

董丞妍, 罗明良, 昌小莉, 张斌, 舒成强. 2015. 汶川及芦山地震余震分布的空间尺度效应. 地震学报, 37(1): 113-124. doi:10.11939/jass.2015.01.010.

Dong C Y, Luo M L, Chang X L, Zhang B, Shu C Q. 2015. Spatial location behavior of aftershocks of Wenchuan $M_s 8.0$ and Lushan $M_s 7.0$ earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 37(1): 113-124. doi:10.11939/jass.2015.01.010.

汶川及芦山地震余震分布的空间尺度效应^{*}

董丞妍 罗明良^{*} 昌小莉 张斌 舒成强

(中国四川南充 637009 西华师范大学国土资源学院)

摘要 基于 GIS 点格局方法, 从余震点分布的不确定性以及烈度区与点空间距离格局的关系角度研究了汶川及芦山余震点格局。结果表明: 余震在较小尺度内接近随机分布且关联效应明显; 在较大尺度内余震聚集分布, 空间距离关联仍呈幂律关系, 无标度区间的上下限与不同烈度区的长短轴间存在关联。汶川、芦山余震形成东北—西南向矩形的热点、次热点分布区, 区域内最邻近指数为 0.99, 0.76; 映秀 XI 度、芦山 IX 度烈度区内最邻近指数分别为 1.02 和 0.95, 显示余震点在强烈度、高聚集区内趋向随机分布。余震点距离关联特征表明: 汶川余震在 13.5—20 km 和 30—43 km 区间, 芦山余震在 7—14.5 km 区间内关联程度显著; 汶川余震在 66—82 km, 225—236 km, 317—321.5 km 区间以及芦山余震在 15.5—22 km, 23—32.5 km, 33.5—43.5 km 区间仍呈幂律关系。该结果与汶川地震 XI—IX 度、芦山地震 IX—VII 度烈度分布区域的长短轴存在一定关联, 321.5 km 和 40 km 与两次地震主破裂面长度也较为吻合。对比核密度估计与地震烈度图可以看出: 带宽越小, 核密度面积与较高烈度区域的一致性越大; 随着带宽的扩大, 核密度面积与烈度区的差异也越大。

关键词 余震序列 空间分布 最邻近指数 空间关联维 汶川地震 芦山地震

doi:10.11939/jass.2015.01.010 中图分类号: P315.5 文献标志码: A

Spatial location behavior of aftershocks of Wenchuan $M_s 8.0$ and Lushan $M_s 7.0$ earthquakes

Dong Chengyan Luo Mingliang^{*} Chang Xiaoli Zhang Bin Shu Chengqiang

(Land and Resources School, China West Normal University, Sichuan Nanchong 637009, China)

Abstract: With the method of GIS, this paper analyzes the point pattern of aftershocks of Wenchuan and Lushan earthquakes, from the perspective about the uncertainty of aftershock distribution and the relationship between seismic intensity region and spatial distance pattern. The result shows that in a smaller scale, the aftershocks are approximately in the random distribution and correlation effect is obvious; while the aftershocks present aggregated distribution in larger scale, but the spatial correlation characteristics are still in power-law relationship, and the upper and lower limits of scale-free area are associated

* 基金项目 国家自然科学基金项目(41101348)、四川省科技厅应用基础研究规划项目(2010JY0089, 2012JY0121)及四川省教育厅自然科学重点项目(2009ZA120)共同资助。

收稿日期 2014-04-25 收到初稿, 2014-10-24 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: lolcan586@163.com

with the major and minor axes of the different intensity seismic region. Wenchuan and Lushan aftershocks form a hot and sub-hot spot regions, which is like a NE-SW rectangular, the nearest neighbor index for this two regions are 0.99 and 0.76. The nearest neighbor index of Yingxiu XI degree and Lushan IX degree was 1.02, 0.95, indicating that the aftershocks tend to distribute randomly in the region with strong intensity and high aggregation. The distance-associated features of the aftershocks indicate that, the aftershocks of Wenchuan earthquake in the intervals of 13.5—20 km, 30—43 km and the aftershocks of Lushan earthquake in the interval of 7—14.5 km are correlated significantly; the aftershocks of Wenchuan earthquake in the intervals of 66—82 km, 225—236 km and 317—321.5 km and the aftershocks of Lushan earthquake in the intervals of 15.5—22 km, 23—32.5 km and 33.5—43.5 km are also have power-law relation, which is coincident with the major and minor axes of Wenchuan earthquake XI-IX degree and Lushan earthquake IX-VII degree regions, also the 321.5 km and 40 km are consistent with the fracture plane of the two earthquakes. Comparison with the kernel density estimation and the seismic intensity map shows that the consistency between kernel density area and high intensity regions increases with the search radius decreasing; with the expansion of the search radius, the discrepancy between kernel density area and seismic intensity region is more greater.

Key words: aftershock sequence; spatial distribution; the nearest neighbor index; spatial correlation dimension; Wenchuan earthquake; Lushan earthquake

引言

2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震和2013年芦山 $M_s 7.0$ 地震释放出巨大的能量,引起地面强烈震动。大地震发生之后,震中和周边地区发生的诸多余震也造成大量的人员伤亡,对抗震救灾工作产生了很大影响,因此对余震发生区域和震级等的研究同样至关重要。

对汶川、芦山两次强震引发的余震,国内科研人员分别进行了深入的研究。在余震重定位方面,房立华等(2013)分析了芦山地震的主震和2464次余震序列。在动态破裂机制方面,陈运泰等(2013)研究了龙门山断裂带中、小地震精确定位、地震活动性及汶川、芦山地震的破裂过程等;张勇等(2008)反演了汶川地震的震源机制和动态破裂过程;赵翠萍等(2009, 2013)研究了汶川、芦山地震的破裂过程及其特征;张培震等(2009)对汶川地震的地表破裂、震源机制、余震定位、地震破裂过程等进行了综合研究;刘成利等(2013)利用远震体波数据反演了芦山地震的震源破裂过程。

国际上对于余震的研究存在两大定律,即大森(Omori)定律(Utsu *et al*, 1995)及Gutenberg-Richter定律(Gutenberg, Richter, 1944)。前者表明余震发生次数随时间衰减呈现幂律特征;而后者表明地震释放的能量也遵循幂律特征(Davidsen, Paczuski, 2005; Zhang *et al*, 2012)。基于这两大定律,Hamdache等(2013)分析了西班牙东南部和南部余震序列的时空特征。Shcherbakov等(2013)分析了1973年至今主要发生在苏门答腊岛、智利、日本的大型俯冲地震的余震序列统计特征。针对空间自相关性,Hirata和Imoto(1991)从多重分形的角度,运用局部莫兰(Moran's *I*)指数分析了关东地区微地震的空间分

布。Kagan(2007)通过回顾震中与震源分维的计算方法,重点分析了地震定位误差、边界效应、深度不均匀性和时间相依性所带来的误差,还特别讨论了地震的空间关联度,结果表明空间关联度不受误差、不均匀性和数据处理误差的影响。Robertson 等(1995)通过计算分形维度对加利福尼亚中部和南部进行地震震源定位来阐明其三维断层结构。Davidson 和 Paczuski(2005)通过分析加利福尼亚南部连续地震震中间的距离,得到地震序列的空间距离与等待时间不相关的结论,这与余震带范围与主震震级一致的结论相矛盾。

上述研究表明,余震时间序列具有内在关联性,余震空间序列内在关联性的研究国外涉及较多,国内相关研究仅见燕云鹏等(2004)对台湾地区地震活动特征的研究及阎春恒和吴小平(2007)对云南省西北部地区地震活动的研究等。本文结合区域热点分析、最邻近指数及空间关联维,试图对余震分布空间距离是否存在尺度效应以及是否与地震烈度有关进行分析。这些问题对于阐明地震空间分布特征,进而探究其机理,以及进行防震减灾工作等方面具有参考意义。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

汶川地震与芦山地震均发生在四川省境内,且都在龙门山断裂带上,但具体位置稍有不同。汶川县位于四川盆地西北部边缘,东邻彭州市、都江堰市,南靠崇州市、大邑县,西接宝兴、小金县,西北和东北分别与理县、茂县相连,其范围跨东经 $102^{\circ}51' - 103^{\circ}44'$ 、北纬 $30^{\circ}45' - 31^{\circ}43'$ 。芦山县位于四川盆地西缘,属盆周山区县,北与汶川相连,东北与崇州及大邑相连,东南与邛崃相连,南与雨城区相连,西南与天全相连,西北与宝兴相连,其范围跨东经 $102^{\circ}52' - 103^{\circ}11'$ 、北纬 $30^{\circ}01' - 30^{\circ}49'$ 。晚第四纪以来活动的龙门山断裂带由 3 条具有发生强烈地震能力的主干断裂组成(总宽度 30—50 km),由西向东依次为:汶川—茂县断裂(后山断裂),大体上沿汶川—茂县的高深峡谷延伸;映秀—北川断裂(中央断裂),沿映秀—北川—平通—南坝展布,连续性较好;灌县—江油断裂(前山断裂),沿龙门山与成都平原交界处分布(张勇等, 2008; 张培震等, 2009; 陈运泰等, 2013)。汶川地震就发生在中央断裂,即映秀—北川断裂上,震中位置更靠近映秀;而芦山地震震中位于龙门山前山断裂西南段(张广伟, 雷建设, 2013)。

1.2 实验区数据

本文研究数据引自国家地震科学数据分享中心(中国地震台网中心, 2013)。汶川地震后,截至 2009 年 10 月 8 日零时,共记录到 $M_s 3.0$ 以上余震 1005 次,其中 $M_s 3.0 - 3.9$ 余震 649 次, $M_s 4.0 - 4.9$ 余震 318 次, $M_s 5.0 - 5.9$ 余震 31 次, $M_s 6.0 - 6.9$ 余震 7 次。芦山地震后,截至 2013 年 5 月 21 日零时,共记录到余震 4249 次, $M_s 3.0$ 以上余震 333 次,其中 $M_s 3.0 - 3.9$ 余震 276 次, $M_s 4.0 - 4.9$ 余震 53 次, $M_s 5.0 - 5.9$ 余震 4 次。

2 研究方法

2.1 Getis-OrdGi^{*} 指数方法

Getis-OrdGi^{*} 指数方法(Getis, Ord, 1992)通过分析子区域中的信息,探索区域信息变化,判断区域内部空间的异质性,识别不同空间区域的高值簇与低值簇,即热点区与冷点区的空间分布。该方法能很好地反映某一区域与临近区域单元属性值的关联程度。其计

算公式为(杨宇等, 2012)

$$G_i^* = \frac{\left(\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j\right)}{\sum_{j=1}^n X_j}. \quad (1)$$

为便于解释和比较, 对式(1)进行标准化处理后得到

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}}, \quad (2)$$

式中: $E(G_i^*)$ 和 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的数学期望和变异数; W_{ij} 为空间权重, 如果 $Z(G_i^*)$ 为正值且显著, 表明位置 i 周围的值相对较高(高于均值), 属于高值空间集聚(热点区), 反之, 表明位置 i 周围的值相对较低(低于均值), 属于低值空间集聚(冷点区)(杨宇等, 2012).

2.2 最邻近指数方法

最邻近指数反映各个点的离散程度, 其实质是以随机分布的标准去衡量实际的点状分布状态(角媛梅等, 2003; Zaliapin, Ben-Zion, 2013). 最邻近指数 R 可定义为

$$R = \bar{D}_a \times 2 \sqrt{\frac{N}{A}}, \quad (3)$$

式中, \bar{D}_a 为各点与其最邻近点之间距离的平均值, N 为总点数, A 为给定区域的面积. 当 $R < 1$ 时, 分布点趋于聚集分布; 当 $R = 1$ 时, 分布点随机分布; 当 $R > 1$ 时, 分布点趋于均匀分布(谢志华, 吴必虎, 2008).

2.3 空间关联方法

地震活动空间关联维数的计算方法(Hirata, Imoto, 1991; 燕云鹏等, 2004)如下:

选定一块计算区域, 将每个地震看作点源, 每两个地震为 1 对, 则其关联维积分为

$$C(r) = \frac{2N_r}{N(N-1)} \quad L < r, \quad (4)$$

式中, L 为某两对地震之间的距离, r 为所选取的用来衡量地震间距的标尺, N_r 为距离 R 小于 r 的地震对数, N 为所选用地震的总对数. r 的选取是一个关键. 若 r 选得太大, 则每对地震的距离都不会超过它, 反映不了地震的分布实质; 若 r 选得太小, 则噪声在任何一维都起作用(燕云鹏等, 2004).

对于选定的一系列 r 值, 绘制出双对数曲线 $\lg[C(r)] - \lg r$, 在曲线上找出近似直线的那一段, 用最小二乘法进行拟合(胡平等, 1993), 即

$$K = \frac{\lg[C(r)]}{\lg r}. \quad (5)$$

在由观测数据序列计算各种维数的实际算法中, “无标度区”的确定是最为关键的环节. 汪秉宏等(1997)给出了一个寻找无标度区的基本依据: 其应该是 $\lg[C(r)] - \lg r$ 曲线的线性段, 其中对应于不同 r 值的点数至少应大于 10, 还应包括曲线中尽可能多的点数; 同时, 这些点应具有足够高的拟合相关系数(如大于 0.98), 而且此线性段所受到的边界效应影响必须足够小.

2.4 核密度估计法

核密度估计法(kernel density estimation, 简称为 KDE)由 Rosenblatt (1956) 提出, 认为地理事件可以发生在空间的任何位置上, 但是在不同位置上的概率不一样(程乾, 凌素

培, 2013). 根据概率理论, 核密度估计定义为: 设点集 X_1, X_2, \dots, X_n 为当作从分布密度函数为 f 的总体中抽取的样本, 估计 f 在某点 x 处的 $f(x)$. 通常用 Rosenblatt-Parzen 核进行估计(程乾, 凌素培, 2013), 即

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-X_i}{h}\right), \quad (6)$$

式中, $k(\cdot)$ 称为核函数, $h > 0$ 为带宽, $x-X_i$ 表示估值点 x 到事件 X_i 处的距离. 其中, 若 h 值过大, 则空间上估计点密度的变化较为光滑, 但会掩盖密度的结构; 若 h 值过小, 则估计点密度的变化会出现震荡现象, 而导致无意义的起伏(吕志强等, 2014).

3 结果分析

3.1 余震空间热点区划分

首先根据下载数据(包含经纬度)将汶川、芦山余震点导入 ArcGIS 生成点状空间数据, 将经纬度坐标系统投影为千米网格坐标系统, 创建其空间剖分的泰森多边形(Voronoi)图并转换为矢量形式的多边形数据; 然后依据震级在每个点出现次数的总和, 计算 Getis-OrdGi* 指数, 利用 ArcGIS 软件将其空间化; 最后将其划分为热点区域、次热点区域、过渡区域、次冷点区域和冷点区域, 生成汶川和芦山余震的点空间格局热点图(图 1).

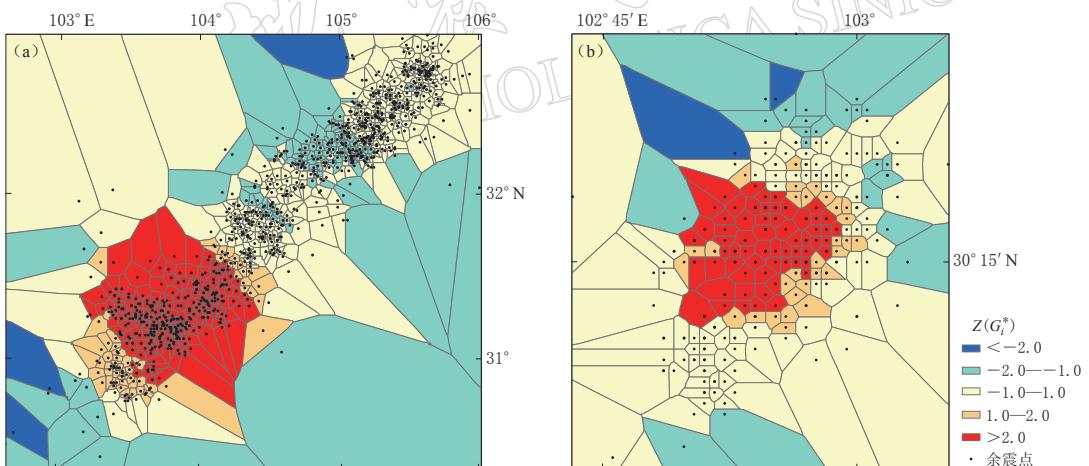


图 1 汶川地震(a)与芦山地震(b)的余震点分布热点图

Fig. 1 The hot spot distribution of aftershocks

由图 1a 可知, 汶川余震的热点区域、次热点区域分布在都江堰、彭州及什邡、绵竹、安县、茂县、汶川等县市, 都具有余震频度高、震级高的特点. 综合热点区域、次热点区域及过渡区域, 总体上形成 NE-SW 走向的矩形区域, 长宽大致为 350 km 和 130 km, 约 94% 的余震发生在这一区域. 次冷点区域和冷点区域则呈辐射状在过渡区四周展开.

由图 1b 可知, 芦山余震的热点、次热点区域分布在芦山、宝兴、天全等 3 县交界处, 震中所在地芦山县占较大区域. 综合热点、次热点区域及过渡区域, 总体上与汶川地震类似, 表现为 NE-SW 走向的矩形, 长宽约为 32 km 和 24 km, 约 86% 的余震发生在这一区域. 次冷点和冷点区域同样呈辐射状在过渡区四周展开. 与汶川地震相比, 芦山地震断裂带较短, 余震区域较小.

3.2 最邻近指数分析

在定性研究余震分布热点区域的基础上,首先对热点及次热点区域内点格局特征进行分析,选取热点和次热点区域内余震点计算最邻近指数,汶川余震为0.99,近似随机分布;而芦山余震为0.76,稍微偏离随机分布,趋向于聚集分布。然后对汶川地震的XI度、芦山地震的IX度区域内的点格局进行对比分析,汶川地震取映秀和北川XI度烈度区内余震点,最邻近指数分别为1.02和1.17,偏离均匀分布,趋向随机分布;芦山地震取IX度烈度区内余震点,最邻近指数为0.95,近似随机分布。最后选取汶川、芦山地震全部余震点计算最邻近指数得出:汶川余震为0.71,偏离随机分布;芦山余震为0.72,同样偏离随机分布,呈一定聚集趋势。

综上,热点区域与高烈度区内余震点格局有相似性特征,但空间上二者并不重合。通过不同空间尺度内余震点的最邻近指数分析可知,随着尺度的缩小,余震点呈随机分布,而随着尺度的扩大,余震点呈聚集趋势。

3.3 不同空间尺度关联特征分析

为了进一步研究余震空间分布的点间距离特征,本文计算了余震的点间距离,并基于指定距离 r (单位:m),统计了点间距离小于 r 的所有点对,得到 $C(r)$;经过 $\lg[C(r)]$ - $\lg r$ 双对数转换,分别得到汶川余震和芦山余震点空间关联维分析曲线(图2,3)。其中,参考汪秉宏等(1997)提出的寻找无标度区的基本依据, r 采用等间距递增方法,增量为500 m,汶川地震取值范围为1—324 km,芦山地震取值范围为1—46.5 km。从图2和图3可以看

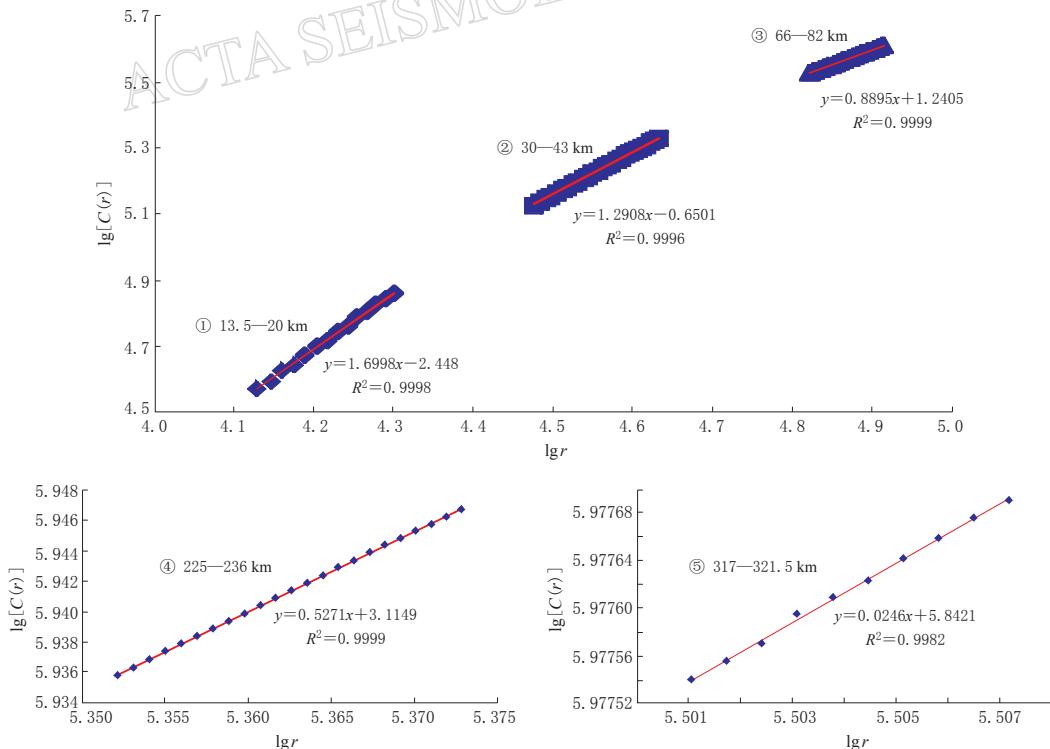


图2 汶川余震点空间关联维分析

Fig. 2 Spatial correlation analysis of aftershocks of Wenchuan earthquake

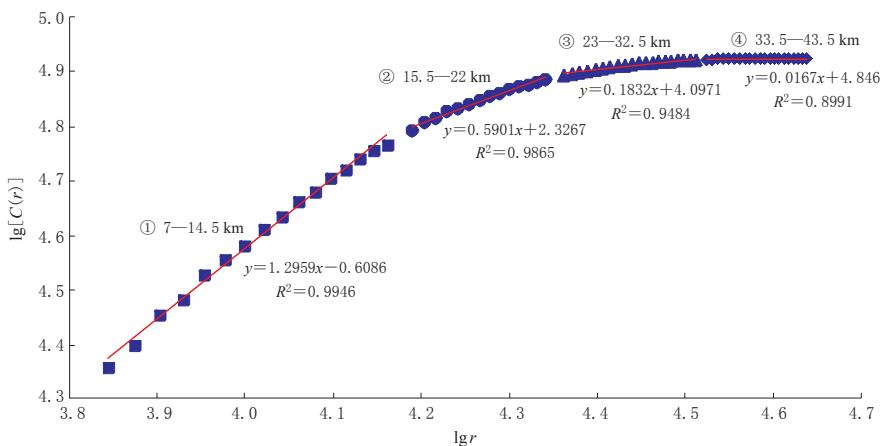


图 3 芦山余震点空间关联维分析

Fig. 3 Spatial correlation analysis of aftershocks of Lushan earthquake

出,汶川余震点在 13.5—20 km、30—43 km、66—82 km、225—236 km、317—321.5 km 等 5 个区间内,芦山余震点在 7—14.5 km、15.5—22 km、23—32.5 km、33.5—43.5 km 等 4 个区间内, $\lg[C(r)]-\lg r$ 线性关系良好,拟合直线斜率不断减小。

燕云鹏等(2004)研究表明,可用关联维数来定量描述地震在空间分布上的从集程度。如果地震分布相对均匀,则从集程度较低,关联维数就相对较大;反之则地震相对从集,均匀程度较差,关联维数较小。具体地讲,汶川地震存在一个从集性较低的分布区域,其间余震分布相对均匀,即第一、二区间,第三、四、五区间分布均匀性依次降低,从集性不断增强;芦山地震从集性较低的分布区域为第一区间,第二、三、四区间分布均匀性依次降低,从集性不断增强。这表明,观测尺度不断增大之后,余震从集性特征不断增强。综合最邻近指数和空间关联度的分析结果显示:在较小尺度内,地震余震点接近随机分布且关联效应明显;在较大尺度内,呈聚集分布,但空间关联特征仍呈幂律关系。时培建等(2009)研究结果表明,在单纯的空间点格局分析中,余震序列在 60 km 范围内余震聚集性明显加强;而在 60—100 km 的空间尺度上,余震聚集不再明显增强,而是稍有下降,但聚集性仍然明显。

中国地震局(2008)编制并发布的“汶川 8.0 级地震烈度分布图”(图 4a)中,地震烈度 XI 度区为以汶川县映秀镇和北川县县城为两个中心呈长条状分布,其中映秀 XI 度区长轴约 66 km,短轴约 20 km,北川 XI 度区长轴约 82 km,短轴约 15 km; X 度区长轴约 224 km,短轴约 28 km; IX 度区长轴约 318 km,短轴约 45 km。关联维分析结果得到的 13.5、20、30、43 km,和 66、82、225、317 km 分别与北川和映秀 XI、X、IX 度区的短轴及长轴较为接近。

中国地震局(2013a)编制并发布的“四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图”(图 4b)中,地震烈度 IX、VIII、VII 度区的长、短半轴分别为 11.5、5.5 km,29、17.5 km 和 56、33 km。关联维分析结果得到的 11、19、28 km 分别与 IX 度区的长轴、VIII 及 VII 度区的短轴较为接近。考虑到参与计算的余震点集没有根据震级进行分组,短半轴为 5.5 km 没有得以体现,应该能够理解。

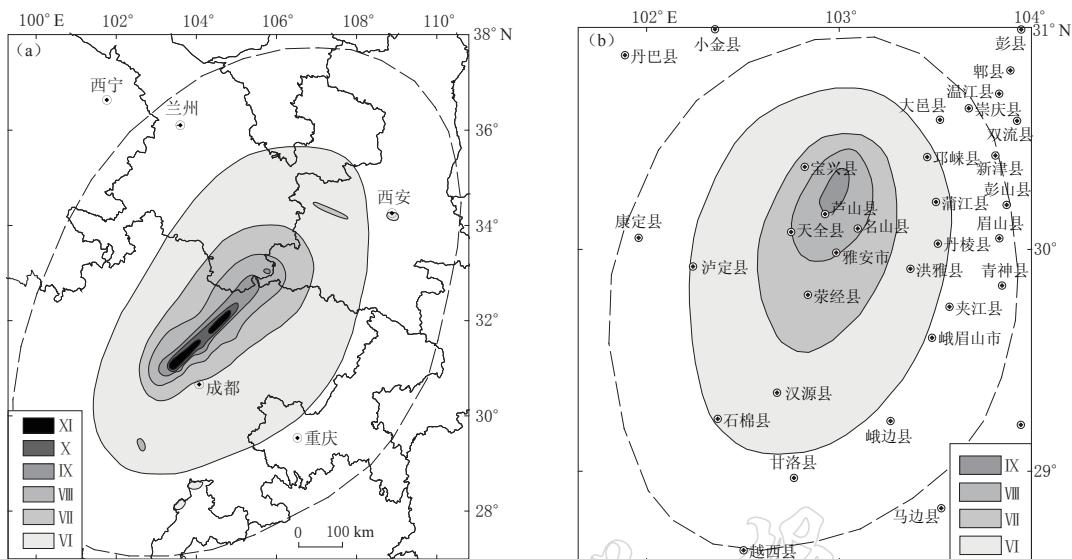


图 4 汶川 $M_s 8.0$ 地震(a)与芦山 $M_s 7.0$ 地震(b)的烈度分布图

Fig. 4 Distribution of seismic intensities of Wenchuan $M_s 8.0$ (a) and Lushan $M_s 7.0$ earthquakes

张勇等(2008)和赵翠萍等(2009)对汶川地震破裂过程的反演结果表明,由起始破裂点(映秀镇)开始,在该点北东方向20—80 km的汶川—映秀一带下方形成了都江堰—绵竹大滑动量区域,沿断层走向长达180 km;在距该点北东方向140—260 km的北川一带下方的北川—青川形成第二个大滑动量区域,一直延伸至平武境内下方,沿断层走向方向长达60 km。张培震等(2009)及赵翠萍等(2013)综合震前GPS观测结果、震后地震地质调查结果以及震源破裂机制等研究也表明,汶川地震从映秀到北川沿龙门山中央断裂带产生长约330 km的破裂面,地表主破裂带长约240 km,龙门山前的江油—灌县断裂的破裂长度也达到72 km左右。时培建等(2009)研究结果认为汶川地震余震空间尺度的范围约为350 km。本文分析的关联维区间与上述断层破裂长度较为吻合。

对于芦山地震,据中国地震局(2013b)初步分析,芦山地震断层破裂长度约为35—40 km;刘成利等(2013)及张广伟和雷建设(2013)的研究证实,芦山地震破裂面南北向展布达40 km左右,断层破裂主要集中在起震点到两侧28 km的范围内,沿断层倾角方向的范围主要在12—30 km左右。本文关联维分析的第四区间36—40 km与上述断层破裂长度较为吻合。

3.4 地震影响范围的核密度模拟

在核密度估计过程中,带宽的确定一般经多次实验后人为指定(程乾,凌素培,2013),缺乏必要的定量探讨。本文从空间关联角度,计算了汶川、芦山余震的关联维无标度区间,同时为了与中国地震局(2008,2013a)发布的地震烈度分布图形形成对比,又在无标度区间内,根据其空间展布范围,选取了不同的带宽。

本文在空间关联维分析的基础上,选取无标度区间的中值作为核密度估计的带宽,余震震级为核密度估计对象,对地震影响范围进行了核密度估计。汶川地震选取16,36,74,230和320 km为带宽,芦山地震选取11,19,28和39 km为带宽(图5)。

为了表达地震影响程度的空间差异性,本文将最小带宽的结果分为两级,其余带宽结

果分为一级,如图5所示。可以看出,余震点核密度值最大区间位于中心地带,随着核密度值不断减小,相应面积不断增大。对比图5a与图4a可以看出,汶川余震带宽16 km大致对应XI度、X度烈度区,36 km大致对应IX度烈度区,74 km大致对应VIII度烈度区。230 km与VII度烈度区相比,230 km核面积范围较大,汶川—青川一带左侧、左下及右下方向面积较大;320 km与VI度烈度区相比,320 km核面积范围较小,泸定—太白一带左下、右下及右侧方向面积较小。对比图5b与图4b可以看出,芦山余震带宽11 km的最中心圈层大致对应IX度烈度区;11 km的其它两层以及19 km和28 km大致对应VIII度烈度区,但区域右侧小于VIII度烈度区;38.5 km与VII度烈度区相比差异较大。综上可以看出,核密度带宽越小,其面积与较高烈度区域的一致性越大;带宽越大,其范围与烈度区的差异越大。这种差异总体上与数据来源于 M_s 3.0以上余震以及缺乏物理过程和机制分析有关。

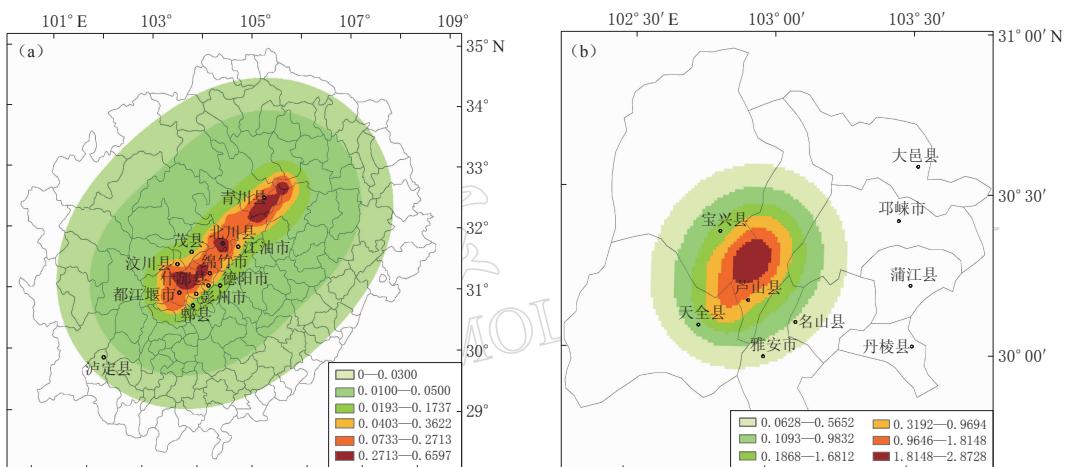


图5 汶川地震(a)与芦山地震(b)的余震分布核密度估计图

Fig. 5 Kernel density of aftershocks of Wenchuan (a) and Lushan (b) earthquakes

4 讨论与结论

本文依据汶川、芦山地震 M_s 3.0以上余震统计数据,运用ArcGIS等软件分析了汶川、芦山余震的空间分布格局。汶川余震中热点区域和次热点区域分布在都江堰市、彭州市、什邡县、绵竹县、茂县、青川、江油、汶川县、郫县、德阳市等县市,该分布与王艳茹等(2009)分析的汶川地震人员伤亡时空分布特点部分吻合。芦山余震中热点区域和次热点区域主要分布在芦山、宝兴、天全等3县交界处,震中所在的芦山县占较大区域。

汶川地震映秀和北川XI度烈度区内余震的最邻近指数分别为1.02和1.17,趋向随机分布;芦山地震IX度烈度区内余震的最邻近指数为0.95,近似随机分布。分析汶川、芦山热点和次热点区域内余震的最邻近指数,汶川地震为0.99,近似随机分布;芦山地震为0.76,偏离随机分布,趋向聚集分布。若考虑全部余震,则汶川地震的最邻近指数为0.71,芦山地震的为0.72,呈现一定聚集趋势。这说明最邻近指数随着空间尺度的变化而变化,空间尺度缩小,余震点逐渐呈随机分布;空间尺度扩大,余震点逐渐呈聚集趋势。

欧式距离关联维分析结果表明:汶川余震在13.5—20 km、30—43 km两个区间内关联程度显著,在66—82 km、225—236 km、317—321.5 km区间内也存在关联特征;芦山

余震在 7—14.5 km 区间内关联程度显著，在 15.5—22 km、23—32.5 km、33.5—43.5 km 区间内也存在关联特征。根据欧氏距离关联维分析结果，确定不同的核密度带宽。余震核密度值极大值位于中心地带，随着核密度值不断减小，相应面积不断增大。对比地震烈度图，核密度带宽越小，其面积与较高烈度区域的一致性越大；带宽越大，其范围与烈度区的差异越大。

综合分析结果表明：余震在较小尺度内，接近随机分布且关联效应明显，余震在较大尺度内呈现聚集分布，但空间关联特征仍呈幂律关系；不同的幂律关系存在的空间距离尺度，暗示了地震烈度的不同分区；最大无标度区间与前人研究的断层破裂长度有对应性。

本文从新的视角对余震空间分布特征进行了探索，突出了余震点位分布的不确定性以及地震确定性的烈度差异之间的关系，同时突出了从定性和定量两个方面对余震空间分布格局的探讨，对借助 GIS 分析和判断余震特征、模拟影响区域及灾害评估具有参考意义。

本文得到的结果仍存在以下不足：余震坐标侧重从经度、纬度两个坐标入手，对余震震源深度未作讨论；缺少对余震时间序列的分析；未涉及不同的余震截止震级等因素对关联维分析存在的影响；汶川、芦山地震各向异性特征明显，在空间关联维分析中未予以考虑；由于分析数据仅为汶川、芦山 $M_{S}3.0$ 以上余震，其结果可能存在一定偏差。后续研究应当综合上述不足，加以重视和改进。

诚挚感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

参 考 文 献

- 陈运泰, 杨智娟, 张勇, 刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1064–1072.
- Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, Liu C. 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake[J]. *Scientia Sinica Terrae*, **43**(6): 1064–1072 (in Chinese).
- 程乾, 凌素培. 2013. 中国非物质文化遗产的空间分布特征及影响因素分析[J]. 地理科学, **33**(10): 1166–1172.
- Cheng Q, Ling S P. 2013. Geographical distribution and affecting factors of the intangible cultural heritage in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, **33**(10): 1166–1172 (in Chinese).
- 房立华, 吴建平, 王未来, 吕作勇, 王长在, 杨婷, 蔡妍. 2013. 四川芦山 $M_{S}7.0$ 级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, **58**(20): 1901–1909.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, Lü Z Y, Wang C Z, Yang T, Cai Y. 2013. Relocation of mainshock and aftershock sequences of $M_{S}7.0$ Sichuan Lushan earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(28/29): 3451–3459.
- 胡平, 李卫, 杨培才. 1993. 运用重构高维相空间的方法对地震过程及其预报问题的研究[J]. 地震学报, **15**(4): 471–476.
- Hu P, Li W, Yang P C. 1993. Research on the process and prediction of earthquake by using the high dimensional phase space reconstruction method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(4): 471–476 (in Chinese).
- 角媛梅, 肖笃宁, 马明国. 2003. 绿洲景观中居民地空间分布特征及其影响因子分析[J]. 生态学报, **23**(10): 2092–2100.
- Jiao Y M, Xiao D N, Ma M G. 2003. Spatial pattern in residential area and influencing factors in Oasis landscape[J]. *Acta Ecologica Sinica*, **23**(10): 2092–2100 (in Chinese).
- 刘成利, 郑勇, 葛粲, 熊熊, 许厚泽. 2013. 2013 年芦山 7.0 级地震的动态破裂过程[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1020–1026.
- Liu C L, Zheng Y, Ge C, Xiong X, Hsu H T. 2013. Rupture process of the $M_{S}7.0$ Lushan earthquake, 2013[J]. *Science China Earth Sciences*, **56**(7): 1187–1192.

- 吕志强,代富强,周启刚. 2014.“交通廊道蔓延”视角下山地城市典型样带空间格局梯度分析[J]. 生态学报, **34**(9): 2442–2449.
- Lü Z Q, Dai F Q, Zhou Q G. 2014. Spatial pattern gradient analysis of a transect in a hilly urban area in China from the perspective of transportation corridor sprawl[J]. *Acta Ecologica Sinica*, **34**(9): 2442–2449 (in Chinese).
- 时培建,刘杰,杨振. 2009. 汶川地震的时空点格局分析[J]. 地震学报, **31**(5): 506–515.
- Shi P J, Liu J, Yang Z. 2009. Spatio-temporal clustering of aftershocks of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(5): 506–515 (in Chinese).
- 汪秉宏,李东升,张军. 1997. 地震的多重分形统计特征研究[J]. 地球科学进展, **12**(6): 535–540.
- Wang B H, Li D S, Zhang J. 1997. Research on earthquake multi-fractal statistical characteristics[J]. *Advances in Earth Science*, **12**(6): 535–540 (in Chinese).
- 王艳茹,王宝光,戴君武,冯学刚,黄腾浪,唐丽华. 2009.“5·12”汶川大地震人员伤亡的时空分布特点[J]. 自然灾害学报, **18**(6): 52–56.
- Wang Y R, Wang B G, Dai J W, Feng X G, Huang T L, Tang L H. 2009. Spatio-temporal distribution characteristics of casualties in great “5·12” Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, **18**(6): 52–56 (in Chinese).
- 谢志华,吴必虎. 2008. 中国资源型景区旅游空间结构研究[J]. 地理科学, **28**(6): 748–753.
- Xie Z H, Wu B H. 2008. Tourism spatial structure of resources-based attractions in China[J]. *Scientia Geophysica Sinica*, **28**(6): 748–753 (in Chinese).
- 阎春恒,吴小平. 2007. 云南西北部强震前地震活动空间关联维的降维过程[J]. 云南大学学报:自然科学版, **29**(3): 266–271.
- Yan C H, Wu X P. 2007. The reduction process of space correlation dimension of seismic activity before large earthquake in northwest of Yunnan[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences*, **29**(3): 266–271 (in Chinese).
- 燕云鹏,许建东,董瑞树. 2004. 台湾地区地震的空间关联维特征与构造环境研究[J]. 地震地质, **26**(1): 15–23.
- Yan Y P, Xu J D, Dong R S. 2004. Tectonic background and spatial correlation fractal dimension of strong earthquakes in Taiwan, China[J]. *Seismology and Geology*, **26**(1): 15–23 (in Chinese).
- 杨宇,刘毅,金凤君,董雯,李莉. 2012. 天山北坡城镇化进程中的水土资源效益及其时空分异[J]. 地理研究, **31**(7): 1185–1198.
- Yang Y, Liu Y, Jin F J, Dong W, Li L. 2012. Spatio-temporal variation of land and water resources benefit of north slope of Tianshan Mountains under the background of urbanization[J]. *Geographical Research*, **31**(7): 1185–1198 (in Chinese).
- 张勇,冯万鹏,许力生,周成虎,陈运泰. 2008. 2008年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学:D辑, **38**(10): 1186–1194.
- Zhang Y, Feng W P, Xu L S, Zhou C H, Chen Y T. 2009. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake[J]. *Science in China: Series D*, **52**(2): 145–154.
- 张广伟,雷建设. 2013. 四川芦山7.0级强震及其余震序列重定位[J]. 地球物理学报, **56**(5): 1764–1771.
- Zhang G W, Lei J S. 2013. Relocation of Lushan, Sichuan strong earthquake (M_S 7.0) and its aftershocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(5): 1764–1771 (in Chinese).
- 张培震,闻学泽,徐锡伟,甘卫军,王敏,沈正康,王庆良,黄媛,郑勇,李小军,张竹琪,马胜利,冉勇康,刘启元,丁志峰,吴建平. 2009. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报, **54**(7): 944–953.
- Zhang P Z, Wen X Z, Xu X W, Gan W J, Wang M, Shen Z K, Wang Q L, Huang Y, Zheng Y, Li X J, Zhang Z Q, Ma S L, Ran Y K, Liu Q Y, Ding Z F, Wu J P. 2009. Tectonic model of the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, **54**(7): 944–953 (in Chinese).
- 赵翠萍,陈章立,周连庆,李志雄,康英. 2009. 汶川Mw8.0级地震震源破裂过程研究:分段特征[J]. 科学通报, **54**(22): 3475–3482.
- Zhao C P, Chen Z L, Zhou L Q, Li Z X, Kang Y. 2009. Rupture process of the Wenchuan Mw8.0 earthquake of Sichuan, China: The segmentation feature[J]. *Chinese Science Bulletin*, **55**(3): 284–292.
- 赵翠萍,周连庆,陈章立. 2013. 2013年四川芦山 M_S 7.0级地震震源破裂过程及其构造意义[J]. 科学通报, **58**(20):

- 1894–1900.
- Zhao C P, Zhou L Q, Chen Z L. 2013. Source rupture process of Lushan $M_S 7.0$ earthquake, Sichuan, China and its tectonic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(28/29): 3444–3450.
- 中国地震局. 2008. 汶川 8.0 级地震烈度分布图[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/549/20120209143159843203157/index.html>.
- China Earthquake Administration. 2008. Seismic intensity distribution of the $M_S 8.0$ Wenchuan earthquake[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/549/20120209143159843203157/index.html> (in Chinese).
- 中国地震局. 2013a. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/549/20130503105353814752350/index.html>.
- China Earthquake Administration. 2013a. Seismic intensity distribution of the $M_S 7.0$ Lushan earthquake[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/549/20130503105353814752350/index.html> (in Chinese).
- 中国地震局. 2013b. 四川省芦山“4·20”7.0 级地震断层破裂长度约 40 km, 最大滑动量达 1.6 m[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100348/20130423205445173448143/index.html>.
- China Earthquake Administration. 2013b. Fault rupture length of the $M_S 7.0$ Lushan earthquake is about 40 km, and maximum slide is up to 1.6 m[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100348/20130423205445173448143/index.html> (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2013. 国家地震科学数据分享中心[EB/OL]. [2013-09-12]. <http://data.earthquake.cn/index.html>.
- China Earthquake Networks Center. 2013. China earthquake data center[EB/OL]. [2013-09-12]. <http://data.earthquake.cn/index.html> (in Chinese).
- Davidsen J, Paczuski M. 2005. Analysis of the spatial distribution between successive earthquakes[J]. *Phys Rev Lett*, **94**: 048501. doi:10.1103/PhysRevLett.94.048501.
- Getis A, Ord J K. 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. *Geographical Analysis*, **24**(3): 189–206.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **34**(4): 185–188.
- Hamdache M, Peláez J, Talbi A. 2013. Analysis of aftershock sequences in south and southeastern Spain[J]. *Phys Chem Earth*, **63**: 55–76.
- Hirata T, Imoto M. 1991. Multifractal analysis of spatial distribution of microearthquakes in the Kanto region[J]. *Geophys J Int*, **107**(1): 155–162.
- Kagan Y Y. 2007. Earthquake spatial distribution: The correlation dimension[J]. *Geophys J Int*, **168**(3): 1175–1194.
- Robertson M C, Sammis C G, Sahimi M, Martin A J. 1995. Fractal analysis of three-dimensional spatial distributions of earthquakes with a percolation interpretation[J]. *J Geophys Res*, **100**(B1): 609–620.
- Rosenblatt M. 1956. Remarks on some nonparametric estimates of a density function[J]. *Ann Math Stat*, **27**(3): 832–837.
- Shcherbakov R, Goda K, Ivanian A, Atkinson G M. 2013. Aftershock statistics of major subduction earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(6): 3222–3234.
- Utsu T, Ogata Y, Matsu'ura R S. 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity[J]. *J Phys Earth*, **43**(1): 1–33.
- Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2013. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability[J]. *J Geophys Res*, **118**(6): 2847–2864.
- Zhang B, Shi K, Liu C Q, Yao L K, Di B F, Ai N S. 2012. Scaling behavior of magnitude clusters in aftershock sequence: An example of the Wenchuan earthquake, China[J]. *Science China Earth Sciences*, **55**(3): 507–512.