

曲延军, 王海涛, 邬成栋, 冯建刚, 陈宇卫, 李莹甄, 王想. 2010. 中国大陆地震空区统计特征分析. 地震学报, 32(5): 544-556.

Qu Yanjun, Wang Haitao, Wu Chengdong, Feng Jiangang, Chen Yuwei, Li Yingzhen, Wang Xiang. 2010. Analysis on statistic characteristics of seismic gap in Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 32(5): 544-556.

## 中国大陆地震空区统计特征分析<sup>\*</sup>

曲延军<sup>\*</sup> 王海涛 邬成栋 冯建刚  
陈宇卫 李莹甄 王 想

(中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局)

**摘要** 对中国大陆具备相对完整资料的 367 次 5 级以上地震, 分 5 个工作片区进行统一性要求的地震空区图像扫描, 得到 194 次震前的空区图像. 其中震前有空区地震与研究地震的比例分别为: 华北片区 14:36; 华东南片区 21:24; 川滇片区 68:124; 青藏高原北部片区 36:82; 新疆片区 55:101. 震前出现空区图像比例最低的为华北地区, 最高的为华东南地区, 新疆与川滇地区基本相当. 在此基础上着重讨论了空区形成后发生的主震与空区形成持续时间、空区空间分布尺度及围空地震震级等的统计关系. 结果表明, 空区的持续时间、空间尺度与主震震级间存在一定的相关关系, 但其误差较大. 而围空的起始震级在 5 级主震前为  $M_L 2.5$  左右, 6 级主震前为  $M_L 3.5$  左右, 7 级以上主震前为  $M_L 4.0$  左右. 主震通常发生在空区的边缘及附近的外部地区. 5 级、6 级和 7 级地震前出现空区图像的比例分别为 45.8%、72.6% 和 100%, 一定程度上表明了震前空区图像是强震前的重要异常判据.

**关键词** 中国大陆 中强地震 空区图像 空区持续时间 空区尺度

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.05.004

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

## Analysis on statistic characteristics of seismic gap in Chinese mainland

Qu Yanjun<sup>\*</sup> Wang Haitao Wu Chengdong Feng Jiangang  
Chen Yuwei Li Yingzhen Wang Xiang

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** By searching seismicity gap patterns in 5 study regions with the same procedure, we obtained appearance of gap before 194 earthquakes from a relatively complete catalogue of 367  $M \geq 5.0$  earthquakes in Chinese mainland. The ratios of the earthquakes with gap over total studied earthquakes in different regions are 14:36 for northern China, 21:24 for southeastern China, 68:124 for Sichuan and Yunnan region, 36:82 for the northern Qingzang Plateau, and 55:101 for Xinjiang region, respectively. The region with lowest gap ratio before

<sup>\*</sup> 基金项目 国家“十一五”科技支撑计划项目子专题(2006BAC01B02-01-05)和地震行业科研专项(200708038)共同资助.

收稿日期 2009-08-10 收到初稿, 2010-03-12 决定采用修改稿.

✦ 通讯作者 e-mail: qyjnew@sina.com

studied earthquakes is the northern China, and that with highest ratio is the southeastern China, the ratios of Xinjiang region and Sichuan province are nearly equal. Based on the above, we discussed statistic relation between the mainshock occurrence after the gap formation and the lasting time of the gap, gap scale, and the earthquake magnitude forming gaps. The result shows that there exists certain correlation between the gap lasting time, gap scale and mainshock magnitude, but the error is large. The gap threshold magnitude for  $M_5$  mainshock is  $M_L 2.5$  or so, the threshold magnitude for  $M_6$  mainshock is  $M_L 3.5$  or so, and the threshold for  $M_7$  earthquake is about  $M_L 4.0$ , and the mainshocks are usually located on gap verge or outside. The gap ratio before  $M_5$ ,  $M_6$  and  $M_7$  earthquakes are 46%, 73% and 100%, respectively.

**Key words:** Chinese mainland; moderate and strong earthquake; gap pattern; gap lasting time; gap scale

## 引言

地震活动空区图像是地震预测研究中最常用的方法之一。20 世纪 60 年代, 费多托夫等提出了地震空区的概念, 但他们主要指大震震源的间隙区(张国民等, 2001)。1979 年 Mogi 将地震空区分为两类: 一类是地震带上大地震震源区分布的空段; 另一类是缺少中小地震的空区(Mogi, 1979)。早在 1960 年梅世蓉在研究中国的地震活动性时曾指出: 一切毁灭性地震都不发生在有感地震频度最高的地方; 1970 年她在研究华北强震活动时进一步提出了地震“空白区”的概念(梅世蓉, 1993)。陆远忠等(1982, 1983, 1985)研究强震前中小地震活动的演变过程时, 提出了“背景空区”和“孕震空区”的概念。在此后的“八五”攻关中, 王炜等(1989)实现了空区的计算机自动识别, 并利用空区内外频次比及应变释放等进一步辅助识别空区; 韩渭宾等(1989)也提出借助  $R-t$  图圈定空区的方法。同时他们还指出孕震空区的后期, 伴随地震活动的增强, 空区内有可能发生“逼近地震”或“显著地震”。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。

早在 1906 年, 日本学者今村明恒即利用空区的概念对 1923 年东京大震作过警告, 大竹政和利用空区在 1978 年墨西哥 7.8 级地震前一年作出了预测(陈运泰, 2007)。而基斯林格在 1985 年阿留申群岛 7.9 级地震前两年根据地震空区作过较好地预报。20 世纪 60—80 年代, 13 次 7.5 级以上强震发生在被划定空区的地方(陆远忠, 宋俊高, 1989)。1985 年美国学者作出了其后 10 年间美国加州的帕克菲尔德地震空区内将发生一次 6 级左右地震的预报(沉冗, 1986)。但直到 2004 年所预报的地震推迟了 11 年之后才发生。对于大震前是否存在地震空区的争论始终未停止过(Kagan, Jackson, 1995)。陈章立和薛峰(1984)指出空区与大震发生的关系存在很多不定性, 因此寻找伴有地震的空区特征是一个重要的问题。同时近年来对空区形成的机理也进行了一些三维数值模拟研究(陆远忠等, 2007), 认为空区形成与否与其孕震体受力的方向、角度及震型都有一定的关系。在《中国震例》系列总结研究中(张肇诚等, 1988, 1990a, b, 1999, 2000, 2002; 陈棋福等, 2002a, b, 2008)对 200 余次中强地震前地震活动相关空区异常演化图像进行了分析研究, 中强地震前震中附近出现地震活动减弱或“空白”图像已被许多震例证实(陈章立等, 1981; 魏光兴, 1981; 陆远忠, 宋俊高, 1989)。2008 年中国大陆发生了汶川 8.0 级地震, 震后总结发现汶川地震前

20 年左右和 5 年左右存在中强和中等以上地震活动的不均匀分布,并形成空区.而震前 5.5 年形成的空区长约 400 余公里(梅世蓉等, 2009; 薛艳等, 2009).

但由于不同区域背景地震活动水平不同,不同研究者的研究重点和角度有所差异,使得认定空区的标准也各有不同.本研究是在补充了新资料,并统一思路、方法后,选取中国大陆地区研究时段内资料相对完整的 367 次 5 级以上地震进行扫描分析,最后识别判定得到 194 次地震前的空区图像.震前出现空区演化图像的地震占研究地震总数的 53%,本文在此基础上着重研究不同区域、不同主震震级及空区参数的统计特征.

## 1 地震空区的扫描识别与判定

研究时段内中国大陆共发生 5 级以上地震 643 次(西藏地区监测能力达不到空区扫描条件未包括,东北深震未包括),删除余震同时震群取一次最大地震后则为 404 次.但这些地震分布地区在研究时段初期及个别边邻地区仍有监测能力达不到空区扫描条件的也进行了剔除.最后选取了中国大陆地区具备分析工作条件的 367 次 5 级以上地震,依下述标准对其进行空区识别扫描:

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,并随着主震震级增大,扫描范围也相应增大.同时根据各区域构造背景调整扫描区域的形状.

2) 确定围空地震起始震级.一般从主震所在区域可监控震级开始扫描,逐级上调震级,直至围空区现象消失.将开始出现空区时的震级定为围空起始震级  $M_0$ ,将空区消失前的震级定为围空最大震级  $M_1$ .

3) 确定围空起始时间.对同一围空震级,从主震时间开始逐月向前扫描,直到出现空区(若未出现空区,5 级地震最长追踪 5 年,6 级地震最长追踪 8 年,7 级地震最长追踪 15 年或直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,避开可能的“死空”.将围成空区的第一次地震发震时间作为空区的起始时间,空区形成后又在空区内发生的地震(打破空区的地震)其发震时间为空区的结束时间.若无打破地震,而在空区内或附近发生了中强地震,则以中强地震的发震时间为空区的结束时间(即空区持续至主震).自空区的起始时间起至空区的结束时间止为空区的持续时间( $T$ ).

4) 确定空区尺度.一般来讲,空区的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,一般情况下空区长轴大于定位精度的 2—3 倍,对于构造复杂部位可作适当调整.由此用圈定空区的椭圆半径( $R$ )来描述空区的尺度.

5) 围空地震次数.不同地区地震活动水平不同,围空的地震次数应大于本地区平均地震活动水平的 2—3 倍.

依据上述标准对中国大陆地区具备分析工作条件的 367 次 5 级以上地震进行扫描分析,最后得到 194 个地震前的空区图像.震前出现空区演化图像的地震占研究地震总数的 53%.这些空区的表现形式分为以下 4 类:① 伴随地震空区的形成,空区内部的地震活动明显减弱,而空区外围地震活动无明显变化;② 伴随地震空区的形成,空区内部的地震活动有所减弱,而空区外围地震活动明显增强;③ 伴随地震空区的形成,空区内部地震活动变化不大(此种情况须区分该区域历史上长时间未发生过地震的地区即“死空区”),但空区外围地震活动明显增强;④ 伴随地震空区的形成,空区内部地震活动明显减弱,同时空区外围地震活动也有所减弱.

以上 4 种类型，都是一个动态的过程，随着空区的发展，不同阶段可能会表现出不同的形态，其原因可能与构造活动及应力水平等多种因素有关，有待进一步研究，因此采用以下方法对这一过程进行跟踪：

1) 研究地震空区及其邻区地震活动随时间的变化，给出地震空区及其邻区地震应变释放加速或衰减、空区内外小震频度比呈现峰值或空区内外地震累计频度和应变释放明显变化。

2) 以主震震中为原点，将围空震级以上地震震中到原点的距离对时间作图( $R-t$ )，以追踪震中附近出现平静的时间(空区围空的开始时间)及其随时间空区的演化过程。

2 典型地震空区图像示例

图 1 给出了 1991 年新疆柯坪 6.5 级地震前 4 级地震围空图像，图 1a 为 1984—1991 年 6.5 级地震前的围空时段 4 级以上地震分布，椭圆实线的内圈为空区边缘，外圈为空区外围区域；图 1b 为 1977—1983 年无大震活动时段 4 级以上地震分布图，图中虚线为相对图 1a 中空区及外围区域的位置，可见围空时段较无大震活动时段的空区内的 4 级地震明显减少而外围则明显集中和增强。图 2a, b 为该空区相应的内外频次比曲线、应变能曲线和  $R-t$  图。可见空区形成的开始时间是 1984 年初，外围地震活动频次明显高于内部，应变能曲线逐渐升高， $R-t$  图显示空区内 1984 年之前有多次 4 级以上地震活动，1984 年开始逐渐只在外围活动，空白区的半径逐渐达 80 km，1991 年 2 月 25 日 6.5 级主震发生在空区的边缘。

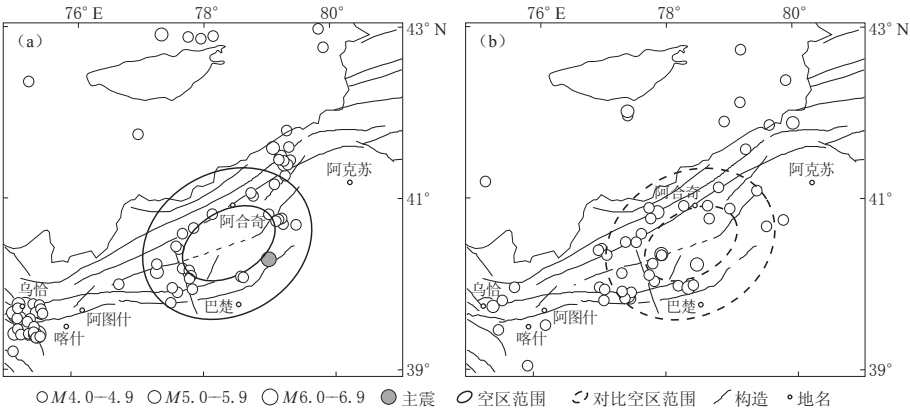


图 1 1991 年 2 月 25 日新疆柯坪 6.5 级地震前空区图像及围空前等长时段地震分布图像  
(a) 围空时段地震分布及空区位置；(b) 围空前等长时段的地震分布

Fig. 1 Seismic gaps and epicentral distribution for the same time interval before gap formation of the  $M_s6.5$  Keping earthquake of Feb. 25, 1991  
(a) epicentral distribution during the gap formation and the gap position; (b) epicentral distribution in the same time interval before the gap formation

3 中国大陆及分区地震活动空区的统计特征

3.1 空区概况

在考虑不同地区不同时间段地震监测及控震能力的基础上，选取了 1970 年以来中国

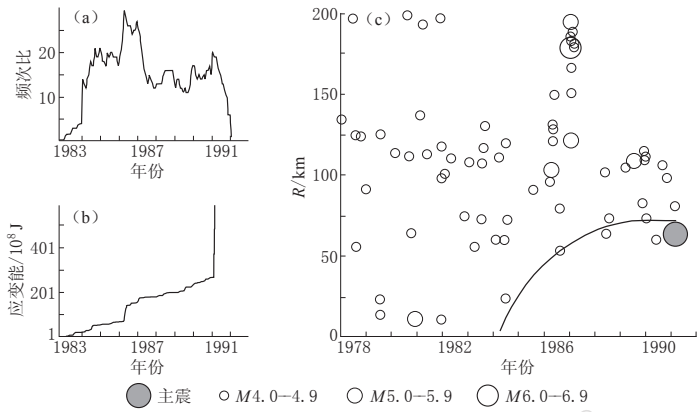


图 2 1991 年 2 月 25 日新疆柯坪 6.5 级地震空区判别参数图像

(a) 空区内外频次比; (b) 应变能曲线; (c) 地震空区 R-t 图

Fig. 2 Parameters for gap discrimination before the  $M_s6.5$  Keping earthquake of Feb. 25, 1991

(a) Ratio between inside and outside gap; (b) strain energy curve inside and outside gap; (c) R-t map of seismic gap

大陆 367 次 5 级以上地震作为研究对象. 依据邓起东等(2002)活动构造图及“十五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书各地区研究分区(中国地震局监测预报司, 2005a, b, c, 2006), 并参考地震分布将全国分为 5 个片区, 分别为华北片区(I)、华东南片区(II)、川滇片区(III)、青藏高原北部片区(IV)和新疆片区(V). 片区划分、研究地震及震前有空区地震的分布如图 3 所示.

367 次可研究地震及出现空区震例的基本统计情况为:

华北片区. 可用于研究的地震共 36 次. 其中, 5.0—5.9 级地震 30 次, 6.0—6.9 级地震 4 次, 7 级以上地震 2 次. 震前有空区现象的 14 次, 占 38.9%; 空区震例中, 5.0—5.9 级地震 11 次, 6.0—6.9 级地震 1 次, 7 级以上地震 2 次.

华东南片区. 可研究地震共 24 次. 其中, 5.0—5.9 级地震 19 次, 6.0—6.9 级地震 5 次, 7 级以上地震 0 次. 震前有空区现象的 21 次, 占 87.5%; 空区震例中 5.0—5.9 级地震 18 次, 6.0—6.9 级地震 3 次.

川滇片区. 可研究地震共 124 次. 其中, 5.0—5.9 级地震 95 次, 6.0—6.9 级地震 19 次, 7 级以上地震 10 次. 震前有空区现象的 68 次, 占 54.8%; 空区震例中 5.0—5.9 级地震 42 次, 6.0—6.9 级地震 16 次, 7 级以上地震 10 次.

青藏高原北部片区. 可研究地震共 82 次. 其中, 5.0—5.9 级地震 67 次, 6.0—6.9 级地震 14 次, 7 级以上地震 1 次. 震前有空区现象的 36 次, 占 43.9%; 空区震例中 5.0—5.9 级地震 25 次, 6.0—6.9 级地震 10 次, 7 级以上地震 1 次.

新疆片区. 可研究地震共 101 次. 其中, 5.0—5.9 级地震 77 次, 6.0—6.9 级地震 10 次, 7 级以上地震 4 次. 震前有空区现象的 55 次, 占 54.4%; 空区震例中 5.0—5.9 级地震 36 次, 6.0—6.9 级地震 15 次, 7 级以上地震 4 次.

表 1 统计了 367 次可研究地震及震前有空区图像的地震分区及震级分档情况. 总体统计结果显示, 研究地震中有 194 次地震前有空区图像出现, 约占 53%. 从分区统计分析,



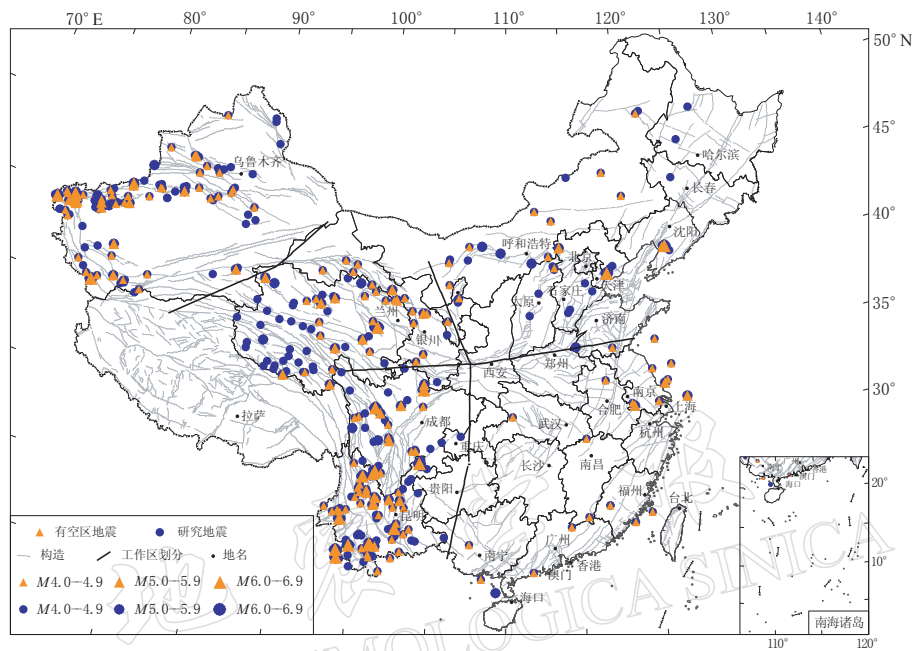


图 3 中国大陆研究地震与有空区地震分布图

Fig. 3 Epicenter distribution of studied earthquakes and those with gaps in China mainland

表 1 研究地震中震前有围空现象的地震数分区及分档比例统计

Table 1 Statistic table of different regions and magnitudes of the earthquakes with gap-formation process before the studied earthquakes

分区	出现空区比例(有空区地震数/分档地震总数)			全部地震
	5 级	6 级	7 级以上	
华北	36.7%(11/30)	25.0%(1/4)	100%(2/2)	38.9%(14/36)
华东南	94.7%(18/19)	60.0%(3/5)	0	87.5%(21/24)
川滇	44.2%(42/95)	84.2%(16/19)	100%(10/10)	54.8%(68/124)
青藏高原北部	37.3%(25/67)	71.4%(10/14)	100%(1/1)	43.9%(36/82)
新疆	46.8%(36/77)	75.0%(15/20)	100%(4/4)	54.4%(55/101)
合计	45.8%(132/288)	72.6%(45/62)	100%(17/17)	52.9%(194/367)

华东南共有 24 次地震，其中 21 次地震前有空区图像，占 87.5%；空区出现比例最低的为华北地区，占 38.9%(14:36). 从震级分档统计分析，5 级、6 级和 7 级地震前出现空区图像的比例分别为 45.8%、72.6%和 100%，一定程度上表明震前空区图像是强震前的重要异常判据.

3.2 空区持续时间与主震关系统计分析

统计中国大陆 1970 年以来 5 级以上地震的围空持续时间与主震震级的关系，据此 194 个样本拟合出经验统计关系为

$$M = 1.004\lg T(\text{月}) + 4.324 \pm 0.503$$

(1)

统计结果显示，围空持续时间与主震震级之间存在线性关系，在 95%置信水平下，F 值为  $37.5 \geq F_{\alpha} = 3.8$ ，即 F 检验表明围空持续时间与主震震级之间明显存在线性关系. 其相关系数为 0.437，相关系数临界值为 0.142. 显然围空持续时间与主震震级之间存在相关

关系.

从图 4a 可以直观看出, 尽管可以用经验关系来描述空区的持续时间与主震之间的关系, 但在震级小于 6 级时, 这种关系似乎并不存在. 同时, 即使在较大地震震端有一定的线性关系, 其误差也很大. 例如, 当  $T=40$  个月时, 由上述经验统计关系式可计算出对应主震震级为 5.9 级. 但图 4a 显示, 事实上对应的主震震级可从 5 级直到 8 级.

从分区情况来看, 可分为 3 类: 一类是样本数量过少无线性关系的, 如华北、华南地区; 第二类是离散度很大, 难以给出两者间的线性关系的, 如青藏高原北侧地区(图 4b); 第三类是两者间存在一定的线性关系, 并随主震震级的增大相关性趋于明显. 尽管可以给出两者间的线性关系, 但仍存在较大的误差, 如川滇地区 68 个样本和新疆地区 55 个样本(图 4c, d). 其拟合关系为:

川滇地区  $M_{川滇} = 1.996\lg T(\text{月}) + 3.194 \pm 0.488$

新疆地区  $M_{新疆} = 1.182\lg T(\text{月}) + 3.861 \pm 0.464$

对上述两式进行显著性检验, 在 95% 置信水平下, F 值分别为 54.1 和 19.3, 分别大于  $F_{\alpha}=4.0$  和 4.1, 即 F 检验表明, 上述两区的围空持续时间与主震震级之间明显存在线性关系. 其相关系数分别为 0.671 和 0.598, 而相关系数临界值分别为 0.240 和 0.270. 显然川滇地区 and 新疆地区空区持续时间与主震震级之间存在相关关系.

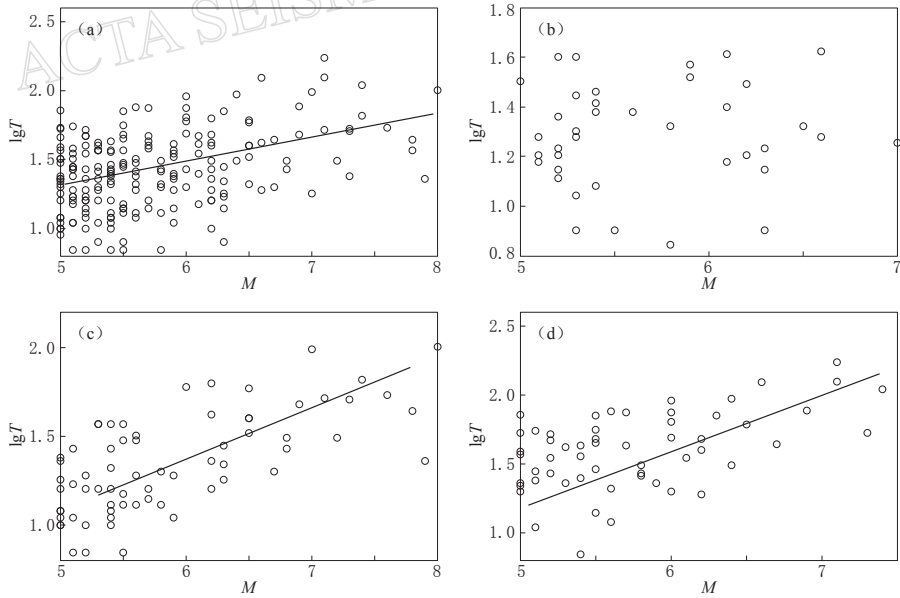


图 4 中国大陆及各分区中强地震空区持续时间与主震震级统计关系  
(a) 中国大陆; (b) 青藏高原北部地区; (c) 川滇地区; (d) 新疆地区

Fig. 4 Statistical relation between the gap lasting time for moderate and strong earthquakes in various regions of China and the mainshock magnitude

(a) Chinese mainland; (b) northern Qingzang plateau; (c) Sichuan and Yunnan region; (d) Xinjiang region

3.3 空区尺度与主震关系统计分析

图 5a 为中国大陆中强地震空区尺度与主震震级分布图, 据此 194 个样本拟合出经验统计关系式为

$$M = 0.968\lg R(\text{km}) + 3.596 \pm 0.523 \tag{2}$$

统计结果显示，围空空间尺度与主震震级之间存在线性关系，在 95% 置信水平下，F 值为  $21.6 \geq F_\alpha = 3.8$ ，即 F 检验表明，围空持续时间与主震震级之间明显存在线性关系。其相关系数为 0.358，相关系数临界值为 0.142。显然空区尺度与主震震级之间存在相关关系。

除个别地震外，仍可用这一经验关系来描述主震震级与空区尺度的统计关系，但同时也可看出，当主震震级小于 5.8 级时，这种关系是很不明显的。当主震震级大于 6 级时，虽然经验关系较为明显，但其误差仍较大。例如  $R=200\text{ km}$  时，由经验关系式计算可得主震震级为 5.8 级，但事实上，图 5a 显示主震震级可从 5 级直到 8 级。

从分区情况来看，除华北、华东南地区因样本数量少无法给出经验关系外，其它 3 个地区都具有一定程度的线性关系。其中川滇地区(图 5c)和新疆地区(图 5d)线性关系好于青藏高原北部地区(图 5b)。而青藏高原北部地区主震震级与空区尺度之间虽无明显的线性关系，但其下包络线(图中虚线)呈现一定线性关系，川滇地区 and 新疆地区也存在类似的下包络线。值得注意的是，依据这条线可作为预测不同震级地震时，进行最小围空尺度的必要条件，即可为该区域利用空区进行强震震级预测分析时提供必要判定条件。

川滇地区  $M_{\text{川滇}} = 2.186\lg R(\text{km}) + 0.894 \pm 0.582$

新疆地区  $M_{\text{新疆}} = 1.424\lg R(\text{km}) + 2.878 \pm 0.472$

在 95% 置信水平下，F 值分别为 17.5 和 14.5，分别大于  $F_\alpha = 4.0$  和 4.1，即 F 检验表

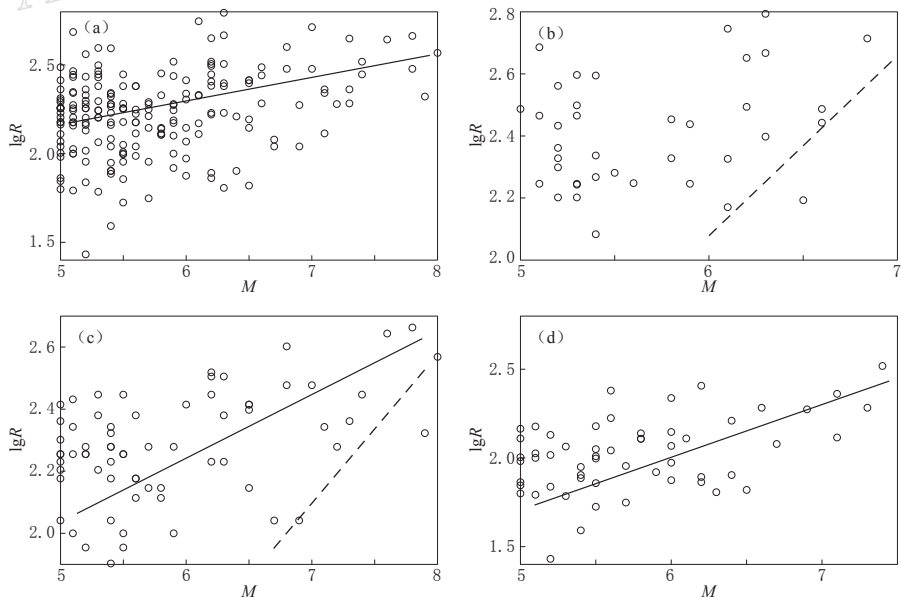


图 5 中国大陆及分区中强以上地震空区尺度与主震震级统计关系

(a) 中国大陆；(b) 青藏高原北部地区；(c) 川滇地区；(d) 新疆地区

Fig. 5 Statistical relation between the gap scale and mainshock magnitude in various regions of China

(a) Chinese mainland；(b) northern Qingzang plateau；(c) Sichuan and Yunnan region；(d) Xinjiang region



明以上两区的围空尺度与主震震级之间明显存在线性关系,其相关系数分别为 0.530 和 0.520,相关系数临界值分别为 0.240 和 0.270. 显然川滇地区 and 新疆地区空区尺度与主震震级之间存在相关关系.

由上述中国大陆及各分区的空区持续时间及空区尺度与主震震级之间的统计关系,华北地区、华东南地区很难拟合出其经验统计关系式,青藏高原北部地区主震与空区持续时间及空区尺度间仅存在数据分布的下包络线. 而中国大陆、川滇和新疆地区,尽管可以拟合出空区持续时间、空区尺度与主震震级间的经验统计关系式,但总体上 6 级以下地震基本不存在线性关系,而大于 6 级地震的线性关系式的拟合误差也很大. 值得一提的是,除华北和华东南地区外,其它各区或可拟合出经验统计关系式,或可给出数据分布的下包络线(图中虚线),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决策依据.

3.4 围空地震震级与主震关系分析

图 6 统计了围空起始震级( $M_0$ )与主震震级( $M$ )间的关系. 由图中虚线(即下包络线)可见,随主震震级增大围空的起始震级有明显增大的现象. 但上限震级的范围较宽,不过仍有随主震震级增大而变窄的趋势. 一般而言,5 级地震围空震级在  $M_L2.5$  左右,6 级地震围空震级在  $M_L3.5$  左右,7 级以上地震围空震级在  $M_L4.0$  左右.

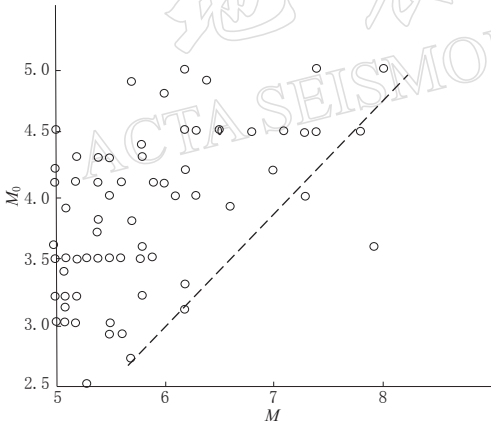


图 6 围空地震与主震震级统计关系

Fig. 6 Statistical relation between the magnitude of earthquakes with gap and mainshock magnitude

3.5 空区与主震位置关系分析

一般来讲空区形成对其后发生的主震有一定的地点指示意义,但空区的围空范围可能较主震的震源体大数倍,而主震相对空区的位置多种多样,因此需进行普遍性统计. 首先对主震相对空区各种各样的相对位置进行大致划分,即“内部”指主震位于圈定空区的椭圆线以内;“外部”指主震位于圈定空区的椭圆线边线以外及附近;“边缘”指主震位于圈定空区的椭圆线上.

据以上划分标准,表 2 统计了中国大陆 194 次有空区主震前出现的 298 个空区(有些地震前出现了多空区现象). 其中,主震发生在空区内部的有 113 个,占 37.9%;发生在空区边缘的有 48 个,占 16.1%;发生在空区外部的有 137 个,占 46%. 总体上大多数空区的

表 2 中国大陆中强地震与空区相对位置统计  
Table 2 Statistics between moderate and strong earthquakes in China mainland and the relative gap positions

中国大陆	M5—5.9	M6—6.9	M7 以上	合计
内部	67(34.5%)	29(37.7%)	17(63%)	113(37.9%)
边缘	37(19.1%)	10(13%)	1(3.7%)	48(16.1%)
外部	90(46.4%)	38(49.4%)	9(33.3%)	137(46%)
总个数	194	77	27	298

主震发生在其边缘和外部, 占 62.1%. 若对主震分档统计, 可见 5—5.9 级地震前出现的 194 个空区中, 主震发生在空区内部的有 67 个, 占 34.5%; 发生在空区边缘的有 37 个, 占 19.1%; 发生在空区外部的有 90 个, 占 46.4%. 6—6.9 级地震前出现的空区 77 个, 主震发生在空区内部的有 29 个, 占 37.7%; 发生在空区边缘的有 10 个, 占 13%; 发生在空区外部的有 38 个, 占 49.4%. 7 级以上地震前出现的空区 27 个, 主震发生在空区内部的有 17 个, 占 63%; 发生在空区边缘的有 1 个, 占 3.7%; 发生在空区外部的有 9 个, 占 33.3%. 由此可见, 7 级以上地震大多发生在空区的内部, 而 5—6 级地震大多发生在空区的外部.

从分区情况来看(表 3), 华北地区 20 个空区中发生了 14 次主震, 内部有主震的空区 7 个, 边缘有主震的空区 10 个, 外部有主震的空区 3 个; 华东南地区 40 个空区中发生了 21 次主震, 内部有主震的空区 11 个, 边缘有主震的空区 7 个, 外部有主震的空区 22 个; 川滇地区 108 个空区中发生了 68 次主震, 内部有主震的空区 60 个, 边缘有主震的空区 7 个,

表 3 中强以上地震与空区相对位置的分区统计

Table 3 Statistics between moderate and strong earthquakes and relative gap positions for different regions

分区	内部	边缘	外部	合计
华北	7	10	3	20
华东南	11	7	22	40
川滇	60	7	41	108
青藏高原北部	12	0	36	48
新疆	23	24	35	82
合计	113	48	137	298

外部有主震的空区 41 个; 青藏高原北侧地区 48 个空区中发生了 36 次主震, 内部有主震的空区 12 个, 外部有主震的空区 36 个; 新疆地区 82 个空区中发生了 55 次主震, 内部有主震的空区 23 个, 边缘有主震的空区 24 个, 外部有主震的空区 35 个. 由此可看出, 川滇地区空区内部发生主震的情况最多, 其它地区空区边缘和外部发生主震的占多数.

3.6 空区打破时间与主震的关系

有些空区形成后期又会在空区内部发生较围空震级相当或稍高的地震, 使空区瓦解即空区打破. 若打破的时间与主震有较好的相关性, 则可为主震发震时间的预测提供依据. 为此统计了各区打破空区的地震距主震的时间及空区打破的次数占各区空区数的比例(表 4). 华北、华南主震前空区被打破的情况较少, 青藏高原北部地区较多, 川滇和新疆地区介于它们之间. 而空区打破后 3 个月内发生主震的占空区打破数的 30%—50%, 1 年内发生主震的占 80% 以上. 但空区打破后 3 个月内发生主震的占空区总数的 5%—17%, 1 年内发生主震的占 10%—33%. 由此可见, 能确认空区被打破, 则其后 1 年发生主震的概率

表 4 空区打破与主震关系统计

Table 4 Statistical relation between the gap failure and mainshocks

分区	DK/KK	打破空区地震距主震时段统计/月					主震发生时间统计			
		≤1	≤2	≤3	≤12	>12	3 个月内发震		12 个月内发震	
							占 DK	占 KK	占 DK	占 KK
华北	14%(2/14)	1	1	1	2	0	50%	7%	100%	14%
华东南	9%(2/21)	1	1	1	2	0	50%	5%	100%	10%
川滇	22%(15/68)	4	6	7	12	3	47%	10%	83%	18%
青藏高原北部	42%(15/36)	4	5	6	12	3	40%	17%	83%	33%
新疆	29%(16/55)	4	5	5	13	3	31%	9%	81%	24%

注: DK 为打破空区数; KK 为空区数.

是很高的. 但若空区没有打破, 则只能据前述的经验统计关系推测未来可能发震的时间和震级.

## 4 讨论与结论

依据对空区图像扫描的定性要求, 对中国大陆 1970 年以来有相对完整资料的 367 次 5 级以上地震前的地震活动图像进行扫描分析, 得到了 194 次震前的空区图像, 据此着重讨论了空区形成后发生的主震与空区形成持续的时间, 空区空间分布的尺度及围空地震的震级等的统计关系. 结果表明:

1) 中国大陆 1970 年以来所选取的 367 次 5 级以上地震前, 出现空区异常图像的震例占研究地震总数的 53%, 高于《中国震例》研究中 42.3% 有空区震例的比例. 其中 5 级、6 级和 7 级地震前出现空区图像的比例分别为 45.8%、72.6% 和 100%. 分区空区震例统计表明, 华东南地区空区出现的比例较高为 87.5%, 华北地区空区出现比例最低为 38.9%, 川滇、新疆和青藏高原北部地区空区出现比例分别为 54.8%、54.4% 和 43.9%.

2) 中国大陆地震空区持续时间与主震震级之间的关系存在一定的统计拟合关系. 川滇和新疆地区, 地震空区持续时间与主震震级之间呈较好的线性关系, 但这种关系在主震震级大于 6 级时才较为显著. 且尽管存在一定意义上的线性关系, 但误差域仍是较大的. 而在样本较少的华北、华东南地区则这种关系并不明显.

本文及以往既有文献得到的地震空区持续时间与主震震级统计拟合关系为:

$$\text{中国大陆地区(本文)} \quad M = 1.004 \lg T(\text{月}) + 4.324 \pm 0.503$$

$$\text{陆远忠和宋俊高(1989)} \quad M_s = 6.02 + 1.34 \lg T_{\#}(\text{年}) \pm 0.48$$

$$\text{“八五”指南(1990)}^{①} \quad M_s = 4.13 \lg T(\text{月}) - 0.51 \pm 0.52$$

$$\text{川滇地区(本文)} \quad M = 1.996 \lg T(\text{月}) + 3.194 \pm 0.488$$

$$\text{新疆地区(本文)} \quad M = 1.182 \lg T(\text{月}) + 3.861 \pm 0.464$$

利用本研究得到的中国大陆地区拟合关系与上述陆远忠和宋俊高(1989)以及“八五”指南(1990)拟合公式, 在相同空区持续时间情况下, 本研究结果介于其二者的拟合结果之间.

对比分析川滇与新疆地区的统计拟合关系, 在相同震级的主震前, 川滇地区的空区持续时间较新疆地区短, 这与川滇地区强震活动频次高于新疆地区相一致.

3) 中国大陆地震空区尺度与主震震级之间存在不同程度的统计拟合关系. 华北地区、华东南地区及青藏高原北部地区很难拟合出空区尺度与主震震级间的经验统计关系式. 中国大陆及川滇和新疆地区, 尽管可以拟合出经验统计关系式, 但总体上 6 级以下地震基本不存在线性关系, 而大于 6 级地震的线性关系式的拟合误差仍很大. 本文及既有文献有关地震空区尺度与主震震级统计拟合关系为

$$\text{中国大陆地区(本文)} \quad M = 0.968 \lg R(\text{km}) + 3.596 \pm 0.523$$

$$\text{陆远忠和宋俊高(1989)} \quad M_s = 3.69 \lg L_{\#}(\text{km}) - 1.71 \pm 0.47$$

$$\text{“八五”指南(1990)}^{②} \quad M_s = 6.20 \lg L(\text{km}) - 8.08 \pm 0.61$$

$$\text{川滇地区(本文)} \quad M = 2.186 \lg R(\text{km}) + 0.894 \pm 0.582$$

①, ② 国家地震局科技监测司. 1990. 《地震学分析预报方法式指南》. 北京: 地震出版社.

新疆地区(本文)  $M = 1.424 \lg R(\text{km}) + 2.878 \pm 0.472$

利用本研究得到的中国大陆地区拟合关系与陆远忠和宋俊高(1989)、“八五”指南(1990)拟合公式对比, 相同空区尺度下, 本研究结果介于其二者的拟合结果之间。

对比分析川滇与新疆地区的统计拟合关系, 在相同震级的大震前, 川滇地区的空区尺度与新疆地区一致。这可能与两地区分别处于印度板块向欧亚板块俯冲的东、西触角部位, 其受力环境相近有一定的关系。

4) 围空起始震级与主震震级间存在一定的正相关关系。上限震级的范围较宽, 但有随主震震级增大而变窄的趋势。5 级地震前围空起始震级为  $M_L 2.5$  左右, 6 级地震前围空地地震起始震级  $M_L 3.5$  左右, 7 级地震前围空地地震起始震级  $M_L 4.0$  左右。

5) 统计了中国大陆 194 次有空区的震例前出现的 298 个空区, 主震发生在空区内部的有 113 个, 占 37.9%; 发生在边缘的有 48 个, 占 16.1%; 发生在外部的有 137 个, 占 46%。总体上大多数空区对应的主震发生在其边缘和附近的外部地区。

6) 地震空区持续时间、空区尺度(长轴)与主震震级关系统计拟合分析还表明, 在大震级端拟合数据点阵存在线性下包络线, 这一结果可作为强震或大震预测时震级判定的必要条件之一。

7) 空区形成后空区内又发生大于围空震级的地震时, 则出现空区打破现象。统计表明打破空区的地震距主震的时间在 1 年内的占打破空区的 80%, 但出现打破空区的比例仅占空区总数的 25%。

审稿专家对本文给予了很多宝贵的建设性意见和建议, 作者在此表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- 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.
- 沉冗. 1986. 美国帕克菲尔德地震预报实验场概述[J]. 国际地震动态, (10): 13—21.
- 陈运泰. 2007. 地震预测: 进展、困难与前景[J]. 地震地磁观测与研究, 28(2): 1—24.
- 陈章立、刘蒲雄、黄德瑜, 郑大林, 薛峰, 王志东. 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.
- 陈章立, 薛峰. 1984. 地震空区与大震关系的不唯一性[J]. 华北地震科学, 2(1): 27—31.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征? [J]. 中国科学: D 辑, 32(12): 1020—1030.
- 国家地震局科技监测司. 1990. 地震学分析预报方法式指南[M]. 北京: 地震出版社: 7—15.
- 韩渭滨, 江道崇, 杨虹, 席敦礼, 成小平, 陈应伦. 1989. 借助  $R-t$ 、 $D-t$  图结合震中分布图在四川地区圈定空区的研究// 国家地震局科技监测司. 地震预报方法应用研究文集: 地震学专辑[M]. 北京: 学术书刊出版社: 25—40.
- 陆远忠, 沈建文, 宋俊高. 1982. 地震空区与“逼近地震”[J]. 地震学报, 4(4): 327—335.
- 陆远忠, 王伟, 沈建文. 1983. 地震空区与“逼近地震”续[J]. 地震学报, 5(2): 129—144.
- 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: 48—110.
- 陆远忠, 宋俊高. 1989. 地震空区与地震预报[M]. 北京: 地震出版社: 1—224.
- 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. 1993. 地震科学研究论文选集[M]. 北京: 地震出版社: 20—48.

- 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.
- 王炜, 黄冰树, 陆远忠, 郑兆苾, 刘东旺, 潘坚云, 陈宇卫. 1989. 孕震空区方法在地震预报中的应用及其效能的研究// 国家地震局科技监测司. 地震预报方法应用研究文集: 地震学专辑[M]. 北京: 学术书刊出版社: 1-24.
- 魏光兴. 1981. 地震空区研究述评[J]. 国际地震动态, (4): 1-3.
- 薛艳, 刘杰, 梅世蓉, 宋治平. 2009. 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震前地震活动异常特征[J]. 地震学报, 31(6): 606-619.
- 张国民, 傅征祥, 桂燮泰. 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社: 12-26.
- 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, 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.
- 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.
- 中国地震局监测预报司. 2005a. 华东地区地震短期预测技术研究及综合预测专家系统[M]. 北京: 地震出版社: 9-32.
- 中国地震局监测预报司. 2005b. 华北地区强地震短期前兆特征与预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社: 48-57, 83-105.
- 中国地震局监测预报司. 2005c. 西南地区强地震短期前兆特征和预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社: 1-16.
- 中国地震局监测预报司. 2006. 西北地区强地震短期前兆特征和预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社: 1-19.
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1995. 王林瑛译. 1998. 新的地震空区 5 年之后[J]. 世界地震译丛, (3): 26-44.
- Mogi K. 1979. *Earthquake Prediction* [M]. Tokyo: Academic Press: 96-103.