

华南地区中强地震重复特征初步分析

沈得秀 周本刚

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 本文通过《中国历史强震目录》、《中国近代地震目录》、《中国地震台报告》、《中国地震详目》及部分地方台网测定的地震目录,初步分析了华南地区1000a以来中强地震($5.0 \leq M \leq 6.4$)的原地重复性,并从时、空、强三方面对地震原地重复特点做了统计分析。分析认为华南地区中强地震的发生具有较高的原地重复率,在时间、强度上都具有一定的规律性。这些规律的探讨对该地区地震区划及工程场地地震安全性评价具有一定的参考价值。

关键词: 华南地区 中强地震 原地重复特征

引言

中国大陆许多强震区的强震具有原地重复的特点。地震的原地重复发生,可能是活动断裂带的长期继承性活动所致。因同一地点断裂活动,其结构条件和介质条件都没有太大变化,当地应力聚集到一定强度,就会发生粘滑破裂,产生强震,应力再一次渐渐聚集、增大,直至发生下一次的强震。

华南地区是我国东部地震活动相对较弱的地震区,中强及其以上的地震活动无论从频度和强度上相比中国西部及华北都要低很多。本文所指华南地区是编制中国地震动参数区划图(2001)中划分出的华南地震区,大致位于北纬 $36^{\circ}27'$ 以南,东经 $103^{\circ}05'$ 以东的区域。该地区地震活动的时空演化图像是很复杂的,地震空间分布虽然广泛但不均匀,有成丛、成带发生的特点。地震的发生主要集中在某些构造位置,如断裂交汇位置或新构造差异运动强烈的地区,并有较多中强地震原地重复发生的震例。研究地震原地重复的特征,对研究区未来地震发生的中长期预测及地震区划有着十分重要的意义,尤其在工程场地的地震安全性评价工作中,需要估计中强地震的年平均发生率,其作用更为突出。因此本文拟在华南地震1000a以来的中强地震的原地重复震例做统计的基础上,分析该地区中强地震原地重复的特征,试图为工程地震实践中评价中强地震年平均发生率提供一些基础材料。

1 资料选取

研究区最早的地震记录为公元前1767年河南偃师西南6级地震,考虑到早期地震记录

[收稿日期] 2006-05-23

[作者简介] 沈得秀,女,生于1975年。工程师,现为地震局地质研究所硕士生。主要研究领域:工程地震与地震区划。

E-mail: shendexiu@163.com

的可靠性问题,选取研究区内 1000a 以来发生的中强地震 ($5.0 \leq M \leq 6\frac{3}{4}$) 作为统计分析对象。资料选自《中国历史强震目录》(国家地震局震害防御司, 1995)、《中国近代地震目录》(国家地震局震害防御司, 1999)、《中国地震台报告》、《中国地震详目》及部分地方台网测定的地震目录。对于发生在海域的历史地震,由于其震中位置的准确性较难判断,本文只考虑近海域地震和有仪器记录的地震。

2 研究区地震活动背景

对华南地区的地震活动情况,已有很多学者从不同角度利用不同方法做过研究,也得出了一些认识。普遍认为研究区地震活动水平总体弱于中国西部及华北地区,地震的发生在时间上具有很明显的周期性,存在着活跃期、平静期,并交替出现;在空间上存在着地震活动分布不均匀,有较为明显的成带、成丛发生的特点;地震活动在强度上相比中国西部及华北地区都较低,发生频度也较低(黄伟琼, 1988; 任镇寰, 1998; 杨继登等, 1999)。

本文在前人的研究基础上,统计了收录到的历史强震目录、近代地震目录及现代仪器记录地震目录中 1000a 以来的 $M \geq 5.0$ 级地震。研究区 1000a 以来,共发生 $M \geq 5.0$ 级地震 265 次。不同震级的地震次数统计表明整个华南地区的地震活动具有在空间上分布不均匀;在时间上活跃期、平静期有交替;在强度上具有频度低,震级小,强震发生少的特点。这在 1000a 以来的地震序列图中可以清楚地看到(图 1)。研究区地震活动从 1400 年以来存在着两个明显的大的活动周期,周期大约 300a 左右,第一个活动周期为 1400—1700 年左右,活动周期内最大地震为 1604 年福建泉州海外地震,震级为 7.5;第二个活动周期为 1700 年以来至今的活动周期,活动周期内最大地震为 1918 年广东南澳东南海中的 7.3 级地震。

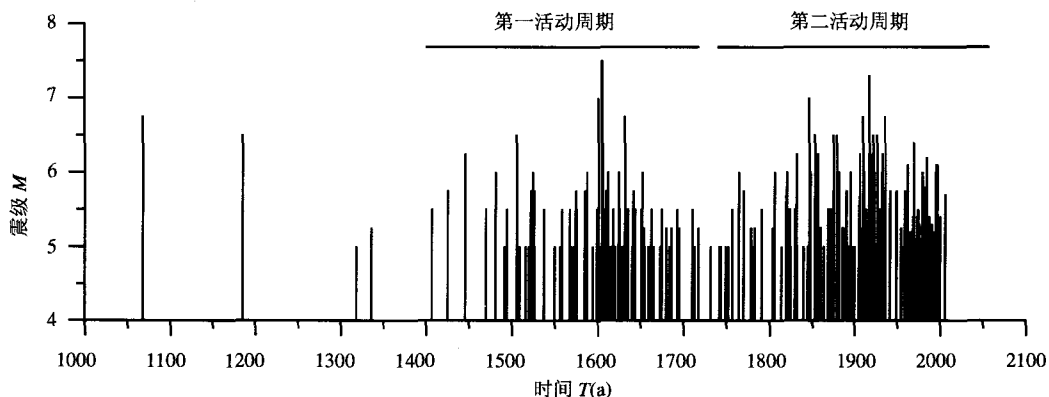


图 1 1000a 以来华南地震区地震活动的 $M-T$ 图

Fig. 1 $M-T$ plot of seismic activity in South China since 1000a

在本文中我们对收集到的研究区内 1000a 以来的 $M \geq 5.0$ 级地震进行了分档统计(图 2)。统计结果表明,研究区 1000a 以来共发生 5 级以上地震 265 次,其中震级最大的地震为 1604 年福建泉州海外 7.5 级地震与海南琼山 7.5 级地震。如果不考虑地震释放的能量差别,仅从地震发生的频度来分析研究区内的地震的强度,从震级-频度图上就可以看出研究区内绝大多数地震震级都在 6.5 以下。这也是本文选取地震震级 $5.0 \leq M \leq 6\frac{3}{4}$ 来分析地震活动特征的原因之一。

研究区地震活动在空间上分布不均匀,地震的发生具有成带、成丛分布的特点。其中以

东南沿海地带为华南地区地震活动水平较高的地区，研究区内 1000a 以来 5 次 7 级以上地震有 4 次在这个地区发生，且分布在海岸线与大陆架分界地带，这可能是由于欧亚板块与太平洋板块、菲律宾板块相互作用的结果；以雪峰山、武夷山一带地震活动水平最低，地震发生频度低，强度也低。这在研究区 1000a 以来的地震震中分布图中可以清楚地看到（图 3）。地震的发生多与震区的构造活动有一定的关系，多发生在一组断裂或不同方向断裂交汇处，或发生在断陷盆地周边或新构造运动强烈的地区。如 1917 年安徽霍山 6.5 级地震区的地震、1624 年江苏扬州附近 6 级地震和湖南常德 6¾ 级地震等。

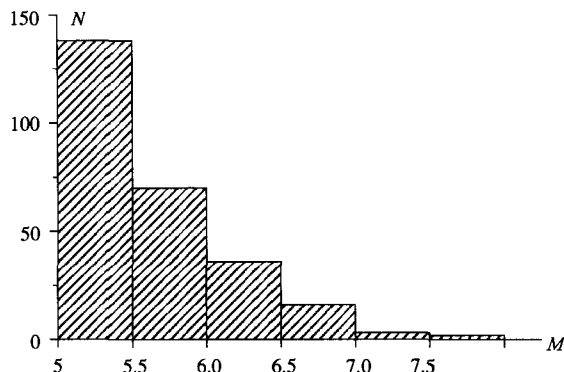


图 2 研究区 1000a 以来地震震级-频度图

Fig. 2 Magnitude-frequency plot of earthquakes occurred in the study area since 1000a

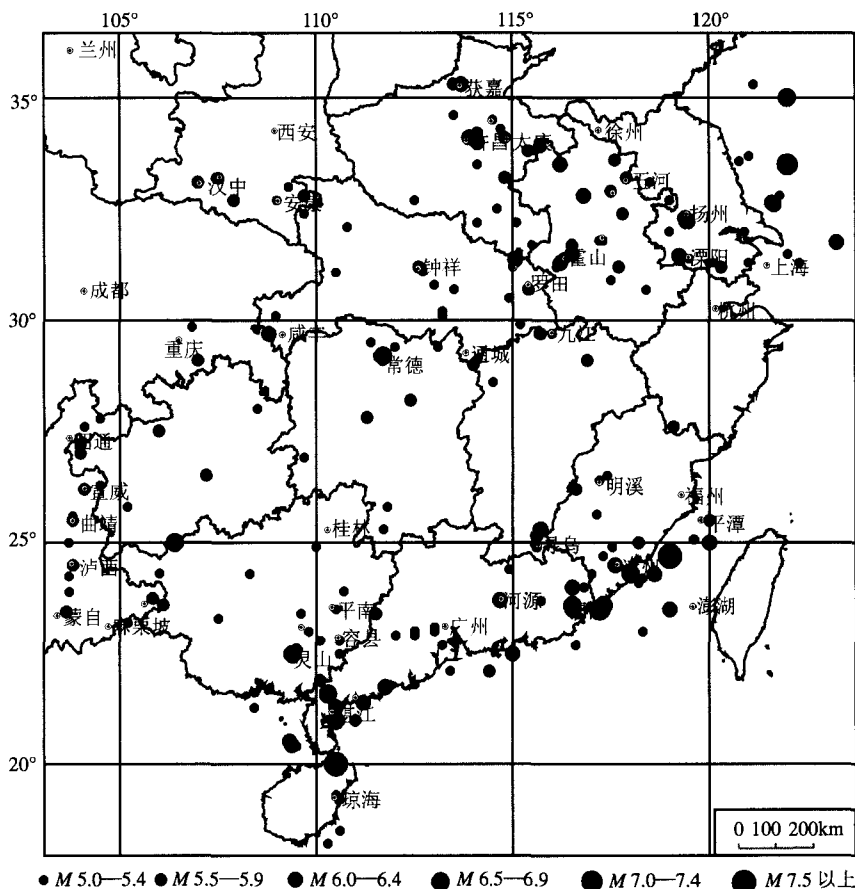


图 3 研究区 1000a 以来 5 级以上地震震中分布图

Fig. 3 Epicenter distribution of Earthquakes with $M \geq 5$ in the study area since 1000a

此外;许多地震区有多次地震原地重复发生的特点,如安徽霍山地震区、湖北钟祥地震区、江西寻乌地震区和广西灵山地震区等。这和中國大陸许多强震区的强震所具有的原地重复发生特点相似。对于这些具有原地重复发生特征的地震,其原地重复发生的规律如何,本文作了初步的统计分析。通过这种分析,试图找出中强地震原地重复发生的一些特征。

3 地震原地重复特征分析

3.1 地震原地重复的判别原则

从前面所述可知,研究区内7级以上地震发生5次,而震级在 $5.0 \leq M \leq 6\frac{1}{4}$ 范围的地震发生相对较多,考虑到统计样本的限制,我们在对地震原地重复特征的分析中不考虑7级以上地震(包括在7级震源区内重复发生的 $5.0 \leq M \leq 6\frac{1}{4}$ 的地震)。考虑到中强地震的震源规模,本文将地震原地重复发生的距离定为50km的范围。由于前震与余震对于地震的原地重复率及复发周期有影响,故而剔除了前震和余震的影响。剔除余震的方法参考了前人所作的工作(Keilis-Borok等,1986;马秀芳,1991),本文将距主震前发震时间间隔1a之内且距离主震小于50km的地震视为前震,将主震后发生在原地(小于50km)的2a内地震、震级比主震小,而震级差在0.5以上的视为余震。双震型地震视为一次地震处理。依据上述原则,本文统计了研究区内具有原地重复特征的地震区,并将这种地震区称为地震原地重复的统计单元,如表1所列。

表1 研究区地震原地重复统计表
Table 1 Statistical results of recurring earthquakes in situ in the study area

统计单元	参考震中	始发地震		复发地震		相邻地震时间间隔(a)	最大震级	次级震级
		发震时间(年-月-日)	震级	发震时间(年-月-日)	震级			
1	陕西洋县	1568-04-22	5	1624-10-00	5.5	56	5.5	5
				1635-10-26	5.5	11		
2	陕西安康	1569-00-00	5	1959-09-28	5	390	5	5
3	江苏苏州西	1524-03-29	5 $\frac{1}{4}$	1839-10-12	5	315	5.5	5 $\frac{1}{4}$
				1872-09-21	5.5	33		
4	湖北咸丰、四川黔江间	1856-06-10	6 $\frac{1}{4}$	1931-07-01	5	75	6 $\frac{1}{4}$	5
5	福建漳州外海域	1185-06-15	6.5	1731-10-22	5	546	6.5	5 $\frac{1}{4}$
				1906-08-19	5 $\frac{1}{4}$	175		
6	河南鄢陵、洧川一带	1522-02-07	5 $\frac{3}{4}$	1524-02-14	6	2	6	5 $\frac{3}{4}$
				1820-08-04	6	296		
7	云南昭通	1935-02-00	5.5	1948-10-09	5 $\frac{3}{4}$	13	5 $\frac{3}{4}$	5.5
8	江西九江	1911-02-06	5	2005-11-26	5.7	94	5.7	5
9	湖北麻城	1913-02-07	5	1932-04-06	6	19	6	5
10	湖北钟祥	1407-00-00	5.5	1469-11-13	5.5	62	5.5	5
				1603-05-30	5	134		
				1620-03-05	5	17		
11	江苏溧阳	1679-12-26	5 $\frac{1}{4}$	1974-04-22	5.5	295	6	5.5

续表

统计单元	参考震中	始发地震		复发地震		相邻地震 时间间隔 (a)	最大 震级	次级 震级
		发震时间 (年-月-日)	震级	发震时间 (年-月-日)	震级			
12	安徽霍山	1336-01-20	5 ¹ / ₄	1979-07-09	6	5	6 ¹ / ₄	6
				1652-03-23	6	316		
				1770-01-16	5 ³ / ₄	118		
				1917-01-24	6 ¹ / ₄	147		
				1934-03-18	5	17		
13	湖北罗田	1634-03-30	5.5	1640-09-00	5.5	6	5.5	5.5
14	安徽凤阳	1644-02-08	5.5	1829-11-18	5.5	185	5.5	5.5
15	江苏扬州附近	1624-02-10	6	1913-04-03	5.5	289	6	5.5
				1930-01-03	5.5	17		
16	黄海	1975-09-02	5.3	1984-05-21	6.2	9	6.2	6.1
				1984-05-21	6.1	0		
17	江苏射阳东南	1987-02-17	5	1992-05-29	5	5	5	5
18	云南泸西	1674-04-00	5	1692-09-12	5.5	18	5.5	5.4
				1926-10-00	5	234		
				2000-01-26	5.4	74		
19	云南曲靖	1494-04-02	5.5	1783-00-00	5 ¹ / ₄	289	5.5	5 ¹ / ₄
20	广东肇庆附近	1584-07-08	5	1749-02-28	5	165	5	5
21	云南宣威	1572-00-00	5	1894-08-24	5	322	5.5	5
				1906-01-07	5.5	12		
				1955-05-27	5	49		
				1966-09-23	5	11		
				1936-04-01	6 ³ / ₄	76		
1958-09-25	5 ³ / ₄	22						
23	云南富宁东	1962-04-23	5.5	1982-10-27	5.8	20	5.8	5.5
24	贵州晴隆	1526-05-31	5	1602-00-00	5	76	5	5
25	广东南海	1683-10-10	5	1824-08-14	5	141	5	5
				1936-04-23	5	112		
26	广东廉江附近	1605-07-19	6.5	1890-08-30	5 ³ / ₄	285	6.5	5 ³ / ₄
27	福建漳州	1445-12-21	6 ¹ / ₄	1549-11-11	5	104	6 ¹ / ₄	5.2
				1968-04-01	5.2	419		
28	福建厦门海外	1906-03-28	6 ¹ / ₄	1995-02-25	5.2	89	6 ¹ / ₄	5 ¹ / ₄
29	广东饶平三饶	1887-04-08	5	1921-03-19	6 ¹ / ₄	34	6 ¹ / ₄	5
30	云南丘北西南	1885-12-22	5 ¹ / ₄	1980-06-18	5.5	95	5.5	5 ¹ / ₄
31	广东潮州一带	1067-11-12	6 ³ / ₄	1641-11-26	5 ³ / ₄	574	6 ³ / ₄	6
				1895-08-30	6	254		

续表

统计单元	参考震中	始发地震		复发地震		相邻地震 时间间隔 (a)	最大 震级	次级 震级
		发震时间 (年-月-日)	震级	发震时间 (年-月-日)	震级			
32	福建南平西南	1659-12-25	5	1917-01-27	5	258	5	5
33	江西寻乌	1804-00-00	5 ¹ / ₄	1806-01-11	6	2	6	5 ³ / ₄
				1941-09-21	5 ³ / ₄	135		
				1987-08-02	5.4	46		
34	河南太康东南	1525-09-13	5 ³ / ₄	1925-10-12	5.5	400	5 ³ / ₄	5.5
35	河南通许东南	1594-03-24	5	1675-00-00	5.5	81	5.5	5 ¹ / ₄
				1918-08-09	5 ¹ / ₄	243		
36	安徽合肥	1673-03-29	5	1954-06-17	5 ¹ / ₄	281	5 ¹ / ₄	5
37	湖北武汉西南	1470-01-17	5	1630-11-14	5	160	5	5
38	湖南常德	1516-00-00	5	1631-08-14	6 ³ / ₄	115	6 ³ / ₄	5 ³ / ₄
				1906-08-16	5	275		
39	安徽巢县南	1585-03-06	5 ³ / ₄	1654-02-17	5 ¹ / ₄	69	5 ³ / ₄	5 ¹ / ₄
40	江西修水西	1575-03-26	5.5	1863-08-30	5	288	5.5	5
41	广西梧州、合浦间	1686-01-01	5 ¹ / ₄	1911-02-05	5 ¹ / ₄	225	5 ¹ / ₄	5 ¹ / ₄
42	广西玉林东北	1507-03-14	5	1778-10-29	5 ¹ / ₄	271	5 ¹ / ₄	5
43	台湾海峡	1881-06-17	6	1992-02-18	5	111	6	5
44	广东吴川近海	1599-01-25	5.5	1611-09-09	6	12	6	5.5
45	湖北钟祥东南	1605-06-08	5	1630-00-00	5	25	5	5
46	上海长江口	1752-05-17	5	1844-12-02	5	92	5	5
				1855-11-20	5	11		
47	陕西海阳白河一带	1869-07-21	5.5	1956-09-28	5	87	5.5	5

注: ①统计单元指 50km 范围内至少有震级 $M \geq 5.0$ 的两次地震发生的震区。②参考震中为统计单元内 1000a 以来发生过的震级最大地震的参考震中位置。③始发地震为统计单元内所发生的最早的 5 级以上地震。④复发地震为统计单元内发震的时间在始发地震后的 5 级以上地震。⑤相邻地震时间间隔是指统计单元内相邻 2 次 5 级以上地震的时间差, 以 a 为单位。⑥最大震级和次级震级是统计单元内所发生地震的最大震级及仅次于最大震级地震的震级。统计单元内发生最大震级相同的 2 次以上地震, 则次级震级也视为该震级。

3.2 地震原地重复的空间特征

如前所述, 通过本文所采用的地震原地重复的原则, 在研究区内共有 47 个地震统计单元, 如图 4 所示。

从研究区内原地重复地震统计单元的分布可以看出(图 4), 研究区内具有原地重复特征的中强地震分布是不均匀的, 主要集中在东南沿海地区、滇东南地区、江汉—洞庭地区及河淮—长江下游地区; 且多发生在第四纪以来构造地貌差异地带(如常德、灵山等)以及第四纪以来不同方向断裂, 尤其是北东与北西向断裂交汇地区。东南沿海地区统计单元的分布沿海岸线呈北东向条带分布、滇东南地区统计单元成南北向条带分布。河淮—长江下游地区统计单元具有成丛分布的特点。考虑到每个震区地震地质构造环境的复杂性及差异性, 本文暂

不做详细讨论。

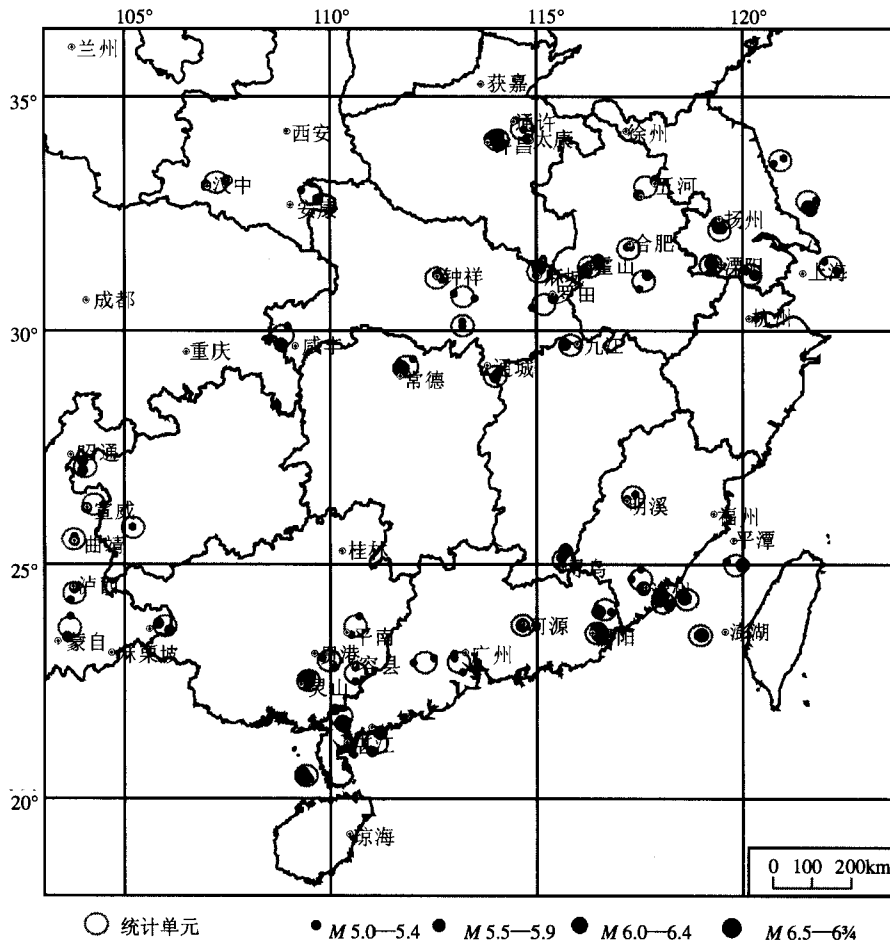


图 4 研究区内原地重复地震统计单元分布图

Fig. 4 Distribution map of statistical units in the study area

3.3 地震原地重复率

根据本文定义的地震原地复发条件,近 1000a 以来,研究区有 120 个地震具有原地复发的特点,通过对上述 120 个地震震中分布统计分析后,发现 120 个地震中有 47 次地震为始发地震,而 74 次地震为上述 47 次地震的原地复发地震。复发率达 61.0%,高于全国强震原地复发率 53.5% (罗灼礼, 1995),这说明即便是华南地震活动相对很弱的地区,地震也具有较高的原地复发率。罗灼礼在《中国大陆原地复发强震的基本特征及其预测》(1995)一文中提及的地震原地复发与本文所述的地震原地复发在概念上基本一致,都认为在以往曾经发生过一定震级地震的地方有再次发生类似震级地震的可能,差异之处在于,本文考虑了中强地震的震源规模,给出了地震原地复发的距离条件,因此作者认为在研究区内地震原地重复特征更为明显。

3.4 地震原地重复的震级特征

本文还对具有原地重复规律的地震震级作了统计,结果发现地震原地重复的统计单元内最大震级地震与次级震级地震之间的震级差存在一定的规律,如图 5 所示。

图 5 中横轴表示统计单元内地震的最大震级与次级地震的震级差, 纵轴表示不同震级差档内地震发生的次数。从图中可以看出有 76.6% 的地震震级差集中在 0.6 级的范围, 这说明统计单元内地震的最大震级与次级地震之间有着较高的相关性, 依据这种相关性, 我们可以根据统计单元内所发生的最大地震的震级及次级地震震级, 对发生在具有地震原地重复性震区的未来地震震级做出估计, 这将会在工程场地地震安全性评价工作中潜在震源区的震级上限确定方面有参考意义。

3.5 地震原地重复的时间特征

本文还针对每个地震原地重复统计单元内地震重复间隔做了统计, 并对统计单元内最大地震时间与次级地震时间的的时间间隔 ($\Delta M \leq 0.5$) 进行分析, 如图 6 所示。

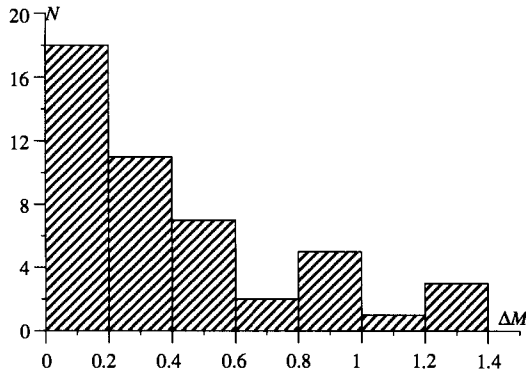


图 5 统计单元内不同震级差条件下地震频度图

Fig. 5 Earthquake frequency plot of magnitude difference in statistical units

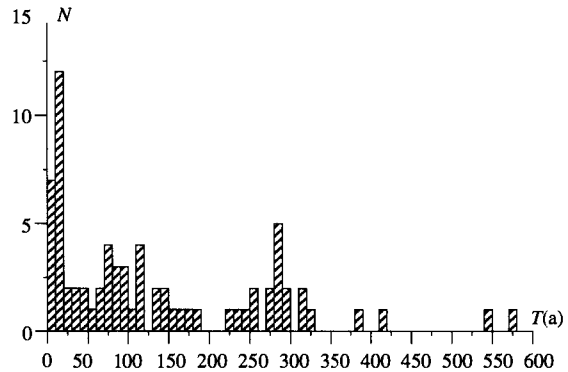


图 6 各地震原地重复间隔内地震频度分布图

Fig. 6 Frequency distribution of earthquakes in situ with different recurring intervals

从图 6 中可以看出, 研究区内的地震原地重复在时间轴上的分布是极不均匀的, 有 94.3% 的地震原地重复时间集中在 320a 以内, 与研究区内地震活动 300a 左右的活跃期大体一致。另外从图 6 也可看出, 在重复间隔为 10—20a 左右、70—120a 左右及 280—290a 左右的 3 个间隔段内, 地震发生的频度显著高于其它重复间隔, 70—120a 左右重复间隔内地震重复时间相对离散。我们分别统计了这 3 个重复间隔内发生的地震占有所有重复间隔内发生地震的个数比例, 其结果列于表 2。

表 2 主要重复间隔内地震所占比例

Table 2 Percentage of earthquake in the main recurring intervals

时间间隔 (a)	10—20	70—120	280—290
所占比例	16.7%	20.8%	6.9%

通过对主要重复间隔内的地震发生及地震序列的分析, 我们认为在研究区两个大的活跃期内, 又分别存在着相对活跃期与平静期。对于在 1400—1700 年左右的第一个活跃期内又存在 1500—1600 年的大约 100a 左右的相对活跃期; 在 1700 年以来至今的第二个活跃期内存在 1850—1950 年的大约 100a 左右活跃期。这说明在 100a 左右地震发震间隔的这些震区, 地震发生不仅受大区域的应力积累影响, 也受到局部的应力积累影响, 甚至局部应力集中更能引发这些地震区的地震发生。而另有一些地震的发生受其局部构造活动影响较小, 或者说其受

大的活跃期影响较大, 存在一个大约 280a 左右的重复间隔。在 10—20a 时间间隔内地震发生频率达到 16.7%, 造成这个时间段内地震重复发生比例较高的原因, 可能是由于地震余震或前震的影响。在本文中, 对地震的前震和余震, 只是做了简单的剔除, 在实际估算工作中, 需要进一步从地震区地震构造背景及地震震源参数来区别前震和余震的影响。

通过对原地重复地震时间特征的分析, 我们可以得到一个统计结果, 即研究区的原地重复地震发生在时间间隔 10—20a、70—120a 及 280—290a 的 3 个时间段内有较高的发生率。

4 认识与讨论

本文通过对华南地区 1000a 来 $M \geq 5.0$ 级地震的活动情况分析, 得出了以下结论:

(1) 华南地区中强地震的原地复发在空间上具有分布不均匀的特征, 地震原地重复震区主要集中在东南沿海地区、滇东南地区及河淮—长江下游地区, 并且具有一定的原地重复性, 统计表明研究区地震原地重复率为 61.0%, 比全国强震的原地重复率 53.5% 高。

(2) 通过对研究区每个地震原地重复统计单元内最大震级地震与次级震级地震的比较, 发现统计单元内原地重复地震在震级上有一定规律, 大约有 76.6% 的地震震级差集中在 0.6 级的范围。这对于统计单元内未来地震的震级大小确定有一定的参考意义。

(3) 通过对研究区内原地重复地震发震时间的统计分析, 发现研究区内有 90.4% 的地震原地重复时间集中在 320a 以内, 其中还存在 3 个 10—20a、70—120a 和 280—290a 的显著重复间隔。这对于估计潜在震源区内中强地震的复发率有一定的参考价值。

本文的分析是建立在统计的基础上, 所选的地震目录没有考虑地震的定位精度问题, 对于余震和前震也只作了简单的剔除。因此对整个华南地区中强地震原地重复发生规律的定量研究还需要做更深入的工作。

周庆为本文的研究提供了地震目录资料, 特此致谢。

参考文献

- 国家地震局震害防御司, 1995. 《中国历史强震目录》(公元 223 前至 1911 年). 北京: 地震出版社.
- 国家地震局震害防御司, 1999. 《中国近代地震目录》(公元 1912 年至 1990 年). 北京: 地震出版社.
- 黄玮琼等, 1988. 东南沿海地区地震带的划分及地震活动性参数的确定. 见: 丁原章等编, 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社.
- 罗灼礼, 1995. 中国大陆原地复发强震的特征及其预测. 地震, 15 (1): 1—11.
- 马秀芳, 傅丽萍, 1991. 爆发余震与强震关系的统计检验. 地震学报, 13 (3): 273—280.
- 任镇寰, 1998. 华南地震区地震活动基本特征与地震大形势再研究. 华南地震, 18 (1): 40—49.
- 杨继登, 1999. 云南地区强震原地复发的基本特征与预测. 地震研究, 22 (2): 130—138.
- Keilis-Borok V.I. and Kossobokov V.G., 1986. Time of increased probability for the great earthquakes of the world. In: Computational Seismology, 1 (19): 48—58.

Primary Analysis on the Recurring Characteristics of Moderate-Strong Earthquakes in South China

Shen Dexiu and Zhou Bengang

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract The statistical analysis is performed to study the spatial and temporal recurrence characteristics of moderate-strong earthquakes ($5.0 \leq M \leq 6.4$) of South China in 1000 a. The earthquake records used in this study are from "Historical strong earthquake catalogue of China", "The recent modern earthquake catalogue of China", "China seismic station report," "Detailed earthquakes catalogue of China", and the partial earthquake catalogue from the local network in south China. The results suggest that the moderate-strong earthquakes occurred in situ in South China have relatively higher recurring rates with some regularities in spatial and temporal domain. The regularities may be helpful to seismic zonation and safety assessment of earthquake engineering in the region.

Key words: South China region; Moderate-strong earthquake; Recurrence characteristics in situ