

汶川 8.0 级地震前的地震活动及序列分析^{*}

李永莉, 毛慧玲, 付 虹

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 通过分析汶川 8.0 级地震的强震活动背景、区域地震活动和地震序列, 寻求汶川地震孕育与活动过程中的特征。结果表明: 该地震是在强震活动外强内弱, 中小地震活动大区域增强, 小区域中长、短期异常活跃的背景下, 发生在龙门山断裂带上的大地震。采用类比概率分析法预测最大强余震, 取得了较准确的结果, 为今后早期判定某些地震序列中最大强余震提供了一种分析思路。

关键词: 汶川 8.0 级地震; 地震序列; 强震活动; 活动背景

中图分类号: P315.75 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)增刊-0424-06

0 前言

在空间分布上的非均匀性和在时间分布上的非平稳性是全球地震活动的显著特征 (张国民等, 2002)。四川地区处于强震活跃的中国大陆西部的西南地区 ($20^{\circ} \sim 35.2^{\circ} \text{N}$, $81^{\circ} \sim 105^{\circ} \text{E}$), 20 世纪以来西南地区的 $M \geq 7$ 地震存在明显的活跃与平静交替活动的规律。

2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震, 是在西南地区处于强震平静期背景下发生的一次巨震。笔者将对汶川地震的强震活动背景、区域地震活动、地震序列等方面进行剖析, 以寻求汶川地震孕育与活动过程中的特征, 分析和研究该次地震的某些特性。

1 强震活动背景

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震后, 中国大陆西部进入了 6 年零 4 个月 (2 318 天) 的 7 级地震平静, 2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.3 级地震结束了这次地震平静, 之后 5 月 12 日四川汶川发生了 8.0 级地震。由图 1 可见, 1900 年以来, 若 7 级地震平静时间超过 1 500 天 (4 年以上),

平静结束后中国大陆西部 $M \geq 7$ 地震会出现明显的丛集活动过程 (4 次以上 $M \geq 7$ 地震, 1963 年 4 月 19 日青海阿兰湖 7 级地震除外), 汶川 8.0 级地震是中国西部地区进入新的 $M \geq 7$ 地震丛集活动过程中的大震。

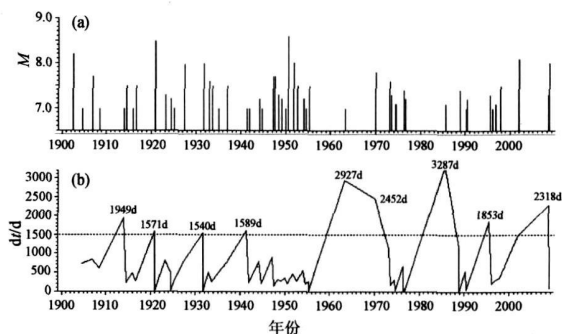


图 1 中国大陆西部 ($20^{\circ} \sim 48^{\circ} \text{N}$, $75^{\circ} \sim 105^{\circ} \text{E}$) $M \geq 7.0$ 地震 M -图 (a) 和 d -图 (b)

由图 2 可见在中国西部地区, 6 级地震呈 NE 向条带分布, 横穿青海、新疆与西藏, 在川、滇、缅 6 级地震呈 SN 向条带分布, 新疆于田 7.3 级地震发生于 NE 向条带的边沿, 汶川 8.0 级地震发生于两条地震条带之间, 因此汶川 8.0 级地震与新疆于田 7.3 级地震, 为 2001 年后西部地区 7 级平静、孕育再次发生的强震。

* 收稿日期: 2008-07-15.

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAC01B03-02-01) 和云南省人才办 (2006PY01-39) 项目联合资助。

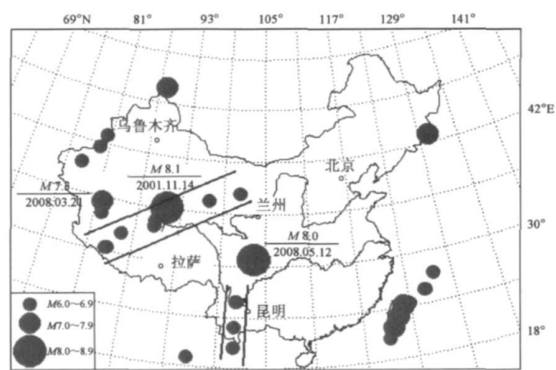


图 2 2001 年 11 月 ~2008 年 5 月
中国 6 级地震震中分布

汶川 8.0 级地震，打破了 1997 年 11 月 3 日西藏玛尼 7.5 级地震后西南地区 10 年零 6 个月的 7 级地震平静（图 3），为新疆于田 7.3 级地震后中国大陆西部 7 级地震丛集活动的延续，为中国大陆西部强震活跃、西南地区强震平静背景下的一次 8 级地震，所以本次地震是在外强内弱的强震动力学背景下孕育与发生的，是延续中国大陆西部强震活动、结束西南地区强震平静期的特殊地震。

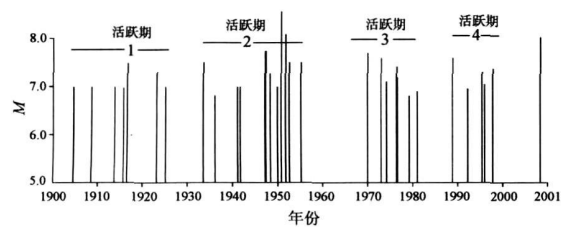


图 3 西南地区 $M \geq 7$ 强震的 $M-t$ 图

2 四川地震活动

四川地区位于我国地震活跃的西南地区，区域内存在地震地质活跃的鲜水河断裂带和龙门山断裂带（傅征祥，1997）。汶川 8.0 级地震发生在龙门山断裂带上，该带东南侧是稳定的四川盆地，西北部是较为活跃的川西高原。该地震反映了印度板块的北推活动，引起青藏块体内部的巴彦克拉次级块体显著向东活动，最终在巴彦克拉地块东端边界上与块体运动方向接近垂直的龙门山断裂带发生以逆冲为主的大破裂。

2.1 强震活动

据统计，1900 年以来四川（以省界为限）共有 8 次 7 级以上地震，有仪器记录的 7 级地震仅为 2 组

3 次：1973 年 2 月 6 日的炉霍 7.6 级与 1976 年松潘的 7.2、7.2 级地震。1933 年 8 月茂汶叠溪 7½ 级地震与 1976 年松潘 2 次 7.2 级地震发生龙门山断裂带附近，其余几次地震均发生在鲜水河断裂带或其附近地区。历史上 7 级地震时间间隔平均为 12 年，最长为 19 年，最短为 3 年，1976 年松潘 7.2 级地震以来四川 7 级强震已平静了 32 年（表 1），为有史以来四川 7 级地震平静时间最长的一次。

表 1 1900 年以来四川地区 $M \geq 7$ 地震

编号	年—月—日	7 级地震		震中	震级	间隔 时间 / a	备注
		东经 /(°)	北纬 /(°)				
1	1904—08—30	31.0	101.1	道孚	7		
2	1923—03—24	31.5	101.0	炉霍	7.3	19	
3	1933—08—25	31.9	103.4	茂汶叠溪	7½	10	
4	1948—05—25	29.5	100.5	理塘	7.3	15	
5	1955—04—14	30.0	101.8	康定	7½	7	
6	1973—02—06	31.50	100.40	炉霍	7.6	18	
7	1976—08—16	32.70	104.08	松潘、平武	7.2	3	多震型
	1976—08—23	32.50	104.30		7.2		
8	2008—05—12	31.00	103.40	汶川	8.0	32	

由图 4 可见，20 世纪以来四川的 $M \geq 6.5$ 地震存在明显的活跃与平静交替活动的规律。1970 年后四川经历了 1968 ~ 1981 年强震活动期和 1982 ~ 1988 年强震平静期。1989 年巴塘 6.7、小金 6.6 级地震后至 2008 年汶川 8.0 级地震，四川 6.5 级地震已平静了 19 年，为史上最长的一次，小金 6.6 级地震也是发生在龙门山断裂带及附近的距今最近的一次 6 级地震。

从统计上分析，汶川 8 级地震为强震较长时间平静后，断裂构造运动产生的一次大能量释放的结果。

2.2 中、小地震活动

我们对四川地区（27.5°~34°N，97°~106°E） $M \geq 3$ 地震目录进行了整理，对 5、6 及 7 级地震序列按主震后 3 个月、6 个月及 12 个月分别对余震进行了删除（吴开统等，1990）。以 1 年为时窗、1 个月为步长，计算 1970 年以来 3、4 级地震的月频次（图 4b、c）。图 4b、c 中点划线表示平均值，点线表示 2 倍方差值。1970 年以来 3、4 级地震活动出现了准同步趋势变化，1989 年以前 3 级地震活动出现增强—减弱、4 级地震活动高于 2 倍方差线 1~3 年后下降时，四川地区均发生了 $M \geq 6.5$ 地震；而 1993 年后 3、4 级地震准同步出现了十分明显的多次增强—减弱活动现象，尤其是 2003 ~

2004年 3、4级地震准频繁出现, 其其后均未发生 $M \geq 6.5$ 地震, 表明 1993年以来四川地区中小地震处于长达 15年之久的强活动状态。

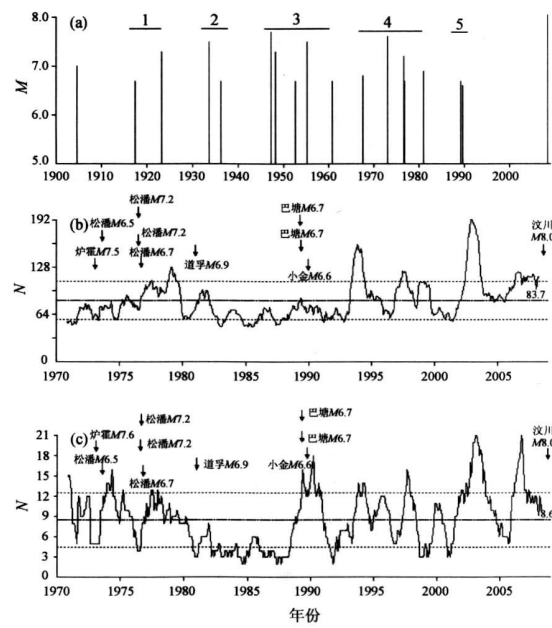
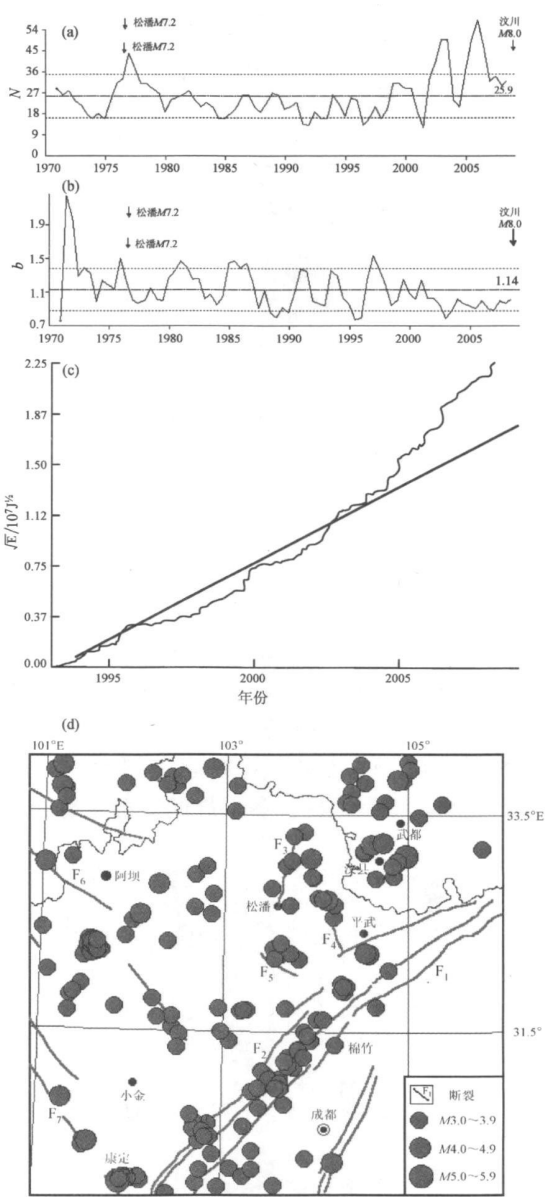


图 4 四川地区强震 M -图与中、小地震月频次曲线图
(a) 1900年以来 $M \geq 6.5$ 地震 M -图; (b) $M \geq 3.0$ 地震月频次; (c) $M \geq 4.0$ 地震月频次

为了追踪龙门山断裂带区域 ($30^{\circ} \sim 34^{\circ} N$, $101^{\circ} \sim 106^{\circ} E$) 的地震活动, 我们以 12 个月为时窗、6 个月为步长, 做 1970 年以来龙门山断裂带 $M \geq 3$ 地震月频次、3~5.5 级地震月 b 值及 1993 年以来 3 级以上地震应变释放曲线 (图 5 a~ c)。图 5 a、b 中点划线表示平均值, 点线表示 2 倍方差值。由图可见, 该区域唯一一组 7 级地震——1976 年松潘 2 次 7.2 级地震前, 3 级地震频次出现高于 2 倍方差的现象, b 值异常不明显。2002 年后该区域 3 级以上地震出现高于 2 倍方差的活动, 尤其 2005~2006 年 3 级地震频次出现 1970 年以来的最高值, 之后居高不下, 在方差线附近波动; 2002~2008 年 4 月 b 值也出现低值异常, 能量释放从 2002 年以来出现明显的加速。从图 5 d 可见 3 级地震主要分布于龙门山断裂带、其它断裂带及甘肃文县、宁强一带, 4、5 级地震集中于甘肃的文县、武都, 四川的平武、康定等地, 表明汶川 8.0 级地震前中小地震集中分布于龙门山断裂带及附近地区, 与其孕震区的空间位置密切相关。



F_1 : 龙门山山前断裂带; F_2 : 龙门山后山断裂带; F_3 : 岷山江断裂带; F_4 : 虎牙断裂带; F_5 : 松坪沟断裂带; F_6 : 玛多断裂带; F_7 : 鲜水河断裂带

图 5 龙门山断裂带及附近地区地震月频次、 b 值、应变曲线及震中分布图
(a) $M \geq 3.0$ 地震月频次; (b) 3~5.5 级地震的月 b 值; (c) 1993 年以来 $M \geq 3.0$ 地震蠕变; (d) 2002 年以来 $M \geq 3.0$ 地震震中分布

综上所述, 1993 年以来四川地区中小地震活动出现了 15 年的活跃, 在此背景下, 2002~2008 年龙门山断裂带及附近地区出现了 6 年的区域性中小地震活动增强、低 b 值、应变释放加速现象, 这可以看作是地震进入孕育期的标志。

3 地震序列的判定

一次强地震发生后，对地震序列趋势的判定至关重要，尤其是对未来最大余震发生时间与震级大小的判定是大家都关心的问题。一般情况下，人们利用 b 值截距法分析序列地震与频度的关系，判定未来最大余震的震级（国家地震局预测预报司，1997、1998），这会受序列地震完整性的影响，早期判定往往存在失误，常需借助对相似条件下历史震例的类比对该序列作出判定。汶川 8.0 级地震为川滇地区有仪器记录以来最大地震，也是发生于大陆板块内的 8 级地震，考虑该地震的震级及区域的特

殊性，我们在汶川地震序列早期（震后 7 天左右）预测中，采取了类比的分析方法。

将 1900 年以来中国大陆地区 8 级地震（8 次）和四川地区 7 级地震（7 次）（图 6）作对比（表 2、3），分别统计这两组地震序列中的最大强余震与主震的震级差 ΔM 及与主、余震间间隔时间 ΔT 与主震震级的关系。结果如图 6 所示：中国大陆 8 级地震组中 ΔM 集中分布于 1.5~2.2 之间，时间间隔 ΔT 集中分布于 30 天内；四川 7 级地震组中 ΔM 集中分布于 1.5~2.0 之间，时间间隔 ΔT 集中于 60 天内。以最大概率统计分析，预测汶川 8.0 级地震的最大余震震级为 6.5 级左右，最佳时间为主震后 2 个月内。

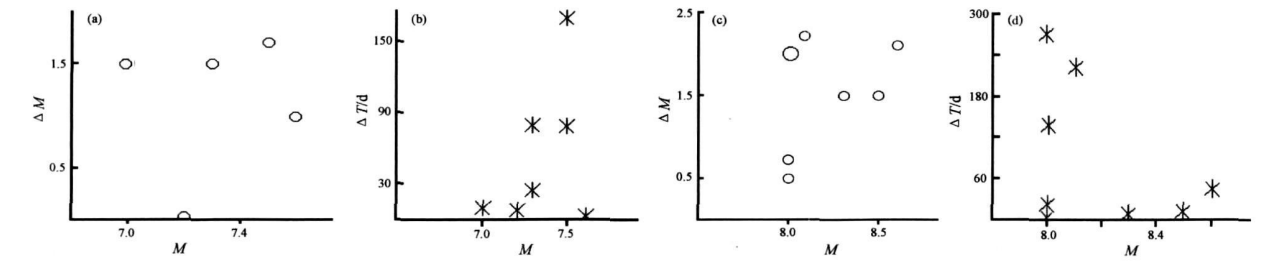


图 6 强震主震与最大余震的震级差及主震震级与间隔时间关系
(a) 四川地区 7 级主震震级与最大余震震级差 ΔM (b) 四川地区 7 级主震震级与间隔时间 ΔT
(c) 大陆地区 8 级主震震级与震级差 ΔM (d) 大陆地区 8 级主震震级与间隔时间 ΔT

表 2 1900 年以来四川地区 $M \geq 7$ 地震序列

编号	7 级大震			后续最大余震		震级差	时间间隔 / d
	年—月—日	地点	震级	年—月—日	震级		
1	1904—08—30	炉霍	7	1904—09—09	$>5\frac{1}{2}$	1.5	9
2	1923—03—24	道孚	7.3	1923—06—14	$5\frac{3}{4}$	1.5	80
3	1933—08—25	茂汶迭溪	$7\frac{1}{2}$	1933—10—15	$5\frac{3}{4}$	1.7	80
4	1948—05—25	理塘	7.3	1948—06—18	$5\frac{3}{4}$	1.5	24
5	1955—04—14	康定	$7\frac{1}{2}$	1955—08—04	$5\frac{1}{2}$	2.0	100
6	1973—02—06	炉霍	7.6	1973—02—08	6.6	1.0	2
7	1976—08—16	松潘	7.2	1976—08—23	7.2	0	7

表 3 1900 年以来中国大陆 $M \geq 8$ 地震序列

编号	8 级大震			后续最大余震		震级差	时间间隔 / d
	年—月—日	地点	震级	年—月—日	震级		
1	1902—08—22	新疆阿图什	8.3	1902—08—31	6.8	1.5	9
2	1906—12—23	新疆沙湾	8.0	1907—05—13	6.0	2.0	150
3	1920—12—16	宁夏海原	$8\frac{1}{2}$	1920—12—25	7.0	1.5	9
4	1927—05—23	甘肃古浪	8.0	1927—05—23	6.0	2.0	0
5	1931—08—11	新疆富蕴	8.0	1931—08—18	$7\frac{1}{4}$	0.7	7
6	1950—08—15	西藏察隅	8.6	1950—09—30	$6\frac{1}{2}$	2.1	45
7	1951—11—18	西藏当雄	8.0	1952—08—18	$7\frac{1}{2}$	0.5	270
8	2001—11—14	青海昆仑山口西	8.1	2002—06—29	5.9	2.2	210

2008年 5月 25日青川县发生一次 6.4级地震,与预测的最大强余震时间震级吻合,同时 6.4级地震后,余震震级随时间也出现明显衰减(图 7);5月 27日四川青川县 5.4、陕西宁强县 5.7级地震后,地震序列余震震级最大为 5级,同时震级无明显起伏(吴开统等, 1990)。因此判定该 6.4级地震为汶川 8.0级地震的最大强余震。

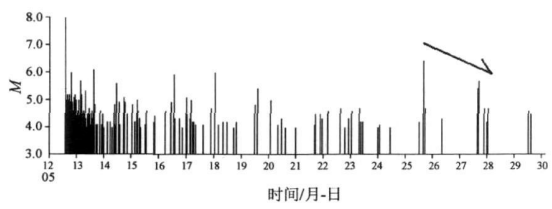


图 7 汶川 8级地震序列的 M— 图

4 结论与讨论

(1) 分析 2002年龙门山断裂带及附近地区 3级以上地震活动(图 5),汶川 8.0级地震前,3级地震沿龙门山断裂带及附近地区密集分布,在距汶川地震 100 km范围内,2002~2006年均无 4、5级地震活动,仅平武于 2007年 3月 11日、9月 16日各发生一次 4.2、4.1级地震,2008年 2月 27日康定发生一次 5.0级地震。即汶川地震前孕震区的地震活动分布为:3级地震沿孕震区构造带增强活动,外围 4、5级地震从平静到活动为强震孕育进入中、短期的标志。但目前川滇地区有仪器记录的大震震例尚少,汶川地震前的地震活动孕育分布特征是否具有普适性,仍需在今后的工作中证明。

(2) 在追踪汶川 8.0级地震前四川地区地震活动的过程中,我们发现四川地区的地震活动出现了历史之最:7级强震平静长达 32年, $M \geq 6.5$ 地震平静长达 19年,3、4级地震活跃长达 15年,在汶川 8.0级地震的孕震区及附近,震前 6年左右出现 3级地震活跃。因此,可将强震大区域长期平静背景下,中、小地震中长、短期活跃作为大震孕育标志。这与以往震例中总结的强震发生前,

大多数以大区域小地震活跃、中强地震平静作为强震进入孕震短期的标志是一致的(梅世蓉, 1993; 蔡静观, 1997)。这种以大区域强震平静、中小地震活跃长达十数为背景,小区域小地震数年活跃为大地震孕育进入中长、短期阶段的特点,可能为强震孕育的又一种新标志,为今后预测预报云南地区未来强震提供了新的分析思路。

(3) 对汶川地震序列采用类比概率法,判定其最大余震的强度、最可能发生时间,在主震后几天内就可取得较准确的初步判定,为以后对强震序列的早期判定提供了可行的方法。当然此方法仍需在未来的震例中不断检验其准确性,同时也要结合序列本身的地震活动规律来加以分析判断。

汶川 8.0级地震是在中国大陆西部强震自 2001年 11月 14日昆仑山口西 8.1级地震平静后,再次进入强震活跃背景下,西南地区 10年零 6个月的 7级地震平静,四川地区长达 19年的 6.5级地震平静,四川地区 3、4级地震活跃 15年之久,龙门山断裂带及附近地区 3级地震 6年活跃下发生的,四川有史以来龙门山断裂带上唯一的一次 8级地震,是在强震活动外强内弱、中小地震活跃的状态下发生在活动断裂带上的大地震,具有特殊地震地质构造和动力学背景,对未来西南地区及云南地区的强震活动可能有一定的指示意义。

参考文献:

蔡静观. 1997 丽江大震前长—中—短—临地震学异常的演化过程 [J]. 地震研究, 20 (1): 13—20.

傅征祥. 1997 中国大陆地震活动性力学研究 [M]. 北京: 地震出版社.

国家地震局预测预报司. 1997. 测震学分析预报方法 [M]. 北京: 地震出版社.

国家地震局预测预报司. 1998. 大陆地震预报的方法和理论 [M]. 北京: 地震出版社.

梅世蓉. 1993 中国地震预报概论 [M]. 北京: 地震出版社. 78—81.

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: 97—148.

张国民 尹京苑 张流. 2002 地震中短期预报物理基础 [M]. 北京: 地震出版社.

The Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake: Pre-seismic Activity and Maximum Aftershock Prediction

LI Yong-li MAO Hui-lin FU Hong

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

Abstract

With the aim to find the features of the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake in development and activity process, we analyze the strong earthquake activity in western China since 2001, the seismicity in Sichuan and the Wenchuan earthquake sequence. The Wenchuan earthquake occurred on the Longmenshan fault under the background that the strong earthquake activity was strong outside southwestern China but weak inside the area; the moderate-small earthquake increased in a big range and the medium- and short-term anomalies were active in a small range. The analogue analysis method, which is used to forecast the maximum strong aftershock of the Wenchuan earthquake, is accurate to the early judgment of the maximum strong aftershock.

Key words: Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake; earthquake sequence; aftershock activity