a) 走滑-近走滑型主震, $n=89$; (b) 斜滑型主震, $n=42$; (c) 倾滑-近倾滑型主震, $n=23$.

○ 表示主余型; ▲ 表示多震型; ● 表示孤立型

4 讨论和结论

利用 1970 年以来中国大陆记录相对完整的 $M_s \geq 5.0$ 地震序列资料, 基于序列余震空间分布, 定量统计了余震优势分布方位(破裂扩展方位)及余震分布尺度(破裂尺度), 统计研究了不同类型中强地震序列余震分布尺度与序列最大地震震级 M_0 及序列主震破裂形式之间的关系. 结果表明:

1) 余震空间分布尺度的对数 $\lg R$ 与序列最大地震震级 M_0 正相关, 但离散程度高. 从分类型来看, 孤立型序列 $\lg R$ 与 M_0 之间看不出明显的相关特征, 余震分布尺度介于 5~60 km 之间; 主余型序列 $\lg R$ 与 M_0 相关关系较好; 多震型序列当 $M_0 \leq 6.2$ 时, $\lg R$ 与 M_0 之间相关关系不显著, 余震分布尺度介于 5~70 km 之间, $M_0 \geq 6.3$ 时, $\lg R$ 与 M_0 线性相关.

2) 走滑-近走滑及斜滑型主震所导致的序列类型比例没有显著差异, 而倾滑-近倾滑型主震(逆冲型为主)所导致的主余型序列比例显著较高, 孤立型及多震型序列所占比例则相对较低. 对走滑-近走滑型主震所导致的序列, $\lg R$ 与 M_0 正相关, 其中主余型及多震型序列的数据分布相对集中, 而孤立型序列数据分布较为离散.

当序列发生之后, 考虑序列主震破裂性质及序列类型, 利用主震震级 M_0 , 通过表 1 中式(1)~(8), 可分类型粗略估计序列余震分布尺度. 若实际序列余震分布尺度明显偏小, 可能意味着序列活动尚未结束, 还会有较大事件继续发生, 使得宏观破裂尺度继续扩展, 可能的继续扩展方向由前述 $N(\theta)$ 峰值所对应的方位 θ 确定. 当实际序列余震分布尺度与统计关系基本吻合, 表明序列宏观破裂尺度与大样本统计结果基本一致, 序列主体活动可能已经结束.

3) 余震分布尺度与最大地震震级之间统计关系有一定的适用范围(M_0 分布区段). 若仅从统计关系来看, 孤立型序列余震分布尺度随 M_0 增长缓慢, 如图 5a 所示, 实际上两者之间的统计相关程度非常低(图 3a). 主余型与多震型序列余震分布尺度在 $M_0 < 6.8$ 时基本一致, 多震型略高于主余型, 之后则主余型余震分布尺度随主震震级的增长速率略快于多震型. 与以往大陆地区的统计结果(吴开统等, 1990)相比较, 当主震震级小于 7 级时, 本文由主余型序列所得余震分布尺度大于吴开统所得结果; 当主震震级大于 7 级时, 本文所得结果小于吴开统结果. 考虑主震破裂滑动类型的差异(图 5b), 当 $M_0 < 6.8$ 时, 走滑-

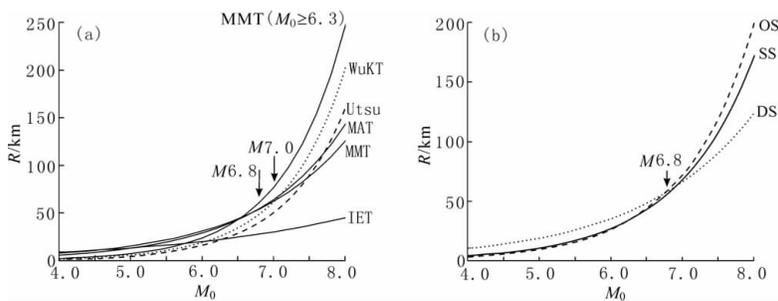


图 5 余震分布尺度与序列最大地震之间的统计关系

(a) 不同类型序列统计结果. IET 为孤立型, MAT 为主余型, MMT 为多震型, MMT($M_0 \geq 6.3$) 为 $M_0 \geq 6.3$ 多震型,

WuKT 为吴开统(1990)主余型序列统计结果, Utsu 为 Utsu(1961)主余型序列统计结果; (b) 不同主震破裂

形式序列统计结果. SS 为走滑-近走滑型, OS 为斜滑型, DS 为倾滑-近倾滑型

近走滑型与斜滑型序列的余震分布尺度基本一致, 低于倾滑-近倾滑型序列的余震分布尺度; 当 $M_0 \geq 6.8$ 时, 斜滑型序列余震分布尺度及其随 M_0 的增大速率均略高于走滑-近走滑型序列, 两者又都明显高于倾滑-近倾滑型序列。

4) 对比表 1 中式(4)与 Utsu(1961)及吴开统等(1990)所得结果可见, 三者统计关系中各项系数非常一致, a 约等于 0.5, b 约等于 $-1.7 \sim -1.8$ 。由于 Utsu(1961)及吴开统等(1990)的结果由主余型序列统计得到, 而式(4)由多震型序列统计得到, 因而这一现象意味着, 当序列最大地震震级较高时, 余震分布尺度主要取决于最大地震震级大小, 而与序列类型关系不大。

部分较新地震的震源机制及破裂节面的确定, 主要依据相关省地震局的年度震情研究报告。限于篇幅所限, 不一一列举, 谨此致谢!

参 考 文 献

- 陈棋福, 郑大林, 车时. 2002a. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京: 地震出版社, 1-429.
- 陈棋福, 郑大林, 刘桂萍, 等. 2002b. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京: 地震出版社, 1-489.
- 陈棋福, 郑大林, 高荣胜. 2002c. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京: 地震出版社, 1-468.
- 蒋海昆, 李永莉, 曲延军, 等. 2006a. 中国大陆中强地震序列类型空间分布特征[J]. 地震学报, **28**(4): 389-398.
- 蒋海昆, 曲延军, 李永莉, 等. 2006b. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J]. 地球物理学报, **49**(4): 1110-1117.
- 单新建, 何玉梅, 朱燕, 等. 2002. 新疆伽师强震群的震源破裂特征[J]. 地震地质, **24**(1): 59-68.
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓. 1990. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社: 138-148.
- 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.
- 许忠淮. 2003. 震源机制[G]//中国地震局监测预报司主编. 地震参数: 数字地震学在地震预测中的运用. 北京: 地震出版社: 16-25.
- 张四昌, 刁桂苓. 1992. 唐山序列的构造过程[J]. 中国地震, **8**(2): 73-80.
- 张肇成, 罗兰格, 李海华, 等. 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社, 1-222.
- 张肇成, 罗兰格, 李海华, 等. 1990a. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京: 地震出版社, 1-421.
- 张肇成, 罗兰格, 李海华, 等. 1990b. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京: 地震出版社, 1-294.
- 张肇成, 郑大林, 徐京华. 1999. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京: 地震出版社, 1-349.
- 张肇成, 郑大林, 徐京华. 2000. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京: 地震出版社, 1-452.
- 周翠英, 王铮铮, 蒋海昆, 等. 2005. 华东地区现代地壳应力场及地震断层错动性质[J]. 地震地质, **27**(2): 273-288.
- 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.
- Biasi G P, Weldon R J. 2006. Estimating surface rupture length and magnitude of paleoearthquakes from point measurements of rupture displacement[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **96**(5): 1612-1623.
- Chapman M C, Powell C A, Vlahovic G, et al. 1997. A statistical analysis of earthquake focal mechanisms and epicenter locations in the eastern Tennessee seismic zone[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(6): 1522-1536.
- Kisslinger C, Jones L M. 1991. Properties of aftershocks in southern California[J]. *J Geophys Res*, **96**: 11947-11958.
- Lutz T M. 1986. An analysis of the orientation of large-scale crustal structures: A statistical approach based on areal distributions of pointlike features[J]. *J Geophys Res*, **91**(B1): 421-434.
- Lutz T M, Gutmann J T. 1995. An improved method for determining and characterizing alignments of pointlike features and its implications for the Pinacate volcanic field, Sonora, Mexico[J]. *J Geophys Res*, **100**(B9): 17659-17670.
- Mogi K. 1968a. Migration of seismic activity[J]. *Bull Earth Res Inst Tokyo Univ*, **46**: 53-74.
- Mogi K. 1968b. Development of aftershock area of great earthquakes[J]. *Bull Earthq Res Inst Tokyo Univ*, **46**: 175-203.
- Mogi K. 1969. Some features of recent seismic activity in and near Japan (2): Activity before and after great earthquakes [J]. *Bull Earthq Res Inst Tokyo Univ*, **47**: 395-417.
- Reasenberg P A. 1999. Foreshock occurrence before large earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **104**(B3): 4755-4768.

- Tajima F, Kanamori H. 1985. Global survey of aftershock area expansion patterns[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **40**: 77-134.
- Utsu T A. 1961. Statistical study on the occurrence of aftershocks[J]. *Geophys Mag*, **30**: 521-605.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**(4): 974-1 002.
- Жалковский Н Д, Мучная В И. 1981. Опространственных и временных распределениях афтершоков[J]. *Геология и Геофизика*, (8): 108-116.

附录

附表 用于本文余震分布尺度统计的序列资料及相关参数

序列最大地震基本参数					序列类型	破裂类型	R/km
年-月-日	纬度/°	经度/°	M_s	地点			
1966-03-22	37.53	115.05	7.3	河北邢台	MMT	SS	99.6
1967-03-27	38.48	116.47	6.5	河北河间	MAT	SS	30.5
1969-07-18	38.33	119.45	7.5	渤海	MAT	SS	52.7
1970-01-05	24.10	102.60	7.7	云南通海	MAT	SS	148.5
1970-02-07	22.90	100.80	6.2	云南普洱	MAT	SS	17.8
1970-02-24	30.80	103.10	6.5	四川大邑	MAT	OS	44.7
1970-12-03	35.85	105.55	5.5	宁夏西吉	IET	SS	52.7
1971-02-05	25.27	99.50	5.8	云南保山	MAT	OS	63.3
1971-03-23	41.43	79.25	6.1	新疆乌什	MMT	SS	71.2
1971-03-24	35.50	98.08	6.3	青海玛多	IET		43.5
1971-04-03	32.22	95.40	6.3	青海杂多	MMT		26.3
1971-04-28	22.80	101.10	6.7	云南普洱	MMT	OS	66.7
1971-07-26	40.02	77.32	5.7	新疆伽师	MAT	SS	44.4
1971-08-16	28.80	103.60	5.9	四川马边	MMT	SS	46.7
1972-01-16	40.33	79.07	6.2	新疆柯坪	MAT	OS	40.0
1972-01-23	23.43	102.43	5.5	云南红河	MAT	OS	12.9
1972-04-09	42.30	84.80	5.6	新疆轮台	MAT		19.3
1972-08-27	22.75	100.57	5.5	云南思茅	MAT		51.4
1972-08-30	36.70	96.40	5.5	青海霍布逊湖	MMT		13.8
1973-02-06	31.50	100.40	7.9	四川炉霍	MAT	SS	164.8
1973-04-22	27.43	103.89	5.4	云南彝良	MAT	SS	37.2
1973-06-01	24.92	99.60	5.3	云南腾冲	MMT	OS	19.0
1973-06-05	44.20	83.58	6.0	新疆精河	MAT	SS	40.1
1973-06-16	37.60	95.82	5.1	青海霍布逊湖	MAT		43.2
1973-08-11	32.92	103.92	6.4	四川松潘	MMT	SS	33.5
1973-08-16	22.82	100.97	6.3	云南普洱	MAT		30.0
1974-04-22	31.43	119.30	5.7	江苏溧阳	MAT	OS	12.3
1974-05-11	28.10	104.00	7.2	云南大关	MAT	SS	40.5
1974-06-15	31.57	100.07	5.2	四川甘孜	MAT	SS	16.6
1974-07-05	45.00	94.18	7.1	新疆巴里坤	MAT	SS	86.6
1974-08-11	39.23	73.82	7.3	新疆乌兹别里山口	MAT	OS	196.6
1974-09-29	40.38	77.87	5.5	新疆阿合奇	MAT	OS	70.9
1975-01-04	38.82	97.62	5.3	青海哈拉湖	IET		39.6
1975-01-12	24.80	101.53	5.6	云南楚雄	MAT		29.3
1975-01-15	29.44	101.81	6.2	四川九龙	MAT	SS	25.6
1975-02-04	40.65	122.80	7.4	辽宁海城	MAT		63.3
1975-05-05	33.22	92.90	6.4	青海卡赛渡口	MAT		16.3

续附表

序列最大地震基本参数					序列类型	破裂类型	R/km
年-月-日	纬度/°	经度/°	M_s	地点			
1975-07-09	23.87	103.08	5.5	云南开远	MAT	SS	19.8
1975-09-04	25.82	99.85	5.4	云南漾泌	MAT	SS	7.5
1975-10-28	21.30	101.50	5.5	云南勐腊	MAT		59.6
1975-12-01	27.10	100.28	5.4	云南丽江	MAT	OS	23.4
1976-01-10	42.02	83.37	5.8	新疆库车	MAT	DS	35.7
1976-02-16	22.87	100.60	6.0	云南普洱	MMT	SS	22.2
1976-04-06	40.22	112.10	6.4	内蒙和林格尔	MAT	OS	80.9
1976-05-29	24.37	98.63	7.3	云南龙陵	MMT	SS	104.2
1976-07-28	39.60	118.20	7.9	河北唐山	MAT	SS	191.7
1976-08-16	32.70	104.08	7.2	四川松潘	MMT	DS	80.8
1976-08-24	39.62	117.43	5.5	河北宝坻	MMT		43.1
1976-09-23	39.98	106.45	6.4	内蒙巴音木仁	MAT	SS	122.7
1976-11-03	25.00	99.25	5.6	云南保山	MAT		36.8
1976-11-07	27.50	101.08	6.7	四川盐源	MMT	SS	74.3
1977-01-02	38.10	91.07	6.4	青海茫崖	MAT		18.7
1977-01-19	37.10	95.80	6.3	青海霍布逊湖	MAT		59.5
1977-07-09	34.88	115.73	5.2	山东成武	IET	SS	8.7
1977-12-16	33.32	97.32	5.3	青海玉树	MAT		14.2
1977-12-19	39.90	77.42	6.2	新疆伽师	MAT	SS	21.3
1978-05-19	25.53	100.30	5.6	云南下关	MMT	SS	16.7
1978-07-13	31.93	102.96	5.1	四川黑水	MAT	OS	2.9
1978-09-10	22.95	101.17	5.5	云南普洱	MAT	SS	65.6
1978-10-08	39.50	74.80	6.0	新疆乌恰	MAT		55.6
1979-03-02	33.18	117.42	5.4	安徽固镇	MAT	OS	2.9
1979-03-15	23.52	101.25	6.8	云南普洱	MAT	OS	13.0
1979-03-29	41.90	83.43	6.0	新疆库车	IET	SS	34.4
1979-03-29	32.40	97.30	6.2	青海玉树	IET		32.4
1979-06-19	37.10	111.87	5.5	山西介休	IET	OS	5.4
1979-07-09	31.45	119.25	6.3	江苏溧阳	MAT	OS	11.1
1979-08-25	41.23	108.12	6.4	内蒙五原	MAT	SS	21.2
1980-04-18	37.87	99.12	5.2	青海天峻	MMT	SS	27.1
1980-06-18	23.42	103.67	5.7	云南蒙自	MAT		19.9
1980-11-06	43.87	86.25	5.7	新疆玛纳斯	MAT	DS	36.2
1980-12-16	46.03	90.40	5.8	新疆青河	MAT		38.4
1981-01-24	31.00	101.17	6.9	四川道孚	MAT	SS	22.7
1981-07-07	25.13	97.92	5.7	云南盈江	MAT		17.1
1981-08-13	40.50	113.42	5.8	内蒙丰镇	IET	SS	6.8
1982-04-14	36.75	105.50	5.5	宁夏海源	IET	SS	14.1
1982-06-16	31.82	99.95	6.0	四川甘孜	IET	SS	5.6
1982-07-03	26.60	99.75	5.4	云南剑川	MAT	SS	30.1
1982-10-08	26.27	100.00	5.4	云南洱源	MAT		16.3
1982-10-27	23.80	105.90	6.0	云南富宁	MAT		3.0
1982-12-28	25.50	99.38	5.2	云南永平	MAT		9.8
1982-12-28	22.43	101.03	5.4	云南景洪	MAT		60.2
1983-02-13	40.23	75.22	6.7	新疆乌恰	MAT	SS	166.3
1983-05-28	22.42	101.22	5.2	云南景洪	MAT		7.9
1983-06-04	26.97	103.40	5.0	云南鲁甸	MAT		41.9

续附表

序列最大地震基本参数					序列类型	破裂类型	R/km
年-月-日	纬度/°	经度/°	M_s	地点			
1983-06-15	33.09	92.00	5.6	青海格尔木	IET		29.7
1983-11-07	35.27	115.28	6.2	山东菏泽	IET	OS	7.3
1984-01-06	37.99	102.18	5.3	甘肃武威	MAT		34.8
1984-02-17	37.73	100.72	5.3	青海祁连	MAT		6.1
1984-04-24	22.07	99.23	6.0	云南孟连	MAT		17.5
1984-05-21	32.47	121.58	6.3	南黄海	MAT	OS	48.8
1984-11-23	38.07	106.22	5.3	宁夏灵武	MAT	SS	10.1
1985-01-16	32.63	95.23	5.2	青海杂多	MAT		33.4
1985-08-12	36.22	95.62	5.2	青海格尔木	MAT		55.3
1985-08-23	39.43	75.47	7.1	新疆乌恰	MAT	OS	120.3
1985-09-02	23.60	102.68	5.6	云南建水	MAT	OS	12.3
1986-03-01	48.67	126.53	5.8	黑龙江德都	MMT	SS	20.3
1986-03-13	26.20	100.17	5.2	云南鹤庆	MAT	SS	22.3
1986-07-10	27.45	101.40	5.0	四川盐源	MMT	OS	26.7
1986-08-12	34.53	91.75	6.4	青海格尔木	MAT		25.6
1986-09-17	37.32	101.62	5.4	青海门源	MMT		44.5
1986-10-07	25.33	102.37	5.3	云南富民	MAT	DS	8.9
1986-12-21	36.72	93.68	5.3	青海格尔木	IET	SS	52.8
1987-01-08	34.16	103.23	5.9	甘肃迭部	MAT		31.7
1987-01-24	41.43	79.27	6.4	新疆乌什	MAT	OS	87.6
1987-02-26	38.07	91.25	6.1	青海茫崖	MAT		8.6
1987-04-30	39.63	74.83	6.0	新疆乌恰	MAT	OS	39.6
1987-05-18	26.18	100.18	5.4	云南鹤庆	MAT		4.0
1987-08-10	38.05	106.28	5.5	宁夏灵武	MAT	OS	12.2
1987-09-19	47.37	89.47	5.8	新疆富蕴	IET	SS	12.5
1988-01-04	38.10	106.32	5.5	宁夏灵武	MAT	DS	13.8
1988-01-10	27.22	100.93	5.5	云南宁蒗	MAT	DS	9.3
1988-11-05	34.27	91.87	6.8	青海唐古拉山	MAT	SS	93.7
1988-11-06	22.83	99.72	7.6	云南澜沧	MMT	SS	154.9
1988-11-22	38.35	99.32	5.7	甘肃肃南	MMT		17.4
1989-04-16	30.00	99.40	6.6	四川巴塘	MMT	SS	77.1
1989-05-14	35.27	91.54	5.5	青海格尔木	MAT		64.8
1989-09-22	31.50	102.60	6.5	四川小金	IET	SS	22.0
1989-10-19	39.97	113.82	6.4	山西大同、阳高	MMT	SS	29.2
1989-11-02	36.00	106.30	5.0	宁夏故原	IET	SS	10.6
1990-01-14	37.83	92.00	6.5	青海茫崖	IET	SS	86.1
1990-01-27	23.22	100.02	5.2	云南景谷	MMT		59.3
1990-04-17	39.45	74.55	6.4	新疆乌恰	IET	SS	57.1
1990-04-26	36.07	100.30	7.0	青海共和	MAT	DS	88.4
1990-10-20	37.07	103.38	6.2	甘肃天祝、景泰	MAT		26.1
1991-01-02	38.20	99.90	5.1	青海祁连	MAT	OS	61.2
1991-02-25	40.33	79.00	6.5	新疆柯坪	MAT	DS	55.4
1991-04-12	27.25	100.98	5.4	云南宁蒗	MAT		37.3
1991-09-02	37.30	95.40	5.1	青海锡铁山	IET		17.3
1991-10-01	37.78	101.37	5.2	青海门源	MAT	DS	14.7
1991-10-01	37.78	101.37	5.2	青海门源	MAT		4.8
1992-06-21	38.55	99.62	5.0	青海甘南	MAT	DS	36.6

续附表

序列最大地震基本参数					序列类型	破裂类型	R/km
年-月-日	纬度/°	经度/°	M_s	地点			
1992-12-18	26.37	100.58	5.6	云南永胜	MMT	SS	5.6
1993-01-27	22.93	101.08	6.3	云南普洱	MAT	SS	23.5
1993-02-01	25.85	101.35	5.5	云南大姚	MAT	OS	11.5
1993-02-03	42.27	86.08	5.7	新疆和静	IET	SS	15.9
1993-06-04	23.67	100.38	5.3	云南临沧	MAT		29.9
1993-07-17	27.78	99.70	5.8	云南中甸	MAT	OS	34.7
1993-08-14	25.45	101.25	5.6	云南姚安	MAT	SS	10.3
1993-09-05	37.10	94.68	5.1	青海格尔木	MAT	DS	23.3
1993-10-02	38.30	88.67	6.6	新疆若羌	MAT	OS	59.2
1993-10-26	38.52	98.87	6.0	青海祁连	IET	DS	8.5
1993-12-01	39.32	75.64	6.2	新疆疏附	MMT	OS	41.0
1994-01-27	33.17	92.47	5.7	青海唐古拉山	MMT		7.7
1994-08-23	40.20	78.87	5.2	新疆巴楚	IET	OS	45.7
1994-09-04	36.10	100.30	5.5	青海共和	MMT	OS	119.6
1994-12-30	28.95	103.58	5.7	四川马边	MAT		18.3
1995-02-18	22.98	99.68	5.3	云南澜沧	MAT	SS	75.9
1995-03-19	42.53	87.18	5.0	新疆和硕	IET	SS	38.6
1995-04-25	22.77	102.73	5.5	云南金平	IET	OS	6.1
1995-05-02	43.78	84.72	5.8	新疆乌苏	IET	OS	2.5
1995-07-09	36.40	99.90	5.3	青海共和	IET		3.9
1995-07-10	22.12	99.05	6.2	云南孟连	MMT		14.8
1995-07-12	21.98	99.07	7.3	云南孟连	MAT	SS	60.2
1995-07-22	36.23	103.13	5.8	甘肃永登	MAT		6.5
1995-09-19	33.02	93.07	5.4	青海唐古拉山	IET		42.8
1995-09-20	34.97	118.10	5.6	山东苍山	IET	SS	4.5
1995-09-26	41.77	81.57	5.1	新疆拜城	MAT	DS	51.4
1995-10-24	25.83	102.32	6.5	云南武定	MAT	SS	28.1
1995-12-18	34.60	97.30	6.2	青海玛多	MAT	DS	39.9
1996-01-09	43.80	85.57	5.2	新疆沙湾	MAT	SS	8.9
1996-02-03	27.30	100.22	7.0	云南丽江	MAT	DS	51.0
1996-03-13	48.40	88.22	6.1	新疆阿勒泰	IET	OS	15.2
1996-03-19	40.14	76.64	6.7	新疆阿图什	MAT	OS	60.0
1996-05-03	40.77	109.72	6.6	内蒙包头	MAT	SS	32.5
1996-06-01	37.31	102.75	5.4	甘肃天祝、古浪	MAT		19.1
1996-08-22	33.72	94.05	5.1	青海唐古拉山	MAT		31.5
1996-10-04	34.82	99.15	5.0	青海玛多	IET		19.5
1996-11-09	31.73	123.03	6.4	长江口	IET	OS	42.7
1996-11-19	35.44	78.36	7.1	新疆和田	MAT	SS	139.2
1996-12-21	30.72	99.59	5.5	四川白玉	IET	SS	14.5
1997-01-21	39.60	77.04	6.0	新疆伽师	MMT	SS	63.9
1997-01-25	21.87	101.08	5.1	云南景洪	MMT	DS	47.6
1997-02-09	36.02	95.93	5.4	青海格尔木	MAT	SS	25.1
1997-06-04	43.32	84.25	5.0	新疆新源	IET	SS	8.1
1997-07-28	33.52	122.22	5.8	南黄海	MAT		5.2
1998-01-10	41.10	114.32	6.4	河北张北	MAT	SS	35.9
1998-03-19	40.12	76.82	6.0	新疆阿图什	MAT	DS	22.1
1998-05-29	37.57	79.03	6.2	新疆皮山	MAT	DS	108.9

续附表

序列最大地震基本参数					序列类型	破裂类型	R/km
年-月-日	纬度/°	经度/°	M_s	地点			
1998-06-25	41.55	80.25	5.1	新疆温宿	IET	OS	4.5
1998-07-28	41.73	81.52	5.4	新疆拜城	MAT	SS	20.2
1998-10-02	27.30	101.10	5.6	云南宁蒗	MMT		28.5
1998-11-19	27.23	100.98	6.2	云南宁蒗	MAT	SS	20.0
1998-12-01	26.32	104.08	5.4	云南宣威	MAT	SS	15.9
1999-03-15	41.82	82.68	5.7	新疆库车	IET	SS	38.3
1999-05-30	32.85	93.57	5.6	青海唐古拉山	MMT		9.6
1999-06-17	41.87	81.80	5.0	新疆拜城	MMT	OS	31.9
1999-09-23	42.40	84.47	5.1	新疆轮台	IET	DS	35.7
1999-09-27	34.58	101.47	5.2	青海河南	MAT		60.3
1999-11-01	39.97	113.88	5.4	山西大同、阳高	MAT	SS	4.1
1999-11-25	24.60	102.87	5.5	云南澄江	MAT	SS	10.2
1999-11-26	34.52	99.87	5.1	青海玛沁	MAT	SS	8.9
1999-11-29	40.53	123.03	5.9	辽宁岫岩	MMT	SS	10.8
2000-01-15	25.57	101.08	5.9	云南姚安	MMT	SS	41.8
2000-01-27	24.15	103.63	5.5	云南丘北	IET	SS	16.9
2000-06-06	37.13	103.93	5.9	甘肃景泰	MAT		25.7
2000-08-21	25.82	102.22	5.4	云南武定	MAT		16.6
2000-09-12	35.57	99.62	6.6	青海兴海	MAT		45.5
2000-09-13	34.63	95.73	5.0	青海曲麻莱	MAT		34.0
2000-12-10	44.30	81.37	5.0	新疆伊宁	IET	DS	35.8
2001-02-23	29.35	101.07	6.0	四川雅江	MAT	SS	17.4
2001-04-10	24.80	99.02	5.2	云南施甸	MMT	SS	19.6
2001-05-24	27.63	100.80	5.8	云南宁蒗	MAT	SS	80.2
2001-07-10	24.93	101.38	5.6	云南楚雄	MAT	SS	11.6
2001-07-15	24.33	102.63	5.4	云南江川	MAT	SS	0.8
2001-09-04	23.63	100.55	5.3	云南景谷	MAT	SS	8.2
2001-10-27	26.23	100.57	6.0	云南永胜	MAT	SS	13.4
2001-11-14	35.84	91.10	8.1	青海喀喇昆仑	MAT	SS	383.3
2002-06-29	34.10	94.30	6.0	青海治多	MAT		46.6
2002-10-27	35.18	96.12	5.5	青海都兰	IET		15.2
2002-12-14	39.82	97.33	5.9	甘肃玉门	MAT		14.9
2002-12-25	39.63	75.13	5.7	新疆乌恰	IET	OS	14.6
2003-01-04	39.67	77.02	5.4	新疆伽师	MAT	DS	18.7
2003-02-14	43.98	85.85	5.4	新疆石河子	MMT	OS	9.6
2003-02-24	39.62	77.27	6.8	新疆巴楚	MAT	OS	119.1
2003-04-17	37.65	96.55	6.6	青海德令哈	MAT	DS	122.0
2003-07-21	25.95	101.23	6.2	云南大姚	MMT	SS	38.1
2003-08-16	43.93	119.68	6.1	内蒙巴林左旗	MAT	SS	22.8
2003-09-02	38.57	75.13	5.6	新疆阿克陶	MAT	SS	28.1
2003-09-27	40.32	77.20	5.1	新疆阿合奇	MAT	DS	22.3
2003-10-25	38.35	100.93	6.2	甘肃民乐、山丹	MMT		11.1
2003-11-13	34.76	103.94	5.2	甘肃岷县	IET		2.1
2003-11-15	27.10	103.37	5.4	云南鲁甸	MMT		11.7
2003-12-01	42.98	80.47	6.0	新疆昭苏	MAT	OS	29.9
2004-05-11	37.72	96.40	5.9	青海德令哈	MAT	SS	22.2

注：“序列类型”中 IET 为孤立型，MAT 为主余型，MMT 为多震型；“破裂类型”为序列最大地震的破裂类型，SS 为走滑-近走滑型，OS 为斜滑型，DS 为倾滑-近倾滑型，此处以逆断破裂型为主。R 为 95% 置信概率条件下的余震分布尺度。

STATISTICAL FEATURES OF AFTERSHOCK DISTRIBUTION SIZE FOR MODERATE AND LARGE EARTH- QUAKES IN CHINESE MAINLAND

Jiang Haikun¹⁾ Zheng Jianchang²⁾ Wu Qiong¹⁾
Qu Yanjun³⁾ Li Yongli⁴⁾ Dai Lei²⁾

1) *China Earthquake Networks Center, Beijing 100036, China*

2) *Earthquake Administration of Shandong Province, Ji'nan 250014, China*

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

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

Abstract: Based on data of earthquake sequences with $M_s \geq 5.0$ in Chinese mainland from 1970 to 2004, for different sequence types and different rupture modes of the main shock, the relationship between aftershock distribution size R and the magnitude of the main shock M_0 has been studied statistically. Considering the rupture mode of the main shock, we give the quantitative statistical relationships between R and M_0 under 95% confidence levels for different sequence types. Qualitatively, $\lg R$, the logarithm of the aftershock distribution size, is positively correlative to the M_0 , but the data distribution is dispersed. Viewing from different sequence types, the correlation between R and M_0 is very weak for isolated earthquake type (IET) sequence, R distributes in the range from 5 to 60 km; For mainshock-aftershock type MAT, $\lg R$ is positively correlative to M_0 ; For multiple main shock type MMT, the correlation between $\lg R$ and M_0 is not very obvious when $M_0 \leq 6.2$ and R distributes in the range from 5 to 70 km, while it shows a linear correlation when $M_0 \geq 6.3$. The statistical results also show that the occupational ratios of different sequence types for strike-slip and oblique slip are almost the same. But for dip-slip (mostly are thrust mechanisms), the ratio of MAT is higher than that of IET and MMT. Comparing with previous results, it indicates that, when M_0 is large enough, R is mainly determined by M_0 and there is almost no relationship with the rupture mode of the main shock.

Key words: Chinese mainland; aftershock distribution size; types of aftershock sequences; rupture mode of the main shock