

蒋飞蕊,叶建庆,杨晶琼. 云南地区中强地震余震序列部分统计特征分析[J]. 华北地震科学, 2015, 33(4): 37-44.

云南地区中强地震余震序列部分统计特征分析

蒋飞蕊,叶建庆,杨晶琼

(云南省地震局,昆明 650224)

摘要:依据 1965 年以来云南地区记录相对完整的 108 次 5.0 级以上地震序列资料,研究云南中强地震余震序列统计特征,探讨序列类型、余震震级、余震分布范围及间隔时间等与主震震级之间的关系。云南地区孤立型、主余型、多震型地震序列分别约占 3.7%、63.0%及 33.3%。5.0 级以上主余型地震序列半年内发生的最大余震震级与主震震级总体呈正相关,但主震震级较低时相对离散。云南地区最大余震与主震距离空间分布具有分级的特点:当 $5.0 \leq \text{主震震级 } M < 6.5$ 时,最大余震优势分布范围是 0~20 km;当主震震级 $M \geq 6.5$ 时,最大余震优势分布范围是 5~40 km。在云南地区的主余型地震序列中有 68% 的最大余震发生在主震后 10 d 内,84% 发生在震后 30 d 内,97% 发生在震后 90 d 内。多震型序列中第一大震与第二大震发生的时间间隔和震中距的分布规律与主余型地震序列基本一致。

关键词:余震序列;统计特征;云南地区

中图分类号:P315.730.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-1375(2015)04-0037-08

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2015.04.007

0 引言

云南地区($21^{\circ} \sim 29^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ} \sim 106^{\circ}\text{E}$)是以云南省为主体且包括上述所设定的经纬度范围内部分相邻区域的地域总称。云南地处印度板块与欧亚板块中国大陆碰撞带东缘,构造运动剧烈,地震活动显著,属于典型的板缘、板内地震混合型地区^[1]。云南地区新构造运动十分活跃,新构造运动孕育了一系列中强地震^[2],仅 1965 年以来,云南地区就发生了 164 次 $M \geq 5.0$ 级地震,地震次数统计剔除前震、余震,震群(双震)只统计最大地震¹。一个大地震后常常伴随一系列余震,余震序列的研究有助于人们了解地震的成因及其发生过程,而且某些强余震也可能引起相当的破坏^[3]。当强余震震级大且距离主震较远时,可能在强余震震中附近造成比主震更严重的破坏^[4]。综上所述,研究云南地区中强地震余震序列特征是具有迫切需求和现实意义的。

余震序列的研究起步较早,也比较广泛。20 世纪 50、60 年代,已有学者从理论和实验上解释了余

震发生的机制^[5],系统地研究了余震的频度衰减^[6]。另外,也有学者综合分析了多个余震序列的特性^[7]。近年来有学者研究分析了余震序列的统计特征:蒋海昆等^[8]依据 1970 年以来记录相对完整的 294 次 5.0 级以上地震序列资料,研究中国大陆中强地震余震序列统计特征,探讨序列类型、最大余震震级、强余震活动持续时间等与主震震级及主震断层性质之间的关系;任雪梅等^[9]通过对西南地区 1900 年以来 5 级以上地震发生 1 个月内强余震资料的统计,得到了主震震级与余震震级、时间间隔及震中距之间的经验关系和统计规律。

本文通过研究 1965 年以来 68 个主余型地震序列和 36 个多震型地震序列的部分统计特征,分析主余型序列中最大余震与主震(多震型序列中第一大震与第二大震)的震级差、距离和时间间隔的关系。在云南地区发生破坏性地震后,根据主震震级大小,可粗略地估计序列最大余震震级和可能发生时间、可能发生空间范围,为强余震预测及序列强余震活动时间和空间范围估计提供统计性参考,以合

收稿日期:2015-03-29

基金项目:云南省地震局传帮带项目;云南中强地震序列研究资助(C3-2014001)

作者简介:蒋飞蕊(1987—),女,云南昆明人,助理工程师,主要从事地震监测技术研究、地震编目工作。E-mail:jiangfr_2009@126.com

1 目录源自《中国强地震目录(公元前 23 世纪—2005 年 6 月)》(中国地震局监测预报司管理处,2005 年 9 月),2005 年 7 月至 2014 年 12 月目录是中国地震台网中心提供的目录(<http://data.earthquake.cn/data/>)

理考虑强余震影响,为抗震救灾工作和震后恢复重建工作提供决策参考。

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序列统计研究的基础,按照基于震级差的序列分类思路^[10],以主震 M 与 12 个月内的最大余震 M_0 之间的震级差 $\Delta M = M - M_0$ 进行序列类型划分: $\Delta M \geq 2.5$ 为孤立型, $0.6 \leq \Delta M < 2.5$ 为主余型, $\Delta M < 0.6$ 为震群型或双震型。

选取云南(云南省部分)1965—2014 年 $M \geq 5.0$ 地震序列 108 个,其中 1965—2011 年数据源于《云南省地震目录》²;2012—2014 年数据源于《云南省月报目录》³。从序列主震震级来看,其中 $M5.0 \sim 5.9$ 地震 77 次, $M6.0 \sim 6.9$ 地震 24 次, $M7.0 \sim 7.9$ 地震 7 次。

从序列类型来看,依据上述序列类型划分标准,

孤立型 4 个、主余型 68 个、多震型 36 个,分别约占 3.7%、63.0%及 33.3%。这些序列资料,构成了本研究的基础数据。与以往 95 个序列得到的统计结果^[1]相比较,孤立型和主余型所占比例有所增加,而多震型比例有所减少。从总体来看,在云南地区,主余型地震占比最大,其次是多震型,占比也较大,这与皇甫岗等^[11]研究结论一致。

由于不同类型地震序列最大余震震级、活动持续时间、活动空间分布有不同的规律,云南地区有记录的孤立型地震序列数量较少,所以取 1965 年以来的主余型和多震型地震序列作为研究对象。主余型地震序列以主震发生后半年内的余震数据建立主震—最大余震目录,并统计了最大余震与主震的距离和最大余震与主震发生的时间间隔(表 1);多震型地震以第一大震发生后半年内发生的第二大震数据建立地震目录,并统计了第一大震与第二大震的距离以及发生时间间隔(表 2)。

表 1 主余型地震序列的有关参数、最大余震与主震距离和时间间隔

序号	序列名称	主震				主震				最大余震与 主震距离/ km	最大余震与 主震时间 间隔/h
		震级	时间	纬度/ (°N)	经度/ (°E)	震级	时间	纬度/ (°N)	经度/ (°E)		
1	中甸地震	M6.4	1966-09-28 22:00	27.5	100.1	M4.6	1966-09-29 07:49	27.4	100.2	16	9.82
2	通海地震	M7.8	1970-01-05 01:00	24.1	102.6	M5.7	1970-02-02 11:39	24.2	102.3	39	682.65
3	普洱地震	M6.2	1970-02-07 06:10	22.9	100.8	M5.5	1970-02-07 06:32	23.1	100.9	25	0.37
4	保山地震	M5.8	1971-02-05 17:10	25.3	99.5	M4.6	1971-02-06 14:25	25.1	99.6	25	21.23
5	思茅地震	M6.7	1971-04-28 23:31	22.8	101.1	M6.0	1971-09-14 11:10	23.0	100.6	63	3 323.63
6	红河地震	M5.5	1972-01-23 10:05	23.4	102.4	M4.8	1972-02-03 15:22	23.4	102.3	20	269.27
7	思茅地震	M5.5	1972-08-27 22:49	22.8	100.6	M4.5	1972-09-11 14:22	22.7	100.6	11	351.53
8	彝良地震	M5.0	1973-04-22 13:46	27.4	103.9	M3.7	1973-04-22 15:25	27.7	104.1	39	1.63
9	思茅地震	M6.5	1973-08-16 11:58	22.8	101.0	M _L 5.2	1973-08-16 14:05	22.6	101.1	30	2.12
10	大关地震	M7.1	1974-05-11 03:25	28.1	104.0	M5.7	1974-06-15 15:02	28.3	104.1	23	851.62
11	楚雄地址	M5.6	1975-01-12 05:22	24.9	101.5	M3.9	1975-01-23 16:33	24.8	101.4	17	275.17
12	建水地震	M5.2	1975-07-09 21:55	23.9	103.1	M _L 3.0	1975-07-10 02:35	23.9	103.2	14	4.65
13	漾濞地震	M5.0	1975-09-04 05:50	25.8	99.9	M3.8	1975-09-20 11:38	25.8	99.8	5	389.78
14	勐腊地震	M5.5	1975-10-28 07:18	21.3	101.5	M4.0	1975-10-28 09:08	21.4	101.6	11	1.82
15	保山地震	M5.3	1976-11-03 13:41	25.0	99.3	M4.3	1977-02-03 05:28	25.0	99.3	9	2 199.78
16	普洱地震	M5.5	1978-09-10 07:11	23.0	101.2	M4.9	1978-09-13 00:39	23.0	101.0	17	65.47
17	普洱地震	M6.8	1979-03-15 20:52	23.1	101.3	M5.3	1979-03-15 20:58	23.0	101.1	17	0.08
18	木里地震	M5.5	1980-02-02 20:29	28.0	101.3	M4.4	1980-02-07 06:03	27.9	101.3	10	105.57
19	蒙自地震	M5.4	1980-06-18 05:45	23.4	103.7	M3.9	1980-06-18 07:01	23.3	103.7	11	1.25
20	剑川地震	M5.4	1982-07-03 16:13	26.6	99.8	M _L 4.3	1982-07-20 15:12	26.6	99.8	4	406.98
21	洱源地震	M5.0	1982-10-08 21:34	26.3	100.0	M _L 3.5	1982-11-25 02:23	26.2	99.7	31	1 132.82

2 云南省地震局,云南省地震目录,1965—2011 年.
3 云南省地震局,云南省地震月报目录,2011—2014 年.

续表 1											
序号	序列名称	主震				主震				最大余震与 主震距离/ km	最大余震与 主震时间 间隔/h
		震级	时间	纬度/ (°N)	经度/ (°E)	震级	时间	纬度/ (°N)	经度/ (°E)		
22	富宁地震	M5.7	1982-10-08 21:34	23.8	105.9	M3.5	1982-10-08 23:56	23.7	105.8	16	2.35
23	景洪地震	M5.4	1982-12-28 15:30	22.4	101.0	M3.4	1983-01-14 13:28	22.5	100.8	24	405.95
24	永平地震	M5.3	1982-12-28 16:00	25.5	99.4	M _L 2.9	1982-12-31 20:31	25.5	99.4	3	76.52
25	缅甸地震	M6.0	1984-04-24 06:29	22.1	99.2	M5.1	1984-04-24 11:34	22.0	99.2	11	5.07
26	建水地震	M5.3	1985-09-02 03:07	23.6	102.7	M _L 4.6	1985-09-02 16:57	23.6	102.7	2	13.82
27	鹤庆地震	M5.3	1986-03-13 16:41	26.2	100.2	M _L 3.8	1986-03-22 09:48	26.2	100.2	4	209.10
28	富民地震	M5.3	1986-10-07 07:27	25.3	102.4	M _L 4.2	1986-10-08 06:39	25.3	102.4	1	23.18
29	鹤庆地震	M5.1	1987-05-18 10:03	26.2	100.2	M _L 3.8	1987-05-18 12:45	26.1	100.2	8	2.68
30	宁蒗地震	M5.5	1988-01-10 15:43	27.2	100.9	M _L 3.5	1988-01-17 19:46	27.3	101.0	6	172.05
31	宁蒗地震	M5.0	1991-04-12 04:32	27.3	101.0	M _L 3.9	1991-04-13 20:28	27.2	101.0	5	39.92
32	普洱地震	M6.3	1993-01-27 04:32	22.9	101.1	M _L 5.3	1993-01-27 13:00	22.9	101.1	6	8.47
33	中甸地震	M5.8	1993-07-17 17:46	27.8	99.7	M _L 4.2	1993-07-29 20:23	27.9	99.7	8	290.60
34	姚安地震	M5.6	1993-08-14 22:30	25.5	101.3	M _L 4.3	1993-08-14 22:34	25.4	101.2	5	0.07
35	澜沧地震	M5.2	1995-02-18 08:14	23.0	99.7	M _L 3.2	1995-03-21 21:39	22.5	99.7	59	757.42
36	武定地震	M6.5	1995-10-24 06:46	25.8	102.3	M5.3	1995-10-25 01:43	25.9	102.3	7	18.93
37	越南地震	M5.2	1995-11-10 04:55	22.2	102.5	M4.3	1995-11-10 07:15	22.1	102.5	12	2.32
38	丽江地震	M7.0	1996-02-03 19:14	27.3	100.2	M6.0	1996-02-05 00:58	27.0	100.3	37	29.72
39	澄江地震	M5.2	1999-11-25 00:40	24.6	102.9	M _L 3.8	1999-12-06 07:34	24.6	102.9	6	270.90
40	姚安地震	M6.5	2000-01-15 07:37	25.6	101.1	M5.9	2000-01-15 07:42	25.6	101.0	17	0.08
41	武定地震	M5.1	2000-08-21 21:25	25.8	102.2	M _L 3.8	2000-08-21 22:52	25.8	102.3	10	1.45
42	宁蒗地震	M5.8	2001-05-24 05:10	27.6	100.8	M _L 4.6	2001-06-24 16:35	27.6	100.9	8	755.40
43	楚雄地震	M5.3	2001-07-10 07:51	24.9	101.4	M _L 3.0	2001-07-10 08:07	24.8	101.4	11	0.27
44	永胜地震	M5.9	2001-10-27 13:35	26.2	100.6	M _L 4.1	2001-10-27 14:06	26.2	100.6	7	0.50
45	鲁甸地震	M5.6	2004-08-10 18:26	27.2	103.6	M4.5	2004-08-10 20:48	27.2	103.6	6	2.35
46	保山地震	M5.3	2004-10-13 19:06	25.1	99.1	M4.7	2005-01-07 23:50	25.2	98.8	32	2 068.72
47	宾川地震	M5.0	2004-12-26 09:18	25.9	100.6	M _L 3.9	2004-12-26 11:31	25.8	100.5	14	2.22
48	双柏地震	M5.0	2004-12-26 15:30	24.7	101.5	M4.3	2004-12-26 15:31	24.7	101.5	5	0.02
49	文山地震	M5.3	2005-08-13 12:58	23.6	104.1	M _L 3.8	2005-10-16 17:19	23.6	104.1	7	1 540.33
50	墨江地震	M5.2	2006-01-03 09:05	23.3	101.6	M4.1	2006-02-16 09:52	23.3	101.6	4	1 056.78
51	宁洱地震	M6.4	2007-06-03 05:34	23.1	101.0	M5.1	2007-06-03 10:49	23.0	101.1	8	5.23
52	盈江地震	M5.0	2008-03-21 20:36	24.6	97.7	M4.1	2008-03-21 21:45	24.6	97.8	17	1.15
53	盈江地震	M5.9	2008-08-21 20:24	25.1	98.0	M5.0	2008-09-03 14:27	24.9	97.9	22	306.03
54	姚安地震	M6.0	2009-07-09 19:19	25.6	101.0	M5.2	2009-07-10 17:02	25.6	101.0	0	21.70
55	宾川地震	M5.0	2009-11-02 05:07	25.9	100.7	M _L 3.1	2009-11-02 06:04	26.0	100.7	3	0.95
56	元谋地震	M5.1	2010-02-25 12:56	25.4	101.9	M _L 3.5	2010-02-25 12:58	25.4	101.9	2	0.02
57	盈江地震	M5.8	2011-03-10 12:58	24.7	97.9	M _L 4.4	2011-03-10 13:03	24.7	97.9	2	0.08
58	缅甸地震	M5.1	2011-11-28 23:06	25.2	97.6	M _L 4.3	2011-11-29 23:15	25.2	97.5	10	24.15
59	宁蒗地震	M5.7	2012-06-24 15:59	27.7	100.7	M _L 3.9	2012-06-26 14:21	27.8	100.7	10	46.35
60	香格里拉 地震	M5.9	2013-08-31 08:04	28.2	99.4	M4.7	2013-8-31 08:27	28.2	99.5	12	0.37
61	鲁甸地震	M6.6	2014-08-03 16:30	27.1	103.3	M4.4	2014-08-04 03:30	27.1	103.4	4	11.00
62	景谷地震	M6.9	2014-10-07 21:49	23.4	100.6	M5.9	2014-12-06 02:43	23.3	100.5	11	1 420.90

注:统计地震序列中,最大的地震(主震),发生在主震前的叫前震,不作统计,统计发生在主震后的最大余震;部分序列中最大余震发生地点(经纬度)没有记录的不作统计。

表 2 多震型地震序列的有关参数、第一大震与第二大震距离和时间间隔

序号	序列名称	第一大震				第二大震				第一大震与 第二大震 距离/km	第一大震与 第二大震时间 间隔/h
		震级 (M)	时间	纬度/ (°N)	经度/ (°E)	震级 (M)	时间	纬度/ (°N)	经度/ (°E)		
1	东川地震	6.5	1966-02-05 23:12	26.2	103.2	6.2	1966-02-13 18:44	26.1	103.2	11	187.53
2	腾冲地震	4.9	1973-06-01 21:02	24.9	98.6	5.1	1973-06-02 00:39	24.9	98.6	2	3.60
3	丽江地震	5.0	1975-12-01 02:22	27.1	100.3	4.6	1975-12-01 02:33	27.2	100.4	18	0.17
4	思茅地震	5.7	1976-02-16 22:45	22.9	100.6	5.5	1976-02-19 17:38	22.7	100.6	16	66.87
5	龙陵地震	7.3	1976-05-29 20:23	24.4	98.6	7.4	1976-05-29 22:00	24.6	98.8	24	1.62
6	盐源—宁蒗 地震	6.7	1976-11-07 02:04	27.5	101.1	6.4	1976-12-13 14:36	27.4	101.1	17	876.53
7	大理地震	5.3	1978-05-19 20:58	25.5	100.3	4.9	1978-05-20 09:40	25.6	100.3	2	12.68
8	盈江地震	5.4	1981-07-07 10:29	25.1	97.9	5.1	1981-08-14 14:09	25.2	97.9	7	915.67
9	景洪地震	5.1	1983-05-26 20:07	22.4	101.2	5.3	1983-05-28 11:28	22.4	101.2	6	39.33
10	缅甸地震	5.3	1985-08-23 11:19	25.4	97.7	5.5	1985-08-26 02:42	25.4	97.7	6	63.37
11	盐源地震	5.0	1986-07-10 09:15	27.5	101.4	5.3	1986-08-12 18:45	27.5	101.4	4	801.50
12	澜沧—耿马 地震	7.6	1988-11-06 21:03	22.8	99.7	7.2	1988-11-06 21:15	23.4	99.6	62	0.20
13	双江地震	5.0	1990-01-27 06:46	23.2	100.0	4.7	1990-01-27 07:27	23.4	100.1	17	0.68
14	施甸地震	4.9	1991-07-01 14:18	24.9	99.0	5.1	1991-07-22 19:58	24.8	99.0	4	509.67
15	缅甸地震	6.7	1992-04-23 22:18	22.4	99.0	6.8	1992-04-23 23:32	22.6	99.1	25	1.23
16	永胜地震	5.4	1992-12-18 19:21	26.4	100.6	5.1	1992-12-22 11:30	26.4	100.6	2	88.13
17	大姚地震	5.3	1993-02-01 03:33	25.9	101.4	4.8	1993-02-01 19:50	25.9	101.3	3	16.28
18	越南地震	5.2	1993-03-29 09:17	21.9	103.0	5.2	1993-03-30 21:57	22.0	103.0	6	36.65
19	景谷地震	4.9	1993-05-30 16:32	23.7	100.4	5.0	1993-06-03 09:15	23.4	100.1	41	88.72
20	临沧地震	5.0	1993-06-04 09:03	23.7	100.4	4.7	1993-06-04 09:42	23.7	100.4	2	0.63
21	缅甸地震	6.7	1994-11-11 08:51	25.1	97.3	6.3	1994-04-06 15:03	24.9	96.8	59	2 046.18
22	景洪—江城 地震	5.1	1997-11-25 10:38	23.6	100.4	5.6	1997-01-30 17:59	23.6	100.3	70	127.33
23	宁蒗地震	5.3	1998-10-02 20:49	21.9	101.1	5.2	1998-10-27 04:01	22.4	101.4	12	583.20
24	缅甸地震	5.0	1999-06-29 07:38	27.3	101.1	5.2	1999-07-15 18:35	27.2	101.0	2	394.93
25	老挝地震	5.2	2001-02-19 23:51	21.4	99.3	5.0	2001-02-20 03:02	21.4	99.3	10	3.18
26	施甸地震	5.2	2001-04-10 11:13	21.4	102.8	5.9	2001-04-12 18:46	21.4	102.9	20	55.55
27	大姚地震	6.1	2003-07-21 23:16	24.8	99.2	5.9	2003-10-16 20:28	24.8	99.0	8	2 085.18
28	鲁甸地震	5.0	2003-11-15 02:49	26.0	101.2	4.6	2003-11-26 21:38	25.9	101.3	4	282.82
29	会泽地震	4.7	2005-08-05 21:45	27.2	103.6	5.4	2005-08-05 22:14	27.2	103.6	2	0.48
30	盐津地震	5.1	2006-07-22 09:10	26.6	103.1	5.0	2006-08-25 13:51	26.6	103.2	4	820.68
31	腾冲地震	5.2	2011-06-20 18:16	28.0	104.1	5.3	2011-08-09 19:50	28.0	104.1	2	1 201.55
32	彝良地震	5.7	2012-09-07 11:19	25.0	98.7	5.6	2012-09-07 12:16	25.0	98.7	12	0.93
33	洱源地震	5.5	2013-03-03 13:41	27.6	104.0	5.1	2013-04-17 09:45	27.4	104.0	6	1 076.07
34	景谷地震	4.8	1994-07-05 19:59	25.9	99.8	5.0	1994-09-19 23:28	25.9	99.8	9	1 827.48
35	永善地震	5.2	2014-04-05 06:40	28.2	103.6	5.0	2014-08-17 06:07	28.1	103.5	7	3 215.45
36	盈江地震	5.6	2014-05-24 04:49	25.0	97.9	6.1	2014-05-30 09:20	25.0	97.8	6	148.50

注:统计地震序列中,第一大震是指多震型地震序列中第1次发生的所释放能量占全序列释放总能量的10%以上的地震;第二大震是指多震型地震序列中在第一大震后发生的第1个所释放能量占全序列释放总能量10%以上的地震。

2 云南地区主余型地震序列统计特征

2.1 最大余震与主震震级之间的关系

以主震震级(M)为横坐标,最大余震震级(M_0)为纵坐标,给出最大余震与主震震级关系(图 1):

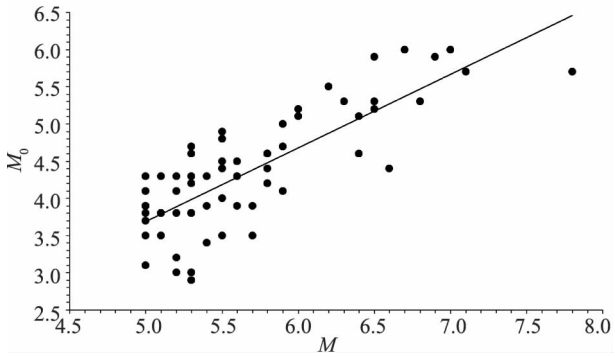


图 1 云南地区最大余震震级和主震震级之间的关系

最大余震活动强度 M_0 大致与主震强度 M 成正比,即 $M_0=kM-C$, C 为常数,随区域不同一般在 $0\sim3$ 或更大范围内变化^[12]。按此关系式,本文利用二元分析方法得到的最大余震 M_0 与主震 M 的经验关系式为:

$$M_0=0.94 M-0.97 \quad \sigma=0.495 2 \quad (1)$$

从图 1 可以看出,云南地区 $M\geq 5.0$ 地震序列半年内最大余震震级 M_0 与主震震级 M 总体呈正相关,但主震震级较低时相对离散。这个认识与任雪梅等^[9]对西南地区 1900 年以来 5 级以上地震发生 1 个月内最大余震震级与主震震级呈正相关的认识一致,也与蒋海昆等^[8]对中国大陆中强地震最大余震震级与主震震级呈正相关的认识一致。

2.2 最大余震与主震震中距的统计关系

Жалковский Н Д 和 Мучная В И^[13]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 有关,大体上满足 $\lg X=aM+b$ 。但不同研究者给出的常系数 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。

用最小二乘法拟合得到云南地区最大余震和主震的震中距 R 与主震 M 的经验关系式为:

$$\lg R=0.91 M-3.82 \quad \sigma=0.501 8 \quad (2)$$

在上述 62 次最大余震中,与主震距离最近为 0 km ,最远为 63 km 。考虑到云南地区的地震监测能力,以 5 km 为间隔统计了最大余震与主震的距离

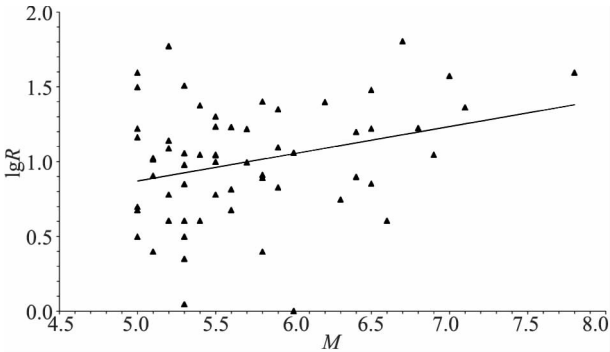


图 2 云南地区最大余震的震中距和主震震级之间的关系

(图 3)。在 62 组主余型地震序列中,主震震级 $5.0\leq M<6.5$ 的有 52 组,其中 44 组的最大余震与主震距离在 $0\sim20\text{ km}$ 之间,占 84.61% ;主震震级 $M\geq 6.5$ 的有 10 组,其中 8 组的最大余震与主震距离在 $5\sim40\text{ km}$ 之间,占 80% 。

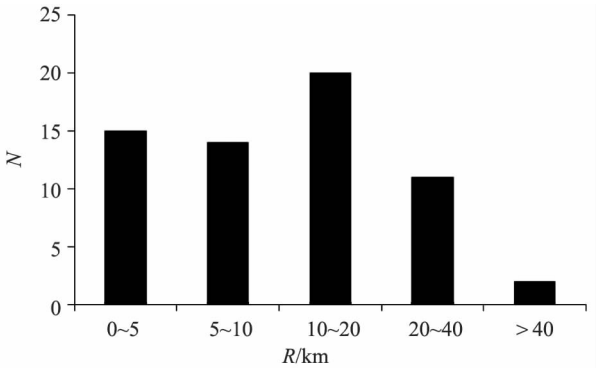


图 3 最大余震与主震的震中距以 5 km 为间隔数量统计

从上述分析可知,在云南地区最大余震距主震距离的空间分布具有分级的特点:当 $5.0\leq M<6.5$ 时,最大余震优势分布范围是 $0\sim20\text{ km}$;当 $M\geq 6.5$ 时,最大余震优势分布范围是 $5\sim40\text{ km}$ 。这一认识与陆远忠等^[14]由统计的中国大陆东部地区 1966—1979 年比较可靠的 25 个 6 级以上地震序列的资料所给出的最大直接余震一般分布在主震震中附近 50 km 范围内的结果相近;也与吕晓健等^[2]研究的川滇地区 12 次主震大于等于 6.5 级地震序列所给出的强余震距离分布的优势范围是距主震 $10\sim39\text{ km}$ 的结果接近。相关研究表明,地震震级越大,地震活断层在震时的破裂尺度越大,余震空间分布范围越大,这是出现上述现象的主要原因。此外,余震分布尺度可能还与区域构造条件等相关,可通过研究不同场地条件下主震震级相当的最大余震分布

范围进行求证。

2.3 最大余震与主震发生时间间隔的统计关系

以主震震级(M)为横坐标,最大余震与主震发生时间间隔的对数(lgT)为纵坐标,绘制 lgT 与主震震级关系图(图 4)。

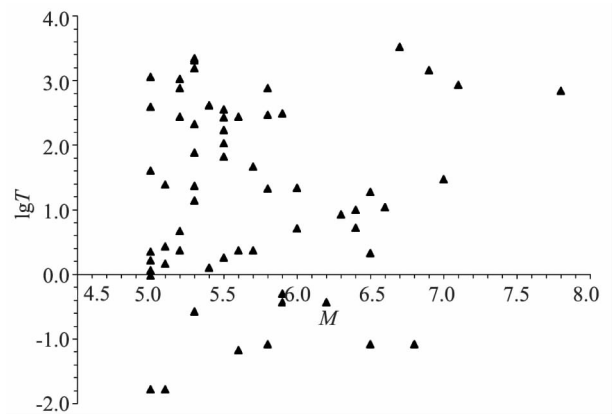


图 4 云南地区 lgT 和主震震级之间的关系

从图 4 可以看出,主震震级 M 与 lgT 离散程度较高,因此本文未给出最大余震与主震发生时间间隔和主震震级的关系式。

统计最大余震与主震发生时间间隔 T 的情况为: $T \leq 1 d$, 占 $33/62 = 53\%$; $T \leq 3 d$, 占 $38/62 = 61\%$; $T \leq 10 d$, 占 $42/62 = 68\%$; $T \leq 30 d$, 占 $52/62 = 84\%$ 。

由上述的统计结果可知,半年内 68% 的序列最大余震发生在震后 10 d 内, 84% 发生在震后 30 d 之内, 97% 发生在震后 90 d 之内。这些统计结果与蒋海昆等^[8]统计的中国大陆 1970—2005 年 294 次记录完整的 5 级以上地震序列中,最大余震发生在主震后 90 d 内的占全序列的 93% 的结论相吻合;同时与刘蒲雄等^[15]的认识“绝大多数序列的最大余震一般发生在主震后 3 个月内”相吻合。

将样本资料中每一个相同震级地震全部的最大余震与主震发生时间间隔(T)相加,再除以这个震级的样本总数 N ,得出各震级档地震的最大余震与主震发生时间间隔的平均值 Ta 与 M 的关系(图 5)。

进一步研究表明,最大余震与主震发生时间平均间隔 Ta 与主震震级 M 有关,如图 5 中所示。当 $M \leq 5.5$ 时, $Ta \leq 32 d$, 当 $5.5 < M \leq 6.5$ 时, $Ta \leq 12 d$; 当 $M > 6.5$ 时,不考虑 $M = 6.7$ 时这个离散点的情况下, Ta 在 1~60 d 之间。总体来看,在云南地区 $M \leq 6.5$ 的地震序列,当主震震级较高时,最大余震与主震平均时间间隔相对较短(Ta 较小),主震震级较低时最大余震与主震平均时间间隔相对较长(Ta 较大),这

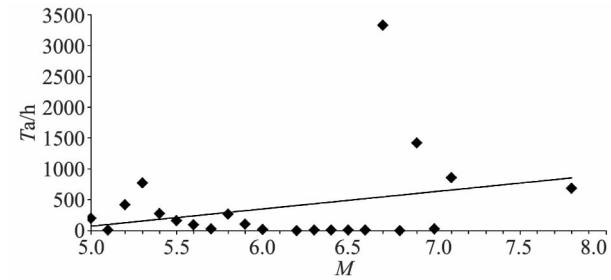


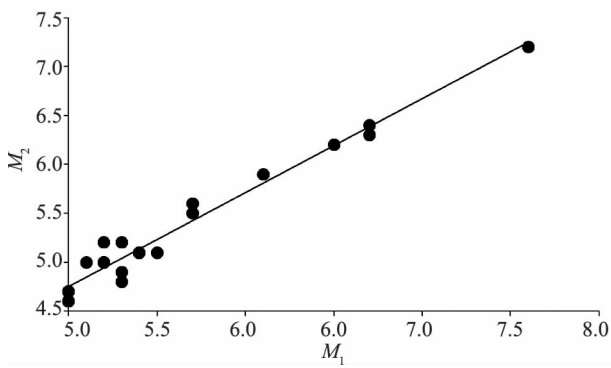
图 5 最大余震平均发生时间间隔与主震震级之间的关系

一认识与蒋海昆等^[8]对中国大陆地区最大余震与主震时间间隔的认识相一致, $M > 6.5$ 的地震序列与上述的认识不同,可能是样本数量较少的原因,有待样本数量增加后进一步研究分析。

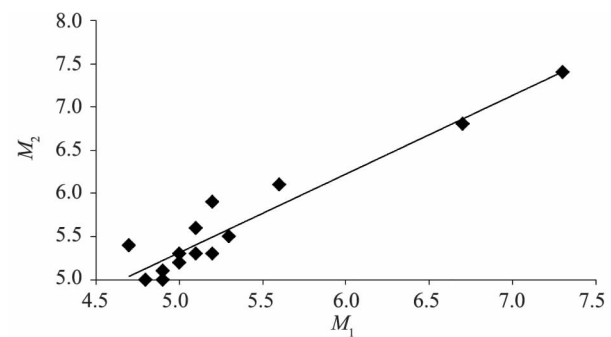
3 云南地区多震型地震序列统计特征

3.1 多震型序列的震级差

对于多震型序列,根据第一大震(M_1)与第二大震(M_2)的震级大小,分为 $M_1 \geq M_2$ 和 $M_1 < M_2$ 2 种情况来分析;以第一大震震级(M_1)为横坐标,第二大震震级(M_2)为纵坐标,给出 M_1 与 M_2 的关系(图 6 a、6 b)。



a $M_1 \geq M_2$



b $M_1 < M_2$

图 6 多震型序列 M_1 与 M_2 关系拟合图

使用最小二乘法对 2 种序列的线性关系式 $M_1 = a + b M_2$ 进行拟合,并求得相关系数^[16]。对于 $M_1 \geq M_2$ 和 $M_1 < M_2$ 2 种序列,其拟合关系式分别为:

$$M_2 = -0.065 + 0.962 M_1 \quad (M_1 \geq M_2, N = 21, r = 0.963) \quad (3)$$

$$M_2 = 0.757 + 0.911 M_1 \quad (M_1 < M_2, N = 15, r = 0.916) \quad (4)$$

其中 N 为统计样本数,式(3)和式(4)的相关系数都在 0.9 以上,说明其线性关系好。根据上述关系式,结合各地区 M_1 与 M_2 的大小统计规律,当第一大震发生后可以迅速地估算出第二大震震级,这在实际地震预测中有很重要的意义。

3.2 多震型与主余型震中距对比分析

主余型地震统计最大余震与主震的震中距 R ,多震型地震统计第二大震与第一大震震中距 R ,图 7 为震中距的占比统计图。

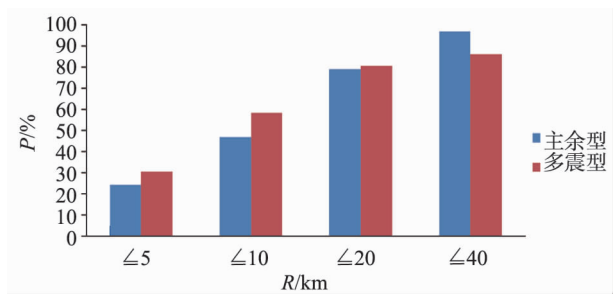


图 7 震中距的占比统计

在 36 组多震型地震序列中,最大震震级 $5.0 \leq M < 6.5$ 的有 30 组,其中有 28 组第一大震与第二大震震中距离在 0~20 km 之间,占 93.33%;主震震级 $M \geq 6.5$ 的有 6 组,其中 4 组第一大震与第二大震震中距离在 5~40 km 之间,占 66.67%。

考虑到云南地区地震监测能力,以 5 km 为间隔统计了第一大震与第二大震的距离。在多震型地震序列中震中距在 0~5 km 之间占 31%,高于主余型的 24%;震中距在 0~10 km 之间占 58%,高于主余型的 47%;震中距在 0~20 km 之间占 81%,略高于主余型的 79%;震中距在 0~40 km 之间占 86%,低于主余型的 97%。通过分析研究后发现,这是由于主余型序列中 6 级以上震例占比高于多震型序列中占比所致。

3.3 多震型与主余型时间间隔对比分析

主余型地震统计最大余震与主震发生时间间隔 T ,多震型地震统计第一大震与第二大震发生时间

间隔 T ,图 8 为时间间隔的占比统计图。

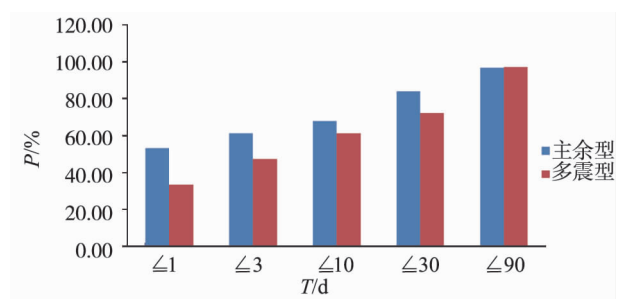


图 8 时间间隔的占比统计

多震型地震序列第一大震与第二大震发生时间间隔 T 的统计情况为: $T \leq 1$ d,占 12/36=33%; $T \leq 3$ d,占 17/36=47%; $T \leq 10$ d,占 22/36=61%; $T \leq 30$ d,占 26/36=72%; $T \leq 90$ d,占 26/36=97%。

从图 8 可见,多震型序列半年内 33% 的序列第二大震发生在第一大震后 1 d 内,远低于主余型地震序列的 53%;47% 的发生在震后 3 d 内,低于主余型地震序列的 68%;61% 的发生在震后 10 d 内,略低于主余型地震序列的 84%;72% 的发生在震后 30 d 内,低于主余型地震序列的 97%;97% 的发生在震后 90 d 内,与主余型地震序列基本一致。

4 讨论和结论

通过对云南地区 1965 年以来 68 个主余型地震序列和 36 个多震型地震序列的统计分析,得出如下结论:

1)云南地区主余型序列半年内最大余震震级 M_0 与主震震级 M 总体呈正相关,但主震震级较低时相对离散。

2)云南地区主余型序列最大余震距主震距离空间分布具有分级的特点,当 $5.0 \leq M < 6.5$ 时,最大余震优势分布范围是 0~20 km;当 $M \geq 6.5$ 时,最大余震优势分布范围是 5~40 km。多震型序列中第一大震与第二大震震中距的分布规律与主余型的基本一致。

3)在云南地区主余型地震序列中,68% 的序列半年内最大余震发生在震后 10 d 内,84% 的发生在震后 30 d 之内,97% 的发生在震后 90 d 之内。最大余震与主震平均时间间隔 T_a 与主震震级 M 有关: $M \leq 6.5$ 的地震序列,当主震震级较高时,最大余震与主震平均时间间隔相对较短,主震震级较低时最大余震与主震时间间隔相对较长,这一认识与蒋海昆等^[8]对中国大陆地区最大余震与主震时间间

隔的认识相一致; $M>6.5$ 的地震序列与上述的认识不同,可能是样本数量较少的原因,有待样本数量增加后进一步研究分析。多震型序列中第二大震发生在震后 3 d 内的震例占比低于主余型序列,在震后 90 d 内的震例占比与主余型基本一致。

4)在主余型地震序列中,由前述的式(1)及最大

余震活动范围、活动时间的统计结果,依据序列主震震级可对序列半年内最大余震震级和可能发生的时间、空间范围进行粗略的估计,为最大余震震级预测及序列最大余震活动时间和空间范围估计提供统计性参考;多震型地震序列由前述的式(3)或式(4)也可按此方法开展后续地震的预测预估工作。

参考文献:

[1] 皇甫岗,陈颢,秦嘉政,等. 云南地震活动性[M]. 昆明:云南科技出版社,2010.

[2] 周海涛,郭良迁. 利用跨断层形变资料研究云南地区主要断裂带应变特征[J]. 华北地震科学,2013, 31(1):59-63.

[3] 王碧泉,王春珍. 余震序列的时空特征[J]. 地震学报,1983,5(4):383-395.

[4] 吕晓健,高孟潭,高战武,等. 强余震和主震地面运动分布比较研究[J]. 地震学报,2007,29(3):295-301.

[5] Benioff H. Earthquakes and rock creep (Part I: creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks)[J]. Bulletin of the SeisMological Society of America,1951,41(1):31-62.

[6] Mogi K. On the tiMe distribution of aftershocks accompanying the recent Major earthquakes in and near Japan[J]. 1962.

[7] 谷继成,谢小碧,赵莉. 强余震的空间分布特征及其理论解释[J]. 地震学报,1982,4(4):380-388.

[8] 蒋海昆,曲延军,李永莉,等. 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,2006,49(4):1110-1117.

[9] 任雪梅,高孟潭,刘爱文,等. 1900 年以来我国西南地区强余震统计特征[J]. 震灾防御技术,2009, 4(2):200-208.

[10] 吴开统. 地震序列概论[M]. 北京大学出版社,1990.

[11] 皇甫岗,秦嘉政,李忠华,等. 云南地震类型分区特征研究[J]. 地震学报,2007,29(2):142-150.

[12] Kisslinger C, Jones L M. Properties of aftershocks in southern California[J]. J Geophys Res,1991,96:11947-11958.

[13] Жалковский Н Д, Мучная В И. О пространственных и временных распределения хвостершоков[J]. Геология и Геофизика,1981,8:108-116.

[14] 陆远忠,吴培稚,沈建文. 直接余震和间接余震[J]. 地球物理学报,1983,26(4):355-365.

[15] 刘蒲雄,陈修启,吕晓健,等. 地震序列的后续显著地震的预测研究[J]. 地震学报,1996,18(1):27-33.

[16] 王红卫,周翠英,王华林. 最大后续地震的强度估计及早期预测应用[J]. 华北地震科学,1997,15(2):67-75.

Statistical Characteristics of Moderate and Strong Earthquake Sequence in Yunnan

JIANG Fei-rui, YE Jian-qing, YANG Jing-qiong

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

Abstract: The statistical characteristics of 108 moderate and strong $M\geqslant 5.0$ earthquake sequences in Yunnan province is analyzed including the sequence type, the magnitudes, the distribution range, the time interval, and the relationship between the main shock and the aftershocks. The results show that in Yunnan area, earthquake sequence of isolation type, the main shock and after shock type, and multi-shock type accounts for about 3.7%, 63.0% and 3.7% respectively; to the earthquake sequences with main shock $M\geqslant 5.0$, the magnitude of their aftershocks is positively correlated with the magnitude of their main shock. If the main shock is $5.0\leqslant M<6.5$, the maximum aftershocks are in the range of 0—20 km from the epicenter of the main shock; if the main shock is $M\geqslant 5.0$, the maximum aftershocks are in the range of 5—40 km. of all the maximum aftershocks, 68% occurs within 10 days after its main shock, 84% occurs within 30 days, 97% occurs within 90 days. To main shock and aftershock type earthquake sequence and multi-shock type earthquake sequence, the distribution of time interval and epicenter distance between the maximum aftershock and second maximum aftershock are basically the same.

Key words: earthquake sequence; statistical characteristic; Yunnan area