

朱春鸣,延军平,董治宝.泛天山地区 $M_s \geq 6.6$ 地震时空对称性及趋势分析[J].地震工程学报,2020,42(5):1117-1124.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1117
ZHU Chunming, YAN Junping, DONG Zhibao.Space-Time Symmetry and Tendency Analysis of $M_s \geq 6.6$ Earthquakes in Pan-Tianshan Mountains[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(5):1117-1124.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1117

泛天山地区 $M_s \geq 6.6$ 地震时空对称性及趋势分析

朱春鸣,延军平,董治宝

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710062)

摘要: 利用可公度法、蝴蝶结构图法、可公度结构系和自回归模型对 1716 年以来泛天山地区 $M_s \geq 6.6$ 地震进行了分析。结合震中位置和震源深度的对称性,发现研究区内的强震具有良好的时空对称性,2022—2023 年泛天山地区,尤其是 2023 年 7 月有(± 1 月)发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性,震中位于 80°E 、 41°N 西南方区域内的可能性较大。利用时间对称性与自回归模型来提高对称性方法对强震的识别精度和趋势分析的可靠程度,同时把日期精确到了月份,使强震趋势判断研究向前推进。该研究可以深化地震韵律与地震连续规律的认识,丰富地理时空规律认识。

关键词: 地震; 时空对称性; 自回归模型; 可公度; 泛天山地区

中图分类号: P315.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1117-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1117

Space-Time Symmetry and Tendency Analysis of $M_s \geq 6.6$ Earthquakes in Pan-Tianshan Mountains

ZHU Chunming, YAN Junping, DONG Zhibao

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

Abstract: In this study, we use the commensurability method, butterfly structure diagram method, commensurable structure, and autoregressive algorithm model to analyze the $M_s \geq 6.6$ earthquakes in Pan-Tianshan Mountains since 1716. Combined with the symmetry of the epicenter location and focal depth, results show that the strong earthquakes in the study area have a good space-time symmetry. A $M_s \geq 6.6$ earthquake is more likely to occur in Pan-Tianshan Mountains on years 2022—2023, especially in July 2023 (± 1 month), and the epicenter is more likely to locate in the southwestern region of 80°E and 41°N . In this study, time symmetry and autoregressive model are used to improve the identification accuracy of the symmetry method and tendency analysis of strong earthquakes. The date is accurate to the month, advancing the judgment of

收稿日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目“中国西部地震灾害时空对称结构精细化对接研究”;中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018TS071)

第一作者简介: 朱春鸣(1995—),女,蒙古族,硕士研究生,主要从事自然灾害学相关研究。E-mail: zhucm@snnu.edu.cn.

通信作者: 延军平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事全球变化与灾害学研究。E-mail: yanjp@snnu.edu.cn.

strong earthquake tendency.

Keywords: earthquake; space-time symmetry; autoregressive model; commensurability; Pan-Tianshan Mountains

0 引言

自然灾害是由自然力量引起的人类社会财产损失和生命伤亡的事件^[1-2]。地震灾害是对人类影响较大的自然灾害,如果能够从时间序列反映地震发生的规律,再逐渐深入到地震发生的机理,这可能是地学对自然灾害研究的重要贡献之一^[3]。

地震的时空对称性在地震研究的过程中备受关注且研究成果显著,趋势判断结果较好^[4-12],研究发现全球两大主要地震带的强震在时间上表现为相对平静期与相对活跃期交替出现^[13],在空间上表现为多种形式的震中迁移,同时不仅国内关注地震时空分布,同时国外也专注地震的模拟及其物理机理相关研究^[14],地震的时空对称性是地震发生机理的外在表现形式^[15-17],通过对其进行深入的研究,并结合天文学、物理学、地质学等学科,逐步深入地震发生的内在机理。

本文拟通过对泛天山地区 1716 年以来 $M_s \geq 6.6$ 地震进行时空对称性分析,在前人的基础上,增加了自相关的算法,使趋势判断更加准确,同时将趋势判断的精确到月份^[18-19]。

1 研究区概况

泛天山地区地处于亚洲腹部,陆壳历史悠久,经历了多次重大地壳的变革,天山-塔里木板块是新疆地区规模最大和构造组合最复杂的一个板块,例如北山断裂带,此处多条平行的逆冲断裂^[20-24]。天山构造变形受到山体盆地和天山构造带变形推力的推动^[25],前人利用全国定位系统(GPS)进行此地区的大地测量,结果表明西天山南北向速率缩短,同时向印度板块和欧亚板块靠近,因此成为地震多发地区,构造运动强烈,同时影响周边地区^[26],尤其是在提出“一带一路”以后,此地区成为关注重点地区,所以本文研究泛天山地震带的地震的趋势规律。

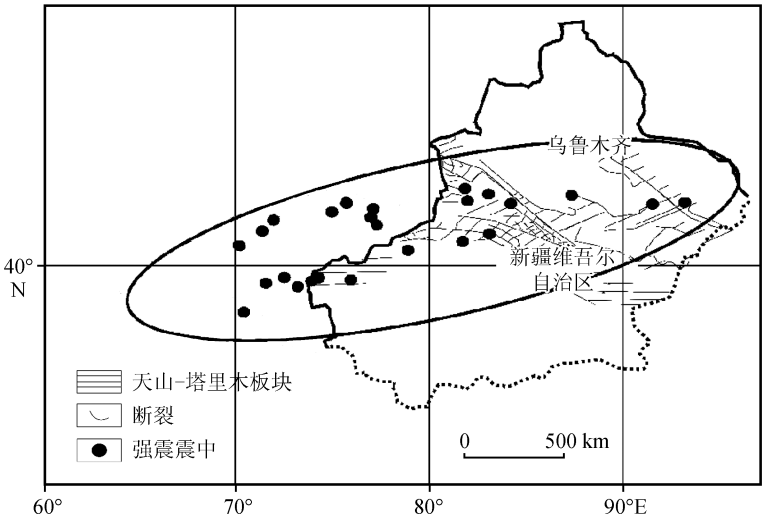


图 1 泛天山地区研究区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area in Pan-Tianshan Mountains

因此成为地震多发地区。强烈的构造运动影响周边大幅地区,尤其关联“一带一路”经济发展战略实施,因此,研究泛天山地震带的地震趋势规律意义重大。

2 数据来源与方法

2.1 资料来源

本文地震数据来源于美国国家海洋和大气管理

局(NOAA)统计数据,(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA),同时参考了《全球地震灾害信息目录》^[27],中国地震台网、新疆地震局及美国地质勘探局(USGS)的相关数据,当数据不一致时以中国地震台网、新疆地震局为准,因此进一步确保了对泛天山地震带 $M_s \geq 6.6$ 未来趋势判断分析。具体数据如下表:

表 1 近 300 年泛天山地区 $M_s\geqslant 6.6$ 地震参数

Table 1 Parameters of $M_s\geqslant 6.6$ earthquakes in Pan-Tianshan Mountains in the past 300 years							
日期	震级/ M_s	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	日期	震级/ M_s	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$
1716	7.5	41.2	80.3	1946-11	7.6	41.5	72.5
1812-03	8	43.7	83	1949-02	7.4	39.2	70.8
1842-06	7	43.6	93	1955-04	7	39.9	74.6
1885-08	6.9	42.7	74.1	1961-04	6.8	39.8	77.7
1887-06	7.3	43.1	76.8	1965-11	6.6	43.9	87.8
1889-07	8.3	43.2	78.7	1970-06	6.6	42.5	78.8
1893-12	6.8	41.7	82.8	1976-05	7	40.31	63.77
1896-11	6.6	39.7	75.9	1978-03	7.1	42.839	78.606
1902-08	7.7	39.88	76.2	1984-03	7	40.32	63.35
1906-12	8.3	43.5	85	1985-08	7.5	39.431	75.224
1907-10	7.4	38.5	67.9	1992-08	7.5	42.142	73.575
1911-01	7.7	43.5	77.5	2008-10	6.6	39.533	73.824
1914-08	7.5	43.5	91.5	2015-012	7.2	38.211	72.78
1944-03	7.2	44	84	2017-08	6.6	44.27	82.89

2.2 研究方法

2.2.1 可公度理论

“可公度性”是自然规律之一,是对称性的一种体现。其对称性既表现在时间上,又表现在空间分布上,具有时空统一性^[28]。时空可公度是经多层时空对称叠加而呈现出的四维对称,其形式为一种网络状的对称形式。重大自然灾害决不是一个个的孤立事件,而应该是一个有时空联系的灾害事件网^[29]。

2.2.2 蝴蝶结构法与可公度结构系

“蝴蝶结构图”是在时间序列之上由不同的等时间间隔绘制而成的,是可公度对于自然灾害时间对称性的进一步表达^[30-31]。其主要解决经可公度计算后,如何从多个可能年份中选择最可能发生灾害的年份问题,并给出预测结果的随机性概率与不漏报的置信水平。可公度结构系是更加简化的蝴蝶结构图,更直观地展现出时间对称性,可再次验证预测时间。

2.2.3 自回归模型

当一个要素(变量)按时间顺序排列的观察值之间具有依赖关系或自相关时,就可以建立该要素(变量)的自回归模型,并由此对其发展变化趋势进行预测。自相关性是建立自回归模型的基础,只有具有显著的自相关性的时间序列才可以建立自回归模型^[32]。大量的研究表明地震时间序列具有自相关性^[33-35],并且广泛应用于地震趋势模型。

时间序列的自相关是指前序列和后序列的值之间的相关性,并且相关程度由自相关系数确定。设 $y_1, y_2, \cdots, y_t, \cdots, y_n$, 共有 n 个观察值。一般地, k 阶自相关系数 r_k 为

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \overline{y_t}) * (y_{t+k} - \overline{y_{t+k}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \overline{y_t})^2 * \sum_{t=1}^{n-k} (y_{t+k} - \overline{y_{t+k}})^2}} \tag{1}$$

式中: $\overline{y_t}$ 和 $\overline{y_{t+k}}$ 分别是 y_t 和 y_{t+k} 的均值,即

$$\overline{y_t} = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} y_t, \overline{y_{t+k}} = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} y_{t+k} \tag{2}$$

一般地, p 阶线性自回归模型为

$$y_t = \varphi_0 + \varphi_1 y_{t-1} + \cdots + \varphi_{t-p} y_{t-p} + \epsilon_t \tag{3}$$

式中: $\varphi_i (i = 0, 1, 2, \cdots, p)$ 为参数值,用最小二乘法估计获得^[29]。本文采用 IBM SPSS Statistics 21 软件对数据进行 3 阶自回归模型的建立。

3 结果分析

3.1 三元可公度趋势分析

三元可公度法计算如下: $x_1=1716; x_2=1812; \cdots; x_{27}=2015; x_{28}=2017; x_{29}=?$ 计算结果为: 2018 年 2 次; 2019 年 9 次; 2020 年 6 次; 2021 年 8 次; 2022 年 7 次; 2023 年 13 次; 2024 年 8 次; 2025 年 5 次; 2026 年 2 次; 2027 年 9 次。其中 2023 为最强, 2019 和 2027 为次强。

3.2 四元可公度趋势判断

四元可公度计算如下: $x_1=1716; x_2=1812; \cdots; x_{27}=2015; x_{28}=2017; x_{29}=?$ 得出结果: 2023 年 56 次; 2024 年 37 次; 2025 年 29 次; 2029 年 29 次; 2030 年 33 次; 2031 年 33 次; 2032 年 32 次。其中 2023 年信号最强。

3.3 五元可公度趋势判断

五元可公度计算如下: $x_1=1716; x_2=1812; \cdots; x_{27}=2015; x_8=2017; x_{29}=?$ 2023 年 177

次;2024 年 150 次;2025 年 143 次;2026 年 123 次;2027 年 124 次;2028 年 97 次;2029 年 102 次;其中 2023 年信号最强有 177 次,而 2027 年仅有 124 次,2023 年信号最强。

3.4 蝴蝶对称结构图趋势判断

自然灾害的发生不仅有时间对称性,同时具有空间对称性,蝴蝶结构图就是空间对称性的体现。是关于时间结构的进一步认识,在前人的文章中多是来做两者信号都强的情况下如何抉择的问题,本文可公度信息明确指向 2023 年,利用可公度信息,绘制蝴蝶结构图,进一步确定与其相关的周期,确定强震趋势的可靠性。从图中可以看出与 2023 年相

关的周期为 6a、8a、15a、30a、38a、39a、47a、53a、60a、62a、80a 等共十一组,根据蝴蝶结构图新疆及其周边地区泛天山地震带发生 $M_s \geq 6.6$ 的随机概率为 72%。

自然灾害的发生不仅有时间对称性,同时具有空间对称性。蝴蝶结构图被广泛应用在空间对称性中信号强弱的对比判别^[36],从图 2 中可以看出泛天山地震带发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的时间具有一定规律性。其中可以套和到 2023 年的最为显著,随机概率最高(75%),不漏保置信水平为 $(1-\alpha=72.41)$ 。相关主周期分别为 6a、15a、31a、39a,共出现 21 组,从而进一步明确该地区在 2023 年可能发生强震。

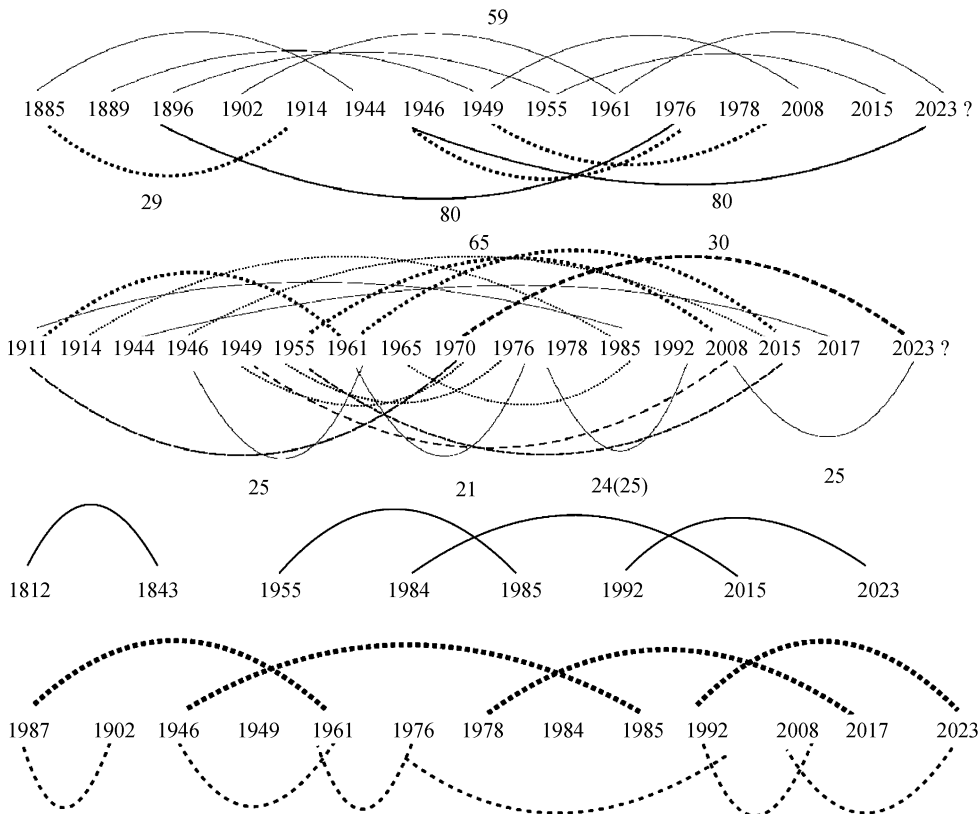


图 2 泛天山地区 1716 年以来 $M_s \geq 6.6$ 地震时间序列蝴蝶结构图

Fig.2 Butterfly structure of time series of $M_s \geq 6.6$ earthquakes in Pan-Tianshan Mountains since 1716

3.5 自回归模型趋势判断

3.5.1 自回归模型检验

首先检验年份自回归模型的预测精度。设 $x_1=1716; x_2=1812; \cdots; x_{27}=2015; x_{28}=2017; x_{29}=?$

3 阶自相关系数

$$r_3 = \frac{\sum_{t=1}^{28} (y_t - \overline{y_t}) * (y_{t+3} - \overline{y_{t+3}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{28} (y_t - \overline{y_t})^2 * \sum_{t=1}^{116} (y_{t+3} - \overline{y_{t+3}})^2}} = 0.951,$$

$$r_{0.001}(100) = 0.159$$

它表明时间序列具有显著的自相关性,并且可以建立自回归模型,得到如下回归模型:

$x_{t+3} = 1.602x_t - 0.941x_{t+1} + 0.458x_{t+2} - 230.622$
运用该模型进行预测计算: $y_{29} = 2\ 022.376$,即 2 022.376 年发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性较大。

令 1712 年设为 1,1713 年设为 2,1714 年设为 3,以此类推,将 1716 年以来泛天山地震带 $M_s \geq 6.6$ 地震按地震发生的年份序数进行顺序排列,即 $y_1 = 1, y_2 = 97, y_3 = 127, \cdots, y_{26} = 293, y_{27} = 300,$

$y_{28}=302$,得到如下回归模型:

$$y_{t+3}=0.941y_t+0.336y_{t+1}-0.284y_{t+2}+5.830$$

运用该模型进行预测计算: $y_{29}=307.376$,即 2 023.376 年发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性较大。

月份自回归模型预测精度检验:设 1812 年 1 月为 1,2 月为 2,3 月为 3,以此类推,由于 1716 年缺失月份,将 1812 年以来 $M_s \geq 6.6$ 地震按地震发生的月份序数进行顺序排列,即 $z_1=3, z_2=366, z_3=884, \dots, z_{26}=2\ 362, z_{27}=2\ 448, z_{28}=2\ 468$ 。通过最小二乘法估计模型参数,得到如下回归模型:

$$z_{t+3}=0.952z_t-0.084z_{t+1}+0.133z_{t+2}+81.721$$

运用该模型进行预测计算: $z_{29}=2539.799$,即 2023 年 7 月发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性较大。 $x_{29}=2\ 022.376$,误差为 0.135 年,所以和三元可公度对应强震趋势判断的结果年份大约为 2023 年; $y_{28}=307.376$,误差为 0.81 年; $z_{29}=2\ 539.799$,误差为 -0.966 月,说明自回归模型较为可信,运用该模型进行预测计算: $z_{29}=2539.799$,即 2023 年 7(± 1 月)发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性较大。

3.5.2 自回归模型分析

首先检验年份自回归模型的预测精度。设 $x_1=1\ 716; x_2=1812; \dots; x_{27}=2015; x_{28}=2017; x_{29}=?$ 3 阶自相关系数

$$r_3 = \frac{\sum_{t=1}^{28} (y_t - \overline{y_t}) * (y_{t+3} - \overline{y_{t+3}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{28} (y_t - \overline{y_t})^2 * \sum_{t=1}^{116} (y_{t+3} - \overline{y_{t+3}})^2}} = 0.951, \\ r_{0.001}(100) = 0.159$$

通过最小二乘法估计模型参数,得到以下回归模型:

$$x_{t+3}=1.602x_t-0.941x_{t+1}+0.458x_{t+2}-230.622$$

运用该模型进行预测计算: $x_{29}=2\ 022.376$,即 2 022.376(± 1 年),发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性较大。通过最小二乘法估计模型参数,得到以下回归模型:

$$y_{t+3}=0.941y_t+0.336y_{t+1}-0.284y_{t+2}+5.830$$

运用该模型进行预测计算: $y_{29}=307.376$,即 2 023.376 年发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性较大。

通过最小二乘法估计模型参数,得到以下回归模型:

$$z_{t+3}=0.952z_t-0.084z_{t+1}+0.133z_{t+2}+81.721$$

运用该模型进行预测计算: $z_{29}=2\ 539.799$,即 2023 年 7(± 1 月)发生 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性

较大。

3.6 区域强震空间分布特征

3.6.1 强震震中迁移特征

图三中数字序号代表泛天山地震带 $M_s \geq 6.6$ 强震自 1716 年到 2017 年 28 次强震,泛天山地区 300 年以来 $M_s \geq 6.6$ 强震有明显的震中迁移现象,并呈现东西对称回旋迁移,除了 1992 年到 2008 呈“东北—西南”迁移,其中东北向西南大的迁移有 8 次,西南向东北迁移亦有 9 次,呈现较好的空间对称性,根据发震时间用三角形将强震震中顺次相连。

从图 2 可以看出三角形主要集中在二一三象限,底边主要集中在第一象限,顶点从泛天山地震带北部地区强震震中纬向迁移规律得出,其对称轴在 41°N 左右;从经向强震震中迁移,其对称轴在 80°E 左右。假设泛天山地震带的强震分布有较好的对称性,那么下次区域强震很有可能向西南方向迁移,在 41°N 以南, 80°E 以西地区。

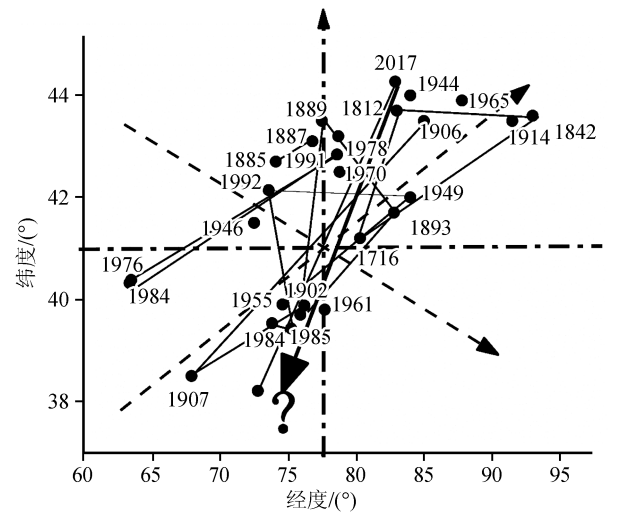


图 3 泛天山地区 $M_s \geq 6.6$ 强震震中三角迁移
Fig.3 Epicenter triangle migration of $M_s \geq 6.6$ strong earthquakes in Pan-Tianshan Mountains

3.6.2 震中经向、纬向迁移特征

从纬向震中迁移看,18 世纪到 19 世纪 50 年代,震中主要集中在 41°N 以北地区;19 世纪 50 年代到 20 世纪 10 年代,震中南北波动平稳移动,20 世纪 10 年代到 20 世纪 50 年代移动仍集中在 41°N 以北地区;从经向震中迁移看从 18 世纪到 20 世纪 60 年代震中以 80°E 为界东西平稳移动,经向震中表现出明显的回旋跨越特征,18 世纪 70 年代前 $M_s \geq 6.6$ 强震以伊塞克湖为界,表现为大幅度东西跳跃。

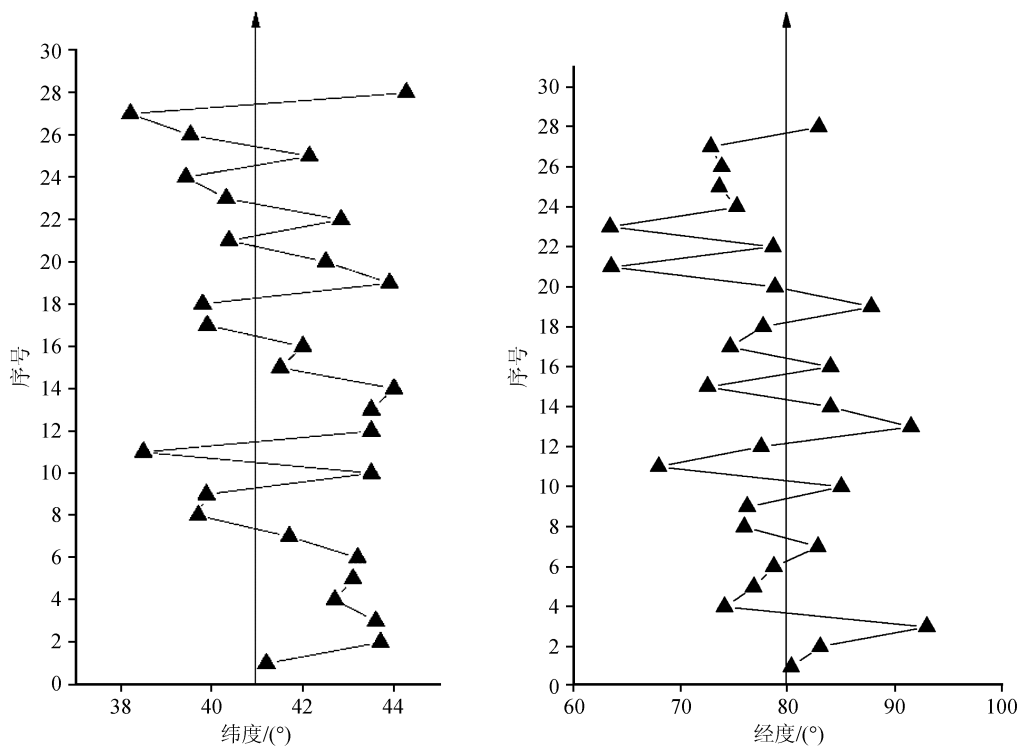


图 4 泛天山地区 $M_s \geq 6.6$ 强震空间迁移图

Fig.4 Spatial migration of $M_s \geq 6.6$ strong earthquakes in Pan-Tianshan Mountains

其中,1716 年、1812 年、1842 年、1885 年、1887 年、1889 年、1893 年、1896 年、1902 年、1906 年构成第一次东西回旋迁移,为一个小活跃期;20 世纪初到 20 世纪 50 年代为一个平静期,1906 年、1907 年、1911 年、1914 年、1944 年、1946 年构成第二次东北向西南回旋迁移;此次为一个大回旋,1970 年迁移至比尔凯克。20 世纪 70 年代后,集中于卡拉科尔地区,同时小范围回旋迁移,天山地震断裂带是相互联系的统一动力过程。

震资料,利用“可公度法”和自回归模型对强震的规律进行探索并推测其发展趋势,得到以下几点结论:

(1) 1700 年以来泛天山地区 $M_s \geq 6.6$ 地震具有良好的时空对称性,体现了对称与非对称的对立统一,发震时间具有很好的“可公度”性和显著的自相关性。

(2) 结果显示 2023 年 7 月(± 1 月)泛天山地区 $M_s \geq 6.6$ 地震的可能性较强,其中纬向对称轴在 41°N 左右;经向对称轴在 80°E 左右,对称轴位于我国新疆省阿克苏地区,处于地震断裂带上,地震震中主要在一、二、三象限,呈现东北—西南向对称。

(3) 蝴蝶结构图和可公度结构系是对可公度的形象化描述,这三种方法可以从较大时间尺度展现较宏观的对称性规律。时间对称性是可以数学语言进行描述的,自回归模型提高了对称性方法对强震的识别精度和趋势分析的可靠程度。

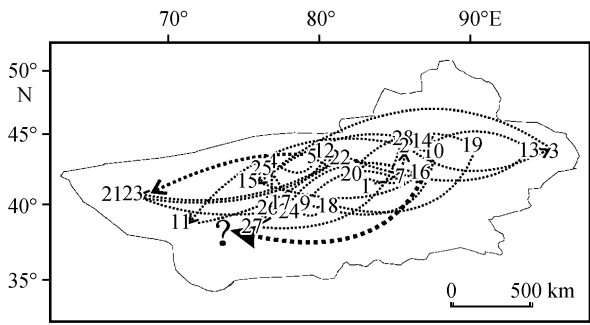


图 5 泛天山地震带 $M_s \geq 6.6$ 强震震中经纬度迁移

Fig.5 The latitude and longitude migration of the $M_s \geq 6.6$ strong earthquake in Pan-Tianshan Mountain area

4 结论

本文依据泛天山地区 1700 年以来 $M_s \geq 6.6$ 地

参考文献(References)

[1] 黄崇福.自然灾害基本定义的探讨[J].自然灾害学报,2009,18(5):41-50.
HUANG Chongfu.A Discussion on Basic Definition of Natural Disaster[J].Journal of Natural Disasters,2009,18(5):41-50.
[2] 于泳,洪汉净,刘培洵,等.全球大地震时空分布与动力学机制的初步研究[J].地学前缘,2003,10(U08):5-10.

- YU Yong, HONG Hanjing, LIU Peixun, et al. Spatiotemporal Distribution of Global Great Earthquakes and Dynamic Mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(U08): 5-10.
- [3] 王德胜. 对称和对称方法[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版), 2003, 5(3): 39-45.
- WANG Desheng. Symmetry and Method of Symmetry[J]. Journal of Southeast University Philosophy and Social Science Edition, 2003, 5(3): 39-45.
- [4] 史学建. 东亚边缘海域地貌格局与岛弧地震活动时空差异的关系探讨[J]. 海洋通报, 1998, 17(2): 51-57.
- SHI Xuejian. Discussion on the Relationship between the Landform Pattern and the Space-Time Difference of Seismic Activity of the Island-arcs in East Asia[J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(2): 51-57.
- [5] 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 Junping, 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.
- [6] 刘永林, 延军平. 自然灾害趋势判断模型与效果检验[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 96-102.
- LIU Yonglin, YAN Junping. The Model and Effect Test about the Trend Judgment of Natural Disasters[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2015, 43(5): 96-102.
- [7] 延军平, 闫军辉, 白晶, 等. 基于可公度方法的陕西及邻近地区重大自然灾害发生趋势探讨[J]. 灾害学, 2010, 25(2): 18-20.
- YAN Junping, YAN Junhui, BAI Jing, et al. Discussion on Trends of Major Natural Disasters in Shaanxi Province and Its Vicinities Based on Commensurable Method[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(2): 18-20.
- [8] JIN J F, YIN S Y, YAN J P. Symmetry and Tendency Judgment of $M_s \geq 8.0$ Strong Earthquakes in Chile[J]. Geodesy and Geodynamics, 2014, 5(1): 34-40.
- [9] 延军平, 白晶, 苏坤慧, 等. 对称性与部分重大自然灾害趋势研究[J]. 地理研究, 2011, 30(7): 1159-1168.
- YAN Junping, BAI Jing, SU Kunhui, et al. Research on Symmetry and Tendency of Several Major Natural Disasters[J]. Geographical Research, 2011, 30(7): 1159-1168.
- [10] 陈爱娟, 殷淑燕, 延军平, 祁连山—六盘山地震带 $M_s \geq 5.1$ 地震时空对称性研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 1126-1130.
- CHEN Aijuan, YIN Shuyan, YAN Junping. Space-time Symmetry of $M_s \geq 5.1$ Earthquake Disasters in Qilian-Liupan Mountain Seismic Belts[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 1126-1130.
- [11] 孟庆彬, 延军平, 芦佳玉. 基于对称性的委内瑞拉及周边地区 $M_w \geq 6.0$ 地震趋势判断及与地球自转关系分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 1061-1067.
- MENG Qingbin, YAN Junping, LU Jiayu. Forecasts of $M_w \geq 6.0$ Earthquake Tendency in Venezuela and Surrounding Areas Based on the Symmetry Principle and Its Relationship with the Earth Rotation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 1061-1067.
- [12] 刘铮瑶, 延军平, 董治宝. 基于可公度方法的伊朗地区地震活动趋势判断[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 523-528.
- LIU Zhengyao, YAN Junping, DONG Zhibao. Earthquake Tendency in Iran Region Based on Commensurability[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 523-528.
- [13] 罗岚. 地震的活动期和平静期[J]. 国际地震动态, 2002(4): 32-33.
- LUO Lan. Seismically Active Period and quite Period[J]. Recent Developments in World Seismology, 2002(4): 32-33.
- [14] DING Y, MAVROEIDIS G P, THEODOULIDIS N P. Simulation of Strong Ground Motion from the 1995 $M_w 6.5$ Kozani-Grevena, Greece, Earthquake Using a Hybrid Deterministic-stochastic Approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 357-373.
- [15] 郭增建, 郭安宁. 用震中迁移交会讨论 1668 年郾城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震: 纪念郾城地震 350 周年[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 519-523.
- GUO Zengjian, GUO Anning. Discussion on the Tancheng $M_{\frac{1}{2}}$ Earthquake of 1668 Based on the Intersection of Epicenter Migration: For the 350th Anniversary of Tancheng Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 519-523.
- [16] 郭增建, 郭安宁. 由震中迁移交汇预测大震的讨论[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 1-3.
- GUO Zengjian, GUO Anning. Discussion on the Prediction of Large Earthquakes Based on the Intersection of Epicenter Migration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 1-3.
- [17] 牛旺祥. 全球强震转移的某些时空特征[J]. 地震, 1989, 9(5): 28-31.
- NIU Wangxiang. Some Time-space Features of Global Strong Earthquake Migration[J]. Earthquake, 1989, 9(5): 28-31.
- [18] 周晓丽, 常丽云. 基于卫星热红外辐射信息的新疆强震震例分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 278-283.
- ZHOU Xiaoli, CHANG Liyun. Features of Thermal Infrared Radiation of Three Strong Earthquake Cases in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 278-283.
- [19] 柏美祥, 王海涛. 强震群活动构造环境比较研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 81-87.
- BAI Meixiang, WANG Haitao. Comparison and Study on Active Tectonics Environment of Strong Earthquake Swarms M_s [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(1): 81-87.
- [20] 肖美美, 延军平, 李光耀. 新疆及邻区 $M_s \geq 7.0$ 地震时空对称性及趋势研究[J]. 防灾减灾学报, 2017, 33(1): 24-31.
- XIAO Meimei, YAN Junping, LI Guangyao. The Time-Space Symmetry and the Tendency Research of $M_s \geq 7.0$ Earthquake in Xinjiang and Its Neighbourhood Region[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2017, 33(1): 24-31.
- [21] 梁洪宝, 武艳强, 陈长云, 等. 2014 年新疆于田 $M_s 7.3$ 地震同

- 震位移及位错反演研究[J].地球物理学报,2018,61(12):4817-4826.
- LIANG Hongbao, WU Yanqiang, CHEN Changyun, et al. Co-seismic Displacement and Dislocation Inversion of 2014 Yutian $M_s 7.3$ Earthquake in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 4817-4826.
- [22] 张琳琳, 唐兰兰. 新疆及周边 5 次 $M_s 7.0$ 以上地震对天山地区小震活动的影响[J]. 地震, 2018, 38(4): 159-171.
- ZHANG Linlin, TANG Lanlan. Influence of Five $M_s 7.0$ Earthquakes on Small Earthquake Activities in Xinjiang and Its Surrounding Areas[J]. Earthquake, 2018, 38(4): 159-171.
- [23] 杨文, 程佳, 姚琪, 等. 2016 年新疆呼图壁 6.2 级地震发震构造[J]. 地震地质, 2018, 40(5): 1100-1114.
- YANG Wen, CHENG Jia, YAO Qi, et al. The Preliminary Study on the Seismogenic Structure of the Hutubi $M_s 6.2$ Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(5): 1100-1114.
- [24] 门可佩. 新疆及其邻区 4 次 $M \geq 7$ 强震预测总结与未来 7 级强震预测研究: 基于有序网络结构分析[J]. 南京信息工程大学学报, 2015, 7(6): 567-576.
- MEN Kepei. Prediction Summary of $M \geq 7$ Earthquakes in Xinjiang Based on the Ordered Network Structure Analysis[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 7(6): 567-576.
- [25] 陈建波. 新疆地震构造特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2008.
- CHEN Jianbo. Research on Seismotectonic Features in Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2008.
- [26] 王伟, 杨少敏, 谭凯, 等. 利用 GPS 资料分析天山现今地壳缩短速率[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(5): 59-63.
- WANG Wei, YANG Shaomin, TAN Kai, et al. Present Crustal Shortening Rate of Tianshan Mountain with GPS Data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(5): 59-63.
- [27] 宋治平. 全球地震灾害信息目录[M]. 北京: 地震出版社, 2011.
- [28] 翁文波. 可公度性[J]. 地球物理学报, 1981, 24(2): 151-154.
- WENG Wenbo. Commensurability[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1981, 24(2): 151-154.
- [29] 延军平, 任志艳, 刘冬梅, 等. 重大自然灾害的信息可公度表达类型及验证[C]//中国地理学会百年庆典论文集. 北京, 2009: 134.
- [30] 李双双, 延军平. 西太平洋俯冲带北部地区 $M_s \geq 8$ 强震时空对称特征[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 960-966.
- LI Shuangshuang, YAN Junping. Space-time Symmetry of $M_s \geq 8$ Earthquake in North-western Pacific Plate Subduction[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 960-966.
- [31] 李双双, 延军平, 刘栋杉, 等. 印度尼西亚 $M_s \geq 7.8$ 强震时空对称特征及其趋势判断[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 190-197.
- LI Shuangshuang, YAN Junping, LIU Lishan, et al. Spatio-temporal Symmetry and Tendency Judgment of the $M_s \geq 7.8$ Strong Earthquake in Indonesia[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 190-197.
- [32] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [33] 于畅, 张羽. 基于 ARMA 模型拟合分析方法的地磁监测数据研究: 以长春地磁台观测数据为例[J]. 防灾减灾学报, 2019, 35(3): 58-63.
- YU Chang, ZHANG Yu. Method of Fitting Analysis for Geomagnetic Data's Research Based on Model ARMA: Take Observation Record of Changchun Geomagnetic Station as an Example[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2019, 35(3): 58-63.
- [34] 张瑞芳. 基于时空统计的大地震前后小微地震时空格局演变研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHANG Ruifang. Study on Spatio-temporal Pattern Evolution of Small and Micro Earthquakes before and after Large Earthquakes Based on Spatio-Temporal Statistics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [35] 任涛, 林梦楠, 陈宏峰, 等. 基于 Bagging 集成学习算法的地震事件性质识别分类[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 383-392.
- REN Tao, LIN Mengnan, CHEN Hongfeng, et al. Seismic Event Classification Based on Bagging Ensemble Learning Algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 383-392.
- [36] 刘铮瑶, 延军平, 董治宝. 基于可公度方法的伊朗地区地震活动趋势判断[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 523-528.
- LIU Zhengyao, YAN Junping, DONG Zhibao. Earthquake Tendency in Iran Region Based on Commensurability[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 523-528.