

孕震断层锁固段累积损伤导致失稳的自组织-临界行为特征

吴晓娟 秦四清 薛雷 杨百存 张珂

Behavior characteristics from self-organization to criticality caused by cumulative damage leading to instability of locked segments in seismogenic fault system

Wu Xiao-Wa Qin Si-Qing Xue Lei Yang Bai-Cun Zhang Ke

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 206401 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180614

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180614>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[论地震发生机制](#)

On the mechanism of earthquake

物理学报.2014, 63(21): 219101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.219101>

[以颗粒物理原理认识地震——地震成因、地震前兆和地震预测](#)

To understand earthquake from the granular physics point of view---causes of earthquakes, earthquake precursors and prediction

物理学报.2012, 61(11): 119103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.119103>

[具微结构地壳中非线性地震波的演化](#)

Evolution of nonlinear seismic waves in microstructured earth crust

物理学报.2012, 61(5): 059101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.059101>

[震前兆信息传播、分布及其探测原理](#)

Propagation, distribution and detection principle of seismic precursory signals

物理学报.2011, 60(11): 119101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.119101>

[池沸腾中气泡生长过程的格子 Boltzmann 方法模拟](#)

Simulation of bubble growth process in pool boiling using lattice Boltzmann method

物理学报.2011, 60(6): 066401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.066401>

# 孕震断层锁固段累积损伤导致失稳的 自组织-临界行为特征\*

吴晓娟<sup>1)</sup> 秦四清<sup>2)3)4)†</sup> 薛雷<sup>2)3)4)</sup> 杨百存<sup>2)3)4)</sup> 张珂<sup>2)3)4)</sup>

1)(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

2)(中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029)

3)(中国科学院地球科学研究院, 北京 100029)

4)(中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

(2018年4月7日收到; 2018年7月30日收到修改稿)

弄清锁固段(岩石)破裂过程中自组织临界性的物理涵义, 对正确认识地震可预测性问题等具有重要意义. 本文指出锁固段破裂过程存在两个临界点, 第一临界点为体积膨胀点, 是自组织过程起点, 在该点锁固段发生可判识的高能级破裂事件, 这可视为锁固段宏观破裂前的惟一可识别前兆; 第二临界点为峰值强度点, 即失稳点, 在该点发生通常有明显地表破裂带的大地震. 基于以前研究给出的两者之间应变比理论关系以及地震震级与能量约束关系, 可预测锁固段在第一和第二临界点处发生的某些标志性地震, 并已得到诸多震例分析的支持. 本文研究结果表明: 由于锁固段是非均匀介质, 其失稳前必须出现自组织过程, 自组织是“因”, 临界失稳是“果”, 正是因为自组织过程的存在, 才使得对某些大地震(如标志性地震)的预测成为可能; 两个临界点之间的破裂演化过程并不是瞬态行为, 通常是一个长期过程, 该过程中标志性地震的发生遵循确定性规律, 并不存在小地震直接导致大地震(如标志性地震)的级联效应.

**关键词:** 自组织, 临界失稳, 沙堆模型, 锁固段

**PACS:** 64.60.av, 91.30.Px, 88.10.gn

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180614

## 1 引言

著名的“沙堆模型”试验<sup>[1]</sup>表明, 沙堆达到某种临界状态后, 一颗沙子的落下可能会引发沙堆结构发生“级联式(自组织)”的响应进而导致突变——沙崩, 崩塌规模与发生频率服从幂律分布, 通常认为这是自组织临界态的“指纹”. Bak等<sup>[1]</sup>基于“沙堆模型”提出了自组织临界性(self-organized criticality, SOC)概念, 指出一个具有持续、缓慢、均匀的能量供给且由许多基本单元组成的系统, 当单元之间具有非线性相互作用时, 会自发地演化到某个临界状态. 此时, 整个系统处在一个非常敏感的状态, 任何微小的局域扰动均有可能触发系统的

“崩溃”. 基于全球地震活动区震级-频次统计关系服从幂律分布<sup>[2]</sup>的认识, Geller等<sup>[3]</sup>认为“地球处于SOC状态, 任何小地震有可能级联性地发展成大地震”, 若真如此, 则地震确实不能被预测, 这引起地震学界的广泛关注和争议<sup>[3-8]</sup>. 该认识正确吗? 我们认为须从地震演化机理及其规律入手, 才能给出科学解答.

“沙堆模型”是自组织临界性理论的典型范例. 由“沙堆模型”试验可得到如下启示: 1) “沙堆模型”存在两个临界点, 第一个临界点是自组织行为的开始点(级联式响应或多米诺效应开始); 第二个临界点是当自组织行为演化到一定程度后, 出现失稳(沙崩); 2) 两个临界点之间历时短暂, 可视为瞬

\* 国家自然科学基金(批准号: 41572311, U1704243, 41302233, 41877218)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [qsqhope@mail.iggcas.ac.cn](mailto:qsqhope@mail.iggcas.ac.cn)

态行为. 如果把上述“沙堆模型”比喻成大地震孕育模型, 可以认为任何小地震(一颗沙子落下)都有可能级联式地发展成一个大地震(沙崩). 那么, “沙堆模型”与大地震孕育模型有何本质不同? 对此必须予以澄清, 才能避免出现“张冠李戴”式的谬误.

产生SOC现象的“沙堆模型”<sup>[1]</sup>, “大米堆模型”<sup>[9]</sup>和“珠子模型”等<sup>[10]</sup>试验, 大都涉及均匀或准均匀散体材料, 其变形力学行为主要受颗粒大小和空隙控制. 地震由断层运动引起的岩石破裂所致<sup>[11]</sup>, 岩石这种典型非均匀介质的变形破坏力学行为主要受内部组构和裂隙控制. 因此, 通过散体材料试验观察到的SOC现象, 可能与加载条件下岩石损伤过程表现出的SOC行为不同, 对此需开展进一步探索.

由于形成环境的复杂性和长期的地质作用, 岩石内部存在大量随机分布的裂隙、孔隙等缺陷, 不同部位的强度也存在差异, 这使其具有强烈的非均匀特征, 这与均匀或准均匀散体材料不同, 也与玻璃等均质材料完全不同. 无论采用何种加载方式, 均质材料力学行为在其宏观破裂前一定是线性的; 然而, 由于岩石非均匀性的存在, 受载时其内部微观单元体的损伤破坏行为并非呈现均匀连续模式, 从而导致非线性力学行为, 如破裂丛集等, 这是岩石失稳可预测性的力学基础.

秦四清等<sup>[12]</sup>指出孕震断层锁固段可定义为在断层面上具有较高强度且在地震中释放较大地震矩的部位, 也就是地震区中积累高能量的载体(图1), 主要包括岩桥、断层中未破裂区段、凹凸体和次级断层所围限的块体. 一方面, 断层或板块运动模式及相关地震活动受锁固段控制, 另一方面, 断层或板块运动加载促使锁固段损伤直至宏观破裂, 并伴随地震发生. 因此, 从锁固段(岩石)破裂行为入手, 才可能揭示大地震演化过程之谜.

尽管SOC理论已应用于探索岩石破裂失稳和地震临界行为<sup>[13-18]</sup>, 但仍有诸多基本问题需要解决, 例如: 1) 自组织行为从岩石(锁固段)变形破坏阶段的哪个特征点开始? 2) 自组织与临界性是何种关系? 3) 临界失稳点是峰值强度点还是峰后某点?

本文从岩石(锁固段)变形破坏阶段的特征入手, 详述自组织产生过程及宏观破裂前兆等问题, 指出锁固段的自组织损伤演化过程存在两个临界点, 基于以前建立的力学模型可量化该两点的应

变联系. 在此基础上, 结合震例分析阐述了孕震断层锁固段的自组织-临界行为特征, 还讨论了关于地震可预测性的某些争议问题.

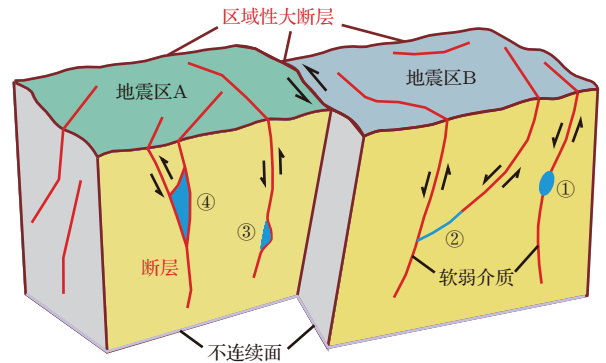


图1 地震区与锁固段示意图 ① 岩桥; ② 断层中未破裂区段; ③ 凹凸体; ④ 次级断层所围限的块体

Fig. 1. Schematic illustration of seismic zones and locked segments: ① rock bridge; ② unruptured segment in a fault intersecting with an adjacent fault; ③ asperity; ④ block bounded by secondary faults.

## 2 岩石(锁固段)变形破坏自组织-临界过程

### 2.1 第一临界点(自组织过程起点)

大量的岩石力学实验<sup>[19-24]</sup>表明, 岩样变形破坏过程可划分为如图2所示的5个阶段, 其中稳定破裂阶段和非稳定破裂阶段的分界点为体积膨胀点, 非稳定破裂阶段和峰后破裂阶段的分界点为峰值强度点.

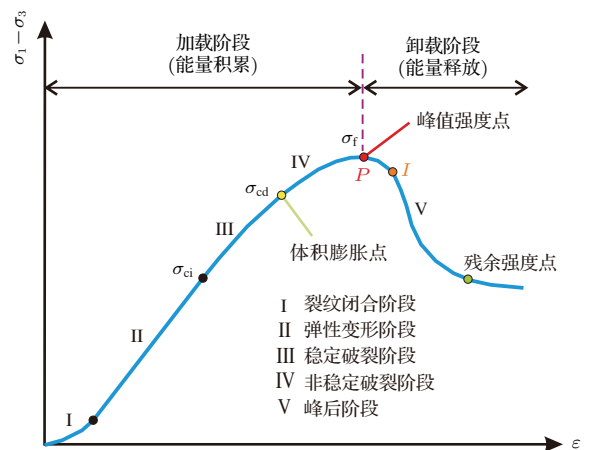


图2 三轴压缩下岩样变形破坏过程示意图,  $\sigma_{ci}$  为裂纹起裂应力,  $\sigma_{cd}$  为裂纹损伤应力,  $\sigma_f$  为峰值强度

Fig. 2. Schematic illustration of deformation and failure process of rock specimen under triaxial compression,  $\sigma_{ci}$  is crack initiation stress,  $\sigma_{cd}$  is crack damage stress, and  $\sigma_f$  is peak stress.

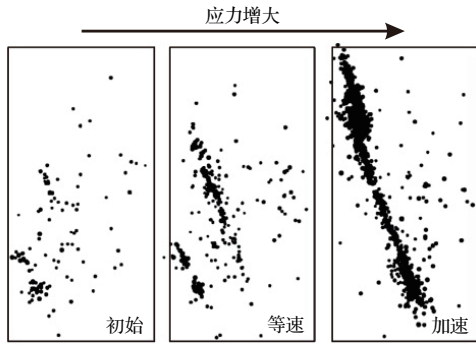


图3 三轴压缩下花岗岩 AE 事件从随机分布到丛集的演化 (据 Lei 等 [27] 修改)

Fig. 3. Evolution of AE events from random to cluster distribution for a granite specimen subjected to triaxial compression (modified from Lei et al. [27]).

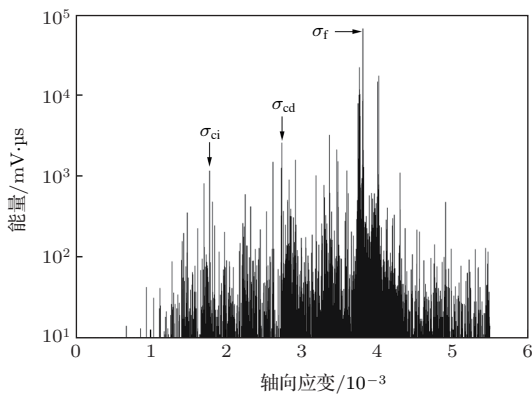


图4 单轴压缩下花岗岩 AE 能量变化特征 (据 Zhao 等 [28] 修改)

Fig. 4. Variation characteristics of AE energy for a granodiorite specimen subjected to uniaxial compression (modified from Zhao et al. [28]).

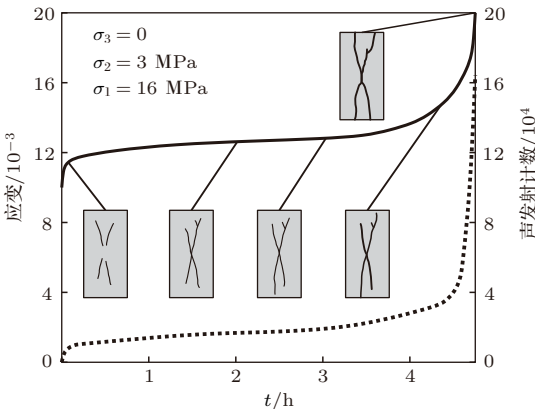


图5 双轴压缩下裂隙岩样应变 (实线) 与 AE 计数 (虚线) 随时间  $t$  的演化 (5 张裂纹扩展模式图为岩样渐进破裂的观测记录) (据孙钧 [29] 修改)

Fig. 5. Evolution of strain (solid curve) and AE counts (dotted curve) with time for a jointed rock sample under biaxial compression. The five sketches of the fracture patterns show the observed progressive failures of the sample (modified from Sun [29]).

当加载应力达到裂纹损伤应力 ( $\sigma_{cd}$ ) 时, 体应变由压缩转为膨胀, 微破裂开始丛集 (图 3), 应变局部化开始, 此时声发射 (AE) 活动开始急剧增多 (图 4), 出现强烈的信号群, 反映在应变或蠕变-时间监测曲线上, 则表现为开始出现应变或蠕变加速现象 (图 5), 通常认为这是岩样发生宏观破裂前, 出现的惟一可识别前兆. 此时, 即使载荷保持恒定不再增加, 破裂仍会自发地累进性发展, 使岩样内薄弱部分依次破坏直至发生宏观破裂, 呈现出自发演化非线性动态行为, 即自组织行为. 因此体积膨胀点可视为自组织过程的起点, 即第一临界点.

与岩样不同之处在于, 孕震断层锁固段具有大尺度、扁平状的几何特征, 且承受极其缓慢的剪切应力 (应变) 加载或应力腐蚀作用, 非均匀性强且脆性破裂程度低 [25], 当损伤至体积膨胀点时, 除具有上述岩样宏观破裂前出现的一般前兆特征外, 还发现在该点必发生一个类似图 4 的显著高能级地震事件, 这是目前监测技术手段可判识的惟一地震活动性前兆 [26].

## 2.2 第二临界点 (失稳点)

诸多室内岩石力学试验 [30] 表明, 若采用柔性试验机加载, 在应力达到峰值强度点的瞬间岩样会发生“爆裂”现象, 即失稳发生在峰值强度点 (图 2 中点  $P$ ). 为得到岩石全应力应变曲线, 目前室内岩石力学试验是通过刚性试验机, 并利用伺服控制系统, 以适当控制岩样的加载速率方式进行, 属于等位移边界加载 [31], 故失稳点  $I$  通常滞后于峰值强度点  $P$ . 对孕震断层锁固段破坏失稳 (大地震) 而言, 临界失稳点究竟对应着哪个点? 必须予以澄清, 才能建立可靠的失稳预测模型. 如图 1 所示, 断层中的锁固段 (震源体) 是高强介质, 是承受应力集中的载体, 其强度和刚度均远大于断层带中的相对软弱介质, 在对锁固段进行加载过程中软弱部位起部分应力传递作用, 锁固段真正的受力条件是等应力边界条件, 这与伺服控制试验条件下室内岩样的加载模式不同. 据此我们推测: 当断层运动对锁固段加载至峰值强度点时, 因软弱介质的约束作用较小导致锁固段在该点被剪断 (大地震发生), 断层急剧错动产生明显的地表破裂带, 这相当于室内柔性试验机加载模式, 所以锁固段失稳点  $I$  应与峰值强度点  $P$  重合, 即大地震发生在峰值强度点  $P$ , 峰值强度点为第二临界点 (失稳点). 对诸多震例的分析 [32-34] 表明, 在显著前震发生后, 尽管标志性地

震(在锁固段体积膨胀点和峰值强度点处发生的地震,若为双震则视为能量等效的一次地震)的发震时间滞后,但峰值强度点距实际失稳点的应变增量很小,可以忽略,即震例分析支持失稳发生在峰值强度点的观点.

### 3 第一与第二临界点的力学联系

如上所述,孕震断层锁固段为积累高能量的载体,其第一临界点为体积膨胀点,第二临界失稳点为峰值强度点.若能建立两者之间的力学联系,便可预测锁固段的剪切失稳行为.

为此,秦四清等<sup>[12]</sup>将体积膨胀点视为重整化群理论中的不稳定不动点进行求解,首次推导出了体积膨胀点处的应变表达式,然后基于损伤本构模型推导出了峰值强度点处的应变表达式,最终构建了峰值强度点与体积膨胀点之间应变比的理论关系式.在此基础上,先后解决了地震区定量划分<sup>[32-34]</sup>、主震与前震判识<sup>[35,36]</sup>、孕震断层锁固段累积Benioff应变(cumulative Benioff strain, CBS)与剪切应变等效性<sup>[37]</sup>与最小有效性震级 $M_v$ 选取(提取锁固段本身破裂事件的震级阈值<sup>[38]</sup>)等问题.通过对全球62个地震区的震例分析<sup>[32-34]</sup>,指出地震区标志性地震为可预测地震类型之一<sup>[39]</sup>,其孕育过程遵循如下确定性规律和约束条件:

$$S_f(k) = 1.48^k S_c, \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{S_f^*(1) - 1.48S_c^*}{0.48}, \quad (2)$$

$$|M_F - M_C| \leq 0.5, \quad (3)$$

$$M_P \leq \min(M_F, M_C) - 0.2, \quad (4)$$

$$E_T = E_M + E_A, \quad (5)$$

$$E_C \ll E_B, \quad (6)$$

式中 $S_c$ 为误差校正后第1锁固段体积膨胀点对应的CBS值; $S_f(k)$ 为误差校正后第 $k$ 个锁固段峰值强度点对应的CBS值; $S_c^*$ 和 $S_f^*(1)$ 分别为误差未校正前第1锁固段体积膨胀点和峰值强度点对应的CBS值, $\Delta$ 为第1锁固段体积膨胀点之前的CBS误差值; $M_C$ 和 $M_F$ 分别为锁固段在体积膨胀点和峰值强度点发生的标志性地震震级, $M_P$ 为锁固段在此期间发生的预震震级; $E_T$ 为主震前该地震区积累的弹性应变能, $E_M$ 为主震本身释放的弹性应变能, $E_A$ 为余震释放的弹性应变能; $E_B$ 为某次标志性地震(锁固段峰值强度点对应的地震)发生前地

震区积累的弹性应变能, $E_C$ 为该标志性地震本身释放的弹性应变能,若满足(6)式,则可判定该标志性地震不为主震.需要说明的是,在假设某一地震区地震效率为常量的条件下,地震波辐射能可作为弹性应变能的替换量.

(1)式适用于描述在极其缓慢压剪或应力腐蚀作用下大尺度、扁平状天然锁固段的破坏行为,其物理涵义是:当第 $k$ 个锁固段损伤累积至其第二临界点时,第 $k+1$ 个锁固段恰好演化至其第一临界点,即第 $k$ 个锁固段的第二临界点与第 $k+1$ 个锁固段的第一临界点重合.对诸多锁固型崩滑<sup>[25,40,41]</sup>与大地震<sup>[32-34]</sup>案例的分析表明,(1)式具有广泛的适用性.杨百存等<sup>[42]</sup>进一步指出,常数1.48是描述不同尺度锁固段加速破裂行为的物理自相似常数,这不仅克服了测定锁固段物理力学参数的困难,而且意味着(1)式是表征锁固段累积损伤导致突变行为的普适性公式.

(1)式—(6)式可视为孕震断层多锁固段脆性破裂理论的基本力学表达式,其中(1)式为标志性地震物理预测模型,(2)式为该模型误差修正计算公式,(3)式—(6)式为该模型约束条件,在统一震级标度情况下有助于从特定地震区地震序列中甄选出标志性地震,从而大大降低滥用(1)式的风险,有效规避大地震预测陷入数字游戏的怪圈.

## 4 孕震断层锁固段的自组织-临界行为特征

如上所述,自第一临界点开始,自组织行为开始出现,其标志是第一临界点对应着一个显著地震.当自组织过程演化到一定程度,到达第二临界点发生失稳,其标志是发生有显著地表破裂带的大地震.本文拟从锁固段的破裂过程入手,根据典型实例揭示其自组织-临界行为特征,并探讨相关的争议问题.

### 4.1 两个临界点之间的破裂演化过程是瞬态行为吗?

以昆仑山口西地震区<sup>[33]</sup>为例,该区已发生了3次标志性地震(表1),即1924年7月3日和14日新疆民丰东 $M_S7.25$ 双震、1973年7月14日西藏尼玛北部 $M_S7.5$ 地震与2001年11月14日青海昆仑山口西 $M_S8.0$ 地震(图6),这些地震的孕育规律遵

循着(1)式, 震级约束关系遵循着(3)式和(4)式. 从图6可以看出, 1997年西藏玛尼  $M_S 7.3$ 地震是该区第2锁固段发生宏观破裂前的1次显著前震, 该震发生后昆仑山口西地震区处于临界状态, 至2001年  $M_S 8.0$ 大震前, CBS监测值没有变化, 即峰值强度点  $P$ 和临界失稳点  $I$  (图1)的应变增量为0, 这为临界失稳点是峰值强度点提供了佐证. 还可看出, 锁固段从第一临界点到第二临界点历时长达数十年, 即其从自组织开始到临界失稳的演化过程不是瞬态行为.

我们所划分的全球62个地震区 [32-34] 覆盖了世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带, 相关震例分析均表明, 标志性地震之间的时间尺度多为数十年甚至上百年, 这充分说明两个临界点之间的历时并非短暂, 而是很长或超长.

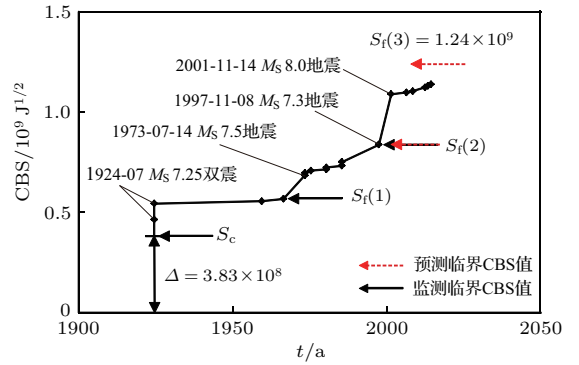


图6 昆仑山口西地震区1924.7.3—2015.11.21之间CBS值与时间  $t$  的关系 [33] (数据分析时选取  $M_S \geq 5.6$  ( $M_v = M_S 5.6$ )地震; 误差修正已被考虑)

Fig. 6. Temporal distribution of CBS in the period from 3 July 1924 to 21 November 2015 in the seismic zone of west of Kunlun mountain pass [33] (The  $M_S \geq 5.6$  ( $M_v = M_S 5.6$ ) earthquakes are selected for data analysis. The error correction is also considered).

表1 锁固段在第一和第二临界点处发生的标志性地震

Table 1. Characteristic earthquakes occurred at the first and second critical points of locked segments.

锁固段编号	第一临界点对应标志性地震	第二临界点对应标志性地震
第1锁固段	1924年7月 $M_S 7.25$ 双震	1973年7月14日 $M_S 7.5$ 地震
第2锁固段	1973年7月14日 $M_S 7.5$ 地震	2001年11月14日 $M_S 8.0$ 地震
第3锁固段	2001年11月14日 $M_S 8.0$ 地震	尚未发生

#### 4.2 小地震能否级联性地发展成大地震?

由图6可知, 1997年玛尼  $M_S 7.3$ 前震发生后该区便处于临界状态, 直至2011年才发生  $M_S 8.0$ 地震, 滞后约4年, 期间曾发生诸多低于  $M_S 5.6$  ( $M_v = M_S 5.6$ )的中小地震(图7), 其中最大一次地震为1998年1月13日玛尼  $M_S 5.4$ 地震, 显然这些地震均能引起应力涨落, 但即使最大的一次

也并未能级联性地发展成大地震; 此外, 在长达约4年的时段潮汐效应也能起到扰动触发作用, 该地震区应在达到临界状态后不久发生大地震. 然而, 事实并非如此. 由此可见, 对于大尺度锁固段而言, 即使其处于临界状态, 微小的扰动并不能导致其发生“崩溃”, 我们推测这种滞后现象是由于断层的黏滞效应所致, 与扰动无关. 再者, 小地震不一定是由于锁固段破裂导致, 也可能是大量的非锁固段

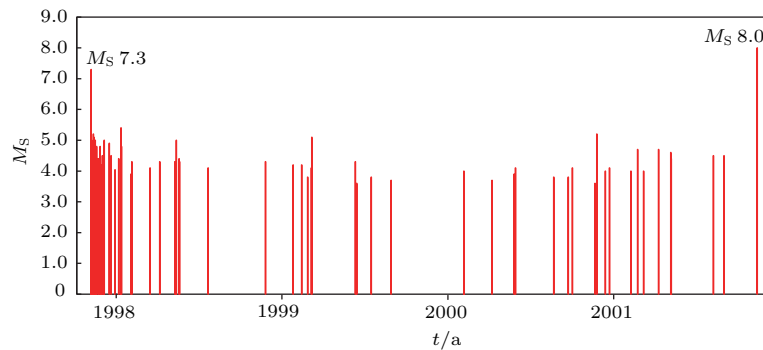


图7 昆仑山口西地震区1997.11.8—2001.11.14间  $M_S-t$  图

Fig. 7.  $M_S-t$  chart in the seismic zone of west of Kunlun mountain pass in the period between 8 November 1997 and 14 November 2001.

(相对软弱介质)破裂信息,对特定地震区进行数据处理时,应通过最小有效性震级  $M_v$  剔除这类地震,不必考虑之.事实上,一次标志性地震发生后,需要发生一系列中间过程地震(预震)事件(震级约束关系见(4)式),直至CBS值满足(1)式时才能发生下一次标志性地震,即标志性地震的孕育过程受确定性规律支配,期间不存在级联效应.地球每天均会发生众多的小地震,如果任何小地震都有可能级联性地发展成大地震,同理可认为这些大地震可级联性地发展成更大的地震,如可从  $M \geq 6.0$  地震级联式地发展到  $M \geq 7.0$ ,  $M \geq 8.0$  乃至  $M \geq 9.0$  地震,甚至更大.然而事实上并非如此,震级越大的地震数量越少,全球  $M \geq 8.0$  地震

屈指可数,  $M \geq 9.0$  地震只有7次<sup>[43]</sup>,而且级联机理也无法解释这些巨震的能量来源.这意味着小地震绝无可能直接导致大地震,否则会违背人们公认的能量守恒原理.从岩石力学原理上说,在能量持续供给下,一个特定地震区某个地震周期内,承载力较小的锁固段会首先断裂,然后应力转移到承载力相对较大的锁固段上,导致其发生断裂,依此类推,直至承载力最大的锁固段发生宏观破裂,即主震发生.显然,主震前的所有地震,无论其大小均表示地震区处于能量积累过程,而主震和其后的余震才表示能量释放过程,这一过程遵循着(5)式所示的能量守恒原理.按此原理,才能合理解释地球上以前从未发生过  $M_W 9.0$  的地震,近些年才发生如此规模地震的事实,如2004年印尼苏门答腊  $M_W 9.0$  (图8)和2011年日本  $M_W 9.0$  (图9)海啸地震.从图8和图9可看出,这两次  $M_W 9.0$  地震均为标志性地震,为可预测地震类型,其发生前所属地震区分别曾发生多次不小于  $M 8.5$  的标志性地震和数量众多的预震.能量计算表明,该两次  $M_W 9.0$  地震发生前,其所属地震区积累的能量均远大于其地震本身释放的能量,即满足(6)式,说明  $M_W 9.0$  地震发生并非偶然,而是能量积累到一定程度后的必然结果.

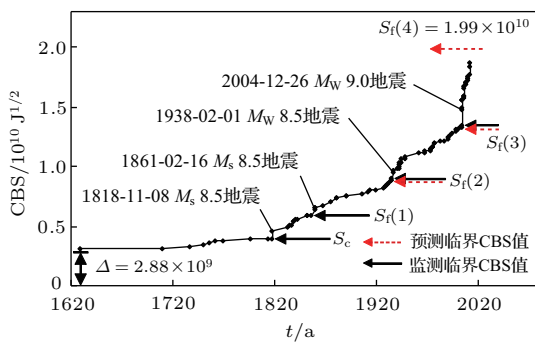


图8 雅加达地震区1629.8.1—2016.2.24之间CBS值与时间  $t$  关系<sup>[32]</sup> (数据分析时选取  $M_L \geq 7.0$  ( $M_v = M_L 7.0$ ) 地震;误差修正已被考虑)

Fig. 8. Temporal distribution of CBS in the period from 1 August 1629 to 24 February 2016 in the Jakarta seismic zone<sup>[32]</sup> (The  $M_L \geq 7.0$  ( $M_v = M_L 7.0$ ) earthquakes are selected for data analysis. The error correction is also considered).

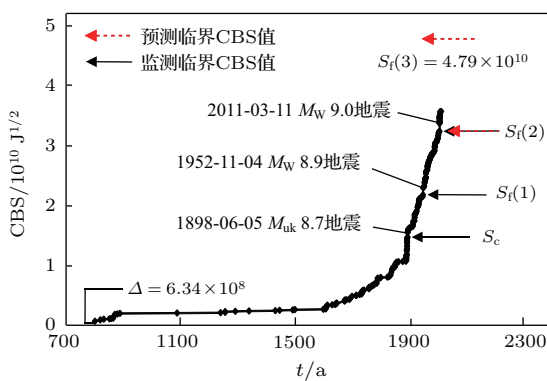


图9 北海道地震区144.2.15—2016.2.24之间CBS值与时间  $t$  关系<sup>[32]</sup> (数据分析时选取  $M_W \geq 7.0$  ( $M_v = M_W 7.0$ ) 地震;误差修正已被考虑)

Fig. 9. Temporal distribution of CBS in the period from 15 February 144 to 24 February 2016 in the Hokkaido seismic zone<sup>[32]</sup> (The  $M_W \geq 7.0$  ( $M_v = M_W 7.0$ ) earthquakes are selected for data analysis. The error correction is also considered).

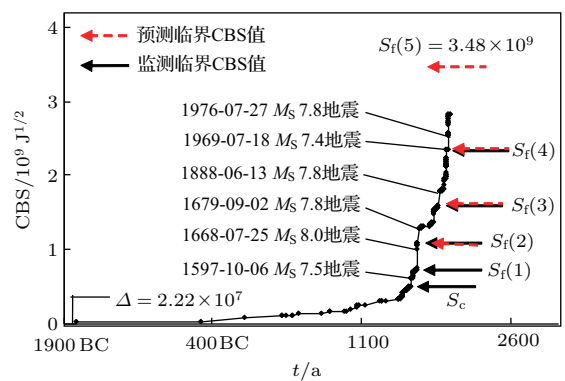


图10 唐山地震区公元前1767—2015.11.21之间CBS值与时间  $t$  关系<sup>[33]</sup> (数据分析时选取  $M_S \geq 5.0$  ( $M_v = M_S 5.0$ ) 地震;误差修正已被考虑)

Fig. 10. Temporal distribution of CBS in the period from 1767 BC to 21 November 2015 in the Tangshan seismic zone<sup>[33]</sup> (The  $M_S \geq 5.0$  ( $M_v = M_S 5.0$ ) earthquakes are selected for data analysis. The error correction is also considered).

曾发生1976年8月四川松潘—平武间 $M_S$ 7.2双震震群,这是显著前震序列,约滞后32年2008年汶川 $M_S$ 8.1地震发生(图11).

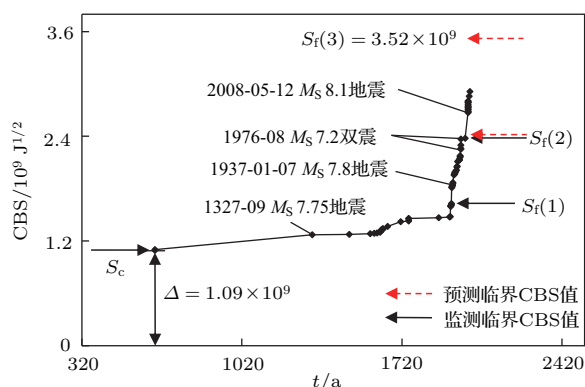


图11 汶川地震区638.2.14—2015.11.21之间CBS值与时间 $t$ 关系<sup>[33]</sup>(数据分析时选取 $M_S \geq 5.5$  ( $M_v = M_S 5.5$ )地震;误差修正已被考虑)

Fig. 11. Temporal distribution of CBS in the period from 14 February 638 to 21 November 2015 in the Wenchuan seismic zone<sup>[33]</sup> (The  $M_S \geq 5.5$  ( $M_v = M_S 5.5$ ) earthquakes are selected for data analysis. The error correction is also considered).

### 4.3 地球是否处于自组织临界状态?

仍以昆仑山口西地震区(图6)为例,1973年 $M_S$ 7.5地震对应着第2锁固段的第一临界点,在向第二临界点演化过程中发生了诸多地震(预震),CBS值不断增加,在1997年 $M_S$ 7.3前震发生后该区处于临界状态,滞后约4年2001年 $M_S$ 8.0地震发生.这说明大地震或巨震孕育系统存在自组织-临界性,断层中锁固段损伤累积到一定程度才能到达第一临界点,从第一到第二临界点这一自组织过程需要一定的历时,即自组织现象的出现并不标志着系统已到达临界失稳状态,这意味着“自组织(SO)”和“临界性(C)”是两个不同的概念,切忌将两者混为一谈.再者,对合理划定的地震区而言,自组织和临界失稳状态呈交替出现特征,如2001年 $M_S$ 8.0地震发生后,昆仑山口西地震区脱离原来临界状态,进入下一个自组织过程,当第3锁固段损伤演化至第二临界点时,该区将再次处于临界失稳状态,预测将发生 $M_S$ 8.0左右标志性地震.

秦四清等<sup>[32-34]</sup>的分析表明,目前世界上62个地震区均处于自组织状态,但只有少数地震区处于临界失稳状态.岩石圈是由不同层次、不同尺度的块体组成,即使某一块体(地震区)处于临界状态,并不代表整个地球处于临界状态.

## 5 讨论

“沙堆模型”可视为非连续且准均匀的散体模型,其灾变前力学行为具有近似线性性质,可能没有可判识的前兆,因而难以预测其临界失稳行为.然而,大地震(如标志性地震)孕育模型涉及到多锁固段破裂失稳,锁固段可视为连续非均匀介质,当其被加载至体积膨胀点时,开始出现破裂丛集导致的显著地震活动性前兆,自此锁固段内部裂纹生成和扩展过程便具有了自组织演化特征,此时若不发生减载作用,则最终会演化至临界失稳状态;反之,若自组织过程开始后,发生减载作用,则不会出现临界失稳现象.这说明锁固段失稳发生前,必须出现持续的自组织过程,自组织是“因”,临界失稳是“果”.自组织行为的出现并不意味着锁固段已到达临界失稳状态,且锁固段也并非时时处于临界失稳状态,即临界性的出现需要一定条件.

再次强调,对孕震断层锁固段破裂失稳而言,第一和第二临界点之间的自组织过程并非短暂,而是一个长期过程;尽管在两个临界点之间会发生包括小地震在内的诸多预震,但这些小地震并不能级联式地发展成大地震(如标志性地震),标志性地震的发生并非偶然,而是锁固段损伤演化至某种程度后的必然结果,其孕育过程遵循确定性规律.这有力地说明,“沙堆模型”与大地震(如标志性地震)孕育模型在演化机理和发生规律方面有着本质不同,决不能将两者混为一谈.

Bak等<sup>[1]</sup>利用SOC理论能够很好地解释一个沙堆的形成和坍塌过程,但Geller等<sup>[3]</sup>将该理论直接外推应用于地震预测,导致错误的理解和导向.实际上恰恰相反,正是由于自组织过程的存在,才使得对某些大地震(如标志性地震)的预测成为可能.对某一非线性系统而言,尽管系统内发生的事件服从幂律分布是自组织系统的标志,但并不意味着这样的系统具有完全不可预测性,实际上不管自组织系统还是其他系统,只要其内部特征事件的演化遵循确定性规律,那么这些事件就具有可预测性.

自Geller等<sup>[3]</sup>的观点提出后,地震学界围绕“地震能否被预测”的争议从未中断,我们认为“地震能否被预测”是伪命题,而“什么类型的地震能被预测”才是科学命题.因为,全球每年会发生数百次6.0级及以上地震,即使在完全掌握地震演化机



理及其规律的情况下,也不可能全部预测.进一步的研究表明<sup>[39]</sup>,并非所有的地震都能被预测,只有遵循确定性规律的某些标志性地震和标志性预震,才能够被预测.

## 6 结 论

1) 锁固段(岩石)是非均匀介质,其临界失稳发生前,必须出现自组织过程.自组织是“因”,临界失稳是“果”,即自组织行为的出现并不意味着锁固段已到达临界失稳状态,且锁固段也并非时时处于临界失稳状态.

2) 岩石或锁固段变形破坏过程中,自组织过程开始的起点对应着体积膨胀点(第一临界点),临界失稳点对应着峰值强度点(第二临界点).对孕震断层锁固段而言,从第一到第二临界点的历时通常为数十年或数百年,这是一个长期或超长期过程,该过程中标志性地震的发生遵循确定性规律,并不存在小地震直接导致大地震的级联效应.

3) 正是因为自组织过程的存在,才使得对某些大地震(如标志性地震)的预测成为可能.

## 参考文献

- [1] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 381
- [2] Gutenberg B, Richter C F 1944 *Bull. Seismol. Soc. Am.* **34** 185
- [3] Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, Mulargia F 1997 *Science* **275** 1616
- [4] Stark P B 1996 *Res. Lett.* **23** 1399
- [5] Wyss M, Aceves B R L, Park S K 1997 *Science* **278** 487
- [6] Sykes L R, Shaw B E, Scholz C H 1999 *Pure Appl. Geophys.* **155** 207
- [7] Crampin S, Gao Y 2010 *Geophys. J. Int.* **180** 1124
- [8] Wu Z L 1998 *Earthquake Research in China* **14** 1 (in Chinese) [吴忠良 1998 中国地震 **14** 1]
- [9] Frette V, Christensen K, Malthé-Sørensen A, Feder J, Jøssang T, Mørk P 1996 *Nature* **379** 49
- [10] Ramos O, Altshuler E, Måløy K J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 078701
- [11] Wu X W, Qin S Q, Xue L, Yang B C, Li P, Zhang K 2016 *Chinese J. Geophys.* **59** 3696 (in Chinese) [吴晓娟, 秦四清, 薛雷, 杨百存, 李培, 张珂 2016 地球物理学报 **59** 3696]
- [12] Qin S Q, Xu X W, Hu P, Wang Y Y, Huang X, Pan X H 2010 *Chinese J. Geophys.* **53** 1001 (in Chinese) [秦四清, 徐锡伟, 胡平, 王媛媛, 黄鑫, 泮晓华 2010 地球物理学报 **53** 1001]
- [13] Sornette A, Sornette D 1989 *EPL* **9** 197
- [14] Chen K, Bak P, Obukhov S P 1991 *Phys. Rev. A* **43** 625
- [15] Zheng J 1992 *Prog. Geophys.* **7** 20 (in Chinese) [郑捷 1992 地球物理学进展 **7** 20]
- [16] Godano C, Alonzo M L, Caruso V 1993 *Phys. Earth Planet. Inter.* **80** 117
- [17] Yoshioka N 2003 *Earth Planets Space* **55** 283
- [18] Lu K Q, Hou M Y, Jiang Z H, Wang Q, Sun G, Liu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 119103 (in Chinese) [陆坤权, 厚美瑛, 姜泽辉, 王强, 孙刚, 刘寄星 2012 物理学报 **61** 119103]
- [19] Brace W F, Paulding B W, Scholz C H 1966 *J. Geophys. Res.* **71** 3939
- [20] Bieniawski Z T 1967 *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **4** 395
- [21] Bieniawski Z T 1967 *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **4** 407
- [22] Martin C D, Chandler N A 1994 *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **31** 643
- [23] Xue L, Qi M, Qin S Q, Li G L, Li P, Wang M M 2015 *Rock Mech. Rock Eng.* **48** 1763
- [24] Xue L, Qin S Q, Sun Q, Wang Y Y, Lee M L, Li W C 2014 *Rock Mech. Rock Eng.* **47** 1183
- [25] Chen H R, Qin S Q, Xue L, Yang B C, Zhang K, Wu X W 2017 *Prog. Geophys.* **32** 2200 (in Chinese) [陈宏然, 秦四清, 薛雷, 杨百存, 张珂, 吴晓娟 2017 地球物理学进展 **32** 2200]
- [26] Yang B C, Qin S Q, Xue L, Zhang K 2018 *Chinese J. Geophys.* **61** 616 (in Chinese) [杨百存, 秦四清, 薛雷, 张珂 2018 地球物理学报 **61** 616]
- [27] Lei X L, Masuda K, Nishizawa O, Jouniaux L, Liu L, Ma W, Satoh T, Kusunose K 2004 *J. Struct. Geol.* **26** 247
- [28] Zhao X G, Wang J, Ma L K, Su R, Cai M, Wang G B 2013 *Proceedings of the 3rd ISRM SINOROCK Symposium*. London: CRC Press/Balkema, p75
- [29] Sun J 1999 *Rheology of Rock and Soil Materials and its Engineering Application 1* (Beijing: China Architecture and Building Press) p434 (in Chinese) [孙钧 1999 岩土材料流变及其工程应用 1 (北京: 中国建筑工业出版社) 第434页]
- [30] Hudson J A, Crouch S L, Fairhurst C 1972 *Eng. Geol.* **6** 155
- [31] Meng X Y, Li S H, Zhang J F 2004 *Chin. J. Rock Mech. Eng.* **23** 1760 (in Chinese) [孟祥跃, 李世海, 张均锋 2004 岩石力学与工程学报 **23** 1760]
- [32] Qin S Q, Li P, Yang B C, Xue L, Wu X W 2016 *Prog. Geophys.* **31** 574 (in Chinese) [秦四清, 李培, 杨百存, 薛雷, 吴晓娟 2016 地球物理学进展 **31** 574]
- [33] Qin S Q, Yang B C, Wu X W, Xue L, Li P 2016 *Prog. Geophys.* **31** 115 (in Chinese) [秦四清, 杨百存, 吴晓娟, 薛雷, 李培 2016 地球物理学进展 **31** 115]
- [34] Qin S Q, Yang B C, Xue L, Li P, Wu X W 2016 *Prog. Geophys.* **31** 559 (in Chinese) [秦四清, 杨百存, 薛雷, 李培, 吴晓娟 2016 地球物理学进展 **31** 559]
- [35] Qin S Q, Li P, Xue L, Li G L, Wang M M 2014 *Prog. Geophys.* **29** 1526 (in Chinese) [秦四清, 李培, 薛雷, 李国梁, 王苗苗 2014 地球物理学进展 **29** 1526]
- [36] Li P, Qin S Q, Xue L, Wu X W, Yang B C, Zhang K 2016 *Prog. Geophys.* **31** 1450 (in Chinese) [李培, 秦四清, 薛雷, 吴晓娟, 杨百存, 张珂 2016 地球物理学进展 **31** 1450]

- [37] Yang B C, Qin S Q, Xue L, Wu X W, Zhang K 2017 *Prog. Geophys.* **32** 1067 (in Chinese) [杨百存, 秦四清, 薛雷, 吴晓娟, 张珂 2017 地球物理学进展 **32** 1067]
- [38] Qin S Q, Yang B C, Xue L, Li P, Wu X W 2015 *Prog. Geophys.* **30** 2013 (in Chinese) [秦四清, 杨百存, 薛雷, 李培, 吴晓娟 2015 地球物理学进展 **30** 2013]
- [39] Yang B C, Qin S Q, Xue L, Wu X W, Zhang K 2017 *Prog. Geophys.* **32** 1953 (in Chinese) [杨百存, 秦四清, 薛雷, 吴晓娟, 张珂 2017 地球物理学进展 **32** 1953]
- [40] Xue L, Qin S Q, Li P, Li G L, Oyediran I A, Pan X H 2014 *Eng. Geol.* **182** 79
- [41] Qin S Q, Wang Y Y, Ma P 2010 *Chin. J. Rock Mech. Eng.* **29** 873 (in Chinese) [秦四清, 王媛媛, 马平 2010 岩石力学与工程学报 **29** 873]
- [42] Yang B C, Qin S Q, Xue L, Chen H R, Wu X W, Zhang K 2017 *Chinese J. Geophys.* **60** 1746 (in Chinese) [杨百存, 秦四清, 薛雷, 陈浩然, 吴晓娟, 张珂 2017 地球物理学报 **60** 1746]
- [43] Song Z P 2011 *Global Earthquake Catalog 1* (Beijing: Seismological Press) pp1–450 (in Chinese) [宋治平 2011 全球地震目录 1 (北京: 地震出版社) 第 1—450 页]

# Behavior characteristics from self-organization to criticality caused by cumulative damage leading to instability of locked segments in seismogenic fault system\*

Wu Xiao-Wa<sup>1)</sup> Qin Si-Qing<sup>2)3)4)†</sup> Xue Lei<sup>2)3)4)</sup> Yang Bai-Cun<sup>2)3)4)</sup> Zhang Ke<sup>2)3)4)</sup>

1) (College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

2) (Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

3) (Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

4) (College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 7 April 2018; revised manuscript received 30 July 2018 )

## Abstract

Each of the seismogenic locked segments in a well-defined seismic zone can accumulate high strain energy to bring about major earthquakes. Hence, better understanding the physical implication of self-organized criticality in the locked segment (rock) failure process is crucial to achieving insights into such issues as earthquake predictability and so on. We point out that there exist two critical points in the locked segment fracturing process. The first critical point is volume expansion point, which is the starting point of self-organization, at which a rupture event with high energy occurs. It can be regarded as the only identified precursor to macroscopic rupture of locked segment. The second critical point is the peak strength point, namely, the instability point, at which a major earthquake which is able to generate obvious surface rupture zones takes place. According to our previous research on the theoretical relationship of strain ratio between the two points as well as the constrained expressions concerning earthquake magnitudes and elastic strain energy, also known as the theory about the brittle failure of multiple locked segments in a seismogenic fault system, we can predict some characteristic earthquakes occurring at the first and the second critical point of locked segment, e.g., the 2004 Sumatra-Andaman  $M_W$ 9.0 earthquake in Indonesia, the 2008 Sichuan  $M_S$ 8.1 earthquake in China, and the 2011 Tōhoku  $M_W$ 9.0 earthquake in Japan. This was obtained by retrospectively analyzing the earthquake cases in 62 seismic zones covering the circum-Pacific seismic belt and the Eurasia seismic belt. The present results show that the self-organized process before the locked segment (rock) instability must arise due to its heterogeneity; there exists a causal link between the self-organization and criticality; it is possible to predict some large earthquakes (e.g. characteristic earthquakes) just because of the existence of self-organized process. We emphasize here that the damage process between the two critical points is not transient behavior, usually a long-term process; the evolution of characteristic earthquakes follows a deterministic rule; there is no probability with which small earthquakes can cascade into a large event (e.g. characteristic earthquakes). In summary, this study can help to comprehend the evolutionary mechanism of characteristic earthquakes, provide a physical basis of understanding the generation process of earthquakes, and clarify such issues as the identification of earthquake types and predictability of earthquakes.

**Keywords:** self-organization, critical instability, sandpile model, locked segment

**PACS:** 64.60.av, 91.30.Px, 88.10.gn

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180614

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41572311, U1704243, 41302233, 41877218).

† Corresponding author. E-mail: [qsqhope@mail.iggcas.ac.cn](mailto:qsqhope@mail.iggcas.ac.cn)