

四川盆地内部少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震预测意义分析*

易桂喜¹, 周龙泉², 张浪平², 龙 锋¹, 官 悦¹

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 中国地震局监测预报司, 北京 100086)

摘要: 自2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震发生以来, 四川盆地内部及盆地边缘发生了一系列 $M_s \geq 4.5$ 地震, 部分地震发生之后, 四川及邻区又发生了 $M_s \geq 6.0$ 强震。2019年6月17日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震后, 对四川盆地内部及盆地边缘 $M_s \geq 4.5$ 地震的预测意义进行了研究和梳理。通过给定不同的预测规则, 对上述 $M_s \geq 4.5$ 地震的预测效能进行了统计检验, 结果表明: 仅四川盆地内部, 以三台、梓潼等区域为代表的历史少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震对四川及邻区未来半年内发生 $M_s \geq 6.5$ 地震具有显著的预测意义。

关键词: 四川盆地; 少震与弱震区; $M_s \geq 4.5$ 地震; 预测效能

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)02-0262-08

0 引言

最近10年的地震活动显示, 四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 中等强度的地震发生后, 其后1年内四川及邻区常有 $M_s \geq 6.0$ 强震发生, 典型的2个震例是2013年4月20日四川芦山 $M_s 7.0$ 和2014年8月3日云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震, 分别在其震前2个月和震前5天, 在四川盆地内部历史少震与弱震区梓潼—三台一带发生了 $M_s \geq 4.5$ 地震。早在1981年, 罗伟(1981)基于1958—1980年地震资料统计发现: 四川盆地发生1次或多次4级以上地震后约1年, 川西或川滇交界区域将发生1次 $M_s \geq 6$ 强震, 但其所列出的四川盆地地震震级标度不明确, 且部分4.0级地震实际目录震级明显低于 $M_L 4.0$, 四川盆地中等强度以上地震对周边强震的预测指示意义还有待进一步研究。因此, 2019年6月17日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震发生后, 笔者针对四川盆地内部及盆地边缘 $M_s \geq 4.5$ 地震的预测意义进行了专题研究和系统清理, 通过设定的预测条件, 对历史地震进行预测效能评分 R 值检验, 确定了四川盆地内部及盆地边缘 $M_s \geq 4.5$ 地震的预测意义与预测规则。

1 四川盆地及盆地边缘地震活动特点

四川盆地位于构造相对稳定、地震活动强度相对较弱的华南地块内部(张培震等, 2003), 其历史地震记载始于公元前26年(国家地震局震害防御司, 1995; 中国地震局震害防御司, 1999)。历史地震资料显示, 四川盆地内部及盆地边缘的地震活动强度远低于北侧的龙门山断裂带(易桂喜等, 2016)和西侧的马边—盐津断裂带(易桂喜等, 2010)。2019年以前, 该区无 $M_s \geq 6.0$ 地震记录(图1、表1), $M_s \geq 5.0$ 地震活动频次也较低, 且复发时间长, 尤其是四川盆地内部发生的 $M_s \geq 5.5$ 地震仅2次, 分别为1896年2月14日富顺 $M_s 5\frac{3}{4}$ 和1967年1月24日仁寿 $M_s 5.5$ 级地震。有区域台网记录以来, 四川盆地 $M_s \geq 4.0$ 历史地震活动主要集中在盆地西侧及南侧的宜宾、自贡一带, 地处盆地边缘盆山结合部位的宜宾地区地震相对活跃; 而龙泉山断裂带以东、华蓥山断裂带以北的盆地内部在2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震前无 $M_s \geq 4.5$ 地震记录(图1)。

然而, 2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震发生后, 四川盆地地震活动显著增强, $M_s \geq 4.0$ 地震频繁, 最突出的是在盆地内部历史少震与弱震区相继发生了

* 收稿日期: 2019-09-29.

基金项目: 国家自然科学基金(41574047)、国家重点研发项目(2018YFC150330501)及2020年地震预测预报运维专项共同资助。

一系列中等强度的地震,包括2010年1月31日四川遂宁与重庆潼南交界 $M_s 5.0$ (何玉林等, 2010)、2013年2月19日四川三台与盐亭交界 $M_s 4.7$ 、2014年7月29日四川梓潼 $M_s 4.9$ 和三台 $M_s 4.6$ 地震(易桂喜等, 2019)。前人研究表明,汶川地震对四川盆地具有应力加载作用(Parsons *et al.*, 2008),由此,推测上述地震活动可能与汶川地震的应力加载有关(易桂喜等, 2019)。

由于汶川地震后四川盆地 $M_s 4.0$ 地震频次高,

本文仅统计 $M_s \geq 4.5$ 地震。根据历史地震记录,四川盆地内部及盆地边缘共发生 $M_s \geq 4.5$ 地震 51 次(表1),其中23次发生在汶川地震后的2010—2019年。在空间上,遂宁、三台、梓潼等历史少震与弱震区呈现中等地震活动增强,同时,宜宾、自贡等历史地震相对活跃区地震活动强度则不断刷新历史记录,最高震级已达 $M_s 6.0$ (易桂喜等, 2019),突破了此前有关该区域的地震不会达到 6.0 级的认知。

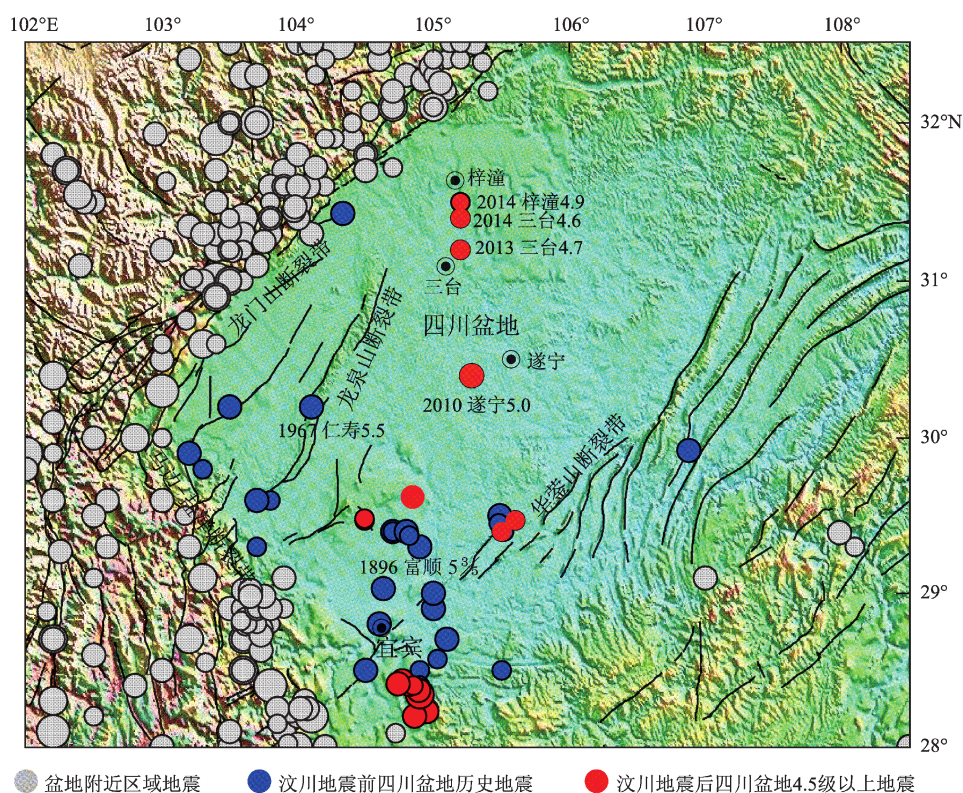


图1 四川盆地及周边 $M_s \geq 4.5$ 地震分布 (B. C. 26—2019)

Fig. 1 Distribution of $M_s \geq 4.5$ earthquakes in Sichuan Basin and its surroundings from B. C. 26 to 2019

2 四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震活动与四川及邻区 $M_s \geq 6$ 强震统计分析

2.1 四川盆地中等强度地震与四川及邻区 $M_s \geq 6.0$ 强震统计分析

为了确定四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震对四川及邻区的强震是否具有预测指示意义,表1列出了四川盆地 $M_s \geq 4.7$ 历史地震和最近10年 $M_s \geq 4.5$ 地震,同时列出了震后半年内、震后0.5~1年内四川及邻区 ($25^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $95^\circ \sim 110^\circ \text{E}$) 发生的 $M_s \geq 6.0$ 强震信息(余震不参与统计,震

群仅计1次)。

由于历史原因,仅能保证汶川地震之后的四川地区 $M_s \geq 4.5$ 地震目录的完整、可靠,因此,为获得较为客观的统计结果,以2008年汶川地震为界,进行分时段统计。

(1) 汶川地震前(公元前26年—2008年5月11日),四川及邻区共记录 $M_s \geq 6.0$ 地震193次(图2),如果不考虑余震、震群按1次计算,则地震总数为164次,包括95次 $M_s \geq 6.5$ 地震。该时段发生在四川盆地的 $M_s \geq 4.5$ 地震共28次(即表1中No. 1~28),15次地震后1年内在四川及邻区发生了 $M_s \geq 6.0$ 地震(共对应19次强震),

表 1 四川盆地有记录以来 $M_s \geq 4.5$ 地震与四川及邻区后续 $M_s \geq 6.0$ 强震统计

Tab. 1 Statistic of $M_s \geq 4.5$ earthquakes in Sichuan Basin and following $M_s \geq 6.0$ strong earthquakes in Sichuan region and its surroundings

编号	发震日期	震中位置		M_s	参考地名	后续半年内 $M_s \geq 6.0$ 地震	后续 0.5 ~ 1 年内 $M_s \geq 6.0$ 地震
		$\lambda_E / (^\circ)$	$\varphi_N / (^\circ)$				
1	B. C. 26 - 03 - 28	104. 6	28. 8	5½	四川宜宾		
2	1488 - 06 - 12	103. 8	29. 6	4¾	四川乐山		1489 - 01 四川西昌 6¾级
3	1610 - 02 - 03	104. 5	28. 5	5½	四川高县		
4	1734 - 03	103. 5	30. 2	5	四川蒲江		
5	1892 - 02 - 10	105	28. 9	5	四川南溪		
6	1896 - 02 - 14	104. 9	29. 3	5¾	四川富顺		
7	1905 - 11 - 09	104. 7	29. 4	5	四川自贡		
8	1913 - 07 - 16	103. 7	29. 6	5	四川乐山	1913 - 08 四川冕宁小盐井 6. 0 级 1913 - 12 - 21 云南峨山 7. 0 级	
9	1927 - 05 - 22	104. 7	29. 4	4¾	四川自贡		
10	1928 - 04	105. 5	28. 5	4¾	四川泸县		
11	1936 - 09 - 25	105. 1	28. 7	5	四川江安		
12	1947 - 10 - 17	104. 8	29. 4	4¾	四川自贡		1948 - 05 - 25 四川理塘 7. 3 级 1948 - 06 - 27 云南剑川兰坪间 6. 2 级
13	1954 - 10 - 24	104. 8	29. 4	5	四川自贡	1955 - 03 - 22 云南泸水 6. 0 级 1955 - 04 - 14 四川康定折多塘 7. 5 级	1955 - 06 - 07 云南华坪 6. 0 级 1955 - 09 - 23 四川会理鱼蚌 6¾级
14	1959 - 11 - 13	105	29	5	四川富顺		1960 - 11 - 09 四川松潘漳腊 6¾级
15	1962 - 07 - 01	103. 2	29. 9	5. 1	四川洪雅		
16	1967 - 01 - 24	104. 1	30. 2	5. 5	四川仁寿		1967 - 08 - 30 四川炉霍 6. 8 级
17	1967 - 05 - 05	103. 7	29. 3	4. 8	四川乐山	1967 - 08 - 30 四川炉霍 6. 8 级	
18	1973 - 12 - 30	103. 3	29. 8	4. 7	四川洪雅	1974 - 05 - 11 云南大关 7. 1 级	
19	1975 - 12 - 04	105. 03	28. 57	4. 7	四川长宁		1976 - 08 - 16 四川松平 7. 2 级 1976 - 11 - 07 四川盐源 6. 7 级
20	1985 - 03 - 29	104. 82	29. 37	4. 6	四川自贡	1985 - 04 - 18 云南禄劝 6. 3 级	
21	1989 - 11 - 20	106. 88	29. 92	5. 2	重庆江北		
22	1989 - 11 - 20	106. 88	29. 92	5. 4	重庆江北		
23	1995 - 12 - 26	105. 52	29. 4	4. 5	重庆荣昌	1996 - 02 - 03 云南丽江 7. 0 级	
24	1996 - 02 - 28	104. 63	29. 03	5. 4	四川宜宾		
25	1997 - 08 - 13	105. 49	29. 5	5. 2	重庆荣昌	1997 - 12 - 30 6. 4 级 (境外)	
26	1999 - 11 - 30	104. 33	31. 43	5. 0	四川绵竹		2000 - 09 - 12 青海 6. 6 级
27	2001 - 06 - 23	105. 48	29. 45	4. 9	重庆荣昌	2001 - 10 - 27 云南永胜 6. 0 级	
28	2008 - 02 - 01	104. 9	28. 5	4. 6	四川长宁	2008 - 05 - 12 四川汶川 8. 0 级	
29	2010 - 01 - 31	105. 28	30. 4	5. 0	四川遂宁、 重庆潼南交界	2010 - 04 - 14 青海玉树 7. 1 级	
30	2010 - 09 - 10	105. 5	29. 4	4. 7	重庆荣昌、四川 隆昌、泸州交界		
31	2013 - 02 - 19	104. 9	28. 3	4. 5	四川兴文、 珙县、 长宁交界	2013 - 04 - 20 四川芦山 7. 0 级 2013 - 07 - 22 甘肃岷县—漳县 6. 6 级 2013 - 08 - 12 西藏左贡 6. 1 级	

续表 1

编号	发震日期	震中位置		M_s	参考地名	后续半年内 $M_s \geq 6.0$ 地震	后续 0.5 ~ 1 年内 $M_s \geq 6.0$ 地震
		$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$				
32	2013-02-19	105.2	31.2	4.7	四川三台、盐亭交界	2013-04-20 四川芦山 7.0 级 2013-07-22 甘肃岷县—漳县 6.6 级 2013-08-12 西藏左贡 6.1 级	
33	2013-04-25	104.9	28.4	4.8	四川长宁、珙县、兴文	2013-07-22 甘肃岷县—漳县 6.6 级 2014-08-12 西藏左贡 6.1 级	
34	2014-07-29	105.2	31.5	4.9	四川梓潼	2014-08-03 云南鲁甸 6.5 级 2014-11-22 四川康定 6.3 级	
35	2014-07-29	105.2	31.4	4.6	四川三台	2014-08-03 云南鲁甸 6.5 级 2014-11-22 四川康定 6.3 级	
36	2015-02-07	104.9	28.3	4.5	四川长宁		
37	2016-12-27	105.6	29.47	4.8	重庆荣昌		2017-08-08 四川九寨沟 7.0 级 2017-11-18 西藏米林 6.9 级
38	2017-05-04	104.87	28.19	4.9	四川珙县	2017-08-08 四川九寨沟 7.0 级	2017-11-18 西藏米林 6.9 级
39	2018-12-16	104.95	28.23	5.7	四川兴文		2019-06-17 四川长宁 6.0 级
40	2019-01-03	104.86	28.2	5.3	四川珙县	2019-06-17 四川长宁 6.0 级	
41	2019-02-24	104.49	29.47	4.7	四川荣县	2019-06-17 四川长宁 6.0 级	
42	2019-02-25	104.49	29.48	4.9	四川荣县	2019-06-17 四川长宁 6.0 级	
43	2019-06-17	104.9	28.34	6.0	四川长宁		
44	2019-06-17	104.77	28.43	5.1	四川珙县		
45	2019-06-18	104.87	28.38	4.5	四川长宁		
46	2019-06-18	104.89	28.37	5.3	四川长宁		
47	2019-06-22	104.77	28.43	5.4	四川珙县		
48	2019-06-23	104.82	28.39	4.6	四川珙县		
49	2019-07-03	104.85	28.4	4.8	四川长宁		
50	2019-07-04	104.74	28.41	5.6	四川珙县		
51	2019-09-08	104.79	29.55	5.4	四川威远		

占比约为 54%。其中半年内发生 $M_s \geq 6.0$ 地震有 9 次（共对应 10 次强震），占比 32%，尽管对应地震比例不低，但超过 88% 的 $M_s \geq 6.0$ 强震前四川盆地无 $M_s \geq 4.5$ 地震活动，漏报率高。95 次 $M_s \geq 6.5$ 地震中，12 次震前 1 年内四川盆地有 $M_s \geq 4.5$ 地震活动，有震对应率为 43%，但超过 87% 的 $M_s \geq 6.5$ 地震前四川盆地无 $M_s \geq 4.5$ 地震活动。

（2）汶川地震后（2010—2019 年），四川盆地共发生 $M_s \geq 4.5$ 地震 23 次（表 1 中 No. 29 ~ 51），12 次地震后 1 年内四川及邻区发生了 $M_s \geq 6.0$ 强震（不包括玉树地震的 1 次 $M_s \geq 6.0$ 余震），占比近 52%，且有 10 次为半年内发震，占比约为 43%；8 次盆地地震后 1 年内四川及邻区发生了 $M_s \geq 6.5$ 地震，占比约 35%，其中有 7 次为半年内发震，占比近 30%。同时期四川及邻区共发生

$M_s \geq 6.0$ 强震 10 次（不包括余震）（图 2 中红色圆），分别为：2010 年 4 月 14 日青海玉树 $M7.1$ ，2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_s 7.0$ 、7 月 22 日甘肃岷县—漳县 $M_s 6.6$ 和 8 月 12 日西藏左贡 $M_s 6.1$ ，2014 年 5 月 30 日云南盈江 $M_s 6.1$ 、8 月 3 日云南鲁甸 $M_s 6.5$ 和 11 月 22 日四川康定 $M_s 6.3$ ，2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 $M_s 7.0$ 和 11 月 18 日西藏米林 $M_s 6.9$ 以及 2019 年 6 月 17 日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震。其中，9 次强震前四川盆地有 $M_s \geq 4.5$ 地震活动，仅 2014 年云南盈江 $M_s 6.1$ 地震例外；该时段 6 次 $M_s \geq 6.5$ 地震之前四川盆地均有 $M_s \geq 4.5$ 地震活动，且其中 5 次出现在震前半年内，仅 2017 年 11 月 18 日西藏米林 $M_s 6.9$ 地震例外。可见，汶川地震后四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震对四川及邻区 $M_s \geq 6$ 强震活动具有一定的指示意义。

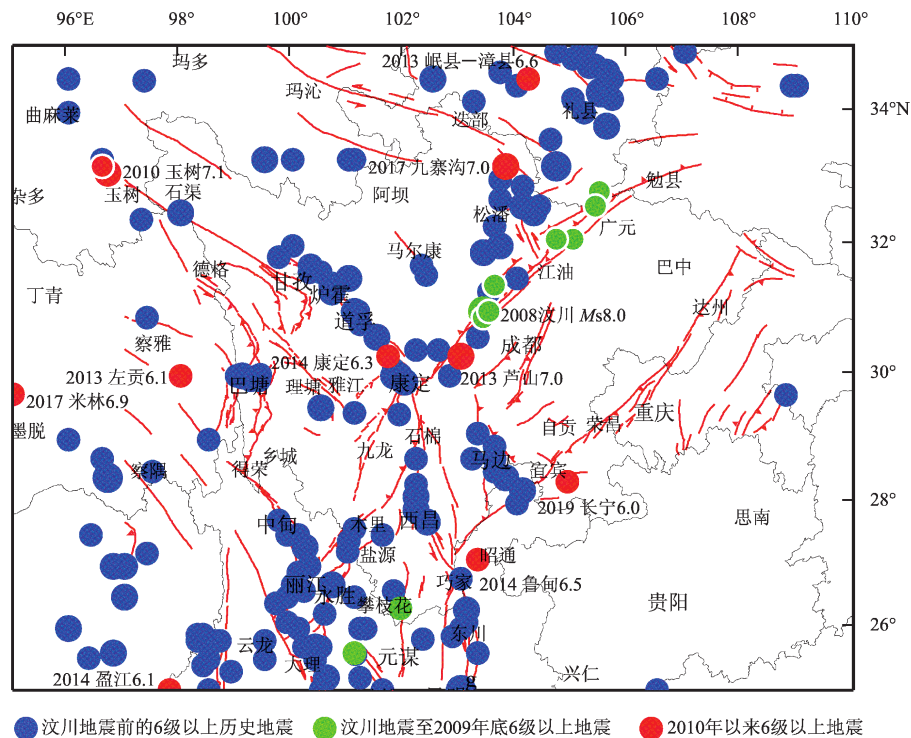


图2 四川及邻区 $M_s \geq 6.0$ 地震分布 (B. C. 26—2019)

Fig. 2 Distribution of $M_s \geq 6.0$ earthquakes in Sichuan region and its surroundings from B. C. 26 to 2019

2.2 四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震预测意义效能检验

2008 年汶川地震之前,四川及邻区多数强震前四川盆地无对应 $M_s \geq 4.5$ 地震活动,因此,本文仅针对 2010—2019 年四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震与四川及邻区强震活动对应情况,进行预测效能评分 R 值检验(国家地震局科技监测司,1990), $R = \text{报对地震数} / \text{应报地震数} - \text{预测占用时间} / \text{统计时段总长度}$,其中,应报地震数为发生在给定统计区域、给定统计时段内满足震级条件的强震总数(不包含余震,震群仅计 1 次);报对地震数为统计区预测时间内发生的强震总数,一次异常可能对应多次强震,也可能多次异常对应同一个强震,地震次数不重复统计;预测占用时间为所有异常预测时间总和,当预测时间重叠时,时间不重复统计。只有当 $R > R_0$ 时,预测意义显著,其中, R_0 表示考虑报准率和漏报率、置信度为 97.5% 时的最低 R 值(国家地震局科技监测司,1990)。

针对不同的预测规则,对四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震预测意义进行内符检验:

(1) 预测规则 1: 四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后,未来 1 年内,四川及邻区将发生 $M_s \geq 6.0$ 地震。

内符检验:最近 10 年(2010—2019 年),四川盆地共发生 $M_s \geq 4.5$ 地震 23 个,预测 23 次。根据预测规则 1,每次预测 1 年时间,时间不重复统计,因此,23 次预测占用时间 2 433 天,四川及邻区实际发生 $M_s \geq 6.0$ 地震 10 次,报对强震 9 次,漏报强震 1 次,虚报 2 次, R 值评分为:

$$R = 9/10 - 2\,433/3\,650 = 0.233 \tag{1}$$
$$R_0 = 0.345$$

$R < R_0$, 不能通过统计检验,预测意义不显著。

(2) 预测规则 2: 四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后,未来 1 年内,四川及邻区将发生 $M_s \geq 6.5$ 地震。

内符检验:最近 10 年(2010—2019 年),四川盆地共发生 $M_s \geq 4.5$ 地震 23 个,预测 23 次,根据预测规则 2,预测占用时间 2 433 天,四川及邻区实际发生 $M_s \geq 6.5$ 地震 6 次,报对强震 6 次,漏报 0 次,虚报 3 次, R 值评分为:

$$R = 6/6 - 2\,433/3\,650 = 0.333 \tag{2}$$
$$R_0 = 0.459$$

$R < R_0$, 不能通过统计检验,预测意义不显著。

(3) 预测规则3：四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后，未来半年内，四川及邻区将发生 $M_s \geq 6.0$ 地震。

内符检验：最近10年（2010—2019年），四川盆地共发生 $M_s \geq 4.5$ 地震23个，预测23次，根据预测规则3，预测占用时间1 683天，四川及邻区实际发生 $M_s \geq 6.0$ 地震10次，报对强震7次，漏报强震3次，虚报4次， R 值评分为：

$$R = 7/10 - 1\ 683/3\ 650 = 0.239 \quad (3)$$

$$R_0 = 0.352$$

$R < R_0$ ，不能通过统计检验，预测意义不显著。

(4) 预测规则4：四川盆地 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后，未来半年内，四川及邻区将发生 $M_s \geq 6.5$ 地震。

内符检验：最近10年（2010—2019年），四川盆地共发生 $M_s \geq 4.5$ 地震23次，预测23次，根据预测规则4，预测占用时间1 683天，四川及邻区实际发生 $M_s \geq 6.5$ 地震6次，报对强震5次，漏报强震1次，虚报4次， R 值评分为：

$$R = 5/6 - 1\ 683/3\ 650 = 0.372 \quad (4)$$

$$R_0 = 0.475$$

$R < R_0$ ，不能通过统计检验，预测意义不显著。

(5) 预测规则5：不考虑盆地边缘和历史地震活跃区，仅将四川盆地内部历史少震与弱震区地震（即表1中的No. 29, 32, 34 ~ 35地震）作为统计对象。四川盆地内部少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后，未来半年内，四川及邻区将发生 $M_s \geq 6.0$ 地震。

内符检验：最近10年（2010—2019年），在四川盆地少震与弱震区（遂宁、三台、梓潼）发生 $M_s \geq 4.5$ 地震4次，预测4次，根据预测规则5，预测占用时间共546天，该时段四川及邻区实际发生 $M_s \geq 6.0$ 地震10次，报对强震6次，漏报强震4次，虚报0次， R 值评分为：

$$R = 6/10 - 546/3\ 650 = 0.450 \quad (5)$$

$$R_0 = 0.338$$

$R > R_0$ ，通过统计检验，具有预测意义。

(6) 预测规则6：不考虑盆地边缘和历史地震活跃区，仅将四川盆地内部历史少震与弱震区地

震（表1中No. 29, 32, 34, 35地震）作为统计对象。四川盆地内部少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后，未来半年内，四川及邻区将发生 $M_s \geq 6.5$ 地震。

内符检验：最近10年（2010—2019年），在四川盆地少震与弱震区（三台、梓潼、遂宁）发生 $M_s \geq 4.5$ 地震4次，预测4次，根据预测规则6，预测占用总时间为546天，该时段四川及邻区实际发生 $M_s \geq 6.5$ 地震6次，报对强震5次，漏报强震1次，虚报0次， R 值评分为：

$$R = 5/6 - 546/3\ 650 = 0.684 \quad (6)$$

$$R_0 = 0.475$$

$R > R_0$ ，通过统计检验，具有预测意义。

上述内符检验预测效能评分 R 值计算结果显示，预测规则6中四川盆地内部历史少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后，预测未来半年内四川及邻区 $M_s \geq 6.5$ 地震的预测效能评分 R 值最高，且能通过统计显著性检验，具有中短期预测意义。

2.3 四川盆地内部少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震预测强震的规则

上述不同预测规则下的预测效能统计检验 R 值评分中预测规则6的 R 值评分最高，因此，将预测规则6作为四川盆地内部少震与弱震区的判定标准及该区域 $M_s \geq 4.5$ 地震预测四川及邻区 $M_s \geq 6.5$ 地震的规则：

(1) 四川盆地内部少震与弱震区判别

位于四川盆地内部，不包含盆山转换区域，震中30 km范围内在汶川地震之前无 $M_s \geq 4.0$ 地震记录，且自1970年有台网记录以来 $M_L \geq 3.0$ 地震频次不超过2次，如三台、梓潼等区域（图3）。

(2) 预测规则

当四川盆地内部少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震发生后，未来半年内，四川及邻区（ $25 \sim 35^\circ \text{N}$, $95 \sim 110^\circ \text{E}$ ）将发生 $M_s \geq 6.5$ 地震。

3 结论

本文基于地震目录的完整性，重点针对（2010—2019年）四川盆地内部和盆地边缘发生的 $M_s \geq 4.5$ 地震及其与四川及邻区 $M_s \geq 6.0$ 强震的

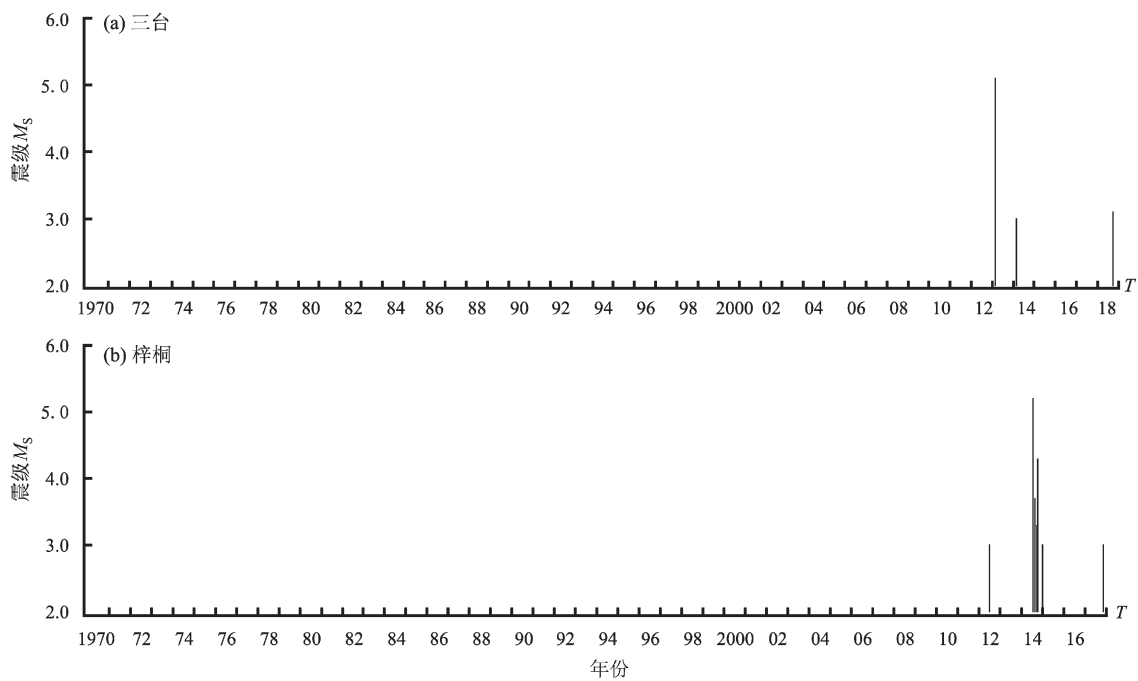


图3 四川三台 (a)、梓潼 (b) 有台网记录以来 $M_L \geq 3.0$ 地震 $M-T$ 图
Fig. 3 $M-T$ diagrams of the $M_L \geq 3.0$ earthquakes in Santai (a) and Zitong (b) areas, Sichuan, since the regional seismic network built-up

对应关系,在给定不同预测规则的条件下,进行了预测效能评分 R 值检验。结果表明,仅四川盆地内部历史少震与弱震区内发生的 $M_s \geq 4.5$ 地震对四川及邻区未来半年内 $M_s \geq 6.5$ 地震具有显著预测意义。

处于构造相对稳定区域的四川盆地内部历史少震与弱震区 $M_s \geq 4.5$ 地震的预测机理是否有别于机理较明确的地震窗或老震区,尚有待进一步研究。

参考文献:

国家地震局科技监测司. 1990. 地震学分析预报方法程序指南[M]. 北京:地震出版社.

国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录[M]. 北京:地震出版社.

何玉林,周荣军,李勇,等. 2010. 2010年1月31日四川遂宁市与重庆潼南县交界5.0级地震概况[J]. 中国地震, 26(2): 235

-241.

罗伟. 1981. 四川盆地地震活动与川西、川滇交界区强震关系初探[J]. 地震研究, 4(2): 178-184.

易桂喜,龙锋, Vallage A, 等. 2016. 2013年芦山地震序列震源机制与震源区构造变形特征分析[J]. 地球物理学报, 59(10): 3711-3731.

易桂喜,龙锋,梁明剑,等. 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 62(9): 3432-3447, doi:10.6038/cjg2019N0297.

易桂喜,闻学泽,张致伟,等. 2010. 川南马边地区强震危险性分析[J]. 地震地质, 32(2): 282-293.

张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学, 33(增刊1): 12-20.

中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录[M]. 北京:中国科学技术出版社.

Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. Nature, 454(7203): 509-510, doi:10.1038/nature07177.

Predictive Efficiency Tests of Moderate Earthquakes with Sizes $M_s \geq 4.5$ in Low Seismicity Regions within Sichuan Basin

YI Guixi¹, ZHOU Longquan², ZHANG Langping², LONG Feng¹, GONG Yue¹

(1. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China)

(2. Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100086, China)

Abstract

Since the 2008 Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake, a series of moderate earthquakes with size $M_s \geq 4.5$ occurred in the interior and the margin of Sichuan Basin. It has been observed that some $M_s \geq 6.0$ strong earthquakes in Sichuan and its surroundings followed a part of the $M_s \geq 4.5$ earthquakes in the interior and the margin of Sichuan Basin. After the Sichuan Changning $M_s 6.0$ earthquake on June 17, 2019, the statistical significance of predictive efficiency for the moderate earthquakes in the interior and the margin of Sichuan Basin has been systematically investigated. Under different prediction rules, statistical tests for predictive efficiency of the $M_s \geq 4.5$ earthquakes have been done, and the results indicate that only some $M_s \geq 4.5$ events occurred in low seismicity regions, such as Santai, Zitong, have statistically significance of predictive efficiency, and can be a predictor for $M_s \geq 6.5$ strong earthquakes within half a year in Sichuan and its adjacent areas.

Keywords: Sichuan Basin; low seismicity regions; $M_s \geq 4.5$ earthquakes; predictive efficiency