

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2021.01.011

祁玉萍,龙锋,林圣杰,等. 2021. 南北地震带中段及周边中强地震序列类型的特征[J]. 地震地质, 43(1): 177—196.

QI Yu-ping, LONG Feng, LIN Sheng-jie, et al. 2021. A study on the earthquake sequence type in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions[J]. Seismology and Geology, 43(1): 177—196.

南北地震带中段及周边中强地震序列类型的特征

祁玉萍¹⁾ 龙 锋¹⁾* 林圣杰¹⁾ 肖本夫¹⁾
赵小艳²⁾ 王培玲³⁾ 冯建刚⁴⁾

1) 四川省地震局, 成都 610041

2) 云南省地震局, 昆明 650224

3) 青海省地震局, 西宁 810001

4) 甘肃省地震局, 兰州 730000

摘 要 文中根据南北地震带中段及附近区域 1973 年以来 86 次 5.0 级以上的地震序列统计结果, 对地震序列类型和空间分布进行分析, 结果表明: 1) 研究区域内的地震序列以主余型为主(51%), 多震型次之(29%), 孤立型最少(20%); 同一序列类型中, 随着地震震级增大, 主余型地震所占的比例增加, 多震型、孤立型逐渐减少, 7.0 级以上地震以主余型为主, 无孤立型地震; 对于不同破裂类型, 逆冲型地震中主余型最多, 多震型地震更可能为走滑和正断性质的地震。2) 主余型和多震型地震序列的主震与最大余震震级的线性关系相对较好; 绝大多数地震的最大余震多发生在震后 20d 内, 主余型最大余震集中在震后 3d 内发生, 多震型地震中次大地震集中在震后 12d 内发生, 孤立型地震的最大余震多发生在地震当天。3) 地震序列空间分布显示, 主余型地震分布相对较广, 多震型地震主要集中在川西巴塘—理塘、川东马边—昭通一带、川北松潘和滇西北云龙、姚安、龙陵及附近区域, 甘孜—玉树断裂带、鲜水河断裂带 NW 段及四川盆地等地更易发生孤立型地震。4) 地震序列类型的空间分布可能与本区域的地质构造和历史地震活动存在一定的关系。

关键词 南北地震带中段 地震序列类型 最大余震震级 序列空间分布特征

中图分类号: P315.3+3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2021)01-0177-20

0 引言

余震序列研究及序列类型判定属于地震短期预测研究领域。准确的震后趋势判定是政府做出应急救援决策的重要依据, 对减少强余震可能导致的人员伤亡和经济损失具有重要意义。

中国对地震序列类型及特征的研究已有数十年历史。吴开统等(1990)和焦远碧(1998)利

〔收稿日期〕 2020-03-18 收稿, 2020-11-20 改回。

〔基金项目〕 中国地震局地震科技星火计划项目(XH21026Y)、国家重点研发计划项目(2018YFC150330501)、中央引导地方科技发展专项(2020ZYD026)和中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题(2019010107)共同资助。

* 通讯作者: 龙锋, 男, 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震定位和统计地震学研究, E-mail: longfeng1981@gmail.com。

用不同方法对序列类型的分类进行研究;蒋海昆等(2006b)基于中国大陆中强地震的余震序列研究发现,地震序列类型的空间分布具有明显的区域特征。多项研究发现,地震序列类型的空间分布特征不仅与区域构造、应力作用方式有关,同时也可能与历史地震活动、区域深部介质环境有一定关系(王华林等,1997;周翠英等,2001;皇甫岗等,2007;林松建等,2011;宋美琴等,2011)。

近年来,国家应急管理对时效性的要求越来越高,但在中强地震发生后的短期内,受余震观测样本较少的限制,很难使用常规的统计地震学分析方法进行快速研判。因此,基于以往的震例研究,事先对不同区域的地震序列类型进行划分,可为正确判断当前序列类型以及震后地震趋势的快速判定提供基础数据。

南北地震带中段位于青藏高原东南缘,稳定的华南块体西部受到印度板块与欧亚板块对接碰撞且持续向 N 推挤,使巴颜喀拉块体与川滇块体向 E、SE 运动,构造背景十分复杂(邓超东等,2002;徐锡伟等,2003)。区域及周边发育多条大型活动断裂,如鲜水河断裂带、龙门山断裂带、安宁河-则木河断裂带、金沙江断裂带等,这些断裂控制着区域构造变形和地震活动。有历史记载以来,该区强震活动频繁,仅自 2008 年汶川地震以来就相继发生了 2010 年青海玉树 7.1 级、2013 年四川芦山 7.0 级、2013 年甘肃岷县-漳县 6.6 级、2014 年云南鲁甸 6.5 级、2014 年四川康定 6.3 级、2017 年四川九寨沟 7.0 级和 2019 年长宁 6.0 级等一系列 6~7 级地震(图 1)。多项研究结果表明,南北带中段区域内仍有发生强震的危险性(徐锡伟等,2017;徐晶等,2019),这也进一步凸显了地震序列类型特征研究的重要性和必要性。

本文收集了南北地震带中段及附近区域 1973 年以来 5.0 级以上地震的地震序列资料,据此深入分析地震序列类型和空间分布特征,并讨论不同序列类型的成因,所得结论可为快速判定中强地震震后的早期趋势提供参考依据。

1 地震序列资料的选取与划分原则

1973 年 1 月以来,南北地震带中段及附近区域($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $96^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)共发生 5 级以上地震 266 次,去除 5 级以上余震并将多震型地震算为 1 次事件进行统计后,梳理得到 5 级以上地震序列 86 组(表 1),其中 5.0~5.9 级地震 55 组,6.0~6.9 级地震 23 组,7.0~7.9 级地震 7 组,8.0 级以上地震 1 组,最大地震为 2008 年 5 月 12 日发生的汶川 8.0 级地震。文中分析所用的震源机制解类型以《中国震例》(张肇诚,1988,1990a, b, c, 2000;陈棋福,2002a, b, c, 2008;蒋海昆,2014a, b;杜方等,2018)研究资料为基础,地震序列目录以《中国震例》序列目录为主,并基于四川地震台网目录进行校对。

为保证结果统一,对于采用 M_L 震级标度的地震序列,根据 $M_S = 1.13M_L - 1.08$ 换算为 M_S 震级,并以序列主震 M_0 与最大余震 M_1 之间的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列类型划分:1) $\Delta M \geq 2.5$ 且余震次数较少为孤立型;2) $0.6 \leq \Delta M < 2.5$ 为主余型,包括主余型序列和前震-主震-余震型序列;3) $\Delta M < 0.6$ 为多震型,包括震群型和双震型序列(蒋海昆等,2006a)。基于上述划分原则对部分地震序列类型进行修正,其中有 7 次地震由震例资料中确定的主余型校正为孤立型,1 次地震由多震型校正为主余型。本文将使用校正后的序列类型开展相关分析。

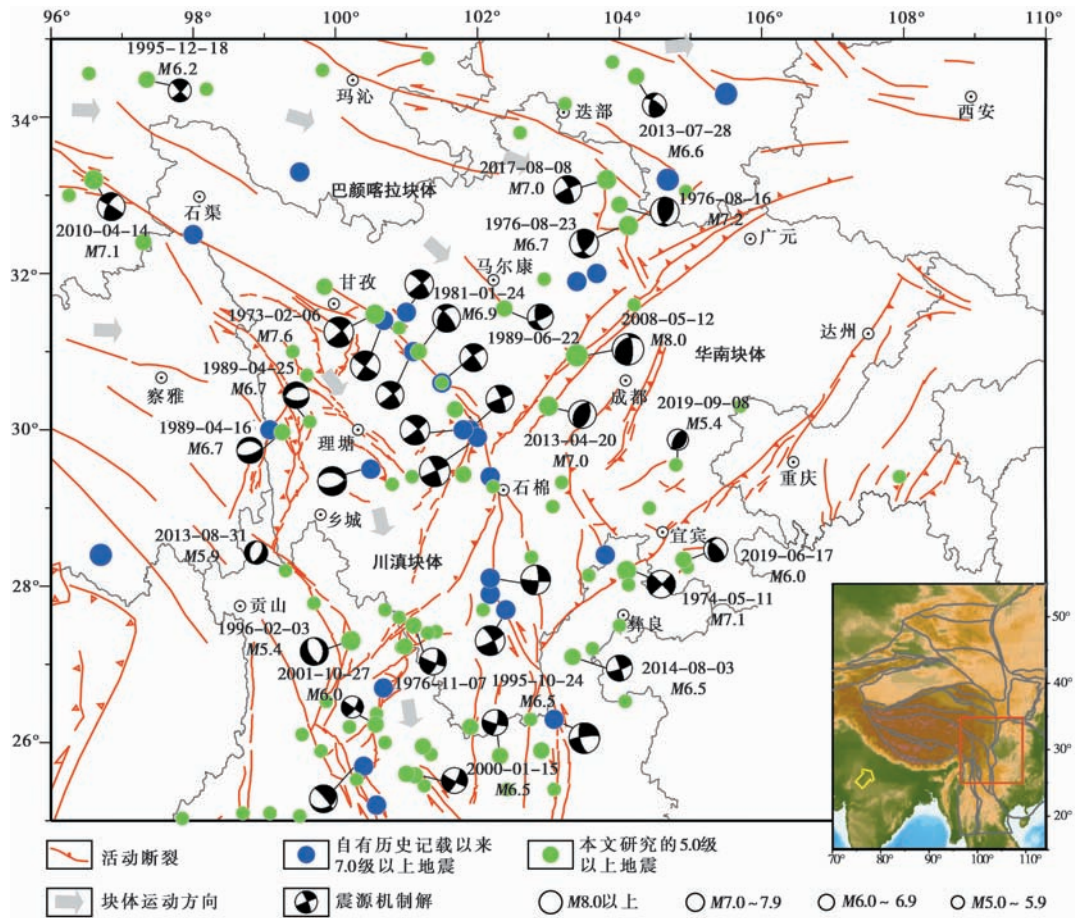


图 1 南北地震带中段及周边地区的活动构造、区域动力学与历史强震背景

Fig. 1 The active structures, regional dynamics and background of historical strong earthquakes in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions.

2 地震序列类型的统计特征

2.1 不同序列类型的比例关系

86 个震例中包括主余型 44 次, 占 51%; 多震型 25 次, 占 29%; 孤立型 17 次, 占 20%。整个区域以主余型地震序列为主。蒋海昆等(2006c)的研究结果显示, 中国大陆 6.0 级以上地震序列属于主余型的自然概率较大(59%), 其次为多震型(18%), 孤立型的自然概率最小(23%)。比较二者结果可发现, 在研究区的地震活动中, 主余型低于大陆活动的平均水平, 多震型地震序列相对较多, 孤立型地震的比例略低于大陆地区的统计结果。

值得注意的是, 在 86 个地震序列中, 1989 年小金 6.6 级地震序列、1993—1995 年汶川 5 级震群和 2013 年鲁甸 5 级震群为 3 次比较特殊的地震序列。1989 年 3 月 1 日、1989 年 9 月 22 日和 1991 年 2 月 18 日在四川小金先后发生了 5.0、6.6 和 5.0 级地震, 虽然 3 次地震活动时间的间隔较长, 但 2 次 5.0 级地震与 6.6 级地震属同一发震构造, 且有类似的受力环境和地震震

表 1 1973 年以来南北地震带中段及邻区 5.0 级以上地震序列的类型统计
Table 1 Sequence type statistics of $M \geq 5.0$ earthquakes in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions since 1973

序号	南北地震带中段及邻区 5.0 级以上强震				最大余震(次大地震)				序列类型	校正后序列类型	所属序列分区	
	发震时刻	北纬 / (°)	东经 / (°)	震级 M	发震地点	破裂类型	发震时刻	震级 M				震级 M_L
1	1973-02-06 18:37:07	31.50	100.40	7.6	四川炉霍	走滑	1973-02-08 00:06:28	6.3		1.24	主余	V
2*	1973-08-11 15:15:36	32.90	104.10	6.5	四川松潘	走滑	1974-01-16 06:50:25	5.8		157.65	多震	III
3	1974-05-11 03:25:18	28.20	104.10	7.1	云南大关	走滑	1974-06-15 15:02:58	5.7		35.81	主余	VII
4	1974-09-23 22:51:05	33.80	102.60	5.6	四川若尔盖	走滑	1974-09-23 22:58:17	2.3		0.02	孤立	I
5	1975-01-15 19:34:41	29.50	101.80	6.2	四川康定、九龙	走滑	1975-01-16 02:51:31	5.2		0.30	主余	V
6	1976-08-16 22:06:45	32.61	104.13	7.2	四川松潘	逆冲	1976-08-22 05:49:49	6.7		5.32	多震	III
7	1976-11-07 02:04:05	27.50	101.10	6.7	四川盐源	走滑	1976-12-13 14:36:57	6.4		36.52	多震	X
8	1978-05-19 20:58:56	25.53	100.30	5.3	云南大关	走滑	1978-05-20 09:40:52	4.9		0.53	多震	X
9	1978-07-13 05:49:55	31.93	102.94	5.4	四川黑水	走滑	1978-07-22 17:05:08	3.1	3.7	9.47	主余	II
10	1979-03-29 15:07:22	32.40	97.30	6.2	青海玉树	走滑	1979-03-29 17:20:00	3.1		0.09	孤立	IV
11	1981-01-24 05:13:47	31.00	101.17	6.9	四川道孚	走滑	1981-01-24 09:19:00	3.9		0.17	孤立	V
12	1982-06-16 07:24:29	31.83	99.85	6.0	四川甘孜	走滑	1982-06-16 17:09:00	3.3		0.41	孤立	IV
13	1982-07-03 16:13:31	26.53	99.87	5.4	云南剑川	走滑	1982-07-20 15:12:48	3.8	4.3	16.96	主余	X
14	1985-04-18 13:52:51	25.90	102.90	6.3	云南禄劝	走滑	1985-08-31 03:25:55	4.9	5.3	134.56	主余	XI
15	1986-03-13 16:41:18	26.20	100.20	5.3	云南鹤庆	走滑	1986-03-18 20:16:35	3.2	3.8	5.15	主余	X
16	1986-08-07 03:55:11	29.30	100.80	5.6	四川理塘	走滑	1986-08-09 13:42:14	2.0		2.42	孤立	IX
17	1986-08-12 18:45:49	27.42	101.42	5.2	四川盐源	走滑	1986-08-13 10:31:54	3.6	4.1	0.66	主余	X
18	1986-10-07 07:28:07	25.40	102.42	5.2	四川富民、武定	逆冲	1986-10-08 06:39:07	4.2		0.97	主余	XI
19	1987-01-08 02:19:05	34.17	103.23	5.9	甘肃迭部	逆冲	1987-03-03 09:27:23	4.1		54.30	主余	I
20*	1988-01-10 15:43:13	27.22	100.93	5.5	云南宁蒗	逆冲	1988-01-17 19:46:15	2.9	3.5	7.17	主余	X
21	1988-04-15 18:58:15	26.30	102.75	5.2	四川会东	走滑	1988-04-16 01:25:10	2.7		0.27	主余	XI
22	1988-06-02 14:11:42	30.60	101.50	5.0	四川道孚	走滑	1988-06-03 11:17:18	3.9		0.88	主余	V
23	1989-04-16 04:34:10	29.97	99.25	6.7	四川巴塘	正断	1989-04-25 10:13:20	6.7		9.24	多震	IX
24*	1989-06-09 22:46:03	29.27	102.22	5.2	四川石棉	走滑	1989-07-17 14:12:27	2.3	3.0	37.64	主余	V
25	1989-09-20 08:26:12	25.50	103.20	5.0	云南嵩明	走滑	1989-09-20 10:05:21	1.5		0.1	孤立	XI
26	1989-09-22 10:25:48	31.60	102.50	6.6	四川小金	走滑	1991-02-18 17:06:18	5.0		514.28	主余	II
27	1992-12-18 19:20:41	26.37	100.58	5.4	云南永胜	走滑	1992-12-22 11:30:16	5.1		3.67	多震	X
28	1993-02-01 03:33:29	25.85	101.35	5.3	云南大姚	走滑	1993-02-01 19:50:34	4.8		0.68	主余	X

续表1

序号	南北地震带中段及邻区5.0级以上强震				最大余震(次大地震)				校正后 序列类型	所属 序列分区			
	发震时刻	北纬 /(°)	东经 /(°)	震级 M	发震地点	破裂 类型	发震时刻	震级 M			震级 M _L	与主震时间 间隔/d	序列 类型
59	2010-04-14 07:49:36	33.20	96.60	7.1	青海玉树	走滑	2010-04-14 09:25:17	6.3	6.3	0.07	主余	IV	
60	2011-04-10 17:02:42	31.30	100.82	5.3	四川炉霍	走滑	2011-04-21 07:45:23	1.1	1.9	10.625	孤立	V	
61	2011-06-20 18:16:49	25.10	98.70	5.2	云南腾冲	走滑	2011-08-09 19:50:16	5.2	5.2	50.06	多震	X	
62	2012-06-24 15:59:32	27.73	100.67	5.7	云南宁蒗	正断	2012-06-26 14:21:14	3.3	3.9	1.93	主余	X	
63	2012-09-07 11:19:40	27.50	103.98	5.7	云南彝良	走滑	2012-09-07 12:16:29	5.6	5.6	0.04	多震	VII	
64	2013-01-18 20:42:50	30.96	99.40	5.4	四川白玉	走滑	2013-01-18 21:17:39	3.3	3.9	0.02	主余	IX	
65	2013-03-03 13:41:15	25.90	99.80	5.5	云南洱源	正断	2013-04-17 09:45:54	5	5	44.84	多震	X	
66	2013-04-20 08:02:46	30.30	103.00	7.0	四川芦山	逆冲	2013-04-21 17:05:23	5.4	5.4	1.38	主余	III	
67	2013-07-22 07:45:56	34.52	104.23	6.6	甘肃岷县	逆冲	2013-07-22 09:12:34	5.6	5.6	0.06	主余	I	
68	2013-08-31 08:04:18	28.20	99.40	5.8	云南香格里拉	正断	2013-08-28 04:44:48	5.1	5.1	-3.14	主余	X	
69	2014-04-05 06:40:34	28.14	103.57	5.2	云南永善	走滑	2014-08-17 06:07:58	5.0	5.0	133.98	多震	VII	
70	2014-05-30 09:20:13	25.03	97.80	6.1	云南盈江	走滑	2014-05-24 04:49:21	5.6	5.6	-6.19	多震	X	
71	2014-08-03 16:30:10	27.10	103.30	6.5	云南鲁甸	走滑	2014-08-04 03:30:31	4.2	4.2	0.46	主余	VII	
72	2014-10-01 09:23:27	28.40	102.80	5.0	四川越西	走滑	2014-10-20 14:04:52	2.4	3.1	19.20	孤立	VI	
73	2014-11-22 16:55:25	30.26	101.69	6.3	四川康定	走滑	2014-11-25 23:19:07	5.8	5.8	3.27	多震	V	
74	2015-01-14 13:21:39	29.30	103.20	5.0	四川金口河	逆冲	2015-01-14 19:21:36	2.5	2.5	0.25	孤立	VII	
75	2015-10-12 18:04:14	34.36	98.19	5.2	青海玛多	走滑	2015-10-13 01:37:21	2.6	3.2	0.31	主余	II	
76*	2015-10-30 19:26:49	25.06	99.50	5.1	云南昌宁	正断	2016-01-09 17:34:59	2.0	2.8	70.92	主余	X	
77	2016-05-18 00:48:47	26.10	99.53	5.0	云南云龙	走滑	2016-05-18 01:05:11	4.6	4.6	0.01	多震	X	
78	2016-09-23 01:23:11	30.10	99.64	5.1	四川理塘	正断	2016-09-23 00:47:12	4.9	4.9	-0.02	多震	IX	
79	2017-03-27 07:55:00	25.89	99.80	5.1	云南漾濞	走滑	2017-03-27 07:40:28	4.7	4.7	-0.01	多震	X	
80	2017-08-08 21:19:46	33.20	103.82	7.0	四川九寨沟	走滑	2017-08-09 10:17:02	4.8	4.8	0.54	主余	III	
81*	2017-11-23 17:43:33	29.40	107.94	5.0	重庆武隆	正断	2017-11-29 10:34:08	2.5	3.1	5.70	主余	VIII	
82	2018-05-06 17:23:39	34.56	96.53	5.3	青海称多	走滑	2018-05-05 00:37:43	4.8	4.8	-1.70	多震	II	
83	2018-10-31 16:29:55	27.70	102.08	5.1	四川西昌	走滑	2018-11-20 06:01:11	3.3	3.3	19.56	主余	VI	
84	2018-12-16 12:46:07	28.24	104.95	5.7	四川兴文	走滑	2019-01-03 08:48:06	5.3	5.3	17.52	多震	VIII	
85	2019-06-17 22:55:43	28.34	104.90	6.0	四川长宁	走滑	2019-07-04 10:17:58	5.6	5.6	16.47	多震	VIII	
86	2019-09-08 06:42:13	29.55	104.79	5.4	四川威远	逆冲	2019-09-09 08:52:39	3.3	3.3	1.08	主余	VIII	

注 序列统计主要基于《中国震例》(张肇诚, 1988, 1990a, b, c, 2000; 陈棋福, 2002a, b, c, 2008; 蒋海昆, 2014a, b; 杜方等, 2018); 对于多震型地震, 主震选用最大震级地震, 最大余震即次大地震; *号表示序列类型发生改变。

源机制,综合分析认为1989年3月1日的5.0级地震属于一次(广义)前震,1989年9月22日的6.6级地震为本次地震的主震,而1991年2月18日发生的5.0级地震则为晚期强余震(张肇诚,2000)。1993—1995年间在四川沐川相继发生1993年8月7日5.0级、1994年12月30日5.7级和1995年4月26日5.1级地震,3次地震持续的时间较长,结合沐川3次5级以上地震野外考察的极震区等烈度线分布、余震分布图像以及震源机制解结果分析认为,这3次5级地震属同一震源区的多次破裂事件,是以3次5级地震为主组成的多震型地震事件(陈棋福,2002a)。2003年11月15日、11月26日和2004年8月10日在云南省鲁甸县分别发生5.1、5.0和5.6级地震,3次地震的发震构造一致,属于一次多震型序列(蒋海昆,2014a)。

2.2 序列类型比例随震级的变化

从不同主震震级区间序列类型的比例来看(表2),5.0~5.9级地震中有主余型24次(占44%)、多震型17次(占31%)、孤立型14次(占25%),6.0~6.9级地震中有主余型13次、多震型7次、孤立型3次,分别占57%、30%及13%;7.0级以上8组地震中,除1976年8月16日四川松潘-平武7.2级地震为多震型外,其他均为主余型地震,无孤立型地震。可见,随着地震震级增大,多震型、孤立型地震所占的比例减少,而主余型地震所占的比例增加,这种趋势与其他研究的统计结果基本一致(蒋海昆等,2007)。

表2 不同主震震级范围内的序列类型统计

Table 2 Statistics of earthquake sequence types in different magnitude ranges

主震震级 M_s	主余型			多震型			孤立型			总计
	N	$M/\%$	$T/\%$	N	$M/\%$	$T/\%$	N	$M/\%$	$T/\%$	
5.9~5.9	24	44	54	17	31	68	14	25	82	55
6.0~6.9	13	57	30	7	30	28	3	13	18	23
7.0~7.9	6	86	14	1	14	4	0	0	0	7
8.0级以上	1	100	2	0	0	0	0	0	0	1
总计		44			25			17		86

注 N 为不同类型、不同震级区间的序列数目; M 为相同震级区间内不同类型的序列所占的比例; T 为相同类型不同震级区间内的序列所占的比例。

2.3 主震破裂形式与余震序列类型

在86个震例中,走滑型地震有62次,占统计样本总数的72%;逆断(冲)型地震14次,占16%;正断型地震9次,占11%;有1次地震的破裂类型未能确定,占1%。由表3可知,主余型地震在不同破裂类型中占绝对优势,尤其是在逆冲性质的地震中主余型的发震概率明显高于其他类型;多震型地震更可能为走滑和正断性质,而孤立型地震在3种破裂类型地震中所占的比例都很小。

3 最大余震统计分析

3.1 最大余震与主震震级之间的统计关系

通常最大余震活动强度 M_A 与主震强度 M_0 呈正比,即 $M_A = M_0 - C$, 其中 C 为常数,对于不同的区域其值一般在0~3或更大范围内变化(Kisslinger *et al.*, 1991; 蒋海昆等, 2006c)。由于

表 3 1973 年以来南北地震带中段及周边 5.0 级以上地震的破裂类型与序列类型统计
Table 3 The statistics of rupture type and sequence type of $M \geq 5$ earthquakes in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions since 1973

地震破裂类型	序列类型	序列次数	占比/%
走滑型	主余	32	52
	多震	19	31
	孤立	11	17
逆断(冲)型	主余	9	65
	多震	2	14
	孤立	3	21
正断型	主余	3	33
	多震	4	45
	孤立	2	22
无资料	主余	0	0
	多震	0	0
	孤立	1	100

孤立型地震的次数相对较少, 离散程度相对较高, 因此仅对主余型和多震型地震的主震与最大余震之间的关系进行分析。

基于表 1 给出的数据, 对主余型地震的主震震级与最大余震震级的线性回归关系进行分析(图 2)。使用 44 次主余型地震资料拟合得到的统计关系为

$$M_A = 1.046M_0 - 1.65, R^2 = 0.6138 \quad (1)$$

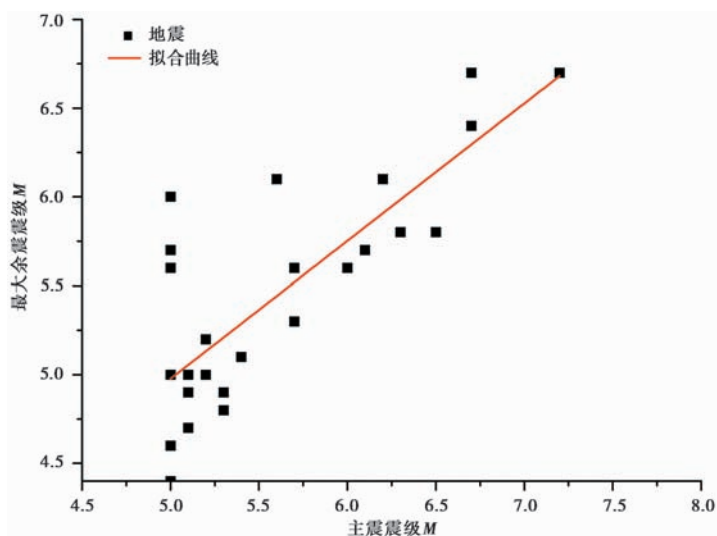


图 2 1973 年以来南北地震带中段及周边主余型地震序列主震震级与最大余震震级之间关系

Fig. 2 Relationship between the magnitude of the largest aftershock and the mainshock of the mainshock-aftershock earthquake type in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions since 1973.

以 25 次多震型地震作为样本进行序列最大与次大地震震级的线性回归关系分析。由于 25 次地震序列中有 6 次首发地震小于最大主震，为了更好地分析主震与最大余震的关系，我们分别将第 1 次地震和最大震级地震作为主震进行分析(图 3)，得到：

$$M_A = 0.775M_0 + 1.105, R^2 = 0.6147 \text{ (第 1 个地震为主震)} \quad (2)$$

$$M_A = 0.904M_0 + 0.184, R^2 = 0.8402 \text{ (最大震级地震为主震)} \quad (3)$$

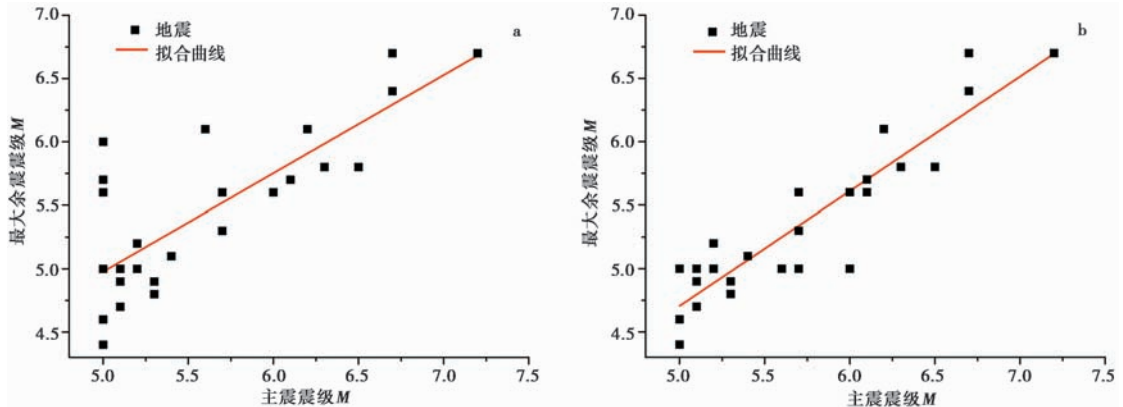


图 3 1973 年以来南北地震带中段及周边多震型地震序列主震及最大余震震级之间关系

Fig. 3 Relationship between the magnitude of the largest aftershock and the mainshock of the multiple earthquake type in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions since 1973.

a 第 1 地震为主震；b 最大地震为主震

在初步判定序列类型的前提下，可利用式(1)—(3)对该序列的最大余震震级进行粗略估计。总体上，地震震级与最大余震震级呈正相关。对于多震型地震序列，若将最大震级地震作为主震，则给出的 R^2 值相对更高，得到的最大余震震级更符合实际情况。

3.2 最大余震时间间隔统计分析

地震发生后，后续最大余震何时发生备受关注。刘蒲雄等(1996)研究认为绝大多数地震序列的最大余震一般发生在主震后 3 个月内。在本文所统计的 86 次地震中，有 80 次地震(93%)的最大余震发生在震后 3 个月内，与蒋海昆等(2006a)给出的中国大陆中强地震最大余震的统计结果一致。为细致地研究区域内不同序列类型最大余震发生的时间，以最大余震发生在震后 3 个月的地震序列作为样本，统计最大强余震持续时间间隔分布，结果显示绝大多数地震的最大余震多发生在震后 20d 内且具有对数分布的特征(图 4)。主余型地震的最大余震集中分布在震前后 3d 内，41 次地震中有 28 次在主震前后 3d 内发生，其中有 22 次地震的最大余震与主震在同一天发生；多震型地震中最大余震集中在震后 12d 内发生的概率更大，个别地震的持续时间较长，如 1993—1995 年沐川震群；孤立型地震的衰减相对较快，最大余震多发生在地震当天。本文的统计结果与前人的研究结果基本吻合(刘蒲雄等，1996；蒋海昆等，2006c)。

4 序列类型空间分布与构造关系的初步讨论

4.1 地震序列类型的空间分布特征

图 5 给出了南北地震带中段 86 次地震序列的类型分布情况。从图中可见，主余型地震的

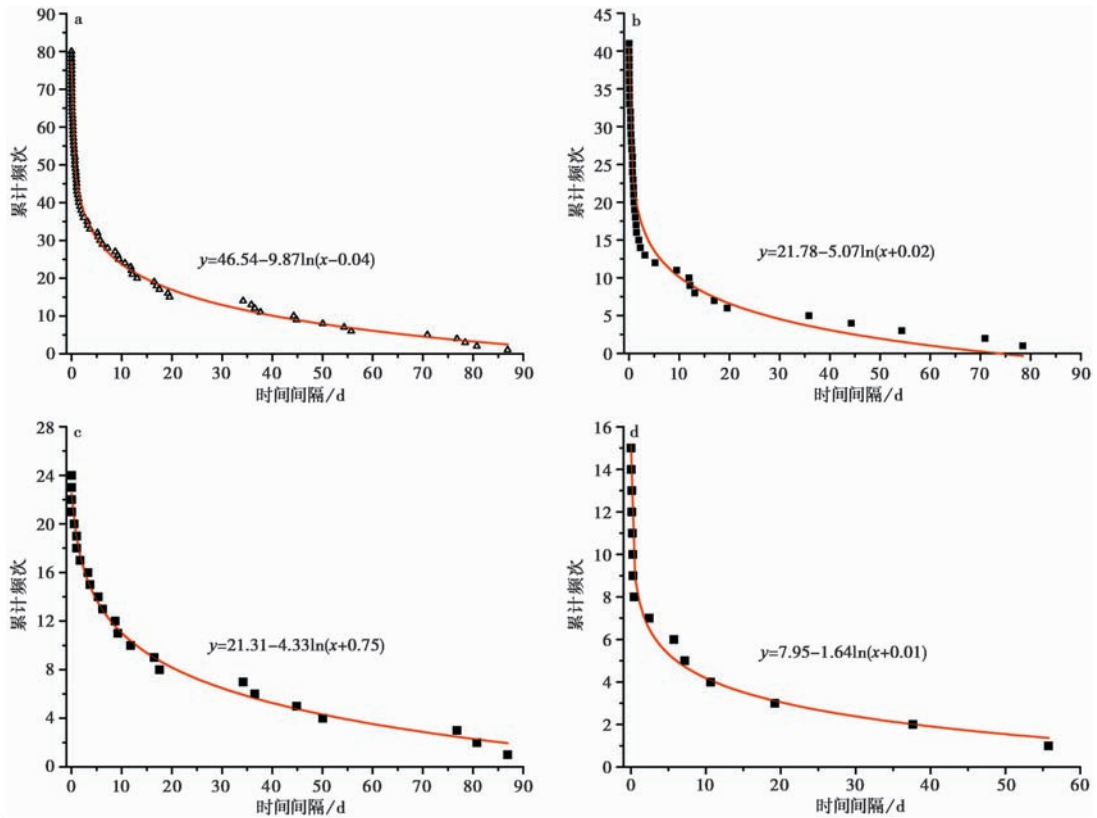


图 4 1973 年以来南北地震带中段及周边 5.0 级以上序列内最大余震与主震的间隔关系

Fig. 4 Relation of the interval between the largest aftershock and the mainshock in the $M \geq 5$ earthquake sequences in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions since 1973.

a 所有地震; b 主余型; c 多震型; d 孤立型

分布相对较广,多震型地震在川西巴塘—理塘、川东马边—昭通一带、川北松潘一带及滇西北云龙、姚安、龙陵及附近区域分布较为集中,甘孜—玉树断裂带、鲜水河断裂带 NW 段及四川盆地等地区孤立型地震相对较多。

序列类型的空间分布与区域构造运动形式有一定关系(沈小七等,2014)。研究区域内地质构造复杂,断裂分布交错,依据闻学泽等(2003)对川滇地区地震区带的划分,结合断层习性、历史地震活动、现今地震活动及序列分布特点,将南北地震带中段及周边按地震类型优势分布划分为 11 个区,各区域序列类型分布如下:

川甘青交界区(I区):该区位于巴颜喀拉块体与柴达木—祁连块体边界区域,发育有多条 NW 走向的活动断裂。区域内主要以主余型地震为主,1973 年以来共发生 5.0 级以上地震 6 次,其中的 5 次主余型地震遍布整个区域,仅 1974 年 5 月 11 日四川若尔盖 5.6 级地震为孤立型地震,无多震型地震发生。

玛多—马尔康地区(II区):青海玛多—四川马尔康区域内有 NW 向的久治断裂、玛多断裂、松岗断裂;此外,区域内的 NE 向龙日坝断裂带是一条晚第四纪新生的强活动逆—右旋走

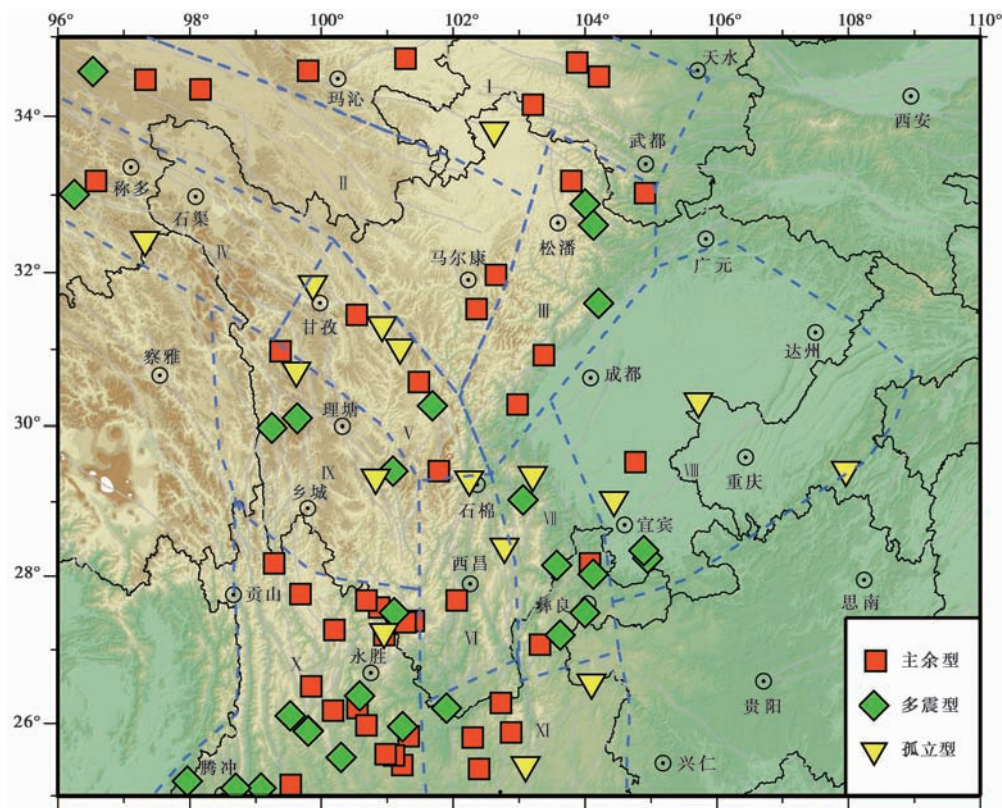


图 5 南北地震带中段及周边 5.0 级以上地震序列类型的空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of earthquake sequences of $M \geq 5$ in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions.

滑断裂带。该区域共发生主余型地震 4 次，2018 年 5 月 6 日青海称多 5.3 级地震为惟一的多震型地震，无孤立型地震；1989 年 9 月 22 日小金 6.6 级地震为特殊的主余型地震，属广义的前震-主震-余震型序列。

松潘-龙门山地区(Ⅲ区)：该区域是巴颜喀拉块体的东边界，活动断裂带分布错综复杂，不仅有 NE 向龙门山断裂带、近 SN 向的岷江断裂和虎牙断裂，还包括 NW 向的塔藏断裂以及由 NW 向转为 NNE 向的白龙江断裂等。历史地震显示该区域 6.0 级以上地震频发，其中最大地震为 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震。从序列统计来看，在 1973 年以来的 7 次地震中，5 次为主余型，2 次为多震型，无孤立型。整个区域属于 7.0 级以上地震的多发区，区域内先后发生 4 次 7.0 级以上地震，其中 3 次为主余型，1 次为多震型，表明该区 7 级以上地震以主余型为主。另外，松潘及附近区域发生了 1 次多震型地震和 2 次主余型地震，其中 1973 年松潘 6.5 级地震虽为 1 次主余型地震，却发生了多次 5 级以上地震，分析认为该区域为虎牙断裂与龙门山断裂的接合部位，不仅受到华南块体的阻挡，北部鄂尔多斯地块对该区域的构造活动也有一定的影响。

甘孜-玉树带(Ⅳ区)：该区域的构造相对单一，NW 向的甘孜-玉树断裂及其次级断裂为

整个区域内的主体构造,与鲜水河断裂共同构成了巴颜喀拉地块、羌塘地块和川滇菱形地块的边界断裂(徐锡伟等,2003)。除2010年玉树7.1级地震外,区内还曾发生过1896年邓柯西7.0级地震和1738年青海玉树西6½级地震。1973年以来记录到的4次5.0级以上地震分布在青海玉树和甘孜一带,共发生孤立型地震2次、多震型地震1次、主余型地震1次。

鲜水河带(V区):NW向的鲜水河断裂带是位于中国青藏高原东部的一条晚第四纪强烈活动的大型左旋走滑断裂,是中国大陆境内动力作用环境和地壳运动变形最强烈的断裂带之一(钱洪,1989;Allen *et al.*, 1991;徐晶等,2013)。断裂带曾发生多次7.0级以上地震,1973年以来沿断裂带先后发生7次5.0级以上地震,其中5.0~5.9级地震3次,6.0~6.9级地震3次,7.0级以上地震1次,最大地震为1973年炉霍7.6级地震。该区地震序列包括3次主余型、3次孤立型和1次多震型地震。主余型地震主要沿断裂展布,孤立型地震分布在甘孜和石棉一带,2014年康定6.3级地震是鲜水河断裂带上惟一一次多震型地震序列,2次主震的震级差为0.5级,分别发生在色拉哈和折多塘分支断裂上。

安宁河-则木河带(Ⅵ区):近SN—NNW向的安宁河-则木河断裂带、NNW向的大凉山断裂带为区内主要断裂,均以左旋走滑为活动特征。安宁河断裂带自1536年7½级地震、则木河断裂带自1850年7½级地震后均未发生过7.0级以上的地震(闻学泽等,2008;祁玉萍等,2018)。多项研究结果显示该区域有发生强震的危险性(M7专项工作组,2012;徐锡伟等,2017),然而该区自1973年以来仅发生过2014年越西5.0级地震和2018年西昌5.1级地震,2次地震分别为孤立型和主余型。

马边-昭通带(Ⅶ区):该区域为大凉山次级块体的一部分,区域内地质构造复杂、断裂交错,SN—NNW向的马边-盐津断裂带由9条规模不等的纵向断裂和数条横向断裂组成,表现出左旋走滑-挤压逆冲的晚第四纪活动特征(唐荣昌等,1993;张世民等,2005;宫悦等,2019);近SN向的峨边-金阳大断裂表现为逆冲性质;NE向的昭通-莲峰断裂带是以右旋走滑兼逆冲或逆冲为主要错动方式的区域性大断裂,其间穿插发育了一些规模较小的NW向断裂,与NE向断裂构成共轭断裂(闻学泽等,2013)。统计结果显示,该区域为多震型地震的多发区,先后发生5次多震型地震、2次主余型地震和1次孤立型地震,1971年云南大关7.1级地震为主余型地震,其依旧遵循7.0级以上为主余型地震的规律。空间分布结果显示,多震型地震主要沿马边-盐津断裂带分布,在马边-盐津断裂带南段和昭通-莲峰断裂带交会区域尤为集中。结合动力学背景分析认为,该区域不仅吸收了川滇块体SE向的运动作用,还需要调节与华南块体的挤压作用(常祖峰等,2014)。

四川盆地(Ⅷ区):四川盆地是在上扬子克拉通基础上发展起来的经历了多期构造演化过程的叠合盆地(何登发等,2011),以华蓥山断裂带为主体构造,内部包括不同规模的褶皱变形。2008年之前,盆地内的地震活动与四川西部地区相比微弱得多,最大地震为1896年2月14日四川富顺5¾级地震;2008年后,整个盆地的地震活动明显增强,尤其在川东南地区5.0级以上地震活动更加活跃,2019年6月17日长宁6.0级地震打破盆地内无6.0级以上地震的记录。从该区域序列统计来看,盆地内孤立型地震居多(3次),多震型次之(2次),主余型地震最少(1次)。孤立型地震分布相对分散,2次多震型地震均发生在川东南宜宾地区,但该局部区域近几年突出的中强地震活动可能有其特殊的成因。

川西理塘—巴塘地区(Ⅸ区):理塘—巴塘地区处于羌塘-昌都陆块与松潘-甘孜造山带的

拼合部位,主要活动断裂有近 SN 向的金沙江断裂带、NE 向的巴塘断裂带和 NW 向的理塘断裂带,此外还发育一系列以张性为主的近 EW 向断裂(周荣军等,2005;易桂喜等,2017)。该区历史上曾发生 1870 年巴塘 $7\frac{1}{4}$ 级地震和 1948 年理塘 7.3 级地震,1973 年以来区内发生的最大地震为 1989 年巴塘 6.7 级震群。区域内共发生过 6 次 5.0 级以上地震,其中 2 次为多震型、2 次为孤立型、2 次为主余型。多震型地震分布相对集中,主要发生在巴塘—理塘一带。

滇西北地区(X区):滇西北地区是青藏高原断块内部次一级块体的边缘接壤地区,地质构造十分复杂。第四纪以来,区内的构造运动以断裂活动为主要特征,发育了 NW、NE 和近 SN 向的 3 组主要活动断裂。红河断裂和中甸断裂为区内主体活动断裂,均以 NW 向右旋走滑活动为主;在本区内普遍发育 NE 向断裂,但规模较小,主要为一些密集排列或平行、叠错并与近 SN 向张性断裂相伴的左旋走滑活动性断裂(谢富仁等,1994)。有历史记载以来,该区域即为地震多发区,1973 年以来发生过 28 次 5.0 级以上地震,以 5.0~5.9 级地震为主。序列统计结果显示,区内以主余型和多震型地震序列为主,其中主余型 16 次,多震型 10 次,孤立型 2 次,即 1988 年云南宁蒗 5.5 级地震和 2015 年云南昌宁 5.1 级地震。主余型地震集中分布在宁蒗—盐源、红河断裂带及其附近区域,云南云龙、洱源、大理、姚安、龙陵、澜沧一带均有多震型地震发生。

滇东区(XI区):该区域以近 SN 向的小江断裂带和普渡河断裂为主体构造,可确定序列类型的地震有 7 次,其中主余型 4 次、孤立型 2 次、多震型 1 次,属于以主余型地震为主的地区,与李永莉等(2011)的统计结果一致。空间分布显示,主余型地震主要沿主干断裂分布,孤立型地震在云南宣威、嵩明及其附近区域分布较多。

4.2 序列类型的空间分布与构造关系的初步讨论

序列类型的空间分布具有较明显的区域性特征,其原因非常复杂。多项研究结果表明,地震序列类型的分布不仅与该区的地质构造环境相关,还与深部介质环境、历史地震活动有一定关系(王华林等,1997;周翠英等,2001;蒋海昆等,2006b;皇甫岗等,2007;林松建等,2011)。

本研究主要获得了以下认识:

(1)南北地震带中段地区地质构造复杂,除龙门山断裂带、鲜水河断裂带、安宁河—则木河—小江断裂带、金沙江断裂带、红河断裂等几条大断裂外,还有多条纵横交错的断裂,对区域内的地震活动影响较大。地震序列的空间分布显示,主余型地震序列无明显集中的分布区域,能够在各类形式的构造运动中产生,较常发生在构造单一的主干断裂周边或新生相互分离的断裂带附近,例如以 NW 向单一断裂为主的川甘青交界区和玛多—马尔康地区的主余型地震序列多于其他构造类型的区域。多震型序列的震源环境一般具有较复杂的发震断层,多发生在共轭或多组构造交会的区域,如川西巴塘—理塘地区、川东马边—昭通一带、川北松潘以及滇西北云龙、姚安、龙陵一带等,这些区域均发育有不同规模的共轭构造(虢顺民等,2002;周荣军等,2005)。孤立型地震序列多发生在简单小断层的端部,四川盆地内部发生过多孤立型地震,这主要是由于盆地内除华蓥山断裂带外无其他大规模断裂发育。

(2)南北地震带中段及周边区域发生多次 7 级以上地震后,一段时间后这些地震的原震区往往将再次发生 5 级以上地震,如 1981 年道孚 6.9 级地震震中附近曾发生 1904 年道孚 7.2 级地震,1816 年炉霍 $7\frac{1}{2}$ 级地震后于 1973 年在老震区发生 7.6 级地震,2011 年再次发生 5.3 级

表4 南北地震带中段及周边地区各分区序列类型统计表

Table 4 Statistical table of sequence types in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions

区域	震级区间	主余型	多震型	孤立型	样本数
川甘青交界区(Ⅰ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	4	0	1	5
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	1	0	0	1
	$M \geq 7.0$	0	0	0	0
	总计	5	0	1	6
玛多—马尔康地区(Ⅱ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	2	1	0	3
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	2	0	0	2
	$M \geq 7.0$	0	0	0	0
	总计	4	1	0	5
松潘—龙门山地区(Ⅲ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	1	1	0	2
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	1	0	0	1
	$M \geq 7.0$	3	1	0	4
	总计	5	2	0	7
甘孜—玉树带(Ⅳ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	0	1	0	1
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	0	0	2	2
	$M \geq 7.0$	1	0	0	1
	总计	1	1	2	4
鲜水河带(Ⅴ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	1	0	2	3
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	1	1	1	3
	$M \geq 7.0$	1	0	0	1
	总计	3	1	3	7
安宁河—则木河带(Ⅵ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	1	0	1	2
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	0	0	0	0
	$M \geq 7.0$	0	0	0	0
	总计	1	0	1	2
马边—昭通地区(Ⅶ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	0	5	1	6
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	1	0	0	1
	$M \geq 7.0$	1	0	0	1
	总计	2	5	1	8
四川盆地(Ⅷ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	1	1	3	5
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	0	1	0	1
	$M \geq 7.0$	0	0	0	0
	总计	1	2	3	6
川西理塘—巴塘地区(Ⅸ区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	1	1	2	4
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	1	1	0	2
	$M \geq 7.0$	0	0	0	0
	总计	2	2	2	6
滇西北地区(X区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	11	7	2	20
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	4	3	0	7
	$M \geq 7.0$	1	0	0	1
	总计	16	10	2	28
滇东区(XI区)	$5.9 \geq M \geq 5.0$	2	0	2	4
	$6.9 \geq M \geq 6.0$	2	1	0	3
	$M \geq 7.0$	0	0	0	0
	总计	4	1	2	7

地震；1988年道孚5.0级地震、2018年西昌5.1级地震也均发生在历史大地震的震中附近，虽然2次地震均属于主余型地震序列，但整个序列的余震相对较少，属余震不发育的主震型。总体而言，在四川地区历史及现今强震的老震区附近发生孤立型或余震不发育的主震型地震的可能性较大。在滇西北地区，1511年永胜7 $\frac{1}{2}$ 级地震和1925年大理7.0级地震的震中附近分别发生了1992年云南永胜5.4地震和1978年下关5.3级地震，2次地震均为多震型地震，表明滇西北地区历史地震的老震区更可能发生多震型地震序列。

5 结论

本文通过对《中国震例》及其他资料对南北地震带中段86次 $M \geq 5.0$ 震例进行了系统性梳理，以研究南北地震带中段及邻区地震序列类型统计和空间分布特征，提取研究区及周边地震序列类型的分区特征，并讨论不同类型震源环境特点，尝试为南北地震带中段及附近区域中强地震的震后早期趋势快速判定提供参考依据。获得的主要认识如下：

(1) 1973年以来南北地震带中段及周边发生的86次5.0级以上地震中，主余型有44次、多震型有25次、孤立型有17次，整个区域以主余型地震序列为主；在同一序列类型地震中，随着地震震级增大，主余型地震所占的比例增加，而多震型、孤立型地震所占的比例减少，7.0级以上地震以主余型为主，无孤立型地震。在不同破裂类型中，主余型占绝对优势，在逆冲型地震中主余型的发震概率明显高于其他类型，而多震型地震则更可能为走滑型和正断层地震。

(2) 主余型和多震型地震序列的主震与最大余震震级的线性关系相对较好，得到的经验公式能够为研究区域内同类地震的最大余震震级判定提供依据；绝大多数地震的最大余震多发生在震后20d内，主余型地震的最大余震集中在震后前3d内发生，多震型地震的最大余震集中在震后12d内发生，孤立型地震的最大余震多发生在主震当天。

(3) 南北地震带中段及周边的序列空间分布具有较明显的区域性差异。从各类型地震的空间分布情况来看，主余型地震的分布相对较广，弥散于川西高原和川滇块体内部；多震型地震主要集中在川西巴塘—理塘、川东马边—昭通一带、川北松潘一带及滇西北云龙、姚安、龙陵及附近区域；甘孜—玉树断裂带、鲜水河断裂带NW段及四川盆地等地孤立型地震相对较多。

(4) 地震序列类型的分布特征与构造和历史地震活动可能有一定关系。构造简单的主干断裂周边或新生相互分离的断裂带附近多发生主余型地震；构造较为复杂、多组构造共轭或交会的区域更可能发生多震型序列；孤立型地震序列一般多发生于简单小断层的端部。同时，在现今活动强烈的已有断层的历史大地震震中附近发生孤立型或余震不发育的主余型序列的可能性更大。

致谢 四川省地震局杜方研究员对文本的分析工作给予了指导；审稿人对本文提出了宝贵的意见和建议。在此一并表示感谢！

参 考 文 献

- 常祖峰, 周荣军, 安晓文, 等. 2014. 昭通—鲁甸断裂晚第四纪活动及其构造意义 [J]. 地震地质, 36(4): 1260—1279. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.025.

- CHANG Zu-feng, ZHOU Rong-jun, AN Xiao-wen, *et al.* 2014. Late-Quaternary activity of the Zhaotong-Ludian fault zone and its tectonic implication [J]. *Seismology and Geology*, 36(4): 1260—1279(in Chinese).
- 陈棋福. 2002a. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京:地震出版社.
- CHEN Qi-fu. 2002a. Earthquake Cases in China(1992—1994)[M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 陈棋福. 2002b. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京:地震出版社.
- CHEN Qi-fu. 2002b. Earthquake Cases in China(1995—1996)[M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 陈棋福. 2002c. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京:地震出版社.
- CHEN Qi-fu. 2002c. Earthquake Cases in China(1997—1999)[M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 陈棋福. 2008. 中国震例(2000—2002)[M]. 北京:地震出版社.
- CHEN Qi-fu. 2008. Earthquake Cases in China(2000—2002)[M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征 [J]. *中国科学(D辑)*, 32(12): 1020—1030, 1057.
- DENG Qi-dong, ZHANG Pei-zhen, RAN Yong-kang, *et al.* 2002. Basic characteristics of active faults in China [J]. *Science in China(Ser D)*, 32(12): 1020—1030, 1057(in Chinese).
- 杜方, 蒋海昆, 杨马陵, 等. 2018. 中国震例: 2008年5月12日四川汶川8.0级地震 [M]. 北京:地震出版社.
- DU Fang, JIANG Hai-kun, YANG Ma-ling, *et al.* 2018. M_s 8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan on May 12, 2008 [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 宫悦, 龙锋, 梁明剑, 等. 2019. 2015年四川乐山金河口 $M5.0$ 地震孕震构造条件分析 [J]. *中国地震*, 35(3): 445—454.
- GONG Yue, LONG Feng, LIANG Ming-jian, *et al.* 2019. Seismogenic structure of the Jinkouhe $M5.0$ earthquake in 2015 [J]. *Earthquake Research in China*, 35(3): 445—454(in Chinese).
- 魏顺民, 徐锡伟, 向宏发, 等. 2002. 龙陵-澜沧新生断裂带地震破裂分段与地震预测研究 [J]. *地震地质*, 24(2): 133—144.
- GUO Shun-min, XU Xi-wei, XIANG Hong-fa, *et al.* 2002. Segmentation of earthquake rupture and earthquake prediction along the Longling-Lancang fault zone in the southwestern Yunnan Province [J]. *Seismology and Geology*, 24(2): 133—144(in Chinese).
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化 [J]. *地质科学*, 46(3): 589—606.
- HE Deng-fa, LI De-sheng, ZHANG Guo-wei, *et al.* 2011. Formation and devolution of multi cycle superposed Sichuan Basin, China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 46(3): 589—606(in Chinese).
- 皇甫岗, 秦嘉政, 李忠华, 等. 2007. 云南地震类型分区特征研究 [J]. *地震学报*, 29(2): 142—150.
- HUANGFU Gang, QIN Jia-zheng, LI Zhong-hua, *et al.* 2007. Subarea characteristics of earthquake types in Yunnan [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 29(2): 142—150(in Chinese).
- 蒋海昆, 代磊, 侯海峰, 等. 2006a. 余震序列性质判定单参数判据的统计研究 [J]. *地震*, 26(3): 17—25.
- JIANG Hai-kun, DAI Lei, HOU Hai-feng, *et al.* 2006a. Statistic study on the criterion index for classification of aftershock sequences [J]. *Earthquake*, 26(3): 17—25(in Chinese).
- 蒋海昆, 李永莉, 曲延军, 等. 2006b. 中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征 [J]. *地震学报*, 28(4): 389—398.
- JIANG Hai-kun, LI Yong-li, QU Yan-jun, *et al.* 2006b. Spatial distribution features of sequence types of moderate and strong earthquakes in Chinese mainland [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(4): 389—398(in Chinese).
- 蒋海昆, 曲延军, 李永莉, 等. 2006c. 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*, 49(4): 1110—1117.
- JIANG Hai-kun, QU Yan-jun, LI Yong-li, *et al.* 2006c. Some statistic of aftershock sequences in Chinese mainland

- [J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4): 1110—1117(in Chinese).
- 蒋海昆, 郑建常, 代磊, 等. 2007. 中国大陆余震序列类型的综合判定 [J]. 地震, 27(1): 17—25.
- JIANG Hai-kun, ZHENG Jian-chang, DAI Lei, *et al.* 2007. Synthetical judgment of types of aftershock sequences in China's mainland [J]. Earthquake, 27(1): 17—25(in Chinese).
- 蒋海昆. 2014a. 中国震例(2003—2006) [M]. 北京: 地震出版社.
- JIANG Hai-kun. 2014a. Earthquake Cases in China(2003—2006) [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 蒋海昆. 2014b. 中国震例(2007—2010) [M]. 北京: 地震出版社.
- JIANG Hai-kun. 2014b. Earthquake Cases in China(2007—2010) [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 蒋海昆. 2014c. 中国震例(2011—2012) [M]. 北京: 地震出版社.
- JIANG Hai-kun. 2014c. Earthquake Cases in China(2011—2012) [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 焦远碧. 1998. 地震序列类型、地震序列 b 值与地震大形势关系初探 [J]. 地震, 18(1): 33—40.
- JIAO Yuan-bi. 1998. Study on types of earthquake sequences and relation between b -value of earthquake sequences and long-term tendency of strong earthquakes [J]. Earthquake, 18(1): 33—40(in Chinese).
- 李永莉, 赵小艳, 秦嘉政. 2011. 云南中强震序列类型的划分及其空间分布特征 [J]. 地震研究, 34(3): 255—261.
- LI Yong-li, ZHAO Xiao-yan, QIN Jia-zheng. 2011. Classification of medium-strong earthquake sequence and its spatial distribution characteristics in Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 34(3): 255—261(in Chinese).
- 林松建, 赵志伟. 2011. 福建及邻区地震序列类型分布特征分析 [J]. 地震研究, 34(4): 447—452.
- LIN Song-jian, ZHAO Zhi-wei. 2011. Geographic distribution feature of the earthquake sequence type in Fujian Province and its vicinity [J]. Journal of Seismological Research, 34(4): 447—452(in Chinese).
- 刘蒲雄, 陈修启, 吕晓健, 等. 1996. 地震序列的后续显著地震的预测研究 [J]. 地震学报, 18(1): 27—33.
- LIU Pu-xiong, CHEN Xiu-qi, LÜ Xiao-jian, *et al.* 1996. Prediction of significant subsequent earthquakes in earthquake sequences [J]. Acta Seismologica Sinica, 18(1): 27—33(in Chinese).
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中一长期危险性研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- Working Group of M7. 2012. Study on the Mid- to Long-Term Potential of Large Earthquakes on the Chinese Continent [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 祁玉萍, 张致伟, 龙锋, 等. 2018. 大凉山次级块体及邻区震源机制解与区域应力场特征分析 [J]. 地震地质, 40(2): 377—395. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2018.02.007.
- QI Yu-ping, ZHANG Zhi-wei, LONG Feng, *et al.* 2018. Earthquake focal mechanisms in the Daliangshan sub-block and adjacent areas and characteristics of the regional stress field [J]. Seismology and Geology, 40(2): 377—395(in Chinese).
- 钱洪. 1989. 鲜水河断裂带的断错地貌及其地震学意义 [J]. 地震地质, 11(4): 43—49.
- QIAN Hong. 1989. Faulted landforms along the Xianshuihe fault zone and their seismological significance [J]. Seismology and Geology, 11(4): 43—49(in Chinese).
- 沈小七, 王俊. 2014. 安徽及邻近地区地震类型分区特征研究 [J]. 地震, 34(2): 98—104.
- SHEN Xiao-qi, WANG Jun. 2014. A study on regional division of earthquake types in Anhui Province and surrounding areas [J]. Earthquakes, 34(2): 98—104(in Chinese).
- 宋美琴, 李斌, 吕芳, 等. 2011. 山西及周边地区地震类型分区特征 [J]. 地震学报, 33(5): 691—696.
- SONG Mei-qin, LI Bin, LÜ Fang, *et al.* 2011. A study on sub-region division of earthquake types in Shanxi and its surrounding regions [J]. Acta Seismologica Sinica, 33(5): 691—696(in Chinese).
- 唐荣昌, 韩渭宾(编). 1993. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社.
- TANG Rong-chang, HAN Wei-bin(ed). 1993. Active Faults and Earthquakes in Sichuan Province [M]. Seismological

Press, Beijing(in Chinese).

- 王华林,周翠英,耿杰. 1997. 中国大陆及邻区地震序列类型的分区特征和震源环境讨论 [J]. 地震, 17(1): 34—42.
- WANG Hua-lin, ZHOU Cui-ying, GENG Jie. 1997. Discussion on zoning features of earthquake sequence type and source environment in Chinese mainland and its adjacent area [J]. Earthquake, 17(1): 34—42(in Chinese).
- 闻学泽,范军,易桂喜,等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景 [J]. 地球物理学报, 56(10): 3361—3372. doi: 10.6038/cjg20131012.
- WEN Xue-ze, FAN Jun, YI Gui-xi, *et al.* 2013. Earthquake potential of the Zhaotong and Lianfeng fault zones of the Sichuan-Yunnan border region [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(10): 3361—3372(in Chinese).
- 闻学泽,易桂喜. 2003. 川滇地区地震活动统计单元的新划分 [J]. 地震研究, 26(S1): 1—9.
- WEN Xue-ze, YI Gui-xi. 2003. Re-zoning of statistic units of seismicity in Sichuan-Yunnan region [J]. Journal of Seismological Research, 26(S1): 1—9(in Chinese).
- 闻学泽,杜方,易桂喜,等. 2008. 川西安宁河断裂上的地震空区 [J]. 中国科学(D辑), 37(7): 798—807.
- WEN Xue-ze, DU Fang, YI Gui-xi, *et al.* 2008. Seismic gap of Anninghe Fault in western Sichuan [J]. Science in China(Ser D), 37(7): 798—807.
- 吴开统,焦远碧,吕培苓,等. 1990. 地震序列概论 [M]. 北京: 北京大学出版社.
- WU Kai-tong, JIAO Yuan-bi, LÜ Pei-ling, *et al.* 1990. Introduction to Earthquake Sequences [M]. Peking University Press, Beijing(in Chinese).
- 谢富仁,刘光勋,梁海庆. 1994. 滇西北及邻区现代构造应力场 [J]. 地震地质, 16(4): 329—338.
- XIE Fu-ren, LIU Guang-xun, LIANG Hai-qing. 1994. Recent tectonic stress field in northwest Yunnan Province and its adjacent areas [J]. Seismology and Geology, 16(4): 329—338(in Chinese).
- 徐晶,邵志刚,马宏生,等. 2013. 鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1146—1158.
- XU Jing, SHAO Zhi-gang, MA Hong-sheng, *et al.* 2013. Evolution of Coulomb stress and stress interaction among strong earthquakes along the Xianshuihe fault zone [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(4): 1146—1158(in Chinese).
- 徐晶,邵志刚,刘静,等. 2019. 川滇菱形块体东边界库仑应力演化及强震发生概率估算 [J]. 地球物理学报, 62(11): 4189—4213.
- XU Jing, SHAO Zhi-gang, LIU Jing, *et al.* 2019. Coulomb stress evolution and future earthquake probability along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan block [J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(11): 4189—4213(in Chinese).
- 徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源 [J]. 中国科学(D辑), 33(S1): 151—162.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, ZHENG Rong-zhang, *et al.* 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China [J]. Science in China(Ser D), 33(S1): 151—162(in Chinese).
- 徐锡伟,吴熙彦,于贵华,等. 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用 [J]. 地震地质, 39(2): 219—275. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2017.02.001.
- XU Xi-wei, WU Xi-yan, YU Gui-hua, *et al.* 2017. Seismo-geological signatures for identifying $M \geq 7.0$ earthquake risk areas and their preliminary application in mainland China [J]. Seismology and Geology, 39(2): 219—275(in Chinese).
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等. 2017. 2016年9月23日四川理塘 $M4.9$ 和 $M5.1$ 地震发震构造分析 [J]. 地震地

质, 39(5): 949—963. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2017.05.006.

- YI Gui-xi, LONG Feng, LIANG Ming-jian, *et al.* 2017. Seismogenic structure of the $M4.9$ and $M5.1$ Litang earthquakes on 23 September 2016 in southwestern China [J]. *Seismology and Geology*, 39(5): 949—963 (in Chinese).
- 张世民, 聂高众, 刘旭东, 等. 2005. 荣经-马边-盐津逆冲构造带断裂运动组合及地震分段特征 [J]. *地震地质*, 27(2): 221—233.
- ZHANG Shi-ming, NIE Gao-zhong, LIU Xu-dong, *et al.* 2005. Kinematical and structural patterns of Yingjing-Mabian-Yanjin thrust fault zone, southeast of Tibetan plateau, and its segmentation from earthquakes [J]. *Seismology and Geology*, 27(2): 221—233 (in Chinese).
- 张肇诚. 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社.
- ZHANG Zhao-cheng. 1988. *Earthquake Cases in China(1966—1975)* [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 张肇诚. 1990a. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京: 地震出版社.
- ZHANG Zhao-cheng. 1990a. *Earthquake Cases in China (1976—1980)* [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 张肇诚. 1990b. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京: 地震出版社.
- ZHANG Zhao-cheng. 1990b. *Earthquake Cases in China (1981—1985)* [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 张肇诚. 1999. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京: 地震出版社.
- ZHANG Zhao-cheng. 1999. *Earthquake Cases in China(1986—1988)* [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 张肇诚. 2000. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京: 地震出版社.
- ZHANG Zhao-cheng. 2000. *Earthquake Cases in China(1989—1991)* [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 周翠英, 侯海峰, 华爱军, 等. 2001. 山东及其近海区地震序列类型地理分布特征 [J]. *华北地震科学*, 19(3): 15—27.
- ZHOU Cui-ying, HOU Hai-feng, HUA Ai-jun, *et al.* 2001. The geographic distribution feature of earthquake sequence type in Shandong and its offshore area [J]. *North China Earthquake Science*, 19(3): 15—27 (in Chinese).
- 周荣军, 陈国星, 李勇, 等. 2005. 四川西部理塘—巴塘地区的活动断裂与 1989 年巴塘 6.7 级震群发震构造研究 [J]. *地震地质*, 27(1): 31—43.
- ZHOU Rong-jun, CHEN Guo-xing, LI Yong, *et al.* 2005. Research on active faults in Litang-Batang region, western Sichuan Province, and the seismogenic structure of the 1989 Batang $M6.7$ earthquake swarm [J]. *Seismology and Geology*, 27(1): 31—43 (in Chinese).
- Allen C R, Lou Z L, Qian H, *et al.* 1991. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe Fault of southwestern China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 103(9): 1178—1199.
- Kisslinger C, Jones L M. 1991. Properties of aftershocks in southern California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 96:11947—11958.

A STUDY ON THE EARTHQUAKE SEQUENCE TYPE IN THE MIDDLE SECTION OF THE NORTH-SOUTH SEISMIC BELT AND ITS SURROUNDING REGIONS

QI Yu-ping¹⁾ LONG Feng¹⁾ LIN Sheng-jie¹⁾ XIAO Ben-fu¹⁾
ZHAO Xiao-yan²⁾ WANG Pei-ling³⁾ FENG Jian-gang⁴⁾

1) Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China

2) Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

3) Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China

4) Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China

Abstract

Based on the statistical results of 86 earthquakes with magnitude ≥ 5.0 in the middle section of the north-south seismic belt and its surrounding regions since 1973, the types of earthquake sequences and the spatial distribution characteristics have been studied. Main conclusions are drawn as follows: 1) The sequence types of moderate and strong earthquakes in the study area are dominated by mainshock-aftershock sequence type (MAT), followed by multiple main-shock type (MMT) and least the isolated earthquake type (IET) sequence. In the same sequence type, with the increase of earthquake magnitude, the proportion of the MAT sequence increased, while the number of MMT and IET gradually decreased, $M \geq 7$ earthquakes are mainly of MAT, and there are no IET earthquakes. Among the different rupture types, the MAT earthquakes are the most in the thrust-type, while the MMT earthquakes are more likely to occur in the strike-slip and the normal-fault earthquakes. 2) There is a relatively good linear relationship between the mainshock-aftershock sequence type earthquakes and the maximum aftershock magnitude of the MAT and MMT sequences; the largest aftershock of most earthquakes mostly occurred in 15 days after the mainshock, the largest aftershock of MAT mainly occurred within 3 days after the mainshock, the largest aftershock of MMT earthquakes mainly occurred within 12 days after the mainshock, and the largest aftershock of IET earthquakes mostly occurred on the day of the earthquake. 3) The spatial distribution of seismic sequence shows that the MAT earthquake distribution range is relatively wide, the MMT earthquakes are mainly concentrated in Batang-Litang, Mabian-Zhaotong, Songpan area in Sichuan Province and Yunlong, Yao'an, Longling and nearby areas in northwest Yunnan Province. IET earthquakes are more likely to occur in Ganzi-Yushu fault zone, the northwestern segment of Xianshuihe fault zone and in Sichuan Basin. 4) The distribution of seismic sequence types in the middle section of the north-south seismic belt and its adjacent areas may be related to the geological structure, historical seismic activity and the crustal stress in this region. The distribution of seismic sequence types also reflects the tectonic movement and dynamic environment in this region.

Key words the middle section of the north-south seismic belt, sequence type, magnitude of maximum aftershock, spatial distribution of seismic sequence

[作者简介] 祁玉萍, 女, 1989年生, 2013年于中国地震局地震预测研究所获构造地质学专业硕士学位, 工程师, 主要从事数字地震学方法应用、地震预报研究, 电话: 028-85450172, E-mail: vickey112@163.com。