

圣安德烈斯断层深部地震复发间隔的 周期性、不规则性和倍增特征*

David R Shelly

(U. S. Geological Survey, Menlo Park, CA 94025, USA)

中图分类号: P315.5; 文献标识码: A; doi: 10.3969/j.issn.0235-4975.2010.10.004

地震的复发历史可能会为未来地震发生的时间提供线索,但大地震之间的时间间隔太长,因而掩盖了所有的复发变化规律。相比之下,小地震频繁发生,而其复发间隔在相对小的时间尺度内也是可以计量的。本研究对一个历时 8.5 年、包含 900 多次低频事件的地震序列进行了研究,这些低频地震在加州帕克菲尔德(Parkfield)附近的圣安德烈斯断层下产生了震动。这些地震事件在时间上表现出密集的复发间隔,一般在 3~6 天之间,但有时这一模式却会突然发生变化。虽然大地震和低频地震的发生环境不同,但是该项研究表明大地震序列可能具有类似的复杂性。

断层段在相似的准周期地震中发生破裂是一个正逐渐被纳入地震预报的模型^[1-2]。但是,在某些地方出现大大偏离平均复发间隔的情况^[3-4]却使人们对这一简单模型的效用产生了怀疑。地震复发的复杂性的实例包括不规则的时间间隔以及周期倍增,周期倍增通常表现为周期性和不规则性间的过渡^[5-6]。

数值模型有时会展现出地震复发间隔的复杂性,比如除了周期性滑动以外^[7-13],还会出现不规则性和周期倍增特征。同样,在摩擦滑动实验室研究中也发现了有关复杂性的证据,特别是在从稳定滑动(断层蠕滑)向黏滑(地震)过渡的临界点附近^[5, 9, 14]。天然大地震可能受类似机制控制,断层的相互作用会影响某个特定断层段上地震复发间隔的变化^[15-16],但是,对于一个给定的天然断层而言,其数十年乃至数百年的大地震复发周

期大大限制了可观测到的地震复发间隔的数量。即使在拥有长期地震记录的非常罕见的实例中,如日本的南海海槽(Nankai Trough)^[16],其一个断层段在 1300 年中发生了 8 次地震,但这可能仍然不能反映出地震破裂的全部变化。同样,根据帕克菲尔德附近圣安德烈斯断层段上 1857 年以来发生的 6 次地震历史,仍然不能预测出 2004 年加州帕克菲尔德 $M_w 6.0$ 地震发生的时间^[17]。

小地震的复发时间相对较短,这为研究地震的复发特征提供了便利的天然实验室。在本研究中,作者对一类低频地震(Low-Frequency Earthquakes——LFEs)的复发间隔进行了分析,这些地震属于构造震动的一部分,它们发生在加州中部帕克菲尔德附近的圣安德烈斯断层(SAF)下方。圣安德烈斯断层上的震动发生在靠近地壳基底的地震带下方^[18-19],可能由剪切滑移引起^[20],这些震动由一个以许多小地震叠加形成的地震序

* 收稿日期: 2010-00-00。

列组成(即低频地震)^[21]。

本研究针对的这类低频地震破裂间隔很短,通常情况下,2~6次相似(也可能是邻近)的地震可能在1~2 min内相继发生,随后的2~7天为平静期。复发间隔指这些地震破裂之间的时间间隔,一次特定破裂序列中的地震事件指相互时间间隔小于0.01天(14.4 min)的地震。通过与波形的互相关,确定出这种相似的低频地震^[22]。同时,研究过程中还对这些地震事件的相对地面速度振

幅进行了测定。

这类特殊的低频地震序列在时间上呈孤立状态——即在这些地震发生之前或之后没有探测到其他类型的震动——表明这些低频事件在空间上发生在一个孤立的断层段上。其他低频地震序列也表现出这里所记录的很多行为特征,但是相比而言,它们之间存在更多的相互作用^[22]。在该研究中,根据31个台站的叠加波形确定了最佳拟合位置(图1),其深度为29.75 km(接近壳幔边界),这

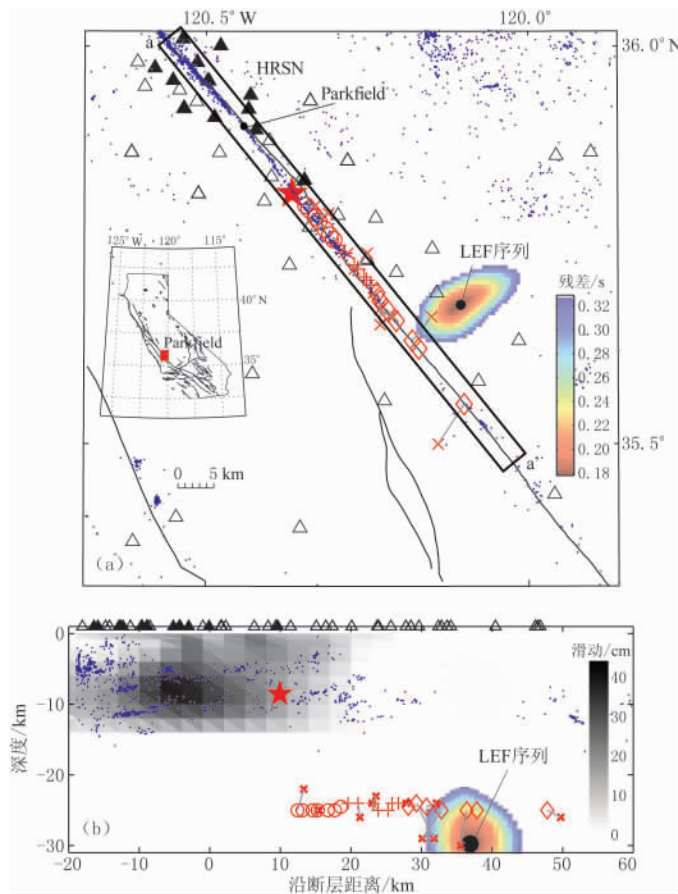


图1 图(a)和截面(b)显示的是低频地震序列的最佳拟合位置(黑色实心圆)。颜色标度显示的是附近位置的平均残差(相对于最佳拟合深度29.75 km)。红色×表示根据P波和S波到时所确定的单个低频地震的最佳拟合位置;空心圆、十字、菱形代表推断的位置^[23];红五星表示2004年帕克菲尔德 M_w 6.0地震的震源;图(b)中的阴影区表示相关的同震和震后(最初230天)滑动^[24];图(a)中的矩形框和a, a'所示部分表示图(b)中截面的范围和方向。黑色实心三角表示高分辨率地震台网(HRSN)的井下地震观测台站,空心三角表示用于定位的其他地震台站,蓝点表示重新定位的1984—2003年间的地震^[25]。修改自文献^[24]

比其他类型的低频地震序列深了几千米。震中的最佳拟合位置从断层地表迹线向东北方向偏移了大约 6 km, 由此表明这些低频地震发生在一条倾斜断层或断错断层上; 但是, 由于位置方向的不确定性(图 1)以及这一深度未知的地震速度结构, 所以在地面痕迹正下方仍然可能存在另一最佳拟合深度。

从 2001 年年中(观测开始)到 2002 年, 低频地震的复发间隔一般在 2~7 天之间, 其中以 2~3.5 天居多(图 2)。在这段时间里, 复发间隔大于 7 天(可能还包括 5~7 天)的地震事件可能表明有地震事件被漏检, 因为此时台站的噪音水平高于 2003 年中后期对台站进行调整后的水平。在台站调整前的 2003 年初至年中, 地震复发模式的变化比较剧烈: 周期~3 天的地震数量减少, 而 2.8 天的增多, 并且还出现了间隔~5.9 天的另一个复发周期。虽然复发间隔在接下来的几个月内继续围绕这些周期震荡, 但~6 天的周期所占比例明显增大。2003 年, 在这一区域以西 80 km 处发生了 San Simeon M_w 6.5 地震, 大概就在这一时期, 3 天与 6 天这两种复发间隔的分布变得更加均匀, 3 天的复发周期在 2004 年中期曾一度占据主导地位。3 天至 6 天的复发间隔振荡在 2004 年早些时候恢复, 一直持续到 2004 年帕克菲尔德 M_w 6.0 地震, 这与实验室研究所报道的周期倍增相类似^[5]。尽管距离帕克菲尔德地震的同震破裂带有 30 km, 但是低频地震的复发行为却在帕克菲尔德地震后发生了显著变化, 3 天的复发周期突然降为 2.5 天, 在接下来的 2 个月里, 又进一步降低为 2 天。这可能是由于地震蠕变活动的影响, 也可能是地震滑动与无震滑动之间的变化所致^[26-27]。这一时期的振幅极小, 表明这次地震引发的强烈震动有可能使这一断层段变弱并发生重复破裂。在接下来的 5 年里, 复发间隔又朝 3 天这个方向缓慢恢复。

除了复发间隔的整体缩短外, 那些有规

律的长周期行为也在地震后消失。一些 4~5.5 天的复发间隔可能只是 6 天间隔的缩短而已(也有可能源于余震序列中一些漏检的地震事件), 但这在地震发生前并不是很普遍, 也未表现出很强的规律性。地震之后, 低频地震突然出现 7 天这样一种独特的复发间隔, 这可能得归因于余震活动序列中一个或多个地震事件的丢失。近乎 6 天的复发间隔在 2006 年中期恢复, 但相比于 2003—2004 年而言, 这种现象并不是很普遍, 并且这些复发间隔也不是很密集。从 2008 年底一直到 2009 年中期, 5~6 天这类复发间隔大量出现, 这表明低频地震在向双周期行为过渡。至 2009 年中期后, 复发模式又发生了变化, 6 天的复发间隔消失, 而可能出现了 2~5 天间隔不等的规则变化。

多项证据表明, 从这类低频地震中观测到的 6 天的复发间隔并不能简单地归因于漏检的地震事件。2004 年帕克菲尔德地震发生后, 6 天的复发周期突然消失了, 此时由于并发余震序列, 地震事件的丢失变得更加频繁。此外, 如果地震事件的丢失很普遍, 那么应该期待能出现 9 天的复发间隔(相当于丢失了两个地震事件), 但这类事件从 2003 年年底开始就没出现过。6 天的复发间隔之后, 振幅也会有增大的趋势(图 2), 这与应力积累会随着时间的增加而增大的预期相一致。而且, 和周期为 3 天的地震相比, 周期为 6 天的地震在每次破裂中包含的次数相对较少, 这说明附加应力使该段断层的破裂次数减少而低频地震的震级增大。相比之下, 每次破裂中地震事件的振幅和数量则与随后的复发间隔几乎没有什么关系。这意味着这样一种模式, 即每次破裂后应力只能降至近似恒值的状态, 而不会降至一成不变的破裂应力状态。从这个意义上讲, 对这些地震事件的预测更多地依赖于滑动, 而不是时间^[28]。

假设地震事件的增加近似于断层~3

cm/a 的滑动速率, 并且滑动与上次地震发生后的时间大致成正比, 那么, 间隔 3 天和 6 天的地震事件分别代表 0.25 mm 和 0.5

mm 的断层滑动。因为复发周期内的某些滑动可能是无震的, 所以这些滑移值代表的将是最大值。

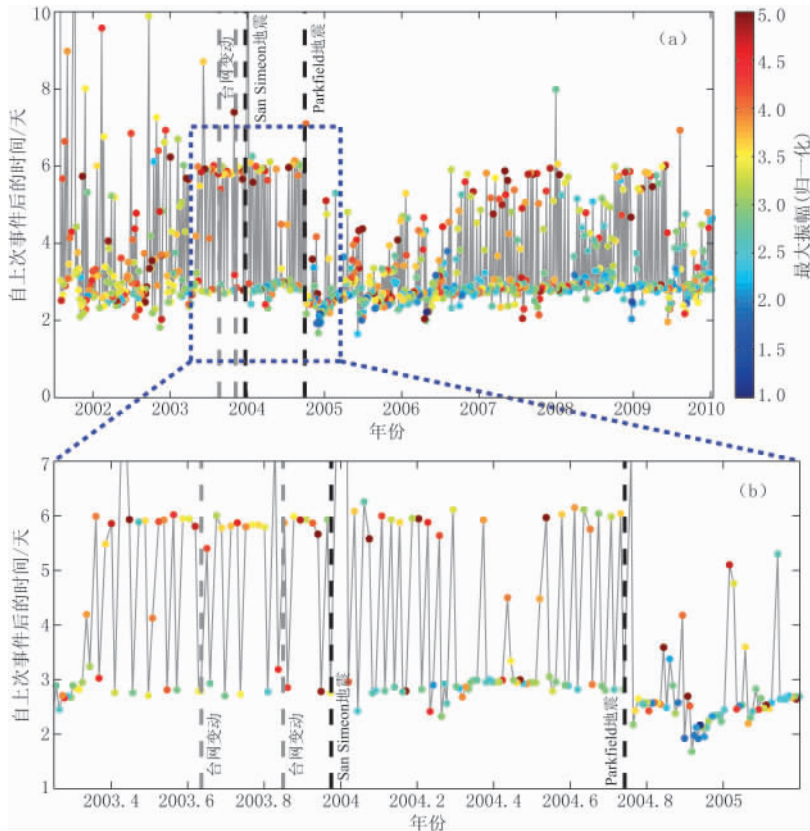


图 2 低频地震复发间隔随时间的变化。(a)2001 年中期至 2010 年的复发历史。颜色标度显示的是每一次破裂的最大振幅(地面速度), 已归一化至所有这类事件的第一个百分位振幅。灰色实线将连续地震事件连接起来。(b)(a)图的放大剖面, 显示出 2004 年帕克菲尔德 M_w 6.0 地震后低频地震的变化特征

对每次地震发生前后的复发间隔进行分析, 我们对此便会产生更加深刻的认识(图 3)。沿对角线的是局部的周期性地震, 其发生前后有着相同的复发间隔。自 2001 年以来, 局部地震的周期性行为以 2.4~3.0 天和(2003 年底尤为显著的)5.8~6.0 天的间隔为特征。另一方面, 偏离对角线的点表明与周期性行为有偏差。周期为 3 至 6 天的线条尤为密集, 表明间隔周期在 3 至 6 天之间振荡。图中, 前后地震事件的不对称性反映出该系统在时间上的方向性。例如, 如果复

发周期出现振荡, 地震序列有时需要经过几轮循环才能缓慢回至主导周期, 这种行为与稳态吸引子非常相像^[5]。

根据实验室研究和数值模拟结果, 多种机制可以解释复发周期的振荡。一种可能是, 摩擦性质本身控制着这种行为。这一概念与本研究有关, 因为震动活动表明该研究区是黏滑和稳滑之间的过渡, 而这正是实验室里观测到的周期倍增状态^[5]。此外, 相邻断层段间的相互作用也可能导致类似的模式出现^[11]。例如, 邻近的无震断层段可能每隔

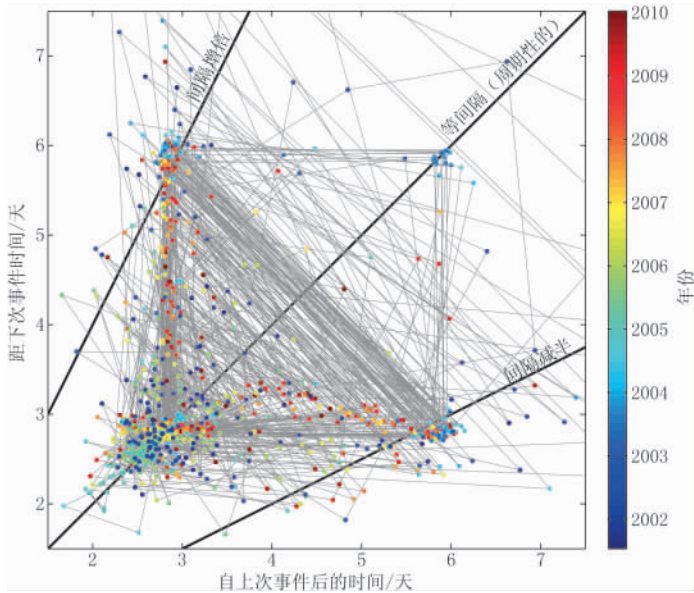


图 3 每次地震发生前后的时间间隔。图中点的颜色代表不同的时间，灰色线条将连续的点连接起来。发生前后时间间隔相同的地震分布在对角线上，偏离对角线的格局表示最常见的 3 至 6 天的周期振荡

3 天发生一次周期性滑动，这通常会引发低频地震。如果该无震断层段没有引发低频地震，那么可能再过 3 天才能触发一次低频地震。

该项研究所针对的低频地震的深度大于大型地震，这可能受控于不同的摩擦特性。特别要指出的是，低频地震周围的温度和流体压力可能比较高。值得注意的是，这些低频地震与大型慢滑事件有更多的共同点，它们在某些地点的发生频率大致也是周期性的^[29]。然而，低频地震的频繁发生却给研究数百轮循环中断层滑移复发情况提供了一个机会，类似研究以前只有在实验室或数值模拟中才可实现。这里所研究的地震事件的复发模式表明，先前在实验室和数值模拟中发现的复杂性可能在真实的地学研究中发挥着重要作用。例如，地震周期行为中大的非随机偏差可能会破坏近周期性事件的序列。特

别是，条件的微小变化可能会使系统行为产生巨大变化，这正是复杂系统的显著特征。虽然已观测到的地震历史可能最能说明某一断层上未来发生地震的状况，但是，此文分析的低频地震序列表明，以此推算较短时期内的地震复发情形可能仍存在局限性。

(注：原图均为彩图)

译自：Science, Vol. 328, 11 June, 2010, 1385-1388

原题：Periodic, chaotic, and doubled earthquake recurrence intervals on the deep San Andreas fault

(中国科学院国家科学图书馆兰州分馆/中国科学院资源环境科学信息中心 赵纪东 译；左玉玲 校)

(译者电子信箱，赵纪东：zhaojd@llas.ac.cn)

参考文献

- [1] Field E H, Dawson T E, Felzer K R, et al. Uniform California earthquake rupture forecast, version 2 (UCERF 2). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2009, 99(4): 2053-2107
- [2] Scharer K M, Biasi G P, Weldon Ray J, et al. Quasi-periodic recurrence of large earthquakes on the southern San Andreas fault. *Geology*, 2010, 38(6): 555-558
- [3] Ellsworth W L, Matthews M V, Nadeau R M, et al. A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities. U. S. Geological Survey Open-File Report, 99-522, 1999
- [4] Weldon R, Scharer K, Fumal T, et al. Wrightwood and the earthquake cycle: What a long recurrence record tells us about how faults work. *GSA Today*, 2004, 14: 4-10
- [5] Gu Y and Wong T-F. In: *Nonlinear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena*, Geophysical Monograph, Vol. 83, W. I. Newman et al., eds. (American Geophysical Union, Washington DC), 1994, 15-35
- [6] Julian B R. Period doubling and other nonlinear phenomena in volcanic earthquakes and tremor. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2000, 101: 19-26
- [7] Burridge R and Knopoff L. Model and theoretical seismology. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1967, 57: 341-371
- [8] Ruina A L. Slip instability and state variable friction laws. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88: 10359-10370
- [9] Huang J and Turcotte D L. Are earthquakes an example of deterministic chaos? *Geophys. Res. Lett.*, 1990, 17: 223-226
- [10] Rice J R. Spatio-temporal complexity of slip on a fault. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 9885-9907
- [11] Ma S and He C. Period doubling as a result of slip complexities in sliding surfaces with strength heterogeneity. *Tectonophysics*, 2001, 337: 135-145
- [12] Becker T W. Deterministic chaos in two state-variable friction sliders and the effect of elastic interactions. In: *Geocomplexity and the Physics of Earthquakes*. *Geophys. Monogr.*, 2001, 120: 5-26
- [13] Erickson B, Birnir B and Lavallée D. A model for aperiodicity in earthquakes. *Nonlinear Processes Geophys.*, 2008, 15: 1-12
- [14] Weeks J D and Tullis T E. Frictional sliding of dolomite: A variation in constitutive behavior. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 7821-7826
- [15] Ito K. Periodicity and chaos in great earthquake occurrence. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 1399-1408
- [16] Huang J and Turcotte D L. Evidence for chaotic fault interaction in the seismicity of the San Andreas fault and Nankai trough. *Nature*, 1990, 348: 234-236
- [17] Bakun W H, Aagaard B, Dost B, et al. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature*, 2005, 437: 969-974
- [18] Nadeau R M and Dolenc D. Nonvolcanic tremors deep beneath the San Andreas fault. *Science*, 2005, 307: 389
- [19] Shelly D R, Ellsworth W L, Ryberg T, et al. Precise location of San Andreas fault tremors near Cholame, California using seismometer clusters: Slip on the deep extension of the fault? *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36: L01303
- [20] Thomas A, Nadeau R M and Bürgmann R. Tremor-tide correlations and near-lithostatic pore pressure on the deep San Andreas fault. *Nature*, 2009, 462: 1048-1051
- [21] Shelly D R, Beroza G C and Ide S. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*,

2007, 446: 305-307

- [22] Shelly D R. Migrating tremors illuminate complex deformation beneath the seismogenic San Andreas fault. *Nature*, 2010, 463: 648-652
- [23] Shelly D R. Possible deep fault slip preceding the 2004 Parkfield earthquake, inferred from detailed observations of tectonic tremor. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36, L17318
- [24] Murray J and Langbein J. Slip on the San Andreas fault at Parkfield, California, over two earthquake cycles, and the implications for seismic hazard. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2006, 96: S283-S303
- [25] Waldhauser F and Schaff D P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: B08311
- [26] Beeler N M, Lockner D L and Hickman S H. A simple stick-slip and creep slip model for repeating earthquakes and its implication for microearthquakes at Parkfield. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2001, 91: 1797-1804
- [27] Chen T and Lapusta N. Scaling of small repeating earthquakes explained by interaction of seismic and aseismic slip in a rate and state fault model. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: B01311
- [28] Shimazaki K and Nakata T. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 1980, 7: 279-282
- [29] Rogers G and Dragert H. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip. *Science*, 2003, 300: 1942-1943

=====

(上接第 48 页)

Time evolution of fault deformation feature intensity and its relationship with strong earthquakes in Gansu and its neighborhood

Zhang Xi^{1,2)}, Xue Fuping²⁾, Jia Peng²⁾

1) Institute of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036

2) The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054

Abstract Using cross-fault mobile short-leveling observational data from late 1980s to November 2009 in Gansu and its neighborhood, the deformation feature intensity of related fault segments are computed, the dynamic evolution features and their relationship with the generation of earthquakes over $M_s 5.8$ are studied. It is concluded that the time-curves of deformation feature intensity of all segments reflected the earthquakes over $M_s 5.8$ on the faults or nearby, displaying thrust abnormality in accordance with their tectonic background from several months to about one year before the earthquakes. After these earthquakes, the abnormality disappeared, or appeared just as transitory normal abnormality (adjustment state).

Key words fault deformation feature intensity; time-variation; earthquake examples