

李莹甄, 王海涛, 邬成栋, 王想, 冯建刚, 曲延军, 王行舟. 2011. 中国大陆地震条带统计特征分析. 地震学报, 33(5): 568-581.

Li Yingzhen, Wang Haitao, Wu Chengdong, Wang Xiang, Feng Jiangang, Qu Yanjun, Wang Xingzhou. 2011. A statistical analysis on seismic belts in Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 33(5): 568-581.

中国大陆地震条带统计特征分析^{*}

李莹甄^{1),*} 王海涛¹⁾ 邬成栋²⁾ 王 想³⁾

冯建刚⁴⁾ 曲延军¹⁾ 王行舟⁵⁾

1) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

2) 中国昆明 650224 云南省地震局

3) 中国石家庄 050021 河北省地震局

4) 中国兰州 730000 甘肃省地震局

5) 中国合肥 230031 安徽省地震局

摘要 对中国大陆具备相对完整资料的 327 次 $M \geq 5.0$ 地震, 分 5 个工作区进行了统一要求的地震条带图像扫描, 发现 96 次中强震前存在条带图像, 约占研究地震总数的 29%. 其中震前有带地震与研究地震的比例分别为: 华北地区 30%, 华东南区 29%, 川滇地区 41%, 青藏高原西北缘 24%, 新疆地区 16%. 中强震前出现条带比例最低的是新疆, 最高的为川滇地区. 在此基础上着重分析了条带形成后发生的主震与条带形成持续的时间、条带长轴尺度及组成条带地震震级等的统计关系. 其结果为: 中国大陆 $\lg t(\text{月}) = 0.30M - 1.03 \pm 0.38$ ($M \geq 6.5$), $\lg L(\text{km}) = 0.11M + 1.73 \pm 1.75$ ($M \geq 5.5$); 川滇地区 $\lg t(\text{月}) = 0.20M - 0.25 \pm 0.24$, $\lg L(\text{km}) = 0.12M + 1.75 \pm 0.16$ ($M \geq 5.5$). 其它分区关系离散, 未提出相应的统计关系. 研究表明, 条带的持续时间和条带的长轴尺度与主震震级在 $M < 5.5$ 时两者没有显著的相关性, 而在 $M \geq 5.5$ 时则存在一定的线性关系, 但其相关性较差. 组成条带的起始震级在 5 级 ($M_{5.0} - 5.9$) 主震前为 $M_L 2.5$ 左右; 6 级 ($M_{6.0} - 6.9$) 主震前为 $M_L 3.0$ 左右; 7 级 ($M \geq 7.0$) 主震前为 $M_L 4.0$ 左右. 主震发生在条带端部的比例大于内部; 主震前出现交汇条带较少, 仅占 10%, 主要出现在 7 级以上地震前. 5 级、6 级和 7 级地震前出现条带的比例分别为 25%、38% 和 71%. 这个比例一定程度上表明了条带图像可能是 7 级以上强震的重要异常判据.

关键词 中国大陆 地震条带 统计特征

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.05.002

中图分类号: P315.5

文献标识码: A

A statistical analysis on seismic belts in Chinese mainland

Li Yingzhen^{1),*} Wang Haitao¹⁾ Wu Chengdong²⁾ Wang Xiang³⁾

Feng Jiangang⁴⁾ Qu Yanjun¹⁾ Wang Xingzhou⁵⁾

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830001, China

2) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

3) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

4) Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

^{*} 基金项目 国家“十一五”科技支撑项目(2006ABC01B02-01-05)资助.

收稿日期 2010-07-13 收到初稿, 2011-03-02 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: liyinzhenq@163.com

5) *Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China*

Abstract: 327 $M \geq 5.0$ earthquakes with relatively integrated data are investigated. The whole seismic area in Chinese mainland is divided into 5 study regions. We spatially scanned the data in each region for seismic belt pattern with a uniform criterion. It is found that the belt pattern exists before 96 moderate-strong earthquakes, being 29% of the total earthquakes. The ratio of earthquakes with pre-earthquake belts over total is 30% for North China region, 29% for south-eastern China, 41% for Sichuan-Yunnan region, 24% for northwest marginal region of Qingzang plateau, and 16% in Xinjiang region. The ratio for Xinjiang region is the lowest and that for Sichuan-Yunnan region is the highest. Then we statistically analyzed the relationship between the magnitude M of the mainshock, occurred after belt formation, and the belt parameters, such as belt duration time t , belt length L , and the magnitude M of belt earthquakes. The results are $\lg t(\text{month}) = 0.30M - 1.03 \pm 0.38$ ($M \geq 6.5$) and $\lg L(\text{km}) = 0.11M + 1.73 \pm 1.75$ ($M \geq 5.5$) for China mainland earthquakes, and $\lg t(\text{month}) = 0.20M - 0.25 \pm 0.24$ and $\lg L(\text{km}) = 0.12M + 1.75 \pm 0.16$ ($M \geq 5.5$) for Sichuan-Yunnan region. Due to less sample earthquakes and large data scattering, the relationships for other regions are not presented. Our study result indicates that no significant correlation exists between the mainshock magnitude M and the belt duration time t , and the belt length L , when the belt earthquake magnitude $M < 5.5$. When $M \geq 5.5$, a linear relation would exist, but with poor data correlation. The lowest magnitudes of belt earthquakes are about $M_L 2.5$, $M_L 3.0$ and $M_L 4.0$ for the $M 5.0-5.9$, $M 6.0-6.9$ and $M \geq 7.0$ mainshock, respectively. The mainshocks occurred at the belt terminals are more than those occurred inside the belts. Only 10% mainshocks are associated with crossing belts, and they are mainly $M \geq 7.0$ earthquakes. The ratios of belts appeared before $M 5.0-5.9$, $M 6.0-6.9$ and $M \geq 7.0$ mainshocks are 25%, 38% and 71%, respectively, showing that the seismic belt pattern may be an important abnormal precursory for $M \geq 7.0$ mainshocks.

Key words: Chinese mainland; seismic belt; statistical characteristics

引言

地震活动条带图像是地震预测中最常用的方法之一。1969 年刘蒲雄在“通过弱震活动的分析开展地震预报的一些认识”一文中首次提出地震条带的概念。指出：“大震前，小震活动出现条带分布，而条带外围广大地区呈现平静的异常图形”（刘蒲雄，陈章立，1989）。

上世纪 80 年代中国地震学家开始对地震条带进行认真清理与系统研究。陈章立等（1981）和陆远忠等（1985）对 1967—1976 年发生在中国的 11 次 $M \geq 7.0$ 大震和部分 $M 6.0-6.9$ 地震前的区域地震活动图像进行了研究，认为 $M \geq 7.0$ 大震前小震活动“条带”的出现具有一定的普遍性，可将震前条带所展现出的的一些共同特征作为孕震条带的判别标准，并认为在震源区和条带上地震频度、 b 值和“应变”释放速率存在异常变化。韩渭宾和席敦礼（1985）清理了四川 $M \geq 6.0$ 地震的条带震例，周传荣和孙志昆（1989）清理了云南地区 1965—1988 年 $M \geq 5.0$ 地震的条带震例，分析了条带的特征，认为小震条带可以作为强

震前的一种震兆,并提出了候选地震活动条带的一些标准.刘蒲雄和陈章立(1989)通过对中国大陆 1967—1989 年 32 个 $M \geq 5.5$ 地震震例的条带图像系统分析,确定了条带的划法和异常条带的判别,并对条带与大震发生的关系进行了统计分析.这些地震学家还从地壳的实际变形过程讨论了条带的形成机理.此外陆远忠等(2007)通过岩石力学实验,认为小震条带的形成与震源体有关,孕震体的形状和几何位置以及破裂方式是影响前兆性地震活动图像形态的重要因素.这些研究成果在中国近 30 年的地震预报研究与实践中发挥了重要的作用.

上世纪 90 年代后随着强震的不断发生,有关条带的报道不断增多.2001 年昆仑山口西发生 $M_s 8.1$ 地震,震后总结发现,震前 4 年中国大陆西部地区 $M \geq 5.5$ 地震形成了两条规模巨大的强震活动条带,其中近南北向条带长度达到 1500 km, $M_s 8.1$ 地震发生在条带的外中部(梅世蓉等, 2009).同时对条带特征、机理与条带识别的研究也没有停止(周仕勇, 1990; 刘文龙, 徐永林, 2006).但这一时期虽经“九五”、“十五”的地震科技攻关研究,仍以地震条带的个案、条带的地区特征研究为主,没有针对整个中国大陆地震条带的新的系统性研究.

在国外,以“条带”之名的板内强震的地震活动图像前兆及其机理的数值模拟鲜有报道.1975 年 11 月夏威夷 Kalapana $M_s 7.2$ 地震震前 4 年,震源区 $M \geq 2.0$ 地震收缩成一条狭窄的条带,但没有关于大尺度地震条带的报导(Wyss *et al.*, 1981).对 2004 年印尼苏门答腊 $M_s 9.0$ 地震前地震条带的报道主要来自于中国学者的研究(薛艳, 宋治平, 2005; 林怀存等, 2005).近些年国外一些地震学家对大震前地震活动相关范围前兆性增长进行了观察和研究,提出了“地震链”的概念(Shebalin, 2006),指出地震链是密集的、具有一定长度的、快速形成的中小地震的序列,是震中时空丛集的一种特殊形式.这一定义与地震条带较为接近.

可以看出,由于不同区域背景地震活动水平不同,不同地震科技工作者的研究重点和角度有所差异,使得认定条带的标准也各有不同.本研究即是在刘蒲雄、陈章立和韩渭宾等学者研究的基础上,补充了近 20 年的地震资料,统一思路和方法后,对中国大陆 $M \geq 5.0$ 地震进行了重新扫描,震前出现条带演化图像的地震占研究地震总数的 29%.这一比例与《中国震例》(张肇诚等, 1988, 1990a, b, 1999, 2000, 2002; 陈棋福等, 2002a, b, 2008) 189 个震例前出现条带的比例接近(27%).本文在此基础上着重研究了不同区域,不同主震震级及条带参数的统计特征.

1 地震条带的扫描识别与判定

1.1 资料来源

本研究所采用的地震目录取自区域台网地震目录和中国地震目录.东部地震目录从 1972 年至今测定精度逐步提高,Ⅰ类和Ⅱ类精度(定位误差在 10 km 以内)可以达到 70% 以上.蒋长胜和吴忠良(2005)采用重复地震对中国地震台网 1987—2000 年 $M_L \geq 1.0$ 地震的定位误差研究,认为平均误差约在 10 km.从给出的条带图像,长度一般在 150 km 以上,对于大尺度的地震条带,Ⅰ和Ⅱ类定位精度可以基本满足分析要求.由于东部与西部地震监测能力存在差异,原则上按各地所能控制的最低震级扫描条带,青藏高原部分地区监测能力达不到条带扫描条件未纳入研究范畴.在研究时段初期及个别边邻地区仍有监测

能力达不到条带扫描条件的也进行了剔除. 因此本文着重对 1973—2007 年中国大陆有监测能力地区 $M \geq 5.0$ 地震(不含余震)前的条带图像进行了扫描.

1.2 条带的扫描与识别

定义条带的长度应在 100 km 以上, 条带的长宽比应为 4 : 1, 空段不超过全长的 1/3. 不同地区地震活动水平不同, 组成条带的地震次数应大于本地区平均地震活动水平的 2—3 倍. 本文采用条带内外地震频度比识别前兆性的地震条带. 即做条带内地震的 $M-t$ 图和逐月条带内外地震的频次比 $N/(N'+1)$ 曲线. 其中 N 为条带内的频次, N' 为条带两侧向外各扩展 1/2 带宽范围内的小震活动频次, 以比平均值高出 2 倍均方差为异常, 结合 $M-t$ 图确定条带出现的时间.

在识别条带图像时, 参考了以往公开发表的地震条带和《中国震例》中的地震条带. 通常从各区所能控制的最低震级下限开始扫描, 从低震级到高震级, 时间上从震前数月到数年, 依次扫描以保证不遗漏任意一种震级下限和时间尺度的条带图像. 条带的判定将遵循条带的定义及以往的判定准则(国家地震局科技监测司, 1990). 提取的条带特征参数有: 组成条带的起始震级, 条带的起止时间及条带的持续时间, 条带的长度和宽度, 以及主震与条带的相对位置等.

1) 确定扫描范围. 以主震震中为中心, 以经纬 $6^\circ \times 6^\circ$ 为扫描初始范围, 并随主震震级增大, 扫描范围也相应扩大. 同时根据各区域构造背景调整扫描区域的形状.

2) 确定条带地震起始震级. 一般从主震所在区域可监控震级开始扫描, 逐级上调震级, 直至地震带状分布现象消失. 将组成条带的最低震级定为条带起始震级 M_0 , 一次地震前可能出现由不同的起始震级组成的地震条带, 但为保持样本量的统一, 在统计条带的起始震级与主震之间的关系时, 仅选择每次地震前最小起始震级的条带参与统计.

3) 确定条带起始时间. 对同一条带震级, 从主震时间开始逐月向前扫描, 直到出现条带. 若未出现条带, 5 级($M_{5.0}-5.9$)地震最长追踪 8 年, 6 级($M_{6.0}-6.9$)地震最长追踪 10 年, 7 级($M \geq 7.0$)地震最长追踪 15 年或至有完整资料开始时间. 扫描过程中参考各区构造背景及长期地震活动分布图像, 注意区别线性构造上的常态地震活动. 将最早能判别为条带的这一组地震中第一次地震的发震时间作为条带的起始时间, 条带形成之后, 若条带外围发生的地震导致条带发散, 其发震时间为条带的结束时间. 若条带没有发散, 而在条带内或附近发生了中强以上地震, 则以中强以上地震的发震时间为条带的结束时间(即条带持续至主震). 自条带的起始时间起至条带的结束时间止为条带的持续时间.

4) 确定条带尺度. 一般来讲, 条带的空间尺度与当地构造背景有关, 同时也与当时地震定位精度有关, 一般情况下条带空间长度大于 150 km, 对于构造复杂部位可作适当调整. 由此用条带的延伸长度来描述条带的空间尺度.

5) 主震与条带的相对位置. 是以内部/外部/中部/端部等的组合来描述, 如主震位于条带内部端部、外部端部、中部或外部、交汇部位等.

依据以上标准对中国大陆地区具备分析工作条件的地震进行扫描.

2 典型地震条带图像示例

图 1—3 给出了以往或近些年发生在中国大陆的 3 次 5 级、6 级地震前的条带图像和条带形成前等长时段的对比图像. 可见震前条带图像清晰; 而在条带形成前后相应时段, 地

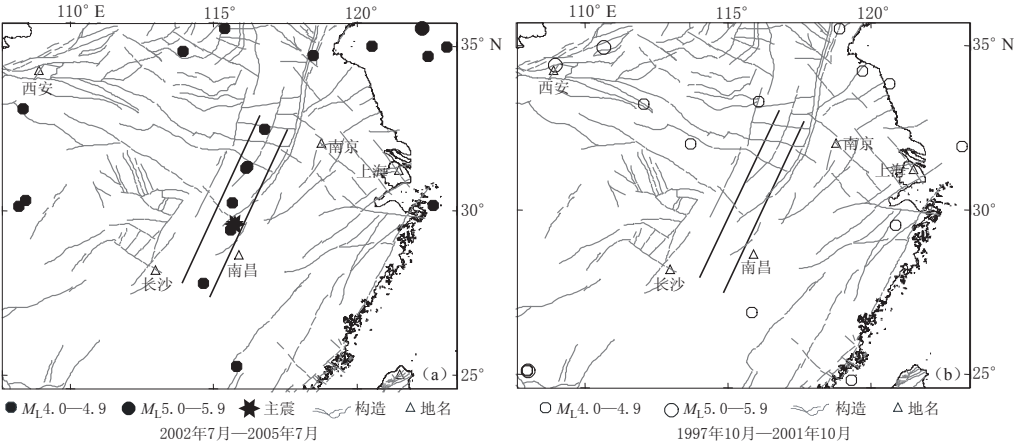


图 1 2005 年 11 月 26 日江西九江 M5.7 地震前条带图像(a)及地震发生前等长时段地震分布(b)

Fig.1 Seismic belt pattern before the M5.7 Jiujiang, Jiangxi, earthquake on Nov 26, 2005 (a) and the earthquake distribution in equal time period before the belt formation (b)

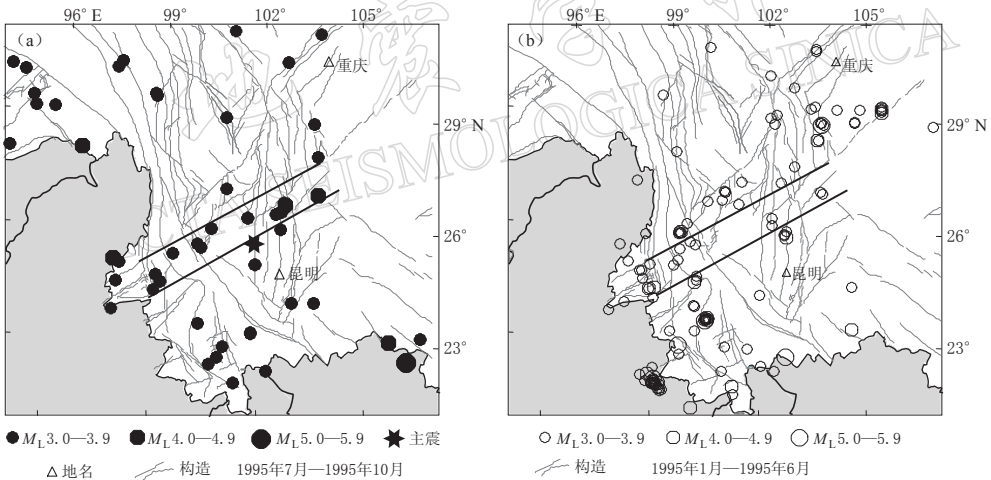


图 2 1995 年 10 月 24 日云南武定 M6.5 地震前条带图像(a)及条带形成前等长时段地震分布(b)

Fig.2 Seismic belt pattern before the M6.5 Wuding, Yunnan, earthquake on Oct 24, 1995 (a) and the earthquake distribution in equal time period before the belt formation (b)

震活动或杂乱无章(图 2b)，或较为平静(图 1b、图 3b)。

图 1a 为 2005 年 11 月 26 日江西九江 M5.7 地震前条带图像，条带长 570 km，宽 60 km，走向北东。组成条带的震级为 $M_L 4.0-4.1$ ，条带起始时间为 2002 年 7 月 9 日，组成条带的最后一次地震出现在震前 4 个月。主震位于条带内的空段附近，发震前条带未发散。

图 2a 是 1995 年 10 月 24 日云南武定 M6.5 地震前条带图像，条带长 620 km，宽 80 km，走向北东东。组成条带的震级为 $M_L 3.0-4.1$ ，条带起始时间为 1995 年 7 月 12 日，组成条带的最后一次地震出现在震前 3 天。主震发生在条带外中部。

图 3a 为 2008 年 8 月 30 日新疆和静 M5.3 地震前条带图像，震前曾借助条带对和静地震做出短期预测(李莹甄等，2010)。该条带长 350 km，宽 80 km，由 $M_s 3.0-5.1$ 地震组

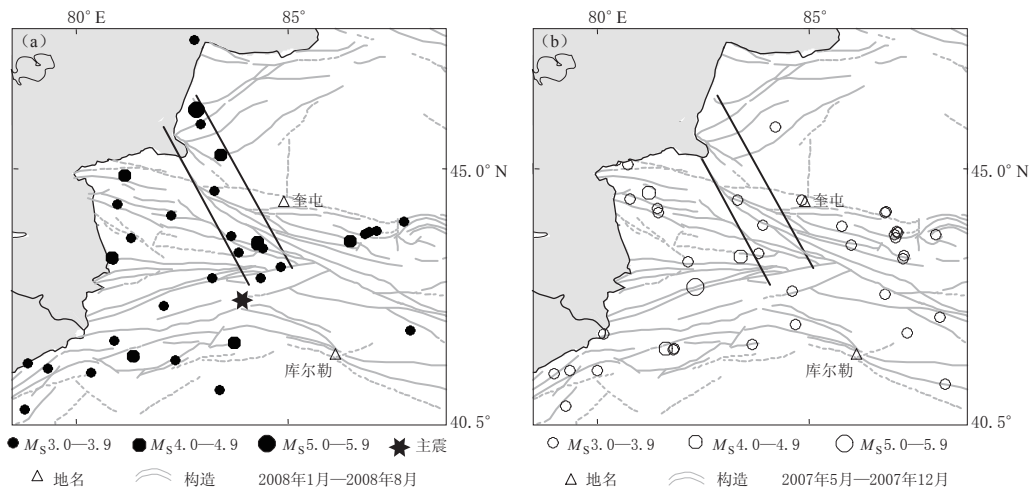


图3 2008年8月30日新疆和静 M5.3 地震前条带图像(a)及地震发生前等长时段地震分布(b)
Fig.3 Seismic belt pattern before the M5.3 Hejing, Xinjiang, earthquake on Aug 30, 2008 (a) and the earthquake distribution in equal time period before the belt formation (b)

成，组成条带的地震起始于2008年1月17日，止于2008年8月30日；16个小时后和静 M5.3 地震发生在条带端部外侧。条带的另一端曾在2008年2月24日发生 M5.1 地震，但这次地震前条带未完全成形，和静地震后条带形态消失。

由于篇幅所限，本文仅列出3次地震前的 $M-t$ 图和逐月条带内外地震的频次比 $N/(N'+1)$ 曲线(图4—6)。可见中强地震前条带内小震活动明显增强，内外地震频次比大幅上升。2005年江西九江 M5.7 地震前条带内4级地震从2002年开始增强活动，条带外地震平静(图4)，1995年云南武定 M6.5 地震条带位置1995年7—9月上旬小震增强活动，内外频次比增高(图5b)。2008年和静 M5.3 地震条带内从2007年11月—震前小震较前期明显增强，内外频次比升高，形成2次峰值(图6)。

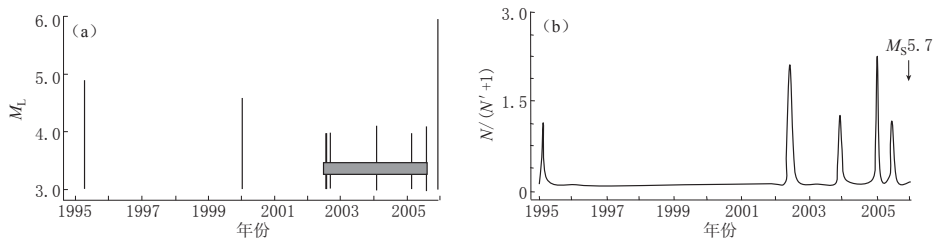


图4 2005年11月26日江西九江 M5.7 地震条带判别参数图像
(a) 条带内地震 $M-t$ 图；(b) 条带内外地震频次比

Fig.4 Variation of the parameters for discriminating seismic belt before M5.7 Jiujiang, Jiangxi, earthquake on Nov 26, 2005
(a) $M-t$ plot of earthquakes inside the belt; (b) Frequency ratio of inside over outside belt earthquakes

3 中国大陆及分区地震活动条带的统计特征

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

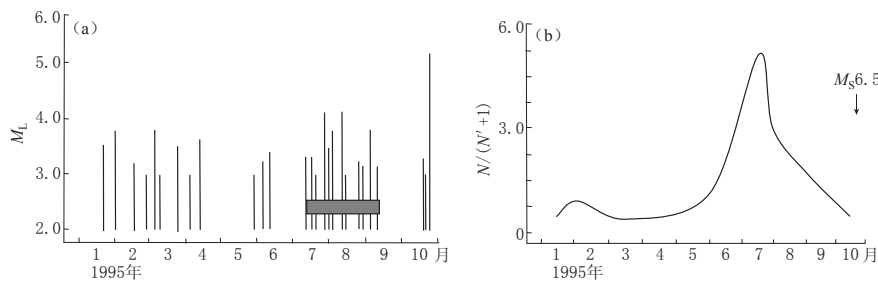


图 5 1995 年 10 月 24 日云南武定 $M_{6.5}$ 地震前条带判别参数图像

(a) 条带内地震 $M-t$ 图; (b) 条带内外地震频次比

Fig. 5 Variation of the parameters for discriminating seismic belt before $M_{6.5}$ Wuding, Yunnan, earthquake on Oct 24, 1995

(a) $M-t$ plot of earthquakes inside the belt; (b) Frequency ratio of inside over outside belt earthquakes

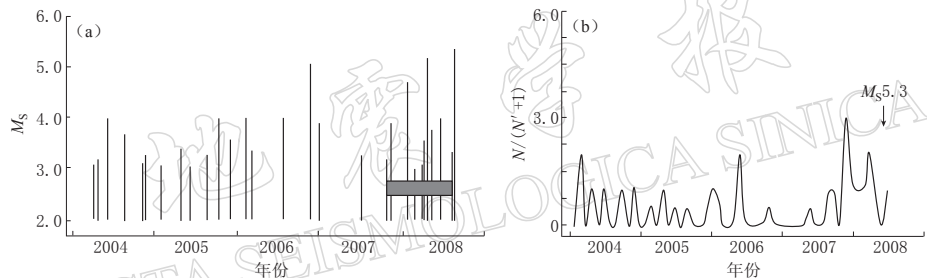


图 6 2008 年 8 月 30 日和静 $M_{5.3}$ 地震前条带判别参数图像

(a) 条带内地震 $M-t$ 图; (b) 条带内外地震频次比

Fig. 6 Variation of the parameters for discriminating seismic belt before $M_{5.3}$ Hejing, Xinjiang, earthquake on Aug 30, 2008

(a) $M-t$ plot of earthquakes inside the belt; (b) Frequency ratio of inside over outside belt earthquakes

中强地震的破裂特征具有一定的区域差异. 而就其确定区域而言, 地震破裂形式则显示出一定程度的统计稳定性. 对条带的研究将采用分区、分片的方法, 分析条带的统计特征.

3.1 条带概况

考察 1973 年以来中国大陆 327 次 $M \geq 5.0$ 地震, 其中 5 级 ($M_{5.0}—5.9$) 地震 258 次, 6 级 ($M_{6.0}—6.9$) 地震 55 次, 7 级 ($M \geq 7.0$) 地震 14 次. 搜索到有条带的地震 96 次, 其中 5 级地震 65 次, 6 级地震 21 次, 7 级地震 10 次, 占整个样本量的 29%. 显然地震条带图像仅在少部分中强地震前出现. 图 7 统计条带在不同震级档出现的比例, 可见只有 1/4 的 5 级地震和 1/3 的 6 级地震前出现条带. 6 级地震前条带出现的比例高于 5 级地震, 而 7 级地震条带的比例又远

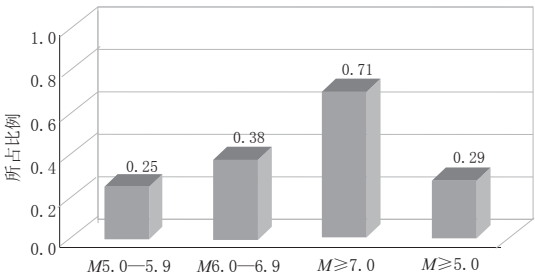


图 7 中国大陆不同震级档条带比例示意图

Fig. 7 Ratios of belt earthquakes over total for different magnitude threshold in Chinese mainland

远高于 6 级地震，达到 71％。条带图像对于 7 级地震的预测更具有前兆意义。

3.2 地震条带空间分布特征

图 8 给出了中国大陆具有地震条带的中强地震分布。按照地域分为华北、华东南、川滇、青藏高原西北缘、新疆及中国大陆等工作区(图 8)。由表 1 可分析条带的分区统计特征。

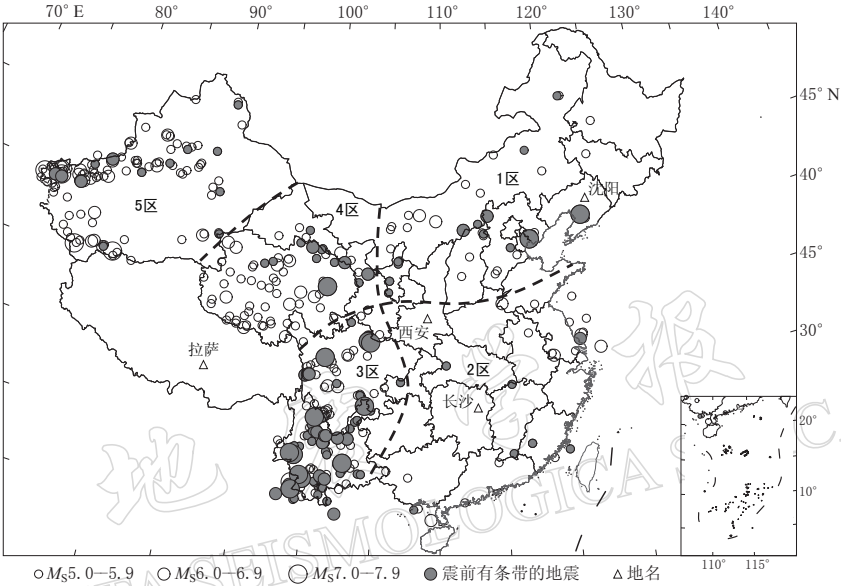


图 8 中国大陆出现条带的 $M \geq 5.0$ 中强地震分布及研究分区

1 区：华北区；2 区：华东南区；3 区：川滇区；4 区：青藏高原西北缘；5 区：新疆区。
空心圆为 1973 年以来 $M \geq 5.0$ 地震，实心圆为震前有条带的地震

Fig. 8 Distribution of $M \geq 5.0$ earthquakes in Chinese mainland and studied sub-regions
Region 1: North China; Region 2: South-eastern China; Region 3: Sichuan-Yunnan region;
Region 4: Northwest marginal region of Qingzang plateau; Region 5: Xinjiang region.
Hollow circles denote $M \geq 5.0$ earthquakes after 1973, solid dots represent the earthquakes with pre-shock belts

表 1 分级统计中国大陆中强地震前条带出现数及所占比例

Table 1 Ratio of earthquakes with pre-shock belts over total for different study regions

分 区	震 级 分 档 统 计						总 计	
	M5.0—5.9	比 例	M6.0—6.9	比 例	M7.0—7.9	比 例	M5.0—7.9	比 例
	条带数/地震数		条带数/地震数		条带数/地震数		条带数/地震数	
华北地区	7/33	0.21	3/4	0.75	2/2	1.0	12/39	0.30
华东南区	6/19	0.33	1/5	0.25			7/24	0.29
川滇地区	33/95	0.35	10/19	0.52	7/9	0.77	50/123	0.41
青藏高原西北缘	8/39	0.20	3/9	0.33	1/1	1.0	12/49	0.24
新疆地区	11/72	0.15	4/18	0.22	0/2	0.0	15/92	0.16
中国大陆	65/258	0.25	21/55	0.38	10/14	0.71	96/327	0.29

1) 5 级地震条带。川滇地区和华东南地区占的比例为 33％—35％，高于全国 25％的比例；华北、青藏高原西北缘和新疆地区占的比例较小，为 15％—20％，低于全国的比例。

2) 6 级地震的条带。川滇和华北地区占的比例较大，为 50％—52％，高于全国 38％的

比例；青藏高原西北缘居中，为 33%；华东南和新疆占的比例较小，为 22%—25%，低于全国比例。

3) 7 级地震条带. 华北地区的 2 次 7 级地震和青藏高原西北缘 1 次 7 级地震前都出现了地震条带；川滇地区 9 次 7 级地震前 7 次出现了条带(比例为 7/9)；新疆地区 2 次 7 级地震前没有出现条带，是由于 1974 年乌恰 $M_s7.3$ 和 1985 年乌恰 $M_s7.1$ 地震发生在南天山与西昆仑交汇处，属于台网地震监测薄弱地区，又靠近国境，地震目录不完整所致。

总体上， $M \geq 5.0$ 地震条带川滇和华东南占的比例较大，为 32%—41%；其次是华北和青藏高原西北缘，为 24%—29%；新疆地区最少，只有 16%。

3.3 条带持续时间与主震震级关系

统计中国大陆 1973 年以来 $M \geq 5.0$ 地震的条带持续时间 t 与主震震级 M 的关系，结果表明在 $M5.0—6.5$ 之间两者关系离散，但在 $M \geq 6.5$ 时出现一种线性增长(图 9a)。用中国大陆 19 个 $M \geq 6.5$ 地震样本拟合出的经验统计关系为

中国大陆
$$\lg t(\text{月}) = 0.30M - 1.03 \pm 0.38 \quad (M \geq 6.5) \tag{1}$$

该式的相关系数为 0.38，在 90% 置信水平下可以通过检验(其相关系数临界值为 0.36)，但在 95% 的置信水平下，无法通过统计检验(其相关系数临界值为 0.43)；若采用 55 个 $M \geq 5.5$ 的样本拟合线性统计关系，则相关系数为 0.23，在 90% 置信水平下，仍通不过检验(相关系数临界值为 0.25)。说明即使在较大地震端有一定的线性相关，其相关性也不大。

从分区情况来看，可分为两类：一类是线性相关程度低，无法通过统计检验的，包括华东南地区、华北地区(图 9c)、青藏高原西北缘和新疆地区(图 9d)。例如对华北地区 12 个

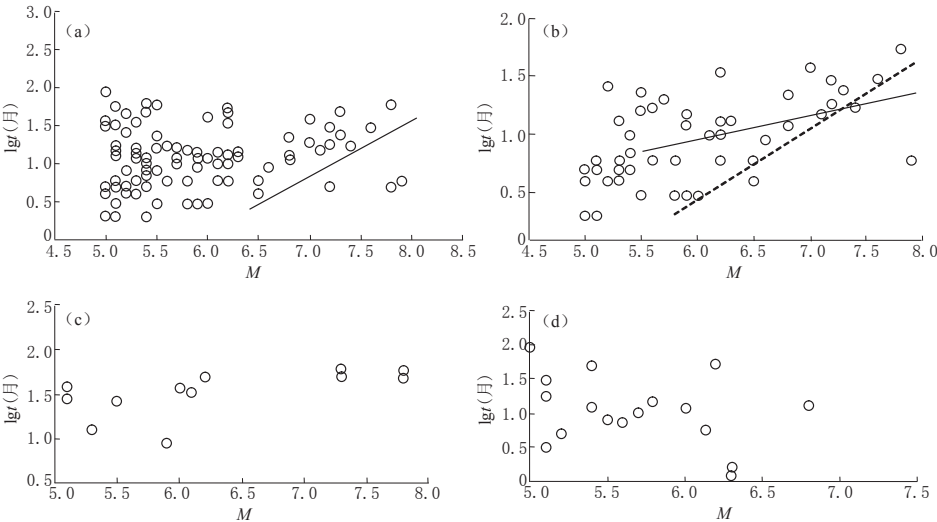


图 9 中国大陆及各分区中强以上地震条带持续时间 t 与主震震级 M 统计关系
(a) 中国大陆；(b) 川滇地区；(c) 华北地区；(d) 新疆地区。图中实线为拟合线，虚线为外包络线
Fig. 9 Logarithm of seismic belt duration time t versus mainshock magnitude M
for moderate-strong earthquakes in Chinese mainland and sub-regions
(a) Chinese mainland; (b) Sichuan-Yunnan region; (c) North China; (d) Xinjiang region.
Solid line fits the data and broken line shows data outside envelope

样本进行线性拟合，其相关系数为 0.30，在 95% 的置信水平下，相关系数临界值为 0.58，无法通过统计检验；在 90% 的置信水平下，相关系数临界值为 0.48，依然通不过检验。第二类是两者在较高震级端存在一定的线性关系，并随主震震级的增大其相关性趋于明显，如川滇地区(图 9b)。采用 $M \geq 5.5$ 的 47 个样本拟合关系为

川滇地区

$$\lg t(\text{月}) = 0.20M - 0.25 \pm 0.24 \quad (M \geq 5.5) \quad (2)$$

该式的相关系数为 0.43，在 95% 的置信水平下相关系数临界值为 0.42，基本通过统计检验。

观察到随主震震级的增加($M \geq 5.5$)，川滇地区条带持续时间下包络线斜率增大，随主震震级的增大条带持续时间增加明显(图 9b 虚线)。这说明条带持续时间较长，虽然不一定表示主震震级就一定高，但如果要预测 $M \geq 7.0$ 地震，其地震持续时间一般要比较长，至少应在 10 个月以上。

3.4 条带长轴尺度与主震震级关系

图 10a 为中国大陆中强以上地震条带长轴尺度 L 与主震震级 M 关系分布图。采用 $M \geq 5.5$ 的 55 个样本拟合经验统计关系式

中国大陆

$$\lg L(\text{km}) = 0.11M + 1.73 \pm 1.75 \quad (M \geq 5.5) \quad (3)$$

该式的相关系数为 0.44，在 95% 的置信水平下相关系数临界值为 0.25，通过显著性统计检验。表明条带长轴尺度与主震震级之间存在相关关系。不过在主震震级 $M < 5.5$ 时，这种关系很不明显。在主震震级 $M \geq 5.5$ 时，虽然经验关系较为明显，但其相关性较差，离

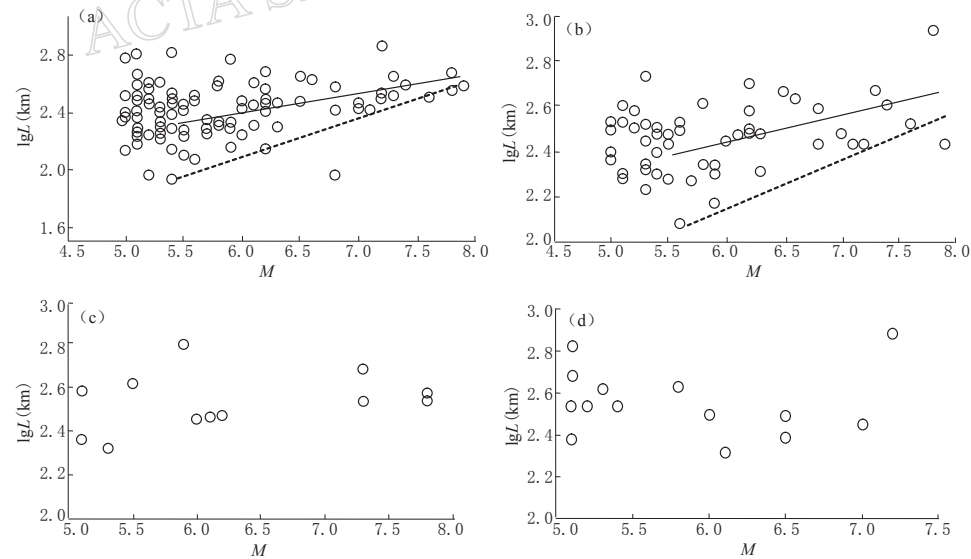


图 10 中国大陆及分区中强以上地震条带长轴尺度 L 与主震震级 M 统计关系
(a) 中国大陆；(b) 川滇地区；(c) 华北地区；(d) 青藏高原西北缘。图中实线为拟合线，虚线为外包络线
Fig. 10 Logarithm of seismic belt length L versus mainshock magnitude M for moderate-strong earthquakes in Chinese mainland and sub-regions
(a) Chinese mainland; (b) Sichuan-Yunnan region; (c) North China; (d) Northwest marginal region of Qingzang plateau. Solid line fits the data and broken line shows data outside envelope

散较大. 如 $L=300\text{ km}$ 时, 由经验关系式计算可得主震震级为 $M6.8$. 但事实上, 图 10a 显示主震震级可从 $M5.0$ 直到 $M7.8$.

从分区情况来看, 除川滇地区具有一定程度的线性关系外, 其它 3 个地区关系离散(图 10c 和 d), 难以给出经验关系. 采用 31 个 $M\geq 5.5$ 样本拟合得到

川滇地区

$$\lg L(\text{km}) = 0.12M + 1.75 \pm 0.16 \quad (M_s \geq 5.5) \quad (4)$$

该式的相关系数为 0.49, 在 95% 的置信水平下相关系数临界值为 0.35, 显然川滇地区条带长轴尺度与主震震级之间存在相关关系.

同样观察到, 随着主震震级的增加, 中国大陆和川滇地区条带长度增加较为明显, 主要表现在下包络线斜率增大(图 10a 和 b 的虚线). 这意味着如果要预测 $M\geq 7.0$ 地震, 其地震条带一定比较长, 至少应在 200 km 以上, 即大尺度的条带是 $M\geq 7.0$ 地震发生的必要条件.

由上述中国大陆及各分区的条带持续时间及条带长轴尺度与主震震级之间的统计关系可看出, 华北地区、新疆地区、青藏高原西北缘和华东南地区很难拟合出条带持续时间、条带长轴尺度与主震震级间的经验统计关系式. 而中国大陆、川滇地区尽管可以拟合出条带持续时间、条带长轴尺度与主震震级间的经验统计关系式, 但总体上 $M<5.5$ 以下地震基本不存在线性关系, 而 $M\geq 5.5$ 地震的线性关系式的相关性亦较差, 离散较大.

3.5 组成条带的起始震级与主震震级的关系

图 11 统计了中国大陆条带起始震级(M_0)与主震震级(M)的关系. 由图中虚线可见, 随主震震级增大条带的起始震级有明显增大的现象, 但上限震级的范围较宽. 一般而言, 组成 5 级地震条带的起始震级在 $M2.0$ 以上, 平均为 $M2.5$ 左右; 6 级地震条带的起始震级在 $M2.5$ 以上, 平均为 $M3.0$ 左右; 7 级以上地震条带起始震级在 $M3.0$ 以上, 平均为 $M4.0$ 左右.

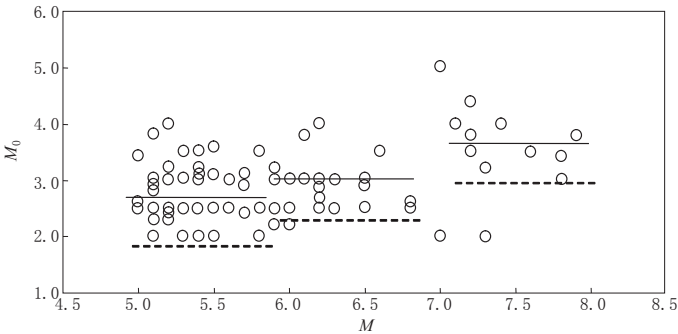


图 11 中国大陆组成条带的起始震级 M_0 与主震震级 M 的统计关系
实线为平均线, 虚线为震级段的下包络线

Fig. 11 Magnitude threshold M_0 of belt earthquakes versus mainshock magnitude M for China mainland earthquakes.
Solid line fits the data and broken line shows data lower envelope

3.6 条带与主震位置关系

一般来讲条带形成对其后发生的主震有一定的地点指示意义, 但条带的尺度范围可能较主震的震源体和主震的破裂长度大数十倍. 而主震相对条带的位置多种多样, 因此需

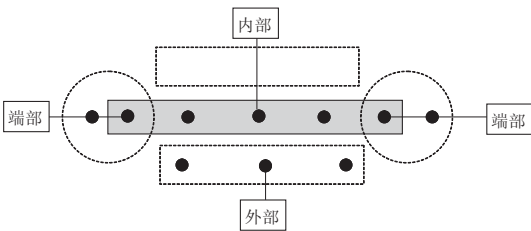


图 12 地震条带与主震相对位置示意图

Fig. 12 Relative location of mainshock with respect to pre-shock belt

进行普遍性统计. 首先对主震相对条带的位置进行大致划分(图 12), 即“内部”指主震位于圈定条带的矩形线以内; “外部”指主震位于圈定条带的矩形线以外及附近; “端部”指主震位于圈定条带的矩形线端内或外. “交汇”指主震前出现两个以上的交汇条带, 主震位于条带的交汇部位或附近.

据以上划分标准, 表 2 统计了中国大陆 96 个地震条带与主震的相对位置. 中国大陆主震位于条带端部的比例高于条带内部, 前者约占 43%, 后者约占 37%. 而主震位于条带外部和震前出现交汇条带较少, 约占 8%—10%.

表 2 中国大陆中强以上地震与条带相对位置统计

Table 2 Relative location of mainshock to pre-shock belt for Chinese mainland earthquakes

中国大陆	M5.0—5.9 条带数(百分比)	M6.0—6.9 条带数(百分比)	M≥7.0 条带数(百分比)	合计条带数 (百分比)
端部	29(45%)	10(47%)	4(40%)	43(45%)
内部	28(43%)	6(29%)	2(20%)	36(37%)
外部	4(6%)	4(19%)	0(0)	8(8%)
交汇	4(6%)	1(5%)	4(40%)	9(10%)
总个数	65	21	10	96

若对主震进行分档统计, 可见 M5.0—5.9 地震前出现的 65 个条带中, 主震发生在条带端部和条带内的比例较高, 分别达到 45% 和 43%; 主震发生在条带外部和震前出现交汇条带的比例很低, 仅占 6%. M6.0—6.9 地震前出现的 21 个条带中, 主震发生在端部的有 10 个, 占 47%; 发生在内部的有 6 个, 占 29%; 主震位于条带外部和出现交汇条带的比例很低. 对于 10 个 $M\geq 7.0$ 地震条带中, 主震发生在端部的有 4 个; 发生在内部的有 2 个. 值得一提的是, $M\geq 7.0$ 地震前出现交汇条带的比例较高, 出现在条带外部的可能性很小, 这为判定大震及其位置提供了一定的帮助.

从分区情况看(表 3), 华东南中强地震前没有出现交汇条带. 其它各区主震与条带的相对位置与中国大陆分布情况基本类似.

表 3 中国大陆中强地震与条带相对位置的分区统计

Table 3 Relative location of mainshock to pre-shock belt for sub-region earthquakes

分 区	主震位于条带的位置				条带总计
	端部数	内部数	外部数	交汇数	
华北地区	5	4	1	1	12
华东南地区	3	4	0	0	8
川滇地区	29	20	4	5	49
青藏高原西北缘	6	3	1	2	12
新疆地区	7	5	2	1	15
中国大陆	43	36	8	9	96

4 讨论与结论

依据对条带图像扫描的定性要求,对中国大陆 1973 年以来有相对完整资料的 327 次 $M \geq 5.0$ 地震前的地震活动图像进行扫描分析,据此着重讨论了条带形成后发生的主震与条带持续时间,条带长轴尺度及条带起始震级等的统计关系.结果表明:

1) 96 次地震前存在条带异常图像,占全部地震的 29%,其中 5 级($M_{5.0}-5.9$)、6 级($M_{6.0}-6.9$)和 7 级($M \geq 7.0$)地震前出现条带占同档地震总数的比例分别为 25%(65/258),38%(21/55)和 71%(10/14),条带图像在 7 级地震前表现最为突出.地震条带出现最多的是川滇地区和华东南地区,最少的是新疆地区.

2) 分析条带持续时间与主震震级的统计关系表明,中国大陆的条带持续时间与主震震级在 $M \geq 6.5$ 时相关.除川滇地区有一定线性关系外,中国其它地区条带持续时间与主震震级关系离散.以往不分震级和地区采用条带持续时间进行主震震级的预报不甚合理.

地震条带持续时间与主震震级统计拟合关系为

中国大陆: $\lg t(\text{月}) = 0.30M - 1.03 \pm 0.38$ ($M \geq 6.5$),此式仅通过 90% 的置信水平检验.

中国大陆(刘蒲雄,陈章立,1989): $t(\text{月}) = 7.8M - 39$.

川滇地区: $\lg t(\text{月}) = 0.20M - 0.25 \pm 0.24$ ($M \geq 5.5$).

四川地区(韩渭宾,席敦礼,1985): $M = 1.84 \lg t(\text{月}) + 6.01 \pm 1.3$.

利用本文得到的中国大陆拟合关系与刘蒲雄和陈章立(1989)拟合公式在相同条带持续时间情况下,本文预测的震级要比刘蒲雄和陈章立(1989)的稍高.

比较本文得到的川滇地区拟合关系与韩渭宾和席敦礼(1985)拟合公式在相同震级条件下,本文预测的条带持续时间要比韩渭宾和席敦礼(1985)的稍长.

3) 川滇地区和中国大陆条带长度与主震震级存在线性关系,这与刘蒲雄和陈章立(1989)研究认为条带的长轴与主震震级无线性关系的结论是不同的.不过尽管可以给出线性关系,但由于相关性较差,如川滇地区条带长度在 250—400 km 时既可以对应 5 级地震又可以对应 6 级地震和 7 级地震,因而预报意义也不大.

地震条带长度与主震震级统计关系为

中国大陆: $\lg L(\text{km}) = 0.11M + 1.73 \pm 1.75$ ($M \geq 5.5$).

川滇地区: $\lg L(\text{km}) = 0.12M + 1.75 \pm 0.16$ ($M \geq 5.5$).

值得一提的是,中国大陆和川滇分区条带持续时间及条带长轴尺度与主震震级的统计关系中可给出数据分布的下包络线,而下包络线的意义在于依据这条线,可为大震预测的震级判定提供依据.

4) 组成条带的起始震级与主震震级间存在一定的正相关关系,但上限震级的范围较宽.一般而言,组成 5 级地震条带的起始震级在 $M_{2.5}$ 左右,6 级地震条带的起始震级在 $M_{3.0}$ 左右,7 级以上地震条带起始震级在 $M_{4.0}$ 左右.条带震级升高可能是发生更大地震的一个必要条件,这对于主震震级预测具有一定意义.

5) 在主震与条带相对位置关系中,主震位于条带端部的比例高于条带内部,前者约占 43%,后者约占 37%.而主震位于条带外部和震前出现交汇条带则较少.6 级地震发生在条带端部比例相对较高;7 级以上地震前出现交汇条带的比例较高,出现在条带外部的可

能性较小, 这为判定主震震级及其位置提供了一定的帮助。

由于存在着一震多条带现象, 为保持统计样本数量的一致性, 本文仅以每组条带中最小起始震级的条带做为统计对象, 对于一震多条带(包括静态和动态的条带)、交汇条带和背景性地震条带等复杂地震条带与中强地震的关系将另文分析。

参 考 文 献

- 陈棋福, 郑大林, 车时, 黄蔚北. 2008. 中国震例(2000—2002)[M]. 北京: 地震出版社: 1-570.
- 陈棋福, 郑大林, 刘桂萍. 2002a. 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. 2002b. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京: 地震出版社: 1-468.
- 陈章立, 刘蒲雄, 黄德瑜. 1981. 大震前区域地震活动特征[C]//国际地震预报讨论会论文选. 北京: 地震出版社: 197-205.
- 国家地震局科技监测司. 1990. 地震学分析预报方法程序指南[M]. 北京: 地震出版社: 12-14.
- 韩渭滨, 席敦礼. 1985. 四川 6 级以上地震前地震活动条带的特征[J]. 地震学报, 7(1): 1-16.
- 蒋长胜, 吴忠良. 2005. 由“重复地震”给出的中国地震台网的定位精度估计[J]. 中国地震, 21(2): 147-154.
- 李莹甄, 聂晓红, 王在华, 杨晓芳, 蒋靖详, 王琼. 2010. 2008 年新疆和静 5.3 级地震异常特征及短临跟踪回顾分析[J]. 西北地震学报, 32(4): 381-387.
- 林怀存, 吴延河, 周翠英, 刘希强, 郑建常. 2005. 印度洋 8.7 级地震及对未来地震趋势的讨论[J]. 国际地震动态, (1): 31-36.
- 刘蒲雄, 陈章立. 1989. 地震条带及其在地震预报中的作用[J]. 中国地震, 5(1): 23-32.
- 刘文龙, 徐永林. 2006. 关于空区条带和前震的地震波识别指标的探讨[J]. 东北地震研究, 22(2): 11-33.
- 陆远忠, 陈章立, 王碧泉. 1985. 地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社: 58-71.
- 陆远忠, 叶金铎, 蒋淳, 刘杰. 2007. 中国强震前兆地震活动图像机理的三维数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 50(2): 499-508.
- 梅世蓉, 薛艳, 宋治平. 2009. 汶川 8.0 级与昆仑山口西 8.1 级地震前地震活动异常特征与启示[J]. 地震, 29(1): 1-14.
- 薛艳, 宋治平. 2005. 印尼苏门答腊 9.0 级地震前地震活动图像异常特征研究[J]. 中国地震, 21(3): 311-319.
- 张肇诚, 罗兰格, 李海华, 陈立德, 李宣瑚. 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社: 1-222.
- 张肇诚, 罗兰格, 李海华, 陈立德, 李宣瑚. 1990a. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京: 地震出版社: 1-421.
- 张肇诚, 罗兰格, 李海华, 陈立德, 李宣瑚. 1990b. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京: 地震出版社: 1-294.
- 张肇诚, 郑大林, 车时. 2002. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京: 地震出版社: 1-429.
- 张肇诚, 郑大林, 徐京华. 1999. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京: 地震出版社: 1-394.
- 张肇诚, 郑大林, 徐京华. 2000. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京: 地震出版社: 1-453.
- 周传荣, 孙志昆. 1989. 地震的条带分布, 地震预报方法实用化研究文集: 地震学专辑[G]//北京: 学术书刊出版社: 100-110.
- 周仕勇. 1990. 新疆地震条带的定量分析[J]. 内陆地震, 4(1): 44-49.
- Shebalin P. 2006. Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains[J]. *Tectonophysics*, 424(3-4): 335-349.
- Wyss M, Klein F W, Johnston A C. 1981. Precursors to the Kalapana, $M=7.2$ earthquake[J]. *J Geophys Res*, 86(B5): 3881-3900.