

李向农,延军平.川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征及其周期解释[J].地震工程学报,2017,39(4):0698-0705.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0698
LI Xiang-nong, YAN Jun-ping. Time Symmetric Characteristics of $M_s \geq 7.0$ Earthquakes in the Sichuan—Yunnan Region and Cycle Interpretation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 0698-0705. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0698

川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征及其周期解释^①

李向农, 延军平

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 通过地震时间对称特征进行地震趋势判断的研究, 对于地震防灾、减灾有重要意义。为验证地震时间对称性研究方法, 揭示地震时间对称特征的机理, 采用可公度计算、蝴蝶结构图和可公度结构系方法研究川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征及趋势; 然后利用小波分析所提取的川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放周期和日月活动周期, 对川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征进行解释。研究结果显示: (1) 川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震具有明显时间对称特征, 2017 年发震信号最强, 其随机概率为 65.5%。(2) 川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征是地震能量释放周期更直观的表达。(3) 川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征是月球赤纬角周期和太阳黑子周期组合叠加的结果, 月球赤纬角极值是强震的主要触发因素。

关键词: 地震; 周期; 时间对称; 川滇地区

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)04-0698-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0698

Time Symmetric Characteristics of $M_s \geq 7.0$ Earthquakes in the Sichuan—Yunnan Region and Cycle Interpretation

LI Xiang-nong, YAN Jun-ping

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xian 710062, Shaanxi, China)

Abstract: The ability to predict the time-trend of earthquakes through seismic time symmetric characteristics is a significant step in earthquake disaster prevention and reduction. To verify the research approach of seismic time symmetry and reveal the mechanisms involved in seismic time symmetry characteristics, time symmetry characteristics and trends of $M_s \geq 7.0$ earthquakes are analyzed and assessed by applying different methods such as commensurability calculations, the butterfly structure diagram, and the commensurability structure system. The seismic time symmetric characteristics are then explained in relation to types of cycles, such as the seismic energy releasing cycle, lunar right declination, and the sunspot cycle. Results show that: (1) the earthquake ($M_s \geq 7.0$) sequence in the study area has evident time symmetry characteristics, and there are strong earthquake signals in 2017 with a random probability of occurrence of 65.5%; (2) the time symmetry characteristics of $M_s \geq 7.0$ earthquakes provide a good intuitive expression of seismic energy releasing cycle; (3) the time symmetry characteristics of $M_s \geq 7.0$

① 收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 国家社科基金重点项目(14AZD094); 国家自然科学基金项目(41371497)

作者简介: 李向农, 男, 博士研究生, 主要研究方向为地震灾害风险管理。E-mail: lxnong@163.com。

通信作者: 延军平, 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事全球变化与灾害学研究。E-mail: yanjp@snnu.edu.cn。

earthquakes results from the varying effects of superposition of lunar right declination and sunspot cycles, and the extremum of lunar right declination is the main trigger for strong earthquakes ($M_s \geq 7.0$).

Key words: earthquake; cycle; time symmetry; the Sichuan—Yunnan region

0 引言

由于地震的突发性和巨大破坏性,如果能准确判断地震三要素:发震地点、时间和震级大小,将能极大地减少地震灾害损失。地震预测一直是地球科学最富有挑战性的研究领域,吸引了众多学者的关注^[1],但目前其仍未达到理想水平,关于地震能否预测亦存在广泛的争议^[2]。地震趋势判断的研究思路是暂时放松地震预测的严格约束条件,研究地震的时空分布规律,对未来地震震级、发震时间和空间位置进行判断。通过不断地积累研究案例和拓展研究方法,逐步提高地震趋势判断的精确度,最终为地震预测做出贡献。汶川地震与玉树地震之前学者的相关研究^[3-4]及一些震例后的回溯性验证研究^[5-6],证明了地震趋势判断对于发现地震规律,提前判断地震的发生有重要意义。

通过分析地震序列对称性特征进行地震趋势判断研究,为地震灾害的研究开拓了一种新的方法,并取得了大量的研究成果^[7-12],但目前仍缺乏对地震对称性特征及趋势的内在机理解释。有学者猜测地震发生是多重周期叠加的结果^[13],有周期就有对称。本文通过对地震发生时间周期的研究印证地震对称性研究方法,并为地震对称性特征及趋势的内在机理提供解释。

中国是全球地震频发区,由于欧亚板块和印度板块的碰撞,应力聚集导致川滇地区地震活动剧烈,成为我国大陆地区最显著的地震活动区域,地震灾害防灾、减灾任务艰巨。同时该地区相对完整和详尽的地震记录资料可以为研究地震时空对称性和趋势判断提供研究数据。因此本文选择川滇地区作为研究区域。

本文采用可公度计算、蝴蝶结构图和可公度结构系方法研究川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征及趋势;运用小波分析方法提取地震能量释放周期,分析地震能量释放周期与地震对称性关系,并结合月球赤纬角与太阳黑子的周期变化探讨地震时间对称性的内在机制。

1 资料来源及方法

1.1 资料来源

川滇地震的历史数据主要来源于中国地震信息

网(<http://www.csi.ac.cn>)以《全球地震灾害信息目录(9999B.C.-2010A.D.)》。从中提取 1900 年以后川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 、 $M_s \geq 7.0$ 的地震序列目录,具体包括发震时间、震级、地点及经纬度坐标。太阳黑子年度变化数据来源于太阳黑子指数数据中心(SIDC),从中提取 1900—2015 年数据。月球赤纬角年度数据采用开源天文计算工具包 PyEphem 计算,时段选取 1900—2015 年。

1.2 研究方法

1.2.1 地震时间对称性研究方法

(1) 可公度计算

最早在天文学研究中总结的天体运行的可公度性,被翁文波院士引入信息预测科学^[14-16],继而广泛应用于自然灾害趋势研究领域,尤其是地震灾害研究,并取得了显著成果。主要使用的可公度计算有:三元可公度、四元可公度、五元可公度和一般可公度值计算。

(2) 蝴蝶结构图

蝴蝶结构图是可公度方法的直观图形化表达,反映灾害事件的时间序列所蕴藏的多时间周期对称性结构。可借助蝴蝶结构图判断未来灾害发生时间窗口期,并进一步计算预测年份中灾害发生的随机性概率值,计算灾害不漏报置信水平。

(3) 可公度结构系

可公度结构系将灾害时间序列在二维平面中以特定的时间间隔进行重构,形成相对规则的网络结构图,是灾害时间结构对称性的另一种表达和验证。构建的可公度结构系越工整,代表灾害的时间对称性规律越强,对未来灾害的趋势判断就更准确。

1.2.2 地震能量释放小波分析方法

在时间序列研究中,小波分析主要用于时间序列的消噪和滤波、信息量系数和分形维数的计算、突变点的监测和周期成分的识别以及多时间尺度的分析等。利用小波变换分析 1900 年以来川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放时间序列信号周期特征。

首先利用 Gutenberg 地震震级和能量的转换关系[式(1)]构建川滇地区地震能量时间序列。

$$E = 10^{1.5M+11.8} \quad (1)$$

其中: M 代表地震里氏震级; E 代表地震释放的

能量。

再次,利用小波变换将地震能量的时间序列信号分解为一系列小波函数的叠加,而这些小波函数都是某一母小波函数在时间域上不断平移或者拉伸与压缩得到的。选择适当的母小波函数非常重要,参考文献[17],选择 Morlet 小波函数作为小波变换母小波,其表达式为:

$$\varphi(t)=\pi^{-\frac{1}{4}}e^{ict}e^{-t^2}\tag{2}$$

其中: c 为无量纲频率,取 $c=6$ 较为合适。

使用 Matlab6.5、Suffer8.0 软件对川滇地区地震能量时间序列进行小波变换,并绘制小波系数实部等值线图、小波方差图和主周期变化趋势图。

2 川滇地区 $M_s\geqslant7.0$ 地震时间对称性特征

20 世纪以来,川滇地区地震活动极其强烈,发震频率非常高。统计 1900 年以来近 115 a 该区 $M_s\geqslant7.0$ 地震活动数据(表 1)对其可公度性开展研究。具体计算过程中同一年份发生多次 $M_s\geqslant7.0$ 地震按照一次对待。

表 1 川滇地区 $M_s\geqslant7.0$ 地震序列

Table1 The $M_s\geqslant7.0$ earthquake sequence in Sichuan—Yunnan area

序列	发震时间	东经/(°)	北纬/(°)	震级/ M_s	地点
1	1904-08-30	101.10	31.00	7.00	四川道孚
2	1913-12-21	102.45	24.15	7.00	云南峨山
3	1917-07-31	104.00	28.00	7.30	云南大关
4	1923-03-24	101.00	31.50	7.30	四川炉霍
5	1925-03-16	100.40	25.70	7.00	云南大理
6	1933-08-25	103.40	31.90	7.50	四川叠溪
7	1941-05-16	99.40	23.60	7.00	云南耿马
8	1941-12-26	99.90	22.70	7.00	云南澜沧
9	1948-05-25	100.50	29.50	7.30	四川理塘
10	1950-02-03	100.10	21.70	7.00	云南勐海
11	1955-04-14	101.80	30.00	7.50	四川康定
12	1967-08-30	100.30	31.60	7.00	四川炉霍
13	1970-01-05	102.68	24.20	7.80	云南通海
14	1973-02-06	100.70	31.30	7.60	四川炉霍
15	1974-05-11	104.10	28.20	7.10	云南大关
16	1976-05-29	99.00	24.50	7.30	云南龙陵
17	1976-05-29	98.70	24.60	7.40	云南龙陵
18	1976-08-16	104.10	32.60	7.20	四川松潘
19	1976-08-23	104.30	32.50	7.20	四川松潘
20	1988-11-06	99.79	22.92	7.60	云南澜沧
21	1988-11-06	99.55	23.16	7.20	云南耿马
22	1995-07-12	99.30	22.00	7.30	云南孟良
23	1996-02-03	100.30	27.20	7.00	云南丽江
24	2008-05-12	103.40	30.95	8.00	四川汶川
25	2010-04-14	96.59	33.22	7.10	青海玉树
26	2013-04-20	102.99	30.30	7.00	四川芦山

2.1 川滇地区 $M_s\geqslant7.0$ 地震可公度计算

2.1.1 三元可公度趋势判断

$X_1=1904;X_2=1913;X_3=1917;X_4=1923;X_5=1925;X_6=1933;X_7=1941;X_8=1948;X_9=1950;X_{10}=1955;X_{11}=1967;X_{12}=1970;X_{13}=1973;X_{14}=1974;X_{15}=1976;X_{16}=1988;X_{17}=1995;X_{18}=1996;X_{19}=2008;X_{20}=2010;X_{21}=2013;X_{22}=?$

计算结果为:

2016 年 9 次;2017 年 3 次;2018 年 7 次;2019 年 4 次;2020 年 13 次;2021 年 8 次;2022 年 5 次;2023 年 6 次;2024 年 7 次;2025 年 9 次;2026 年 5 次;2027 年 5 次;2028 年 3 次;2029 年 3 次;2030 年 1 次;2031 年 1 次;2033 年 1 次。未来 10 a 中,2020 年信号最强,其次是 2016 年。

2.1.2 四元可公度趋势判断

$X_1=1904;X_2=1913;X_3=1917;X_4=1923;X_5=1925;X_6=1933;X_7=1941;X_8=1948;X_9=1950;X_{10}=1955;X_{11}=1967;X_{12}=1970;X_{13}=1973;X_{14}=1974;X_{15}=1976;X_{16}=1988;X_{17}=1995;X_{18}=1996;X_{19}=2008;X_{20}=2010;X_{21}=2013;X_{22}=?$

计算结果为:

2016 年 74 次;2017 年 77 次;2018 年 68 次;2019 年 61 次;2020 年 48 次;2021 年 32 次;2022 年 35 次;2023 年 33 次;2024 年 27 次;2025 年 10 次;2026 年 12 次;2027 年 7 次;2028 年 4 次;2029 年 6 次;2030 年 3 次;2036 年 1 次。未来 10 a 中,2017 年信号最强,其次是 2016 年。

2.1.3 五元可公度趋势判断

$X_1=1904;X_2=1913;X_3=1917;X_4=1923;X_5=1925;X_6=1933;X_7=1941;X_8=1948;X_9=1950;X_{10}=1955;X_{11}=1967;X_{12}=1970;X_{13}=1973;X_{14}=1974;X_{15}=1976;X_{16}=1988;X_{17}=1995;X_{18}=1996;X_{19}=2008;X_{20}=2010;X_{21}=2013;X_{22}=?$

计算结果为:

2016 年 185 次;2017 年 179 次;2018 年 167 次;2019 年 141 次;2020 年 137 次;2021 年 110 次;2022 年 102 次;2023 年 95 次;2024 年 89 次;2025 年 61 次;2026 年 59 次;2027 年 43 次;2028 年 28 次;2029 年 30 次;2030 年 16 次;2031 年 12 次;2032 年 7 次;2033 年 6 次;2034 年 3 次;2035 年 1 次;2036 年 1 次;2038 年 3 次;2039 年 1 次。未来

形成 5 组地震年份;图 2(b)为 2017 年预测所构建的可公度结构系,其结构系包含 5 个标准矩形,以 1933、1955 年为起点,以相同的时间间隔 15 a、7 a、18 a、15 a、7 a 同时向下延伸形成 5 组地震年份。该结构系非常工整,表现出川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震活动很强的时间对称性,据此得出的未来川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震的时间窗口期为 2016 和 2017 年,与之前方法得出的结论基本吻合。

3 1900 年以来川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放

3.1 小波系数实部等值线图

小波系数实部等值线图反映地震能量释放时间

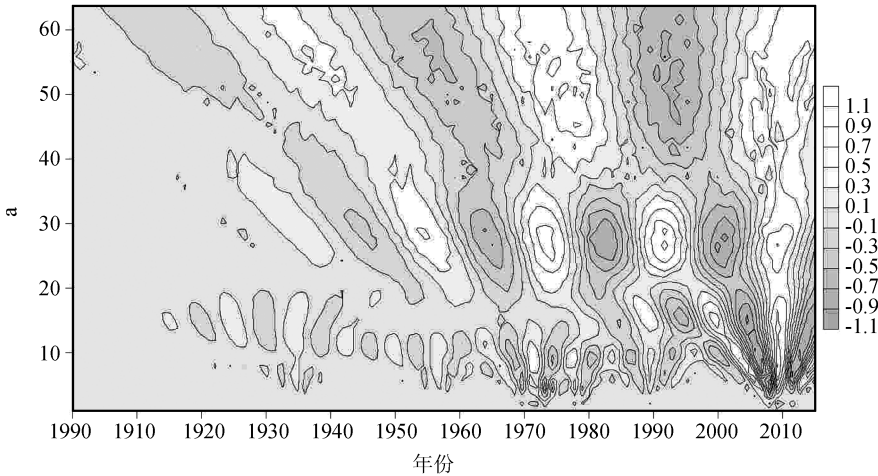


图 3 1900 年以来川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放小波变换等值线

Fig.3 Contour of wavelet transform of $M_s \geq 5.0$ earthquake energy release in Sichuan—Yunnan area since 1900

3.2 小波方差分析

小波方差图可以表现出川滇地区地震能量释放时间序列的波动能量随尺度 a 的分布情况,以此可以确定该区地震能量释放过程中存在的主周期。

由图 4 可知,川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放存在 5 个较为明显的峰值,它们依次对应着 53 a、28 a、15 a、10 a 和 5 a 的时间尺度。其中最大波峰对应着 28 a 的时间尺度,说明 28 a 左右的周期震荡最强,可以认为是川滇地区地震能量释放变化的第一主周期;53 a 时间尺度对应着第二峰值,为地震能力变化的第二主周期;其余波峰对应的 5 a、10 a 和 15 a 依次为地震能量释放的第三、第四和第五主周期。不同时间尺度 5 个周期的波动控制着川滇地震能量释放在整个时间域内的变化特征。

3.3 准周期变化趋势

根据小波方差检验的结果绘制控制川滇地区能

量释放序列的不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,进而能判断在不同时间尺度上地震能量释放的未来变化趋势。

由图 3 可知,川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放时间序列存在多时间尺度特征。总体来看,在川滇地区地震能量释放过程中存在 5~20、20~40 以及 40~60 a 的 3 类尺度的周期变化规律。其中在 40~60 a 尺度上出现了准两次震荡;在 20~40 a 时间尺度上存在准 4 次震荡,且这一尺度的周期变化在整个分析时域中表现相对稳定;而 5~20 a 尺度的周期变化在 1920—1940 年、1940—1988 年和 1988—2008 年三个时段表现较为稳定。

量释放序列的五个主周期小波系数图(图 5)。依据该图分析在不同的时间尺度下川滇地区能量释放存在的平均周期及能量释放的变化特征。

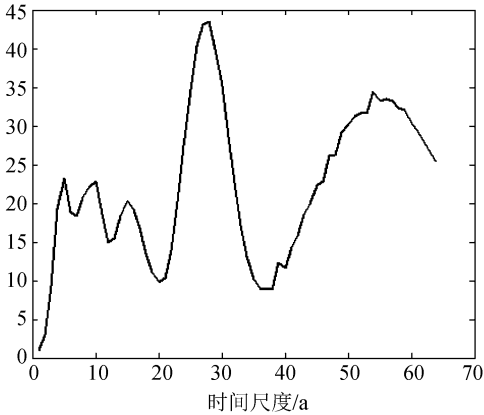


图 4 1900 年以来川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放小波方差图

Fig.4 Wavelet variances of $M_s \geq 5.0$ earthquake energy release in Sichuan—Yunnan area since 1900

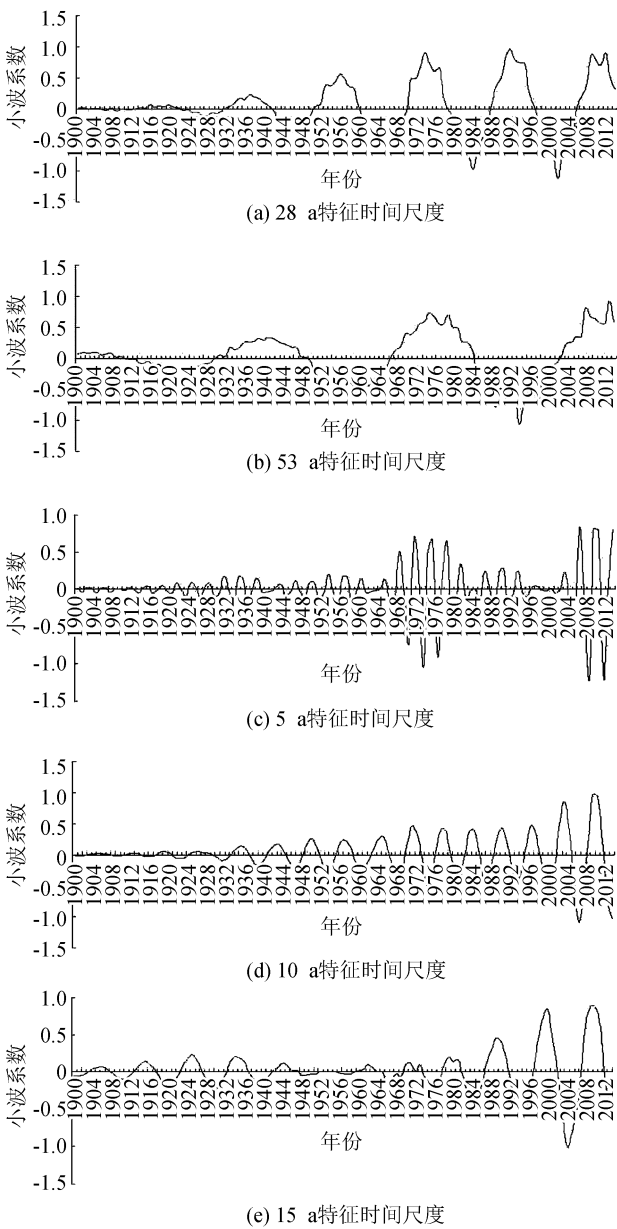


图 5 1900 年以来川滇地区 $M_s\geq 5.0$ 地震能量释放准周期

Fig.5 Quasi-period of $M_s\geq 7.0$ earthquake energy release in Sichuan—Yunnan area since 1900

由图 5(a)可知,川滇地区 $M_s\geq 5.0$ 地震能量释放在 28 a 特征时间尺度上地震能量释放变化的平均周期为 18.5 a 左右;而在 53 a 特征时间尺度上[图 5(b)]其地震能量释放变化的平均周期为 36 a 左右;在 5 a 特征时间尺度上[图 5(c)]地震能量释放变化的平均周期为 3 a 左右;在 10 a 特征时间尺度上[图 5(d)]地震能量释放变化的平均周期为 7 a 左右;在 15 a 特征时间尺度上[图 5(e)]地震能量释放变化的平均周期为 9 a 左右。

4 川滇地区 $M_s\geq 7.0$ 地震时间对称特征的周期分析

4.1 地震时间对称特征是地震能量释放周期的直观表达

川滇地区 $M_s\geq 7.0$ 地震序列表现出明显的时间对称特征。在地震时间对称特征研究方法中,蝴蝶结构图是地震时间对称性最直观的表现方法。该地区 $M_s\geq 7.0$ 地震蝴蝶结构图(图 1)中,蝶宽分别为:3 a、7 a、9 a、18 a、22 a、35 a 及 40 a(个别蝶宽出现上下一年的波动),其中 18 a(19 a)与地震能量释放小波分析所得到的第一主周期(18.5 a)非常吻合,而 35 a(34 a)、3 a(2 a 或 4 a)、7 a(6 a 或 8 a)、9 a(10 a)的蝶宽也与地震能量释放的第二主周期(36 a)、第三主周期(3 a)、第四主周期(7 a)、第五主周期(9 a)基本一致。说明川滇地区 $M_s\geq 7.0$ 地震时间对称特征是地震能量释放周期的一种更直观的表达,地震能量释放周期分析也可以作为地震时间对称性方法的佐证和补充。

4.2 地震能量释放主周期与月球赤纬周期关系

川滇地区 $M_s\geq 5.0$ 地震能量释放第一主周期为 18.5 a 左右,与月球轨道 18.6 a 升交点西移周期非常吻合。月球赤纬角最大时地球产生的形变量值是月球赤纬角最小时产生相应形变量值的 2.3 倍^[18]。月球赤纬的这种周期性变化,对潮汐在地球内产生的起潮力有较大的影响,川滇地区地震能量释放的 18.5 a 准周期现象正是这种影响的体现。川滇地区 $M_s\geq 5.0$ 地震能量释放第二主周期(36 a)和第五主周期(9 a)应该是月球赤纬周期的倍周期和半周期;而其地震能量释放的第三主周期(3 a)、第四主周期(7 a)无法独立地用月球赤纬周期解释。

4.3 川滇地区 $M_s\geq 7.0$ 地震与日月关系

既然地震能量释放周期与月球赤纬周期有关,同时考虑到已有的太阳黑子与地震的相关研究^[19-23],分析 1900 年以来川滇地区 $M_s\geq 7.0$ 地震与日月关系(图 6),图中虚线反映月球赤纬角变化,实线反映太阳黑子变化,数据标记点为 $M_s\geq 7.0$ 地震。

从图 6 中可以看出:

(1) 当月球赤纬角处于极大、极小值或它们的领域内(在极大或极小值前后 2 a 的时域)时,川滇地区均发生 $M_s\geq 7.0$ 地震(1960 年左右特殊,未发生 7.0 级以上地震),月球赤纬角极值是川滇地区 $M_s\geq 7.0$ 地震的主要触发因素。

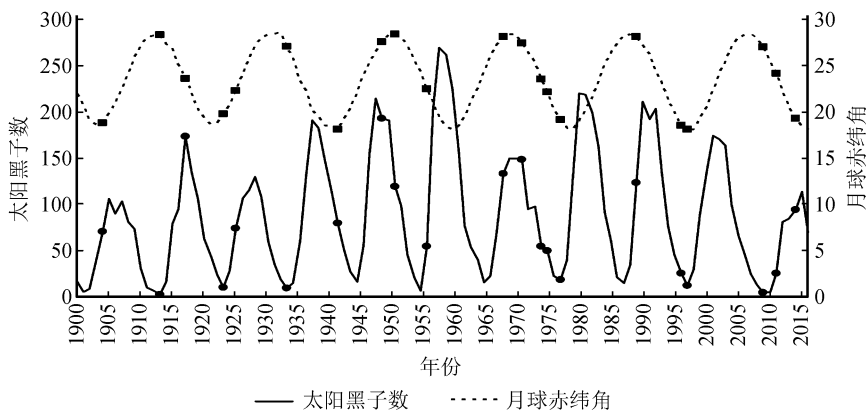


图6 1900年以来川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震、最大赤纬角与太阳黑子

Fig.6 Distribution of $M_s \geq 7.0$ earthquakes, maximum lunar declination, and sunspots in Sichuan—Yunnan area since 1900

(2) 川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震多发生在太阳黑子活动处于谷值年附近时,其中6次 $M_s \geq 7.0$ 地震与太阳黑子谷值年完全吻合,发震时间分别是1914年、1923年、1933年、1976年、1996年和2008年;而太阳黑子活动处于峰值年附近时,川滇地区发生 $M_s \geq 7.0$ 地震相对较少,只有1917年地震刚好处于太阳黑子活动的峰值年。

总体看,川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震主要受到月球赤尾角周期变化影响,太阳黑子的活动周期对其发震时间有一定调节作用。作为该地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征表达方法的蝴蝶结构图(图1)和可公度结构系(图2),其中出现的各组对称的时间间隔均可认为是月球赤尾角周期与太阳黑子周期相互叠加的结果,如22 a时间间隔组正好是太阳黑子11 a年周期的两倍,18 a时间间隔组与月球赤纬角18.6 a周期基本一致,而40 a时间间隔组恰恰是以上两个周期的组合。

5 结论

本文采用可公度计算、蝴蝶结构图和可公度结构系方法研究川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征及趋势;运用小波分析方法提取1900年以来川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震能量释放周期,分析地震能量释放周期与地震对称性关系,并结合月球赤纬角与太阳黑子的周期变化探讨地震时间对称性的内在机制,得出以下结论:

(1) 川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震具有明显的时间对称特征,2017年发震信号较强,随机概率65.5%,蝴蝶结构图与可公度结构系非常工整。

(2) 川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征是地震能量释放周期更直观的表达,地震能量释放的5

个周期在蝴蝶结构图中都得到较好的体现。

(3) 川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震时间对称特征是月球赤纬角周期和太阳黑子周期组合叠加的结果,月球赤纬角极值是该地区 $M_s \geq 7.0$ 地震的主要触发因素。川滇地区 $M_s \geq 7.0$ 地震主要受到月球赤尾角周期变化影响,太阳黑子的活动周期对其发震时间有一定调节作用。

地震发生是非常复杂的过程,涉及地球内部与外部多个因素的演化及相互影响,未来研究需要进一步考虑其他因素,如地球自转周期变化与地震时间特征的关系,以印证和完善地震时间对称性研究方法。

参考文献(References)

- [1] 陈运泰.地震预测:回顾与展望[J].中国科学:D辑(地球科学), 2009,39(12):1633-1658.
CHEN Yun-tai. Earthquake Prediction: Retrospect and Prospect[J]. Science in China: Series D (Earth Sciences), 2009, 39 (12):1633-1658. (in Chinese)
- [2] Kossobokov V G. Earthquake Prediction: 20 Years of Global Experiment[J]. Natural Hazards, 2013, 69(2):1155-1177.
- [3] 龙小霞,延军平,孙虎,等.基于可公度方法的川滇地区地震趋势研究[J].灾害学,2006,21(3):81-84.
LONG Xiao-xia, YAN Jun-ping, SUN Hu, et al. Study on Earthquake Tendency in Sichuan—Yunnan Region Based on Commensurability[J]. Journal of Catastrophology, 2006, 21 (3):81-84. (in Chinese)
- [4] 延军平,同娜.关于地震预测体系构建的可能性及验证[J].陕西师范大学学报:哲学社会科学版,2008,37(5):19-23.
YAN Jun-ping, YAN Na. Probability and Verification of Constructing an Earthquake Predicting System [J]. Journal of Shaanxi Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition, 2008, 37(5):19-23. (in Chinese)
- [5] 郭安宁,李鑫,赵乘程,等.2013年芦山7.0级地震一年尺度预测的回顾性研究——基于三性法、静中动和垂震底继模式[J].

- 地震工程学报,2013,35(2):257-265.
- GUO An-ning, LI Xin, ZHAO Cheng-cheng, et al. Retrospective Study on One-year Prediction for 2013 Lushan $M_s 7.0$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2):257-265. (in Chinese)
- [6] 郭增建, 郭安宁, 吴建华, 等. 2015 年 10 月 26 日阿富汗 $M_s 7.8$ 地震发生时间的回顾性预测[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1123+1128.
- GUO Zeng-jian, GUO An-ning, WU Jian-hua, et al. Reviewing Prediction for the Occurrence Time of the Afghan $M_s 7.8$ Earthquake on Oct. 26, 2015[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 1123+1128. (in Chinese)
- [7] 谭锴. 基于可公度方法的云南地区地震数据分析与预测[J]. 地震地磁观测与研究, 2009, 30(6): 12-16.
- TAN Kai. Data Analyzing and Forecasting of Earthquake in Yunnan Region Based on Commensurability[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2009, 30(6): 12-16. (in Chinese)
- [8] 胡辉, 曾佐勋, 苏有锦, 等. 芦山地震的预测[J]. 天文研究与技术, 2015, 12(2): 247-252.
- HU Hui, ZENG Zuo-xun, SU You-jin, et al. On the Forecasts of the Lushan Earthquake in 2013[J]. Astronomical Research and Technology, 2015, 12(2): 247-252. (in Chinese)
- [9] 董国胜. 中国大陆 8 级地震的可公度值探讨[J]. 地震研究, 1987, 10(4): 441-446.
- DONG Guo-sheng. A Preliminary Study on Commensurability of Strong Earthquakes Mithin the Continent of China[J]. Journal of Seismological Risiarch, 1987, 10(4): 441-446. (in Chinese)
- [10] 林辉, 苏有锦, 韩延本, 等. 新疆昆仑地震的可公度性[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 189-191.
- LIN Hui, SU You-jin, HAN Yan-ben, et al. Commensurability of Earthquakes in Kunlun Area of Xinjiang[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 189-191. (in Chinese)
- [11] 丁彩霞, 延军平, 李敏敏, 等. 意大利 $M_s \geq 6$ 地震时空对称性趋势判断[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(8): 50-54.
- DING Cai-xia, YAN Jun-ping, LI Min-min, et al. Research on Space-time Symmetry of $M_s \geq 6$ Earthquake Disasters in Italy[J]. Journal of ARID Land Resources and Environment, 2014, 28(8): 50-54. (in Chinese)
- [12] 唐宝琪, 延军平. 斐济地区 $M_s \geq 7.1$ 地震活动规律及未来趋势统计研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(5): 2064-2070.
- TANG Bao-qi, YAN Jun-ping. The Active Pattern and Future Trend of Earthquakes with $M_s \geq 7.1$ in Feiji Area[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(5): 2064-2070. (in Chinese)
- [13] 朱照宣. 阿诺德舌头、朱栽培平均律和翁文波可公度性[J]. 力学与实践, 2008, 30(6): 120-123.
- ZHU Zhao-xuan. Arnold tongues, Zhu Zaiyu's Twelve-tone Temperament and Weng Wenbo's Commensurability[J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(6): 120-123. (in Chinese)
- [14] 翁文波. 可公度性[J]. 地球物理学报, 1981, 24(2): 151-154.
- WENG Wen-bo. Commensurability[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1981, 24(2): 151-154. (in Chinese)
- [15] 翁文波. 预测论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- WENG Wen-bo. Fundamentals of Forecasting Theory[M]. Beijing: Petrochemical Industry Press, 1984. (in Chinese)
- [16] 翁文波, 吕牛顿, 张清. 预测学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- WENG Wen-bo, LV Niu-dun, ZHANG Qing. Forecasting[M]. Beijing: Petrochemical Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [17] 解朝娣, 吴小平, 雷兴林, 等. 长周期潮汐与全球地震能量释放[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3425-3433.
- XIE Chao-di, WU Xiao-ping, LEI Xing-lin, et al. Long-periodic Astronomical Tide and Global Earthquake Energy Release[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3425-3433. (in Chinese)
- [18] 杨学祥, 陈殿友, 李守春. 干旱、地震与月球赤纬角变化[J]. 西北地震学报, 1999, 21(1): 45-48.
- YANG Xue-xiang, CHEN Dian-you, LI Shou-chun. Drought, Earthquake and the Variation of the Moon's Declination[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(1): 45-48. (in Chinese)
- [19] 刘双庆, 曹井泉, 张磊, 等. 太阳黑子活动对地球地震活动的影响浅析[J]. 华北地震科学, 2013, 31(1): 1-7.
- LIU Shuang-qing, CAO Jing-quan, ZHANG Lei, et al. Some Analyses of the Impact of Sunspots Activities on Earthquakes[J]. North China Earthquake Sciences, 2013, 31(1): 1-7. (in Chinese)
- [20] 屠泓为, 李智敏, 罗国富, 等. 太阳黑子活动周期对中国大陆西部不同震级段地震的影响探讨与分析[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 879-885.
- TU Hong-wei, LI Zhi-min, LUO Guo-fu, et al. Discuss and Analyze of Sunspot Activity Periods Impact on the Vary Segment Magnitude Earthquake of West China[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3): 879-885. (in Chinese)
- [21] 刘长海, 陈宇卫, 刘义高. 华东地区中强地震与太阳黑子数时间变化的呼应[J]. 地震地磁观测与研究, 2003, 24(5): 57-59.
- LIU Chang-hai, CHEN Yu-wei, LIU Yi-gao. The Relation between the Moderate Earthquakes in East China and the Variation of Sunspot Number[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2003, 24(5): 57-59. (in Chinese)
- [22] 尹继尧, 朱元清, 宋治平, 等. 中国西部及邻区百年尺度周期的地震活动及其和太阳活动之间的负相关性[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2263-2271.
- YIN Ji-yao, ZHU Yuan-qing, SONG Zhi-ping, et al. Hundred-year-scale Cycle of Seismic Activities in Western China and Its Negative Correlativity with Sunspot Activity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2263-2271. (in Chinese)
- [23] 杨云, 田韬, 冯志生. 太阳黑子活动及地球自转对江苏及邻区地震的影响分析[J]. 华南地震, 2011, 31(1): 92-97.
- YANG Yun, TIAN Tao, FENG Zhi-sheng. Analysis of the Influence of Sunspot Activity and Velocity Variation of Earth Rotation on the Earthquake of Jiangsu and Its Adjacent Area[J]. South China Journal of Seismology, 2011, 31(1): 92-97. (in Chinese)