

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.04.10

美国圣安德烈斯断裂带强震活动规律及未来趋势研讨

李英杰, 延军平, 唐宝琪, 王文静
(陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 本文选取 1900 年以来圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 强震数据, 在可公度理论和对称性原理的基础上, 采用蝴蝶结构图和可公度结构系方法分析了圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震的时空对称性, 并探讨可能触发地震的主要天文因素, 从强震触发机理上验证了预测结果的可靠性。结果表明: 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 历史地震可公度性良好, 2017 年发震信号较强。历史强震震中空间上呈现明显的“西北-东南”对称回旋迁移规律, 由此判断下次强震往东南方向 ($116^\circ\text{W}, 34^\circ\text{N}$ 附近) 迁移可能性较大。相关分析显示, 在地球自转速度变化率较大的年份该断裂带易发生强震, 且多数强震发生在太阳黑子峰值年, 这也进一步佐证了 2017 年该地区发生强震的可能性。

关键词: 强震; 可公度; 震中迁移; 趋势判断; 物理机理; 圣安德烈斯断裂带

中图分类号: P642.27

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)04-0056-08

Tendency judgement of $M_w \geq 6.8$ earthquake in San Andreas fault

LI Yingjie, YAN Junping, TANG Baoqi, WANG Wenjing
(College of Tourism and Environmental, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: Natural disasters, especially earthquakes, characterized as sudden, disastrous and difficult to predict. Therefore, to have an accurate judgement on the tendency of this disasters is of great theoretical and practical significance. Based on the seismic data ($M_w \geq 6.8$) in San Andreas Fault area, the signal intensity of strong earthquakes tendency was analyzed and judged by using the methods of commensurability information. The author also applied butterfly structure diagram and commensurability structure system to analysis the earthquake's spatiotemporal symmetry and prove the reliability of the forecast result. To reveal how the astronomical factors effect strong earthquake activities, the paper analyzed the connection between strong earthquakes and Sunspot activities, the change of Earth's rotation speed. The results show that: The seismic in San Andres Fault has good commensurability. The signal showed earthquake will occur in 2017 is strong with the random probability of 55.6%. Furthermore, the butterfly structure diagram and commensurability structure system verified this judgement. In recent 115a, the epicenter showed a "Northwest-Southeast" symmetrical swing migration phenomenon, and the next earthquake is very likely to occur in the southeast. The years when the Earth rotation rate have a significant change is more likely to occur strong earthquakes, and most strong earthquakes occurred in the years that sunspot number reached to its maximum.

Keywords: strong earthquake; commensurability; epicenter migration; trend judgment; physical mechanism; San Andreas fault

0 引言

研究表明,在全球变化的背景下,重大灾害事件频

繁发生^[1-2],地震作为一种破坏力极强且很难精确预报的自然灾害,给人类的生命和财产带来了巨大的威胁,长久以来也受到众学者的广泛关注和研究。翁文

收稿日期: 2016-03-01; 修订日期: 2016-03-07

基金项目: 国家社会科学基金重点项目:西部重大灾害时空规律的统计研究(14AZD094); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(15JJD790022); 国家社会科学基金重点项目:中国丝绸之路经济带生态文明建设评价与路径研究(14XKS019)

第一作者: 李英杰(1990-),男,河南济源人,硕士,研究方向为全球变化与区域灾害防治。E-mail: lyj@snnu.edu.cn

通讯作者: 延军平(1956-),男,陕西绥德人,教授,博士生导师,主要从事全球变化与灾害研究。E-mail: yanjp@snnu.edu.cn

波院士运用可公度信息系理论成功地对1976年唐山大地震、1992年美国加州地震做出了趋势判断^[3],龙小霞等也基于此理论方法对川滇地区地震趋势进行了研究,其判断结果在2008年汶川8.0级地震中被有效验证^[4]。闫娜等继续关注川滇地区地震态势,并认为2010年川滇地区仍有发生大震的趋势^[5],2010年青海玉树7.1级地震验证了其研究结果。大量前人研究已充分表明地震具有可公度性及地理学意义的时空对称性。因此,从地理学的角度研究历史地震序列的时空变化规律,对于由表(规律)及里(机理)探究认识地震灾害,进而提高预测预报水平具有重要意义^[1,5]。

前人研究多选择行政区域或地理区划单元来研究地震,这对于地区防灾减灾管理具有一定的指导作用。但地震的发生绝大多数是地质构造运动所造成的^[6],因此,选取一个完整的地震活跃带作为研究区,更有利于揭示地震的时空规律性。因此本文选取地球表面最长和最活跃的断层——美国西海岸的圣安德烈斯断层地震带作为研究区。目前为止,有关该断裂带的研究多集中在几何学和运动学特征以及动力学的解释及与周围构造的关系,鲜有利用统计方法进行趋势预测,本文运

用可公度理论对研究区未来强震的时空变化趋势进行研究判断,并进一步探索了太阳黑子、地球自转速度变化等可能致震因子与地震的相关关系,以期为探索强震发生的可能机理提供思路。本文研究圣安德烈斯断裂带地震活动趋势,对认识全球地震活动规律以及应用可公度方法对地震趋势进行有效判断研究具有指示意义,同时对提高防御重大灾害的能力,最大限度地减少灾害损失,保护人民生命财产安全,具有一些参考价值。

1 研究区地质构造概况

圣安德烈斯断层(San Andreas Fault)位于美国西海岸,南部起于索尔顿海(Salton Sea),向北延伸至加利福尼亚湾,继而折向西部与圣贝纳迪诺山脉交汇,在阿雷纳的北边伸入太平洋。圣安德烈斯断层呈南北走向的水平运动,太平洋板块向西南,北美洲板块向西北运动,两大构造板块碰撞交错挤压形成的转换断层型边界(图1),此外该地震带是地球表面最长和最活跃的断层,在强震趋势判断研究上具有很强的代表性。1900年以来,圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震具有良好的可公度性和空间迁移特征,对认识全球地震活动

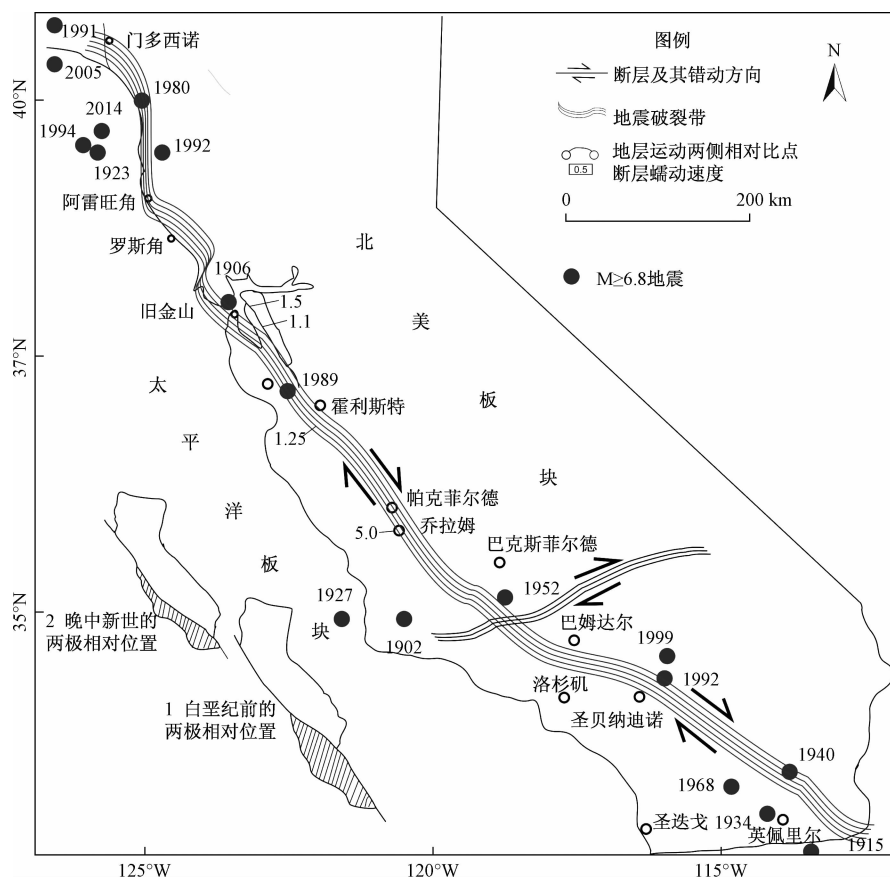


图1 圣安德烈斯断层周边板块构造背景及历史地震分布

Fig. 1 The plate tectonics and the spatial distribution of historical earthquakes in San Andreas fault

规律及应用可公度方法对地震趋势进行有效判断研究具有重要意义。

2 资料来源和研究方法

2.1 资料来源

本文地震数据资料主要来源于美国地质调查局 USGS (United States Geological Survey), 同时参考了《全球地震目录》^[7] 和中国地震信息网 (<http://www.csi.ac.cn/>)。太阳黑子相对数来源于美国国家地球物理数据中心 NGDC (NOAA National Geophysical Data Center)。地球自转数据整理自国际地球自转服务组织 IERS (International Earth Rotation Service) <http://hpiers.obspm.fr/> 网站公布资料。表 1 为 1900—2014 年美国西海岸圣安德烈斯断裂带所有 $M_w \geq 6.8$ 地震数据资料。

表 1 圣安德烈斯断裂带 1900 年以来 $M_w \geq 6.8$ 地震信息统计表

Table 1 The $M_w \geq 6.8$ earthquakes sequence data in San Andreas Fault

序号	地震时间	纬度/°N	经度/°W	震源深度/km	震级 M_w
1	1902/03/22	35	-120	—	6.9
2	1906/04/18	37.75	-122.55	10	7.7
3	1915/10/03	40.5	-117.5	—	7.6
4	1922/01/31	40.7	-125.553	15	7.2
5	1923/01/22	40.487	-125.324	15	7.1
6	1927/11/04	34.915	-121.031	15	7.0
7	1934/12/31	32.685	-115.761	15	7.1
8	1940/05/19	33.222	-115.697	15	7.1
9	1952/07/21	34.927	-119.06	15	7.3
10	1968/04/09	33.157	-116.194	15	7.0
11	1980/11/08	41.11	-124.3	17.3	7.3
12	1989/10/18	37.11	-121.77	11.4	6.9
13	1991/08/17	41.748	-125.586	6.7	7.1
14	1992/04/25	40.35	-124.068	18.5	7.2
15	1992/06/28	34.184	-116.532	11.1	7.3
16	1994/09/01	40.381	-125.776	10.1	7.0
17	1999/10/16	34.515	-116.435	5.1	7.2
18	2005/06/15	41.2	-125.98	9.9	7.2
19	2010/04/04	32.297	-115.278	4	7.2
20	2014/03/10	40.8287	-125.134	16.6	6.8

2.2 研究方法及流程

可公度性是不同长度的周期叠加后表现出的一种混合规律,表达了系统元素中可以共同度量的某种规律^[8]。美国学者 Shelly 研究认为,地震的复发历史可能会为未来地震发生的时间提供线索,并利用地震重复周期成功对阿留申群岛东部大震作了预报^[9-10]。可公度法在利用重复周期进行规律探索的基础之上,寻求不同长度的周期叠加后的混合规律,因此具有更

强的预测功能。

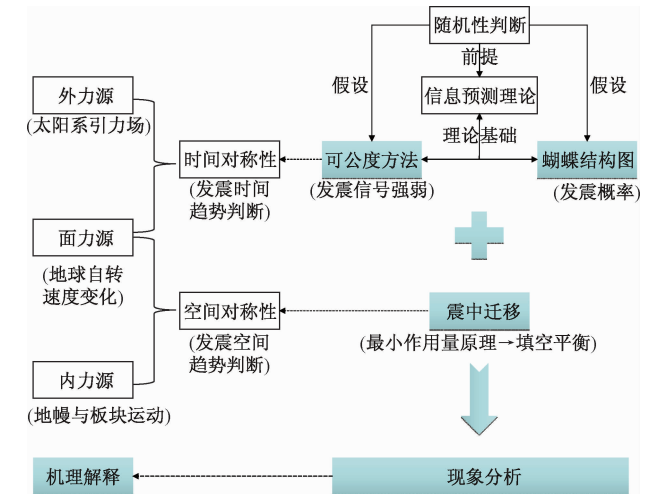


图 2 强震趋势判断研究流程

Fig. 2 The framework of strong earthquake tendency judgment

本文基于可公度理论并结合蝴蝶结构图和可公度结构系对圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震进行时空对称性及其发生趋势判断分析,同时探讨了太阳黑子、地球自转速度变化等可能致震因子与地震的相关关系,探求强震发生的物理机理。旨在探索对称性在地震灾害趋势判断中的意义,丰富可公度方法的灾害趋势判断案例。

3 结果分析

3.1 强震时间对称性及其趋势判断

3.1.1 三元可公度趋势判断

由表 1 知,自 1900 年以来圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震共发生 20 次,其中 1992 年发生两次地震,依据强震群以其主震为代表,同一年份数次强震以最大一次为代表^[11],对圣安德烈斯断裂带 19 次地震可公度性进行分析。对 19 次历史地震进行检验,得出圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 历史地震有很好的可公度性。

设 $Y_1 = 1902$; $Y_2 = 1906$; $Y_3 = 1915$; $Y_4 = 1922$; $Y_5 = 1923$; $Y_6 = 1927$; $Y_7 = 1934$; $Y_8 = 1940$; $Y_9 = 1952$; $Y_{10} = 1968$; $Y_{11} = 1980$; $Y_{12} = 1989$; $Y_{13} = 1991$; $Y_{14} = 1992$; $Y_{15} = 1994$; $Y_{16} = 1999$; $Y_{17} = 2005$; $Y_{18} = 2010$; $Y_{19} = 2014$, $Y_{20} = ?$ 根据已知年份推算第 20 次发生地震的可能年份,三元可公度计算方法为: $y_j = y_m + y_n + y_i$ 。 i, j, m, n 为指标, $m, n, i \in [1, 19]$, j 为要判断的第 20 个强震可能发生年份,即 $j = 20$,且同时满足 $j = m + n - i$ 。

三元可公度计算结果显示 2017 年和 2018 年为最

近高频年份,其中 2018 年的信号高于 2017 年(表 2)。

表 2 圣安德烈斯断裂带地震活动三元可公度式结果
Table 2 Ternary commensurability expressions of seismicity in San Andreas

预测年	三元可公度结果	
	$Y_6 + Y_{17} - Y_3 = Y_{20} = 2017$	$Y_{14} + Y_{17} - Y_{11} = Y_{20} = 2017$
2017 年	$Y_7 + Y_{17} - Y_4 = Y_{20} = 2017$	$Y_{16} + Y_{18} - Y_{14} = Y_{20} = 2017$
	$Y_8 + Y_{16} - Y_4 = Y_{20} = 2017$	
	$Y_2 + Y_{19} - Y_1 = Y_{20} = 2018$	$Y_5 + Y_{18} - Y_3 = Y_{20} = 2018$
2018 年	$Y_6 + Y_{19} - Y_5 = Y_{20} = 2018$	$Y_7 + Y_{16} - Y_3 = Y_{20} = 2018$
	$Y_{17} + Y_{17} - Y_{14} = Y_{20} = 2018$	$Y_{19} + Y_{19} - Y_{18} = Y_{20} = 2018$

3.1.2 四元、五元可公度趋势判断

四元可公度计算公式为 $y_j = y_m + y_n - y_i - y_o$ 。其中 i, j, m, n, o 为指标, $m, n, i, o \in [1, 19]$, j 为要判断的第 20 个年份, $j = m + n - i - o$ 。四元可公度计算结果表明最近较高频发生地震年份为 2017 年和 2016 年,

频次分别为 43 次和 40 次(表略)。即 2017 年信号最强,其次是 2016 年。

同样,对圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 强震进行五元可公度计算,信号较强的年份为 2016 年 90 次、2017 年 90 次(表略),依然表明这两个年份具有很强的可公度性。

综合三元、四元和五元可公度结果可以得到,未来几年里圣安德烈斯断裂带发生 $M_w \geq 6.8$ 在 2017 年发生 $M_w \geq 6.8$ 地震的信号最强。

3.1.3 蝴蝶结构图趋势判断

构建圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震蝴蝶结构图(图 3),发现该组数据存在着明显的时间对称性,总体呈现 12a、21a、25a、46a、65a、76a 的准周期,其中与 2016 年相关的周期有 3 组,与 2017 年相关的周期有 3 组,分别是 12a、25a、65a。

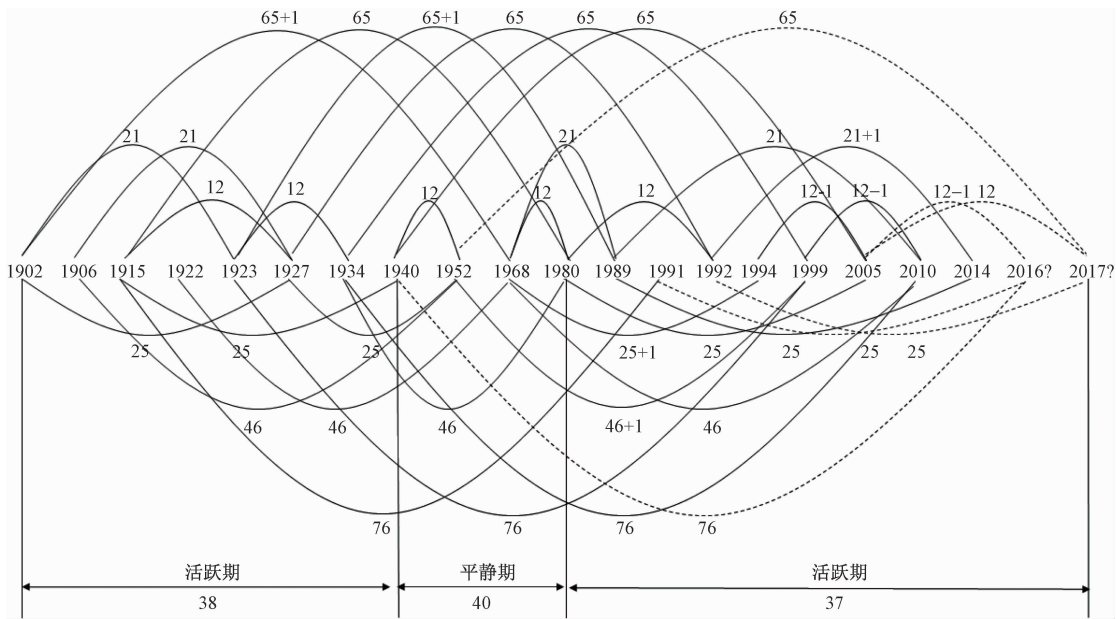


图 3 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震序列蝴蝶结构图

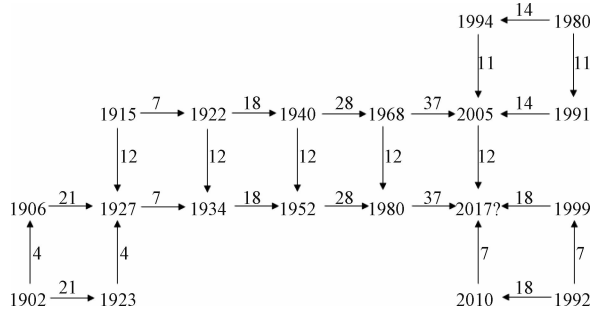
Fig. 3 The Butterfly Structure of $M_w \geq 6.8$ earthquakes in San Andreas fault area

蝴蝶结构的随机性概率为 $P = n/N$;不漏报置信水平为 $(1 - \alpha) = n/(N + 1)$ 。其中 T 为灾害事件时间序列中预测年份发生的可能概率, P 为预测年份的发病概率, N 为历史地震灾害的总次数, n 为实际参与地震预测的次数。(1)2014 年用作验证,即 2014 年不参与预测,则总灾害时间次数 $N = 18$,2014 年和 2017 年圣安德烈斯断裂带发生 $M_w \geq 6.8$ 强震的随机性概率分别为 44.4 % 和 77.8 %,不漏报置信水平为 42.1 % 和 73.7 %。(2)未来趋势验证,即 2014 年为已发生事件,参与预测,则 $N = 19$,2017 年圣安德烈斯断裂带发

生 $M_w \geq 6.8$ 强震的随机性概率为 73.7 %,不漏报置信水平为 70.0 %。由此可见,2017 年发生强震的概率很大。因此,依据蝴蝶结构图判断 2017 年圣安德烈斯断裂带可能发生 $M_w \geq 6.8$ 地震。

3.1.4 可公度结构系趋势判断

可公度结构系能清楚地展现各个灾害发生年之间的相互关系,是验证可公度法的有效途径。从圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震可公度结构系看(图 4),2017 年断裂带区发生地震的信号较强,这与可公度计算和蝴蝶结构图趋势判断结果相一致。

图4 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震可公度结构系图Fig. 4 The commensurability system structure of $M_w \geq 6.8$ earthquakes in San Andreas

3.2 强震空间对称性及其趋势判断

3.2.1 地震震中空间的迁移特征

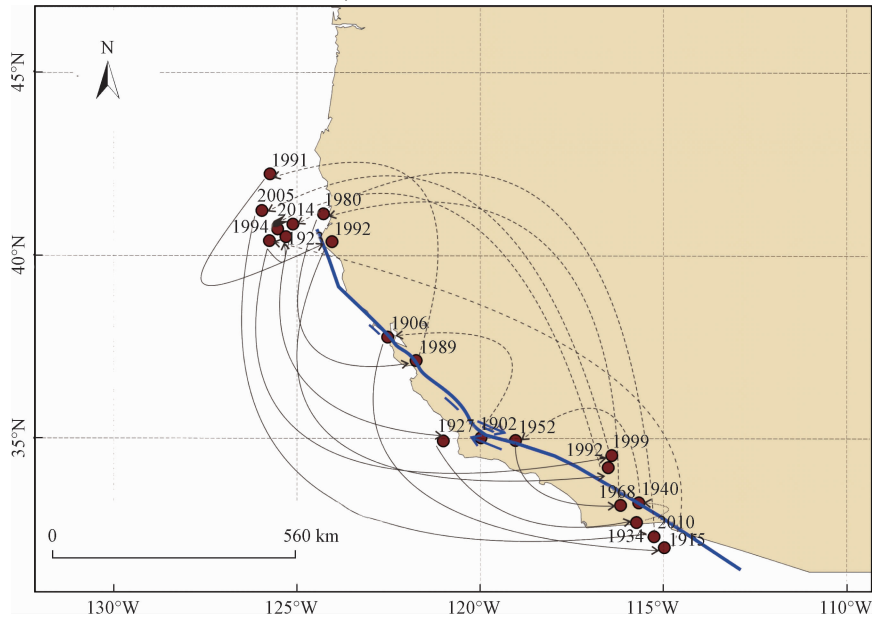
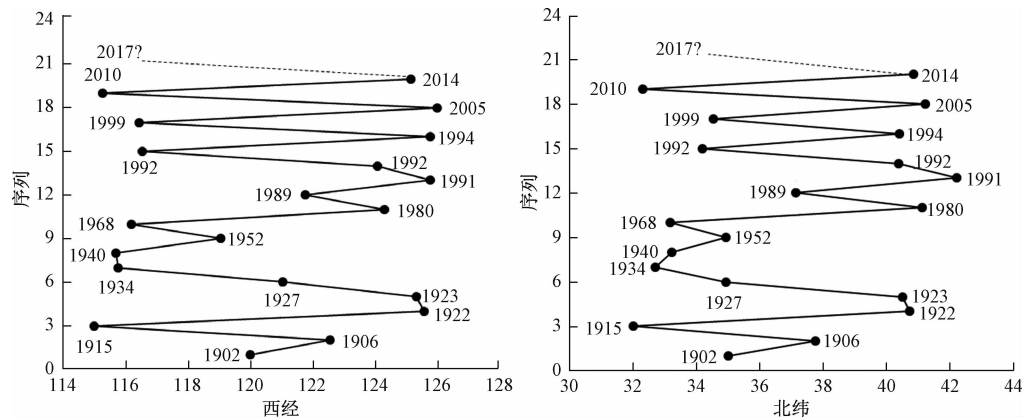
震中迁移现象已被多次应用于强震预报^[12],美国

学者萨维奇(J. C. Savage)在北美西海岸的大地震迁移研究中,也发现了有震中迁移现象。

对圣安德烈斯断裂带地区近 115a 来 $M_w \geq 6.8$ 强震活动的空间分布特征进行分析(图 5),除个别年份外,断裂带区震中整体呈现“西北-东南”对称回旋迁移特征,其中,西北向东南大的迁移 9 次(实线),东南向西北大的迁移亦有 8 次(虚线),呈现良好的空间对称特征。

3.2.2 强震震中经向、纬向迁移特征

从圣安德烈斯断裂带强震震中迁移(图 6)可以看出,该断裂带经、纬向震中迁移呈现出良好的同步性——经向西迁移时,纬向向北;震中经向向东时,纬向向南。20 世纪 30 年代至 20 世纪 70 年代,区域集中且有向东南波动迁移的趋势;20 世纪 80 年代至

图5 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 强震震中迁移Fig. 5 The $M_w \geq 6.8$ earthquake migration in San Andreas fault area图6 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震震中迁移Fig. 6 The $M_w \geq 6.8$ earthquake migration trend in San Andreas fault area

20 世纪 90 年代初,区域集中且有向西北波动迁移的趋势;20 世纪 90 年代至今,震中“西北-东南”平稳迁移;圣安德烈斯断裂带强震震中对称轴分布在 121°W 、 37°N 左右,由于圣安德烈斯断裂带地震空间分布具有良好的对称性,那么下次 $M_w \geq 6.8$ 地震将可能朝东南方向迁移,即 121°W 以东, 37°N 以南地区。

4 相关机理分析

4.1 地球自转速度变化与强震

地球自转变化引起的附加应力可能对全球地震活动起一定的触发作用;也有研究发现全球大地震与地球自转速度变化曲线的峰谷区间段有密切联系,统计结果显示在地球自转减速期太平洋东带和北带 7 级以上地震发生次数略高于加速期^[13-14]。

为探索地震与地球自转速度的关系,选取圣安德烈斯断裂带 20 世纪以来 6.8 级以上地震与地球日长“十年起伏”趋势变化情况作了对比分析(图 7),1900

年以来圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震发生在地球自转速度减速期和加速期的比例为 7:12,减速期发生地震几率比加速期高,这与陈学忠全球强震的研究结果一致。统计发现,强震往往发生在地球自转速度变化率较大的年份(1909 ~ 1940 年及 1977 ~ 2005 年),占发震年份的 68%,验证了俄罗斯学者“地球自转减速阶段会加大地壳岩石所承受的压力,继而触发地震”的观点。自 2013 年以来地球自转速度呈现大幅的变速期,因此未来几年发生强震的可能性较大,佐证了 2017 年发震的可能性。

4.2 太阳黑子活动与强震分析

太阳活动加强或减弱时,其向外发射的电磁粒子量也会随之变化,异常的电子流穿过地球的岩石晶体时促使岩石内部部分分子键的崩解,降低了地表岩石强度,从而诱发地震^[15-17]。

本文通过对太阳黑子事件和圣安德烈斯断裂带地震两者的发生时间进行对比分析(图 8),发现两者存

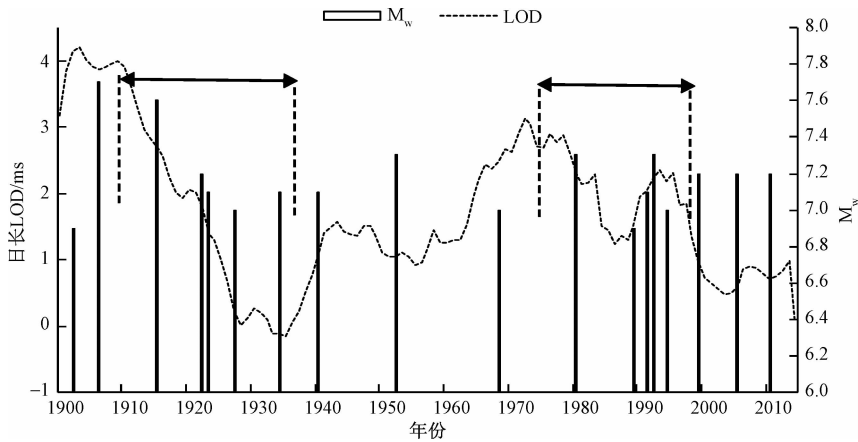


图 7 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震与地球自转十年起伏关系

Fig. 7 The relationship between the events of $M_w \geq 6.8$ earthquakes in San Andreas fault area and the ten years ups and downs of earth rotation

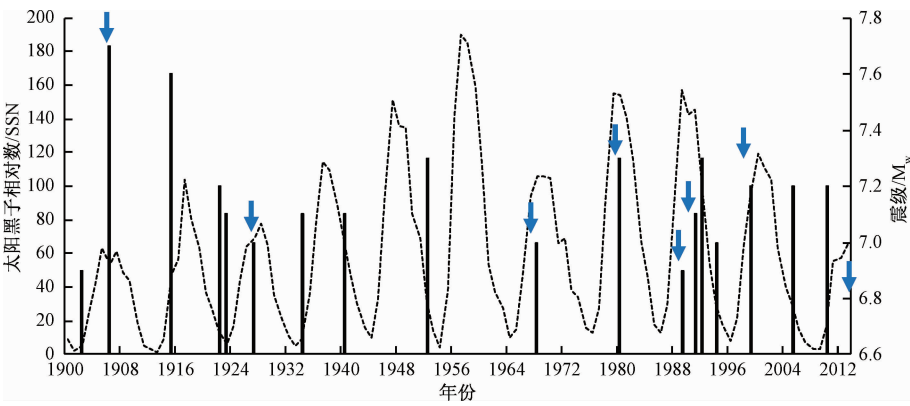


图 8 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 地震与太阳黑子数相关性分析

Fig. 8 The correspondence between $M_w \geq 6.8$ earthquakes in San Andreas fault area and the Sunspot number

在较好的对应关系。绝大多数地震都发生在太阳黑子活动峰值年及相邻年份,占发震年份的 42.11%;强震多发生在太阳黑子活动的下降段及谷值年次之,均达到 26.32%,而太阳黑子活动上升段地震发生频率低,仅 5.26%。根据太阳黑子活动 11 年周期的规律,圣安德烈斯断裂带未来发生强震信号最强的年份 2017 年正是新的周期峰值附近,进一步增强了趋势判断的可能性。

表 3 太阳活动的不同阶段强震事件发生的次数及比例
Table 3 The frequency of earthquake events in different stages of the solar activity

	上升段 (m+, M-)	峰值年 (M)	下降段 (M+, m-)	谷值年 (m)
事件次数	1	8	5	5
百分比	5.26%	42.11%	26.32%	26.32%

5 结论与讨论

本文运用可公度理论,选择圣安德列斯断裂带这一典型地质构造带作为研究对象,对该地区 1900 年以来 $M_w \geq 6.8$ 地震的时空对称性规律进行分析,并从与地震灾害可能相关的天文周期运动等表象规律出发,从地理学视角探讨历史地震时空对称性与物理力源的可能叠加结果,对圣安德烈斯断层地震发生的机理进行简单探讨,得到主要结论如下:

(1) 1900 年以来,圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 强震发生时间具有良好的可公度性,结合三元、四元、五元可公度计算,2017 年圣安德烈斯断裂带发生 $M_w \geq 6.8$ 地震信号较强。

(2) 构建蝴蝶结构图和可公度结构系得出,2017 年圣安德烈斯断裂带发生 $M_w \geq 6.8$ 地震的随机性概率达 73.7%。可公度法与蝴蝶结构图法分析得出的结论表现出高度的一致性。

(3) 近 115 年来圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 强震具有明显的震中迁移现象,在时间和空间上呈“西北-东南”对称回旋迁移。震中对称轴分布在 121°W 、 37°N 左右,未来强震震中可能向东南方向迁移,即 121°W 以东, 37°N 以南地区。

(4) 圣安德烈斯断裂带 $M_w \geq 6.8$ 强震与地球自转速度和太阳黑子发生时间存在良好的对应关系。地震主要发生地球自转速度减速期,且强震往往发生在地球自转速度变化率较大的年份;此外地震多发在太阳黑子峰年,其次多发生在下降段及谷值年,而太阳黑子活动上升段发震事件较少。

自然灾害风险评价、趋势判断、预测与预报是自然灾害研究的不同阶段^[18],对重大自然灾害的准确预测预报目前为止还是世界性难题^[19],本文采用的可公度、蝴蝶图以及结构系图法在较小时空尺度上还尚未达到较好的预判水平,但在对区域自然灾害未来 1~10 年中、大空间尺度上的趋势判断上已经达到了较高精度。有综述研究结果^[18]表明,应用该方法,地震、旱涝灾害及雪灾趋势判断准确率分别是 61.5%、65%、87.5%,这对灾害的区域预防管理提供了一定的科学参考,但距离真正向政府提供科学决策,还有很长的路要走。

参考文献:

- [1] 延军平. 重大自然灾害时空对称性研究[M]. 陕西: 陕西师范大学出版总社有限公司, 2013: 55-60.
YAN Junping. Study on the spatiotemporal symmetry of serious natural disasters [M]. Xi'an: Shaanxi Normal University General Publishing House co., 2013: 55-60.
- [2] 曹楠, 申太丽, 罗水莲, 等. 西昌市地质灾害发育分布规律及防灾建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 127-132.
CAO Nan, SHEN Taili, LUO Shuilian, et al. Development and distribution patterns of geologic hazards in Xichang city and prevention suggestion [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 127-132.
- [3] 翁文波. 预测论基础[M]. 石油工业出版社, 1984: 33-56.
WENG Wenbo. Fundamentals of forecasting theory [M]. Petroleum Industry Press, 1984: 33-56.
- [4] 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 Xiaoxia, YAN Junping, SUN Hu, et al. Study on earthquake tendency in Sichuan-Yunnan region based on commensurability [J]. Journal of Catastrophology, 21(3): 81-84.
- [5] 延军平, 闫娜. 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(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(5): 19-23.
- [6] 鄢毅, 王军, 李鸿雁. 汶川地震区地质灾害特征及

- 成生过程探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(2):143-144.
- YAN Yi, WANG Jun, LI Hongyan. The characters of geological disaster and its generation process in Wenchuan earthquake zones[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(2):143-144.
- [7] 宋治平, 张国民, 刘杰, 等. 全球地震目录[M]. 北京:地震出版社, 2011.
- SONG Zhiping, ZHANG Guomin, LIU Jie, et al. Global earthquake catalog [M]. Beijing: Seismological Weng W B. 1984. Prediction theory basis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [8] 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.
- [9] Shelly, D. R. 2010. Periodic, chaotic, and doubled earthquake recurrence intervals on the deep San Andreas fault[J]. Science, 328:1385-1388.
- [10] 谷继成. 美国的地震预报研究近况[J]. 国际地震动态, 1988, 5(1):1-5.
- GU Jicheng. Decent earthquake prediction research in the United States[J]. Recent Developments in World Seismology, 1988, 5(1):1-5.
- [11] 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(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(3):960-966.
- [12] 郭增建, 秦保燕. 地震迁移问题(综述)[J]. 国际地震动态, 1983(1):7-10+31-32.
- GUO Zengjian, QIN Baoyan. The migration of earthquake [J]. Recent Developments in World Seismology, 1983(1):7-10+31-32.
- [13] 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.
- ZHANG Guomin, FU Zhengxiang, GUI Xietai, et al. The introduction of earthquake forecast[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [14] 刘忠书, 李愿军. 地球自转与八十年代中国的大震活动趋势[J]. 地壳形变与地震, 1982(3):74-82.
- LIU Zhongshu, LI Yuanjun. Earth's rotation and strong earthquake's activity trend of China at 1980's [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1982(3):74-82.
- [15] 韩延本, 郭增建, 吴瑾冰, 等. 太阳活动对中国近东西向断层 8 级大地震的可能触发[J]. 中国科学 G 辑:物理学、力学、天文学, 2003(6):567-573.
- HAN Yanben, GUO Zengjian, WU Jinbing, et al. Possible triggering of solar activities to big earthquakes ($M_s = 8$) near the east and west faultage in China [J]. Science in China (Series G), 2003(6):567-573.
- [16] 秦四清, 徐锡伟, 胡平, 等. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J]. 地球物理学报, 2010(4):1001-1014.
- QIN Siqing, XU Xiwei, HU Ping, et al. Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction [J]. Chinese J. Geophys, 2010(4):1001-1014.
- [17] 蒋伯琴. 太阳黑子、磁暴与地震活动的关系[J]. 地震学报, 1985(4):452-460.
- JIANG Boqin. The relationship between earthquakes and activities of sunspots and magnetic storms [J]. Earthquake Science, 1985(4):452-460.
- [18] 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.
- [19] 武强, 陈佩佩. 地裂缝灾害研究现状与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1):22-27.
- WU Qiang, CHEN Peipei. Research on state of art and prospect of earth fissures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1):22-27.