

张致伟. 四川盆地显著地震的“窗口”效应[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 41–47. [ZHANG Zhiwei. The "Window Effect" of Significant Earthquakes in Sichuan Basin[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 41–47]

## 四川盆地显著地震的“窗口”效应

张致伟

(四川省地震局, 成都 610041)

**摘要:** 为研究四川盆地显著地震与四川及邻区强震的关系, 通过系统分析了1980年以来四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震与四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震的对应情况, 并对其预报效能进行统计检验, 试图为四川及邻区强震的预测提供依据。结果表明, 四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震对四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震具有一定的预测意义, 优势发震区域为巴颜喀拉块体中东部和川滇交界地区, 发震优势时间为160天内。由此可见, 四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震可作为四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震的中短期预测指标。

**关键词:** 四川盆地; 显著地震; 四川及邻区; 强震; “窗口”地震

**中图分类号:** P315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2022)04-0041-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2022.04.06

## The "Window Effect" of Significant Earthquakes in Sichuan Basin

ZHANG Zhiwei

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between the significant earthquakes and the strong earthquakes in Sichuan and its adjacent area, this paper systematically analyzed the correspondence between the earthquakes with  $4.5 \leq M \leq 5.0$  in Sichuan Basin and the earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Sichuan and its adjacent areas since 1980, and conducted statistical tests on their prediction efficiency, trying to provide a basis for the prediction of the strong earthquakes in Sichuan and its adjacent areas. The results show that the earthquakes with  $4.5 \leq M \leq 5.0$  in Sichuan Basin have good prediction significance for the earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Sichuan and its adjacent areas. The dominant seismogenic regions are the middle segment of Bayan Har block and the Sichuan–Yunnan border area, the dominant time is 160 days. It can be concluded that the earthquakes with  $4.5 \leq M \leq 5.0$  in Sichuan Basin can be used as a short and medium term prediction index for earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Sichuan and its adjacent areas.

**Keywords:** Sichuan Basin; Significant earthquake; Sichuan and its adjacent area; Strong earthquake; "Window" earthquake

**收稿日期:** 2022-02-10

**基金项目:** 国家重点研发计划专题(2021YFC3000705-07)和震情跟踪定向工作任务(2021020503)联合资助。

**作者简介:** 张致伟(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事地震预报和数字地震学应用研究。

**E-mail:** zzw1983107@163.com

## 0 引言

地震活动增强或减弱在一定程度上是构造应力场强弱变化的反映。震例研究表明,较大地震前,未来震中周围 200~300 km 范围内地震活动出现增强是一种具有普适性的震兆现象<sup>[1]</sup>;Mogi<sup>[2]</sup>指出,在浅源大震前一段时间内,震源区周围广大区域的地震活动显著增强,此区域的半径比震源区大 2~3 倍;罗伟<sup>[3]</sup>研究发现四川盆地内的地震活动可作为川西和川滇交界区发生强震的一个标志,当盆地内发生一次或几次 4~5 级显著地震后,大约一两年内或稍长时间,在川西或川滇交界区将可能发生一次或几次 6~7 级乃至 7 级以上地震;焦远碧等<sup>[4]</sup>通过研究我国大陆及边境地区 24 次 6 级以上地震,发现 80% 的强震前在震源区及附近有中等显著地震活动增强的过程,认为中等地震活动增强可看作是稳态蠕变阶段后期发生的广义前震;张国民等<sup>[5]</sup>研究发现大地震前地震活动往往出现增强过程,有的出现在未来大地震的震中及其邻近地区,有的则出现在更大的范围内;易桂喜等<sup>[6]</sup>研究发现四川长宁窗  $M_L \geq 3.5$  显著地震可作为判定四川及邻区发生  $M \geq 5.5$  地震的中期预测指标;杨向东等<sup>[7]</sup>研究了华南地区 14 次中强地震前中等地震活动特征,总结出中短期中等地震累积频度呈指数(加速)增长,短期至发震中等地震持续平静;赵小艳等<sup>[8]</sup>研究发现 2013 年四川芦山 7.0 级地震前川滇地区出现 4~5 级显著地震活动,尤其是 2 月 19—22 日连续发生了巧家 4.9 级、珙县—兴文 4.5 级、三台—梓潼 4.7 级、广西 4.5 级等 6 次地震,其显著活动性历史罕见;付虹等<sup>[9]</sup>研究发现 1971 年以来云南所有  $M \geq 6.8$  地震前,震中附近  $2^\circ \times 2^\circ$  范围或强震所处的小构造区,震前 1~2 年 4 级地震频度明显增加。

四川盆地地震活动作为川西和川滇交界区发生强震的一个指标<sup>[3]</sup>,在四川地区的地震预测工作中一直被应用和检验,但随着时间的推移,地震预测实践中不断有新的现象出现。2008 年汶川 8.0 级地震以来四川及邻区进入强震活跃期,跟踪发现四川及邻区强震前四川盆地均有显著地震发生。为研究新一轮强震活跃期四川盆地显著地震与四川及邻区强震的可能关系,在前人研究的基础上,本文系统分析了 1980 年以来四川盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震与四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震的对应情况,并对其预报效能进行统计检验,试图为四川及邻区强震预测提供依据。

## 1 研究范围及地震活动情况

本文涉及的四川盆地具有较为清晰的边界(图 1:黑色虚线框)。据中国地震台网测定,1980 年以来四川盆地共发生 36 次  $M \geq 4.5$  地震(图 1:绿色),其中 4.5~4.9 级地震 22 次,5.0~5.9 级地震 12 次,6.0~6.9 级地震 2 次,最大为 2019 年 6 月 17 日长宁 6.0 级和 2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震。本研究涉及的强震分布在四川及邻区,包括四川省境内和距离省界 100km 范围的省外区域。据中国地震台网测定,1980 年以来四川及邻区共发生 38 次  $M \geq 6.0$  地震(图 1:红色),其中 6.0~6.9 级地震 32 次,7.0~7.9 级地震 5 次,8.0~8.9 级地震 1 次,最大为 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震,空间上主要分布在巴颜喀拉块体中东部和川滇菱形块体。

图 2 给出了四川盆地  $M \geq 4.5$  地震(a)与四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震的  $M-t$  图,结果显示,四川盆地  $M \geq 4.5$  地震与四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震活动同步性较好,呈现活跃—平静的交替特征。1980 年以来四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震经历了 3 个活跃时段(图 2b),分别为 1981—1989 年,1995—2003 年和 2008—2021 年。四川盆地  $M \geq 4.5$  地震频次随时间逐渐增多(图 2a),尤其在 2008 年以来的第三活跃时段,四川盆地  $M \geq 4.5$  地震与四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震呈现较好的对应关系。

## 2 “窗口”效应分析

地震活动显著增强的表现形式有两种类型,一是未来大震震中及其邻近地区,地震活动水平出现明显增强,通常大震在地震增强活动峰值后的下降阶段发生;二是未来大震震中及邻近地区并无明显地震活动增强,而主要表现为更大范围的地震活动性显著增强,这种地震活动增强一般不持续至主震的发生<sup>[1]</sup>。本文为第二种活动增强形式,在地震活动增强的震级范围选取中,我们尝试了不同的震级档,当选  $M > 4.0$  时,四川盆地地震太多,强震的对应率偏低;当选  $M > 5.0$  时,震例太少,强震的漏报率偏高,不具备研究性。通过不断的筛选,最终选取  $4.5 \leq M \leq 5.0$  较为合适。

为分析四川盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震与四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震的对应关系,挑出盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震后 1 年内四川及邻区发生的  $M \geq 6.0$  地震,并计算了盆地地震与对应地震的时间间隔,详细信息列于

表1。对1980年以来四川盆地21次 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震和四川及邻区38次 $M \geq 6.0$ 地震进行梳理,其中约定将对应同一 $M \geq 6.0$ 地震的四川盆地地震考虑为一组,最终得到14组 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震。将时间较近的强余震或同一 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震后的 $M \geq 6.0$ 对应地震作为一组,最终得到12组 $M \geq 6.0$ 地震。结果显示,

1980年以来四川盆地14组 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震中,有12组震后半年内四川及邻区发生了 $M \geq 6.0$ 地震,仅有2组例外,对应率达86%,表明四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震对四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震具有较强的指示意义。

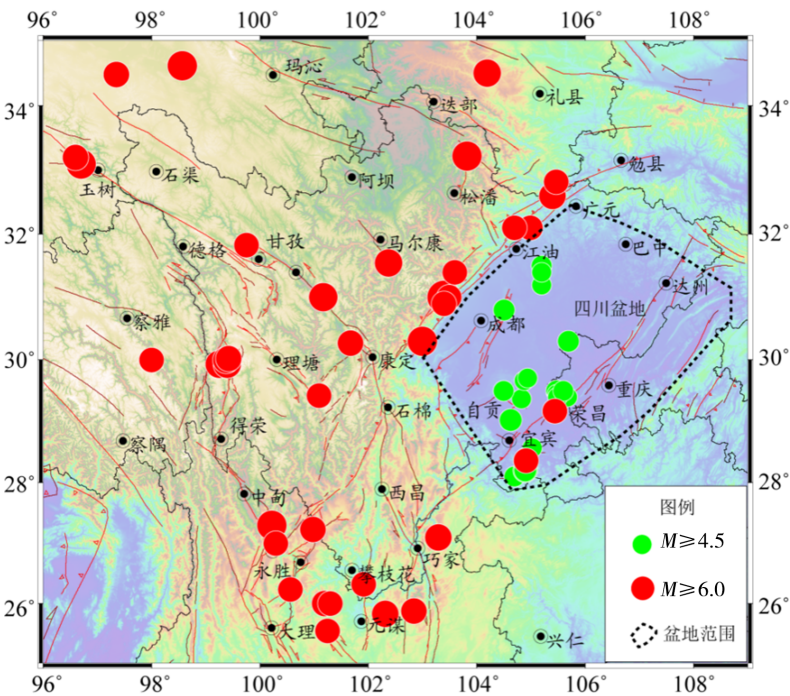


图1 四川盆地 $M \geq 4.5$ 地震(绿色)、四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震(红色)空间分布  
(1980年1月1日—2021年12月31日)

Fig.1 The spatial distribution of earthquakes with  $M \geq 4.5$  in Sichuan basin (green circle) and earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Sichuan and its adjacent area (red circle) from January 1<sup>st</sup>, 1980 to December 31<sup>st</sup>, 2021

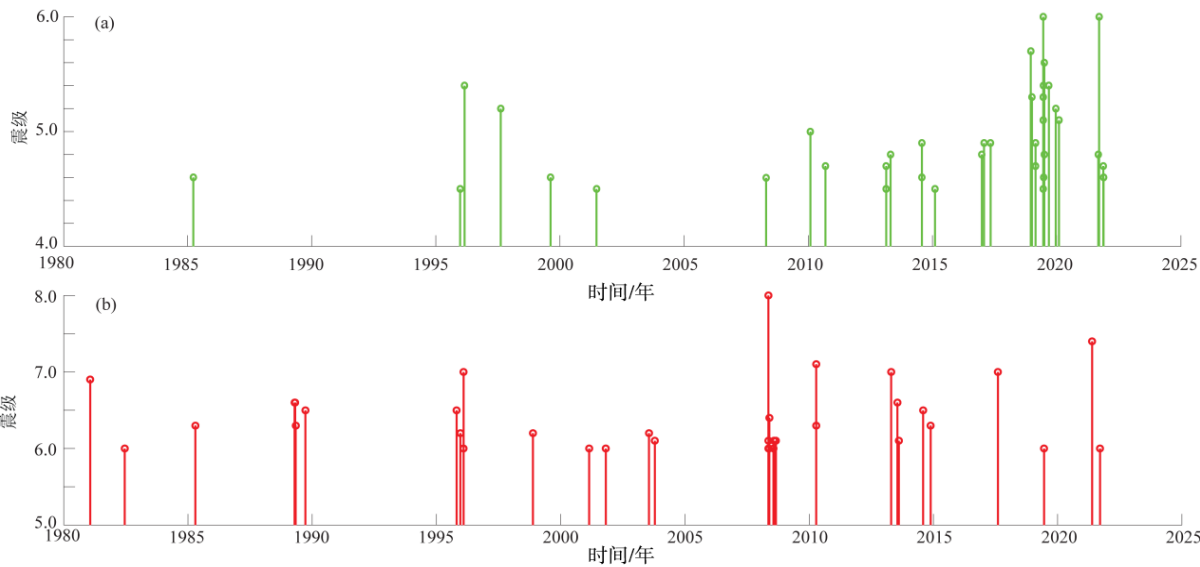


图2 四川盆地 $M \geq 4.5$ 地震(a)、四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震(b)  $M-t$ 图

Fig.2 The  $M-t$  maps of the earthquakes with  $M \geq 4.5$  in Sichuan Basin (a) and earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Sichuan and its adjacent area (b)

表 1 四川盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震与四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震的对应关系

Table 1 The corresponding relationship between earthquakes with  $4.5 \leq M \leq 5.0$  in Sichuan Basin and earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Sichuan and its adjacent area

| 组号 | 四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震 | 四川及邻区 $M \geq 6.0$ 对应地震  | 时间间隔/d |
|----|-------------------------------|--------------------------|--------|
| 1  | 1985-03-29 四川自贡 4.6 级         | 1985-04-18 云南禄劝 6.3 级    | 20     |
| 2  | 1995-12-26 重庆荣昌 4.5 级         | 1996-02-03 云南丽江 7.0 级    | 39     |
| 3  | 1999-08-17 重庆荣昌 4.6 级         | 2000-01-15 云南姚安 6.5 级    | 151    |
| 4  | 2001-06-23 重庆荣昌 4.5 级         | 2001-10-27 云南永胜 6.0 级    | 126    |
| 5  | 2008-02-01 四川长宁 4.6 级         | 2008-05-12 四川汶川 8.0 级    | 101    |
|    |                               | 2008-08-30 四川攀枝花 6.1 级   | 210    |
| 6  | 2010-01-31 四川遂宁—重庆潼南 5.0 级    | 2010-04-14 青海玉树 7.1 级    | 73     |
| 7  | 2010-09-10 重庆荣昌 4.7 级         | 无对应                      |        |
| 8  | 2013-02-19 四川三台—盐亭 4.7 级      | 2013-04-20 四川芦山 7.0 级    | 60     |
|    | 2013-02-19 四川珙县—兴文 4.5 级      |                          |        |
| 9  | 2013-04-25 四川长宁—珙县—兴文 4.8 级   | 2013-07-22 甘肃岷县—漳县 6.6 级 | 88     |
|    |                               | 2013-08-12 西藏左贡—芒康 6.1 级 | 109    |
| 10 | 2014-07-29 四川梓潼—三台 4.9 级      | 2014-08-03 云南鲁甸 6.5 级    | 5      |
|    | 2014-07-29 四川梓潼—三台 4.6 级      | 2014-11-22 四川康定 6.3 级    | 116    |
| 11 | 2015-02-07 四川长宁 4.5 级         | 无对应                      |        |
| 12 | 2016-12-27 重庆荣昌 4.8 级         | 2017-08-08 四川九寨沟 7.0 级   | 226    |
|    | 2017-01-28 四川筠连 4.9 级         |                          | 193    |
|    | 2017-05-04 四川珙县 4.9 级         |                          | 96     |
| 13 | 2019-02-24 四川荣县 4.7 级         | 2019-06-17 四川长宁 6.0 级    | 114    |
|    | 2019-02-25 四川荣县 4.9 级         |                          | 113    |
| 14 | 2021-09-03 四川兴文 4.8 级         | 2021-09-16 四川泸县 6.0 级    | 13     |

2.1 对应地震的优势发震区域

为了分析对应地震的优势发震区域，图 3 给出了 15 次  $M \geq 6.0$  对应地震(震群或强余震算一次)的空间分布。由图可见，除了 2013 年甘肃岷县—漳县 6.3 级、2013 年西藏左贡—芒康 6.1 级、2019 年四川长宁 6.0 级和 2021 年四川泸县 6.0 级等 4 次地震外，其余对应地震主要集中分布在巴颜喀拉块体中东部(5 次)和川滇交界地区(6 次)。其中巴颜喀拉块体中东部以  $M \geq 7.0$  地震(占 80%)为主，而川滇交界地区则以 6.0~6.9 级地震(占 83%)为主。罗伟等<sup>[3]</sup>基于早期资料，分析认为四川盆地内 4 级以上地震的活动与川西、川滇交界的强震活动有较为密切的关系，而与松潘、龙门山断裂带的关系不明显。这与本文的研究结果存在差异，我们分析了优势发震区域的原因。

已有研究表明，汶川 8.0 级和芦山 7.0 级强震可能是巴颜喀拉块体向南东方向运动，在龙门山断裂带附近与稳定的华南块体碰撞、挤压引起地壳缩短的产物<sup>[10]</sup>。汶川 8.0 级地震的发生，对四川盆地具有应力加载作用<sup>[11]</sup>，近十多年，四川盆地地震活动显著增强，历史少震或弱震区发生了一系列中强地震，也表明汶川和芦山地震的发生可能改变了四川盆地的应力环境<sup>[12]</sup>，因此，四川盆地地震活动对巴颜喀拉块体和华南块体的应力变化十分“敏感”。川滇交界地区强震活动主要与川滇菱形块体往南东方向运动有关，这种运动受到四川盆地的阻挡，而首当其冲的是盆地西南部，此处的应力变化可能对川滇菱形块体的运动具有灵敏的指示性<sup>[3]</sup>，这可能就是巴颜喀拉块体中东部、川滇交界地区与四川盆地显著地震关系密切的原因。因此，可把四川盆地内显著地震活动作



为巴颜喀拉块体中东部和川滇交界地区强震发生的一个标志。

2.2 对应地震的优势发震时间

为了分析对应地震的优势发震时间，图4给出了12组四川及邻区  $M \geq 6.0$  对应地震与最近一次四川盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震的时间间隔。由图可见，12组  $M \geq 6.0$  对应地震均发生在 160 d 内(占 100%)，最大间隔时间为 151 d。表明四川盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震发生后，四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震的优势发震时间为 160 d 内。已有相关研究也给出了地震活动增强

的预测时间，如四川地区 3.5~5.9 级地震月频度可作为判定四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震的 1 年尺度预测指标<sup>[6]</sup>；华南地区地震活动指数快速增长开始到发震时间平均约 15 个月，即处于地震孕育的中期阶段<sup>[7]</sup>。总之，大量震例研究显示<sup>[1]</sup>，地震活动增强的时间预测指标主要以中期为主，42% 的地震发生在异常持续 6 个月内，21% 的地震发生在异常持续 7~12 个月内。根据长中短临异常的划分<sup>[13]</sup>，可将四川盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震作为四川及邻区强震预测的中短期指标。

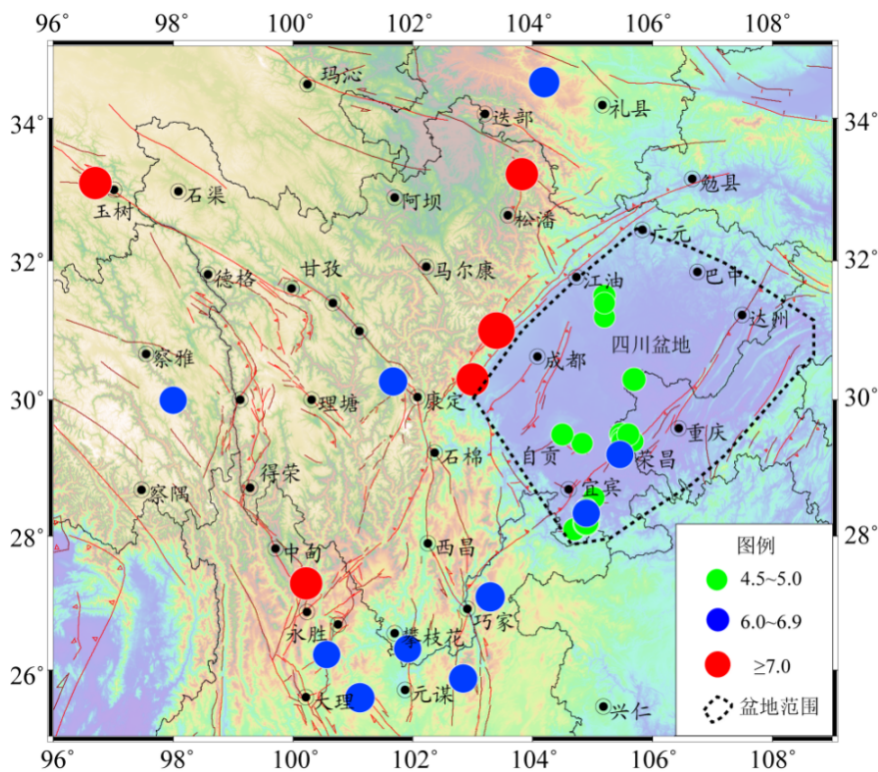


图3 四川及邻区  $M \geq 6.0$  对应地震的空间分布

Fig.3 The spatial distribution of earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Sichuan and its adjacent area

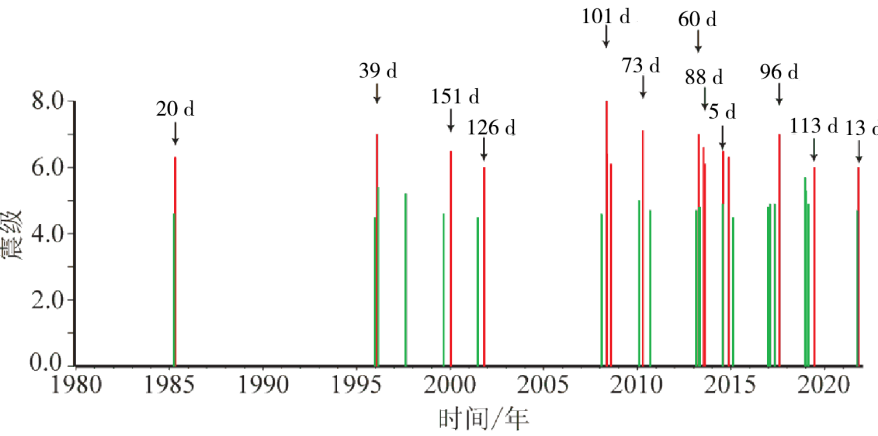


图4 四川盆地  $4.5 \leq M \leq 5.0$  地震(绿色)与四川及邻区  $M \geq 6.0$  地震(红色)时间间隔对应关系

Fig.4 The time distribution of earthquakes with  $4.5 \leq M \leq 5.0$ (green)in Sichuan Basin and earthquakes with  $M \geq 6.0$ (red)in Sichuan and its adjacent areas

3 地震预报效能评价

判别四川盆地 $4.5\leq M\leq 5.0$ 地震是否具有统计上的预测意义，必须遵循一定的预测规则，进行预测评分 $R$ 值检验。许绍燮<sup>[14]</sup>提出了利用 $R$ 值评估地震预报效能的方法，是针对某种预报方法或学科在一个较长时间段内，对一定范围内一定震级下限的地震，进行了若干次地震预报，既有报对的，又有报错的(虚报)，也有地震没有预报的(漏报)，评价其总体预报效能的一种方法。几十年来一直被广泛使用，并进行了改进和应用方式的拓展<sup>[15-17]</sup>。本文采用《地震学分析预报方法程式指

南》<sup>[18]</sup>中的地震预报效能 $R$ 值评分方法(式(1))，该方法能给出不同报对次数、漏报次数下具有97.5%置信水平的 $R$ 值表，可以用于检测预报方法的可信度。

$$R=\frac{\text{报对的地震次数}}{\text{应报的地震总次数}}-\frac{\text{预报占有时间}}{\text{预报研究的时间}}\quad (1)$$

1980年1月至2021年12月共42年，四川及邻区共发生26次 $M\geq 6.0$ 地震(震群或强余震算一次)，其中报对15次，漏报11次，虚报2次。本文的预测规则为，四川盆地发生 $4.5\leq M\leq 5.0$ 地震后，预测未来30 d、90 d、180 d和365 d内四川及邻区可能发生 $M\geq 6.0$ 地震。表2分别给出了不同预测时间的预测效能评分 $R$ 值。

表 2 不同预测时间的 $R$ 值检验结果  
Table 2  $R$ -value test results of different prediction time

| 预测时间/d | $R$  | $R_0$ |
|--------|------|-------|
| 30     | 0.08 | 0.10  |
| 90     | 0.18 | 0.15  |
| 180    | 0.38 | 0.21  |
| 365    | 0.29 | 0.21  |
| 160    | 0.39 | 0.21  |

使用 $R$ 值评分法进行效能评价， $R>0$ 代表该指标效能高于随机预测，具有预测意义；当 $R\geq R_0$ 时，表明该指标预测效能通过显著性检验。其中 $R_0$ 表示考虑报准率和漏报率时，置信度为97.5%的最低 $R$ 值。由表2可知，预测窗长为30 d时， $R<R_0$ ，

未通过统计检验；预测窗长为90 d、180 d和365 d时， $R>R_0$ ，通过统计检验，且最佳预测时间为160 d内(表2、图5)。因此，1980年以来四川盆地 $4.5\leq M\leq 5.0$ 地震可作为判断四川及邻区未来160 d内是否发生 $M\geq 6.0$ 地震的预测指标。

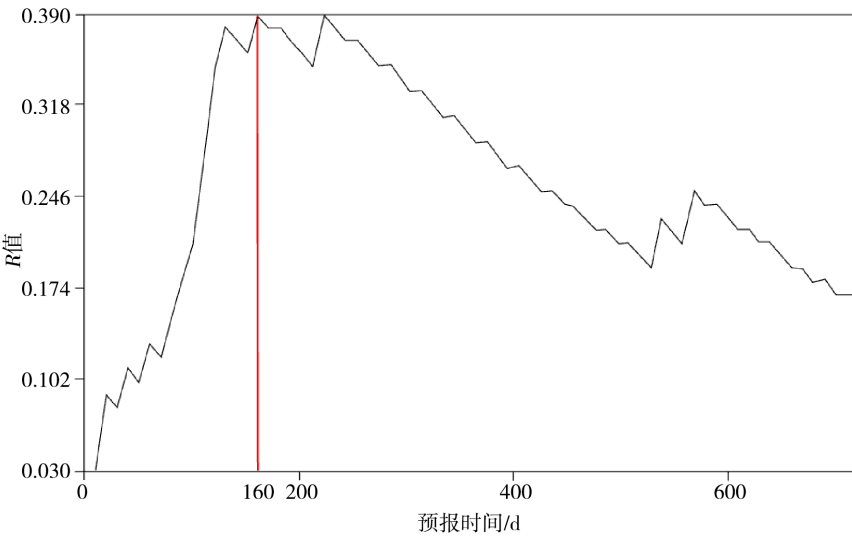


图5 不同预测时间的 $R$ 值曲线  
Fig.5  $R$ -value curve of different prediction times

## 4 结论与讨论

通过系统分析1980年以来四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震与四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震的对应关系,得到以下主要认识。

(1)四川盆地14组 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震中,有12组震后半年内四川及邻区发生了 $M \geq 6.0$ 地震,对应率达86%,表明四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震对四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震具有较强的指示意义。

(2)四川盆地发生 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震后,四川及邻区 $M \geq 6.0$ 对应地震的发震优势地点为巴颜喀拉块体中东部及川滇交界地区,发震优势时间为160 d内。由此可见,四川盆地 $4.5 \leq M \leq 5.0$ 地震可作为四川及邻区 $M \geq 6.0$ 地震的中短期预测指标。

(3)根据强震前的地震活动模式<sup>[19]</sup>,强震前地震活动存在震前增强、平静、前兆震群和甜甜圈等模式,众多地震之前都有这些模式的全部或部分,细节因事件而异,且在不同阶段表现出不同的地震活动特征。鉴于强震孕育过程极为复杂,局部区域发生显著地震仅为强震孕震过程中表现出的地震活动特征之一,还需结合其他地震活动图像演化和观测手段进行综合分析研判。

致谢:中国地震台网中心闫伟副研究员提供了 $R$ 值评分的程序;本文图片采用GMT软件<sup>[20]</sup>绘制;在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] 中国地震局监测预报司. 测震分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社,2020.
- [2] Mogi K. Some features of recent seismic activity in and near Japan (2), activity before and after great earthquakes [J]. Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 1969(47):395-417.
- [3] 罗伟. 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, 1981, 4(2):178-184.
- [4] 焦远碧, 丁鉴还. 中等地震活动增强作为强震标志的研究[J]. 地震, 2000, 20(2):15-19.
- [5] 张国民, 傅征祥, 桂燮泰, 等. 地震预报引论[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [6] 易桂喜, 龙锋, 张致伟, 等. 长宁窗地震与四川及邻区 $M \geq 5.5$ 地震的对应关系[J]. 地震研究, 2013, 36(4):427-432.
- [7] 杨向东, 刘特培. 中等地震对华南中强地震的指示意义[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(3):42-47.
- [8] 赵小艳, 苏有锦, 王强, 等. 芦山7.0级地震前川滇地区中等地震密集活动[J]. 地震研究, 2014, 37(3):347-353.
- [9] 付虹, 洪敏, 王光明, 等. 云南区域强震活动中短期异常的共性特征及应用研究[J]. 地震研究, 2020, 43(2):241-252.
- [10] 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 芦山地震发震构造及其汶川地震关系讨论[J]. 地学前缘, 2013, 20(3):11-20.
- [11] Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. Nature, 2008, 454(7203):509-510.
- [12] 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 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, 2019, 62(9):3432-3447.
- [13] 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 1993:44-96.
- [14] 许绍燮. 地震预报能力评分[C]//国家地震局科技监测司. 地震预报方法实用化研究文集地震学专辑. 北京:地震出版社, 1989:586-589.
- [15] 王晓青.  $R$ 值用于地震预测效能评估中的问题与改进[J]. 中国地震, 2000, 16(3):256-262.
- [16] 罗兰格.  $R$ 值评分方法的再研究[J]. 华北地震科学, 2004, 22(2):1-5.
- [17] 罗兰格. 改进 $R$ 值评分方法的一点更正及其多种用法[J]. 华北地震科学, 2010, 28(4):47-50.
- [18] 国家地震局科技监测司. 地震学分析预报方法程式指南[M]. 北京:地震出版社, 1990.
- [19] Kanamori H. The nature of seismicity patterns before large earthquakes[M]// Earthquake prediction. Washington: AGU, 2013.
- [20] Wessel P, Smith W H F. Free software helps map and display data[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1991, 72(41):445-446.