

李佳威, 宋笛牒, 吴忠良, 李杭威. 2025. 地震统计物理研究的新视角: “龙王”理论及“龙王”地震事件[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 56(3): 225-242. doi: 10.19975/j.dqyx.2024-033.
Li J W, Sornette D, Wu Z L, Li H W. 2025. New horizon in the statistical physics of earthquakes: Dragon-king theory and dragon-king earthquakes[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(3): 225-242 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyx.2024-033.

地震统计物理研究的新视角: “龙王”理论及 “龙王”地震事件

李佳威¹, 宋笛牒^{1*}, 吴忠良^{1,2}, 李杭威¹

1 南方科技大学 前沿与交叉科学研究院 风险分析预测与管控研究院, 深圳 518055

2 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要: 系统地定量考察大地震发震机理是否特殊, 不仅能够深化对断层破裂和地震活动规律的理解, 而且有望促进大地震可预测性研究和提升防灾减灾策略的有效性. 本文作者之一于 2009 年提出的“龙王”理论, 旨在为那些内源性极端离群值(即“龙王”事件)提供一个量化的识别和检验框架. 该理论为解释、预测和管控这些罕见但影响巨大的事件提供了非常有价值的分析工具. 本文讨论了将其应用于地震学的可行性, 提出用古登堡-里克特定律的离群值作为识别“龙王”地震事件的标志, 并结合断层耦合强度、有限断层破裂、破裂几何复杂性及地震动力学数值模拟实验呈现的失稳破裂探讨了可能导致这些特殊事件产生的四个地震学机制. 尽管“龙王”理论在地震学的具体应用还面临诸多实际挑战, 但仍有望显著丰富统计地震学的研究内容. 通过从统计物理研究的视角重新系统性审视地震破裂类型的分类, 并将这些认识与其背后的物理机制相结合, 本文呈现的内容将可以极大提升地震统计物理研究领域的分析手段和研究深度.

关键词: 地震统计物理; “龙王”事件; “龙王”理论; 地震发震机制; 统计地震学; 离群值检验

doi: 10.19975/j.dqyx.2024-033

中图分类号: P315

文献标识码: A

New horizon in the statistical physics of earthquakes: Dragon-king theory and dragon-king earthquakes

Li Jiawei¹, Sornette Didier^{1*}, Wu Zhongliang^{1,2}, Li Hangwei¹

1 Institute of Risk Analysis, Prediction and Management (Risks-X), Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Southern University of Science and Technology (SUSTech), Shenzhen 518055, China

2 Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: A systematic quantitative investigation into whether the mechanisms of large earthquakes are unique could significantly deepen our understanding of fault rupture and seismicity patterns. This research holds the potential to advance our ability to predict large earthquakes and enhance the effectiveness of disaster prevention and mitigation strategies. In 2009, one of us introduced the dragon-king theory, offering a quantitative framework for identifying and testing extreme outliers—referred to as dragon-king events—that are endogenously generated.

收稿日期: 2024-08-20; 录用日期: 2024-11-05

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2024A1515011568); 国家自然科学基金资助项目(U2039202, U2039207); 深圳市科技创新委员会资助项目(GJHZ20210705141805017); 南方科技大学计算科学与工程中心
Supported by the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (Grant No. 2024A1515011568), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U2039202, U2039207), the Shenzhen Science and Technology Innovation Commission (Grant No. GJHZ20210705141805017), and the Center for Computational Science and Engineering at Southern University of Science and Technology

第一作者: 李佳威(1992-), 男, 博士, 主要从事地震学研究. E-mail: lijw3@sustech.edu.cn

*通信作者: 宋笛牒 Didier Sornette (1957-), 男, 讲席教授/院士, 主要从事地震学、统计物理、复杂系统和风险分析等研究. E-mail: dsornette@ethz.ch



This theory provides valuable tools for explaining, predicting, and managing the risks associated with these rare but highly impactful events. The present paper discusses the feasibility of applying this theory to seismology, proposing that dragon-king earthquake events can be identified as outliers to the Gutenberg-Richter law. It also examines four seismological mechanisms that may contribute to the occurrence of these extraordinary events, considering factors such as fault coupling intensity, finite fault rupture, rupture geometric complexity, and run-away unstable rupture revealed by numerical simulations of earthquake dynamics. Although applying the dragon-king theory to seismology presents practical challenges, it offers the potential to significantly enrich statistical seismology. By reexamining the classification of earthquake rupture types through a statistical physics lens and integrating these insights with underlying physical mechanisms, this approach can greatly enhance the analytical tools and depth of research in the field of statistical seismology.

Keywords: statistical physics of earthquakes; dragon-king event; dragon-king theory; earthquake mechanism; statistical seismology; outlier detection

0 引言

地球上通常平均每年会发生一次 8 级以上、约 10~15 次 7 级以上以及约 150 次 6 级以上大地震。虽然大地震发生频次较低，但其在短时间内释放的巨大能量对地壳能量平衡有着显著影响。这种快速能量释放过程与应力积累的漫长构造过程及地质时间尺度形成鲜明对比。大地震可造成广泛影响，如 1976 年河北唐山 $M_W7.6 / M_S7.8$ 地震 (Chen et al., 1988; Mearns and Sornette, 2021)、2008 年四川汶川 $M_S8.0$ 地震 (Chen and Booth, 2011) 和 2011 年日本东北 (Tohoku) $M_W9.0$ 地震 (Satake et al., 2013)。本文想要讨论的主要问题是，大地震是否具有某些可区分的特性，从而使其可被预测。对于这个问题的探讨不仅有利于对地震物理及其时空组织结构的更好理解，而且对于地震灾害风险评估和防灾减灾实践也具有重要意义。

(1) 观点：大地震不具有可区分特性，不能被预测

普遍的观点认为，这个问题的答案是否定的，即大地震仅仅是小地震继续扩展到更大尺度的结果。换句话说，除了大小不同，大地震与小地震并无任何差别，两者的统计特性也可以通过刻画地震总体特征的标度关系来描述。这一观点来源于许多描述地震活动统计特性的幂律分布。

幂律 (power law) 分布广泛存在于自然科学、社会学、经济学等复杂系统中 (Mitzenmacher, 2004; Newman, 2005; Sornette, 2006)，其描述事件尺度大小 x 的概率密度函数 $P(x)$ 可写作：

$$P(x) \propto \frac{1}{x^{1+\alpha}} \quad (1)$$

其中， α 是一个正指数常数。幂律分布具有两个重要性质，即自相似性 (self-similarity) 和“肥尾” (fat tail)，前者意味着系统中所有事件 (甚至包括极端大和极端小事件) 在发生机制上完全无差别，后者则指处于该分布尾部的极端 (大) 事件其发生概率远超指数分布和正态分布 (图 1; Mitzenmacher, 2004; Newman, 2005; Sornette, 2006)。地震学中用来近似描述许多观测的幂律分布包括：描述地震能量或地震矩频度关系的古登堡-里克特定律 (描述震级-频度关系时，古登堡-里克特定律是一个指数分布函数) (Gutenberg and Richter, 1944; 刘月等, 2024; Sornette et al., 1996)、断层破裂尺度的频度分布 (Clark et al., 1999; Davy, 1993; Scholz et al., 1993; Scholz, 1997)、地震活动性和断层系统的分形/多重分形/分层缩放特征 (Hirabayashi et al., 1993; Hirata and Imoto, 1991; Ouillon et al., 1996; Turcotte, 1997)、时空网格地震活动率的频度分布 (Saichev and Sornette, 2006, 2007)、大地震间隔时间和震中距的频度分布 (Ito, 1995)、地震破裂位错的频度分布 (Lavallée and Archuleta, 2003; Lavallée et al., 2006) 等。另外，若干近似幂律的地震活动规律进一步强化了地震间自相似性的证据。作为一阶近似，大森-宇津定律描述了余震活动率随主震发震时刻的衰减 (Ōmori, 1894; Utsu, 1970)、余震生产率量化了特定主震触发的平均余震数量与主震震级的指数型相关性 (因此是地震能量的幂律函数) (Yamanaka and Shimazaki, 1990)、空间格林函数给出了余震数量随主震震中距的衰减 (Nandan et al., 2021; Zhuang et al., 2004)、 k^2 震源谱分布描述了地震破裂位错空间频率分量在波数域中的衰减 (Herrero and Bernard, 1994) 等。

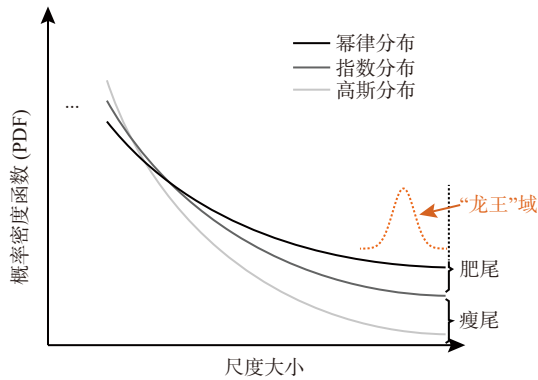


图 1 在幂律分布尾部作为离群值出现的“龙王”事件观测示意图。“龙王”事件虽然是极端事件，但其发生概率远大于高斯和指数分布，甚至远高于幂律分布。通常，将概率密度函数在尾部衰减快于指数分布的情况称为瘦尾（thin tail；超指数），如高斯分布；而衰减慢于指数分布的情况称为肥尾（fat tail；亚指数），幂律分布即肥尾分布的一个特例。重尾（heavy tail）则指的是在公式（1）中定义的幂律分布指数 α 小于 2 的渐近幂律衰减，这意味着该分布的方差在数学上是无限的。“龙王”事件域表现为分布极右端的一个“肩部”，其衰减速度相比幂律分布更慢

Fig. 1 A schematic diagram of the observations of dragon-king events appearing as outliers in the tail of a power law distribution. Although dragon-king events are extreme, their occurrence probability is much higher compared to Gaussian and exponential distributions, and even significantly higher than the power-law distribution. Typically, if the probability density function decays faster than an exponential distribution in the tail, it is referred to as a thin tail, such as for a Gaussian distribution; whereas a decay slower than an exponential is known as a fat tail (sub-exponential in mathematical terms). A specific example of a fat tail distribution is the power law distribution. The term "heavy tail" is technically used to refer to an asymptotic power law decay with exponent α defined in Equation (1) smaller than 2, so that the variance of the distribution is mathematically infinite. The dragon-king regime can express itself as a shoulder or as a change of speed of decay in the far-right end of the distribution

这些在地震学中广泛存在的幂律分布（特别是古登堡-里克特定律）被解释为地震学中支持自组织临界性（self-organized criticality）存在的证据（Bak et al., 1987; Bak and Tang, 1989; Bak and Paczuski, 1995; Sornette and Sornette, 1989），其认为大地震相较其他地震并无任何本质上的特殊性，仅仅是更大的地震事件而已；所有地震事件都揭示了地壳自组织到一种临界状态的过程，这种状态的特征是缓慢的应力积累，并通过各种震级的地震将

其突然释放（Geller et al., 1997; Wyss, 1997）。大地震和小地震均服从同一近似幂律分布，这被解释为它们具有相同的孕育、发震和破裂机制。如果上述观点是真的，那么将无法在大地震前识别真正有信息的地震前兆，大地震也因此具有不可预测性。上述观点在 1999 年《自然》上开展的“地震是否可预测”论坛^①中得以详细阐释。

（2）观点：大地震具有可区分特性，能被预测

与这种完美的自相似观点相反，其他观测则注意到在许多特定区域（如板块边界地区或晚第四纪活动断层区域）的地震大小-频度关系在大震端会显著偏离古登堡-里克特定律。于是，特征地震（characteristic earthquake）模型被提出，认为大断层可能会间歇性破裂，直至跨越其整个长度（Ishibe and Shimazaki, 2012; Wesnousky, 1994）。还有一些证据表明，在环太平洋地震带的 14 个俯冲带中，大地震群和小地震群遵循两种不同的分布（Pisarenko and Sornette, 2004）。这里的大地震被定义为震级超过 $M_w 8.1 \pm 0.3$ ，这表明该震级以上的地震可能与较小的地震相比具有特殊的性质。此外，采用边界积分方程对均匀断层上地震破裂进行的弹性动力学破裂模拟结果也显示，大地震和小地震的成核和破裂传播可能存在显著差异，而非仅仅是大小差异（Sornette et al., 2024; Wei et al., 2021; Wen et al., 2018; Xu et al., 2023）。有一类地震在起始破裂后不久即自行停止，无需任何外部障碍体（Wei et al., 2021）。据估计，这些自停止（self-arresting）地震的最大震级上限约为 6~6.5 级。除了数值模拟之外，此类自停止地震还在实际目录中也被观测到（Galis et al., 2017; Wen et al., 2018; Xu et al., 2023）。模拟计算结果还表明，自停止地震可与一类失稳破裂（即亚剪切和超剪切破裂）共存，但两类地震处于不同的应力和摩擦状态。这些失稳破裂因为需要坚硬的障碍体来阻止其破裂传播，因此更有可能形成大地震。Sornette 等（2024）最近提出了一个用以理解均匀断层上地震成核的统计热力学方法，解释了上述不同类型地震（自停止地震和失稳破裂）的发生机制。通过将断层系统分形特征与成核物理进行联系，Sornette 等（2024）推导出了自停止地震大小满足古登堡-里克特幂律分布。在这一理论中，古登堡-里克特定律被解释为自停止

① <https://www.nature.com/nature/articles?searchType=journalSearch&sort=PubDate&type=debate&year=1999&page=4>. 最后访问日期：2024 年 3 月 28 日。

地震的统计性质, 而失稳地震则具有不同的分布. 这些发现均表明, 大地震的发生可能涉及与小地震明显不同的放大机制, 且可能伴随可观测的前兆. 因此, 系统而定量地研究大小地震之间是否存在本质差异 (特别是在地震生成机制方面), 不仅有助于更好地理解断层破裂和地震活动的模式, 还可能对地震可预测性研究、大地震情景下的防灾减灾实践产生重要影响 (如, [Li et al., 2022](#); [Zhang et al., 2023](#)).

需要认识到, 当前地震学仍然缺乏一个可用的分析框架来系统地定量考察大地震是否特殊这一基本问题. 15 年前, 本文作者之一引入了“龙王”事件的概念并提出了“龙王”理论, 为上述问题的讨论提供了一个可能的、有效的统计量化分析工具. 本文将首先介绍复杂系统中描述极端事件的“龙王”事件概念并介绍“龙王”理论的主要内容, 然后将讨论“龙王”地震事件的可能地震物理机制. 本文还将介绍识别“龙王”地震事件的主要方法, 最后将指出“龙王”理论应用于地震学实际需要留意和持续探索的若干问题.

1 “龙王”事件与“龙王”理论

1.1 “龙王”事件的定义

“龙王” (dragon-king, DK) 体现了一种双重隐喻, 表示一类不仅相较同一系统其他事件具有极大规模或影响力 (因此称“王”), 而且还具有独特起源环境 (因此称“龙”) 的极端事件. 结合对异常灾难可预测性的预示性讨论 ([Sornette, 1999](#)), [Sornette \(2009\)](#) 提出“龙王”假设, 认为“龙王”事件源于特定机制, 这些机制偶尔会放大极端事件, 导致严重灾难发生, 同时也可能创造出非凡机遇. “龙王”事件的可能产生机制、统计特征、建模预测以及风险管控策略已经在相关研究中得到探讨 ([de S Cavalcante et al., 2013](#); [Sornette, 2009](#); [Sornette and Ouillon, 2012](#)).

引入“龙王”概念的动机首先来自于对股票市场盈亏的实证观察, 特别是极端金融回撤 (从高峰到低谷的累积损失) 的频率比通过大多数回撤频率分布外推来预测的极值频率高出 10~100 倍 ([Johansen and Sornette, 1998, 2001](#)). 换句话说, 极端金融回撤是离群值 (outlier; [图 1](#)): 它们远高于基于 99% 的回撤样本校准的频率分布. 然而, 在

统计学中, 离群值通常指的是不需要的数据点, 它们是需要被修正或者移除的错误和异常 ([National Institute of Standards and Technology, 2007](#)). 与此相反, 在金融回撤的频率分布中识别出的极端离群值并非错误. 事实上, 它们代表了金融市场中最重要的事件, 即在短短几天或几周内摧毁数万亿美元价值的重大崩盘. 这些离群值事件影响整体经济, 并经常引发政策制定者的剧烈反应以及新法规的出台. 此外还发现, 这些极端事件大多是由内源性成熟过程导致不稳定性结果. 因此, 为了将它们与通常由外源性因素引起的离群值 (被认为是统计错误或数据异常) 区分开来, “龙王”概念被提出以突出这些事件的极端重要性、强调其内源性起源, 并引起人们对其独特性和深远影响的关注 ([Sornette, 2009](#)).

目前, “龙王”事件已在许多研究中被广泛报道, 包括:

(1) 自然科学, 如材料失效、地震破裂 ([Sammis and Sornette, 2002](#))、流体力学 ([L'vov et al., 2001](#))、滑坡预测 ([Lei et al., 2023](#))、癫痫发作 ([de Arcangelis, 2012](#); [Osorio et al., 2010](#));

(2) 金融学, 如股市崩盘 ([Filimonov and Sornette, 2015](#); [Johansen and Sornette, 1998, 2001, 2010](#));

(3) 社会学, 如学术论文影响力 ([Golosovsky and Solomon, 2012](#))、城市规模 ([Wheatley and Sornette, 2015](#))、核安全事故 ([Wheatley et al., 2017](#)) 等.

1.2 “龙王”事件的可能产生机制

“龙王”事件的发生基于其独有的放大机制, 该机制无法 (或较少) 作用于同一系统其他事件, 因此赋予了“龙王”事件本质上的特殊属性. 目前, 前人提出了以下机制以解释“龙王”事件的发生.

(1) 外源性冲击

大多数自然和社会系统都不断受到各种不同类型的外力作用, 包括外部刺激、噪声和各种冲击, 这些外力的幅度差异会很大. 因此, 一个非常大的事件可能是由于强烈的外源性冲击而引起, 而非系统内部动力的结果, 或者也可能是两者的结合. 一个突出的例子是 6600 万年前陨石撞击地球对地球生物圈造成的巨大影响, 这一事件与恐龙的灭绝有关. 该事件对地球生物圈来说是外源性的, 并且是

一个具有非凡影响的极端事件。

一个有趣的问题是去考察像这样外源性“龙王”事件的存在,会如何改变表征系统动力学的各种统计指标?在广义分层 Weierstrass-Mandelbrot 连续时间随机游走(WM-CTRW)模型^②的背景下,Werner 等(2012)通过人为插入一个“龙王”事件,或者一个规模远超任何现有结构的冲击型“龙王”事件,回答了这个问题,并通过解析推导和数值模拟方法确定了对应平稳速度自相关函数的变化。

(2) 部分全局同步

许多系统可以简要地表示为具有阈值的耦合异质松弛振荡器^③,具体例子包括:表现出神经元放电“雪崩”的生物神经系统、发生地震的断层系统、心脏细胞、生态系统种群、社会系统、电网、气候系统等。不同的系统状态取决于耦合强度 C 与异质性程度 H (例如振荡器的自然频率)之比 C/H 。对于较大的 C/H ,系统往往趋于全局同步,例如东南亚某些种类的萤火虫,其雄性群体会一致地闪烁生物荧光以吸引雌性;对于较小的 C/H ,振荡器大致独立振荡,系统表现出嘈杂的时空动力学;在中等值的 C/H 时,这些系统呈现出不同形式的自组织现象,且“雪崩”在相当广泛的规模范围内分布。当“雪崩”规模分布能够被幂律很好地描述时,这样的系统则被称为自组织临界(SOC)系统。在 SOC 和完全全局同步的状态之间,系统会表现出混合特征,即既有类似幂律分布的“雪崩”,也有短暂的全局同步爆发。这些爆发相对于幂律分布描述的其他雪崩群体来说就是“龙王”事件。这些“龙王”事件是系统未能完全进入全局同步状态的结果。例如,Gil 和 Sornette (1996)曾研究的系统由通过分布式控制参数的扩散相互连接的耦合亚临界分叉系统构成,描述该系统的数学模型包括普通微分方程与随机部分抛物线扩散方程的耦合。该系统在不同的“雪崩”松弛时间尺度下展现出自组织临界性和“龙王”状态。类似的行为也在弹簧-滑块

系统(Sachs et al., 2012)、引发野火的森林(Sachs et al., 2012)、神经元系统(de Arcangelis, 2012)和那些将大型癫痫发作视为“龙王”事件的生物神经系统(Osorio et al., 2010)中得到了研究。

(3) 聚簇行为与逾渗相变

逾渗(percolation)问题研究的是在任意图(graph)中联通集团(簇)的行为和性质。逾渗理论提供了一种原则性方法来研究系统稳健性,为各种现象解释带来了深刻见解,例如:材料学中多孔材料的特性、流行病学中疾病传播的模型以及系统理论中系统的稳健性特征等。随着连接点或现有连接(边)的比例 p 增加,在一个拓扑结构相关的临界值 p_c 处会发生明确的逾渗临界相变,在此临界值之上会出现大规模的连通性。即当 $p > p_c$ 时,会出现一个巨大的联通集团(簇),使得整个系统内逾渗成为可能。这个巨型联通集团(簇)是所有簇中的“龙王”,而其他簇的大小则遵循截断的幂律分布(Stauffer and Aharony, 2018)。逾渗问题有许多推广,其中元素之间的连接(边)展现了空间相关性或者其他各种类型的相互依赖性。特别是,无序介质中的破裂也可以被概念化为属于“相关逾渗”问题的一般类别,其中巨型簇是导致系统失效的裂隙网络。在所有这些系统中,“龙王”事件对应于巨型联通集团(簇)、破裂系统或失效面。参见 Sornette (2006) 中的第 13 章。通过各种方案控制逾渗也经常导致非常大的簇突然出现(Schröder et al., 2017)。

在玻色-爱因斯坦凝聚态跃迁理论中,玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein condensate)滴(droplet)模型^④由于其最大实体的相对吸引力或效用控制机制,会导致出现超过其他滴大小的超大临界簇(即“龙王”事件)。与将 N 个粒子分配在 C 个能级上的玻色-爱因斯坦统计问题类似,Yukalov 和 Sornette (2012)在研究城市规模对人口吸引力时考虑了 N 个个体在 C 个城市中的分布问题。他们发现,

② 广义分层 Weierstrass-Mandelbrot 连续时间随机游走(WM-CTRW)模型,是一种结合了分形理论和随机游走概念、用于描述复杂随机过程的数学模型。该模型考虑了不同时空尺度,允许粒子在连续时间(而非离散时间步长)下进行随机游走,并用 Weierstrass-Mandelbrot 函数描述分形特性,以体现过程的自相似性和复杂性。

③ 具有阈值的耦合异质松弛振荡器,是一种用于研究多种类型振荡器(如神经元、机械振荡器等)之间相互作用的模型。这些振荡器特性展现出异质性(如频率、相位或松弛时间差异等),且相互之间通过某种耦合(或正向或负向)连接在一起。当振荡器状态超过系统存在的某个阈值时,可能会触发其相邻振荡器的特定动态变化,导致整体层面的非线性行为和突发性现象。

④ 玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein condensate)滴(droplet)是量子物理学中描述玻色-爱因斯坦凝聚现象的一种理论模型中的基本元素。在极低温下,多个玻色子(例如某些原子)会以相同的量子态聚集,从而形成凝聚态,表现出宏观量子现象。玻色-爱因斯坦凝聚滴模型则描述了一种局部的、有限的玻色-爱因斯坦凝聚体,类似于液滴的形态,通常在非平衡状态或特定条件下形成。这种滴状结构可能在某些参数下是稳定的,显示出独特的量子特性。

正如玻色-爱因斯坦凝聚一样, 人口也会在特定条件下在最大城市聚集, 使得最大城市的规模不遵循其他城市规模的齐普夫 (Zipf) 分布. 因为玻色-爱因斯坦凝聚是一种相变, 因此“龙王”事件的出现也可以被认为是一种相变. 此外, 在研究巨正则少数派博弈 (grand canonical minority games)^⑤, 即 N 个个体通过选择 C 个策略 ($C < N$) 以竞争有限资源时, Johnson 和 Tivnan (2012) 发现当一个策略被证明是成功时, 会有大量个体被吸引选择采用这个策略, 这使得系统会产生一种极端变化, 这种变化与系统其他动态的标准统计偏离有关, 也就是说, 这是一种“龙王”事件. 但是这种变化是短暂且不可持续的, 因为随着越来越多的个体转而采用这一策略, 这个之前成功的策略会在博弈中迅速失效.

(4) 正反馈机制

正反馈指的是一种初始变化通过其引发的后续反应被放大, 从而导致效果进一步增强的过程 (Sammis and Sornette, 2002; Sornette, 1999). 这可能会产生一个使得初始刺激不断被加强的自我强化循环. 换句话说, 初始偏离某个起点后, 随之而来的是不断增加的偏离, 这与负反馈过程将系统带回初始点的情况相反. 在经济学和金融学中, 正反馈也被称为顺周期性, 其特征是加强 (无论是正面还是负面) 经济趋势的行为, 从而增加经济周期的波动性. 正反馈过程在不同领域中有许多实例. 在气候动力学中, 随着北极冰层融化进而减少了反照率效应 (太阳光的反射), 导致地球表面吸收更多热量, 进一步加速冰层融化. 在社会系统中, 随着更多人加入并使用一个社交媒体平台, 导致其价值增加, 从而吸引到更多用户, 进一步提升其网络价值. 在金融市场中, 当市场上涨时, 股票价格的上涨会吸引更多投资者, 从而推动股票价格进一步上涨, 因此吸引更多投资者. 相反, 在下跌的市场中, 股票价格下跌导致更多卖出行为, 因此进一步压低股票价格, 可能导致“死亡螺旋”, 即金融崩盘产生. 还有, 奔跑野牛数量的增加会加剧牛群中的恐慌情绪, 这又促使更多的野牛加入奔跑. 同样, 当大量银行客户由于担心银行可能破产而同时提取存款时,

可能导致更多客户会匆忙赶往银行取款, 这增加了其他客户对银行未来偿付能力的担忧, 从而放大了最初的取款行为, 导致自我强化的取款循环和银行挤兑的自我应验预言.

不受控制的正反馈通常会导致有限时间奇点 (finite-time singularity), 即在有限时间内的爆炸性增长到非常大的值或崩溃到零. 例如, 考虑一个截面为 A 的杆, 受到恒定拉力 F 的作用. 杆内部发生的蠕变/损伤过程, 可以用经验方程 $dA/dt = -(F/A)^n$ 来描述, 其中 F/A 是杆内的应力, n 是一个正指数. 这个方程的解为 $A(t) = A_0(t_c - t)^{1/(n+1)}$, 表明杆在有限时间 $t = t_c$ 处发生断裂, 并且应力相应地在有限时间内发散. 在这个蠕变和损伤过程中, 许多小裂隙开始形成并合并, 导致可检测到的声发射. 最终的断裂通常表现为能量释放的爆发, 这与潜在的数学有限时间奇点 (Gluzman and Sornette, 2001, 2002) 有关, 其规模远大于之前的所有声发射事件, 构成了一个“龙王”事件 (Johansen and Sornette, 1999; Sornette, 2009).

正反馈机制导致“龙王”事件的出现, 这是不可持续动力的大型最终事件. 实际上, 数学上的有限时间奇点从未完全实现, 因为在接近奇点时, 其他力量和机制便会开始起作用, 比如, 最明显的就是系统的有限大小. 因此, 这种发散最终会被极端波动或事件所取代, 这些事件就是“龙王”事件.

第一个例子来自科学论文的引用分布. 在存在线性优先依附的情况下, 科学论文的引用频度分布呈现幂律分布, 如公式 (1). 在存在超线性优先依附的情况下, 则会出现失控行为, 即少数论文 (即“龙王”) 会占据所有引用中有限但相当大的比例 (Dorogovtsev et al., 2000; Krapivsky et al., 2000), 类似于前面提到的玻色-爱因斯坦凝聚. 同样, Golosovsky 和 Solomon (2012) 发现, 高被引论文 (被引次数超过 1500 次) 表现出超出随机部分且异常大的确定性增长, 这也显示出“龙王”事件的特征. 即使系统对历史动态的微弱记忆及其对乘性随机游走速率的反馈, 也可能导致发散的统计分布和失控事件.

第二个例子是金融回撤分布, 即从峰值到谷值的损失 (在下跌过程中对波动性有一定的容忍度),

^⑤ 巨正则少数派博弈 (grand canonical minority games) 是一种用于研究多主体系统中个体行为之间的相互作用如何导致集体结果的博弈论模型. 参与者在每轮选择一个行动 (如“参与”或“不参与”), 目标是成为少数派, 即选择的人数最少, 以获得奖励. 在这个框架中, 系统的参与者数量和策略是可变的, 允许研究在不同参与者数目下的博弈动态. 参与者通常根据历史表现和其他参与者的行为来调整自己的策略, 这引入了学习和适应机制. 通过分析个体的策略选择, 可以研究系统的集体行为和自组织现象.

其中表现出非常明显的离群值. 这些极端回撤就是著名的金融崩盘 (Filimonov and Sornette, 2015; Johansen and Sornette, 2001, 2010). 正反馈过程分为两个阶段: (1) 在崩盘前的泡沫阶段, 价格沿着超指数加速发展, 由模仿、群体行为以及顺周期对冲等许多潜在的正反馈机制推动 (Sornette and Woodard, 2009; Sornette and Cauwels, 2015); (2) 在崩盘期间, 正反馈循环会形成一个恶性循环, 价格下跌会引发更多卖出, 而卖出压力的增加又会进一步压低价格.

1.3 “龙王” 事件的识别方法

由于“龙王”事件的主要统计特征是离群性质, 因此现有识别“龙王”事件的技术思路主要是相对于一个无离群值的零假设模型来检验离群值. 在许多情况下, 通常假设数据遵循高斯分布. 然而, 诸多领域的观测数据往往并不符合高斯分布. 在很多案例中, 数据更适合用具有肥尾的分布来描述, 例如指数分布或幂律分布. 特别地, 帕累托 (幂律) 分布在很多现象中普遍存在, 从自然灾害如地震、山体滑坡、洪水和海啸, 到工业灾难如化学品泄漏、核事故和大规模停电, 再到社会系统和地缘政治事件, 包括通过人员伤亡来衡量的战争和冲突强度的分布 (Laherrere and Sornette, 1998; Mitzenmacher, 2004; Newman, 2005; Sornette, 2006).

根据 Wheatley 和 Sornette (2015)、Sornette 和 Wei (2024) 的研究, 本文重点关注在具有近似指数分布或帕累托分布尾部的样本中检验离群值. 值得注意的是, 通过一个简单的对数变换, 针对指数分布样本设计的离群值检验方法也可以应用于帕累托分布的样本. 这使得具有指数底层分布的检验统计量成为需要关注的核心. 离群值检验方法大致可分为四类: (1) 区块检验法、(2) 向内检验法、(3) 向外检验法和 (4) 混合检验法. 其中每种检验方法都不同程度受到掩盖效应 (masking) 和淹没效应 (swamping) 的影响. 掩盖效应是指只有在前一个离群值不存在的情况下, 下一个较大的离群值才能被正确检验的情况. 也就是说, 前一个离群值的成功识别会造成下一个离群值的漏报. 而淹没效应则是指当与真正的离群值一起考虑时, 非离群值会被错误地识别为离群值的情形. 也就是说, 真正的离群值会导致样本数据中非离群值的误报.

具体来说, 假设有 n 个级序排列的随机变量, 即 $x_1 > x_2 > \dots > x_n$, 其中有 k 个真离群值 (x_1, x_2, \dots ,

x_k) 和 r 个待检验的备选离群值 ($n \geq r \geq k$). 零假设 H_0 则为无离群值, 即所有变量源自同一分布. 四类离群值检验的算法如下:

(1) 区块检验法 (block test)

区块检验法 (Hawkins, 1980) 是识别离群值的一种直接方法, 通过预先确定备选离群值的数量 r , 这种方法可以在单次检验中确定出全部 r 个或 0 个离群值. 这种方法在区块大小 r 内包含过多或过少数据点时会受到掩盖和淹没效应的影响. 但是如果设定得当, 考虑到区块检验法能够同时处理所有数据, 因此这种方法仍然具有很强的实用性.

(2) 向内检验法 (inward test)

为了减少对区块大小 r 设定的依赖, 于是发展了向内和向外两种序列检验法. 向内检验法从完整样本 n 开始, 检验最大的数据点 x_1 是否为离群值. 如果 x_1 被识别为离群值 (即零假设被拒绝), 则将其从样本 n 中移除, 接着对 x_2 重复此检验. 这一过程持续进行, 直到首次未能拒绝零假设为止. 因此, 最后估计的离群值数量是检验被拒绝 (边缘) 的数量. 这种检验也可能同时受到掩盖和淹没效应的影响.

(3) 向外检验法 (outward test)

这种方法首先通过从样本 n 中删除 $r-1$ 个备选离群值, 仅保留 r 个待检验备选离群值中最小的那个 x_r , 以检验其是否为真离群值. 如是, 则其他所有 $r-1$ 个更大的待检验备选离群值均会被认为是真离群值. 如果零假设未被拒绝, 则向外执行下一步操作, 将 r 个待检验备选离群值中次小的那个 x_{r-1} 重新纳入样本, 对其进行检验. 直到零假设第一次被拒绝, 则终止该过程. 若遍历所有 r 个待检验备选离群值后零假设均未被拒绝, 则未能识别出任何离群值. 这种检验法最小化了掩盖和淹没效应的概率和程度.

(4) 混合检验法 (mixture test)

该检验法基于对以下混合模型的数据拟合, 即:

$$f(x) = (1 - \omega)\phi(x) + \omega\psi(x) \quad (2)$$

其中, ω 是权重因子 ($0 \leq \omega \leq 1$), $\phi(x)$ 为零假设中所有样本满足的分布, 均值为 μ 且标准差为 σ 的高斯密度函数 $\psi(x)$ 定义了“龙王”域. 零假设 H_0 即 $\omega = 0$. 利用这个模型与零假设 H_0 (一个纯指数或幂律分布) 进行似然比检验可提供 p 值, 而 $n\omega$ 则为

估计出的离群值数量. 该方法无需进行序列检验, 且可以推广到其他形式的龙王函数 $\psi(x)$.

在表 1 中, 本文提供了一些上述离群值检验常用统计量的解析定义. 实际应用中, 区块、向内和向外三种检验法还可与表 1 中列举的 6 个统计量组合使用, 以适应不同的离群值检验场景. 整体而言, 向外检验法可能会过高估计离群值的数量, 在只有一个离群值的情况下效果不佳. 而向内和向外检验法在处理多个分散的离群值时表现相似. 使用 MRS 统计量的向内检验法比向外检验法在计算上更方便, 造成的假正例 (false positives) 严重程度较低, 并且在识别单个或多个分散离群值时甚至可能更有效. 在向外检验法中, MS 统计量表现更优, 而进行了鲁棒性修改的 MRS 则表现相似. 在离群值成丛的情况下, 混合检验法计算最为方便, 效果也最好 (Sornette and Wei, 2024; Wheatley and Sornette,

2015).

2 “龙王”事件与特征地震

“龙王”事件的概念在应用于地震活动性时, 与特征地震概念有明显重叠. 两者都涉及异常大且相对可预测的地震事件, 且都表现为古登堡-里克特关系的离群值. “龙王”事件描述了由独特机制所引发的极端离群值, 而特征地震则指特定断层段上反复破裂出现的大地震. 结合来看, 这两个概念都强调理解极端地震现象对提升地震预测与灾害评估的重要性. 本文将尝试厘清这两个概念的相似之处, 并强调两者之间的重要差异.

在地震学中, 特征地震模型意味着某些断层或断层段倾向于在特定位置处产生相似大小和特征的地震 (Schwartz and Coppersmith, 1984; Wesnousky,

表 1 可用于“龙王”事件检验的一些统计量. 考虑了 n 个降序排列的随机变量, 即 $x_1 > x_2 > \dots > x_n$. 不同的统计量是由不同的求和与分母组合得到

Table 1 A few statistics that can be used to detect dragon-king events. Consider a set of n random numbers that have been ordered in descending rank $x_1 > x_2 > \dots > x_n$. The different statistics are obtained as different combinations of sums and denominators

统计量	定义	掩盖	淹没	其他
标准区块检验SS统计量 ^{a)}	$T_k^{SS} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$	分子项无	有	可检测多个离群值
改进的区块检验SRS统计量 ^{b)}	$T_{k,r}^{SRS} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{\sum_{i=r+1}^n x_i}$	无	有但显著减小	—
标准向内检验MS统计量 ^{c)}	$T_j^{MS} = \frac{x_j}{\sum_{i=j}^n x_i}$	有	无	处理多个离群值时不如SS和SRS
改进的向内检验MRS统计量 ^{d)}	$T_{j,r}^{MRS} = \frac{x_j}{\sum_{i=r+1}^n x_i}$	有但显著减小	无	—
D统计量 ^{e)}	$T_k^D = \frac{x_1}{x_{k+1}}$	严重	轻微	—
区块检验DK统计量 ^{f)}	$T_k^{DK} = \frac{\sum_{i=1}^k z_i}{\sum_{i=k+1}^n z_i}$	严重	严重	不可检测多个离群值

a) SS统计量: 总和-总和检验统计量(sum-sum test statistic);

b) SRS统计量: 总和-鲁棒-总和检验统计量(sum-robust-sum test statistic), 其中 r 为预先指定的离群值最大数目($r \geq 1$);

c) MS统计量: 第 j 个级序量的最大-总和检验统计量(max-sum test statistic);

d) MRS统计量: 第 j 个级序量的最大-鲁棒-总和检验统计量(max-robust-sum test statistic);

e) D统计量: 狄克逊检验统计量(Dixon test statistic);

f) DK统计量: “龙王”检验统计量(dragon-king test statistic; Pisarenko and Sornette, 2012), 其中, 当 $i = 1, 2, \dots, n-1$ 时, $z_i = i(x_i - x_{i+1})$, 且 $z_n = nx_n$.

1994) . 一些研究还认为特征地震具有一定的时间规律性, 即事件发生的时间间隔相当规律. 但这一观点被 2004 年 9 月 28 日发生在美国帕克菲尔德的一个 $M6.0$ 地震证明是错误的. 自 19 世纪 50 年代以来, 帕克菲尔德断层上分别发生了 6 次 $M6.0$ 地震, 地震学家根据这 6 次地震的发震间隔估计了下一次事件发生时间的 95% 置信区间上限. 然而, 实际地震的发生时间却比估计的晚了 10 多年. 特征地震概念的核心是这些地震在震级和破裂面积上相似, 暗示着断层在其破裂类型、位置和规模方面表现出重复的、可预测的地震行为. 特征地震震级一致性的假设是基于断层每次在其整个区域相同段破裂时, 都会以类似的方式释放积累的应力. 特征地震之所以会发生, 是因为存在明确的断层段. 因此每个断层段都可能有自己的特征地震, 其震级和破裂长度可能与相邻段不同. Sachs 等 (2012) 通过研究 1972—2009 年帕克菲尔德事件序列余震区发生的所有地震事件, 提供了特征地震的证据. 他们通过古登堡-里克特定律的外推预测了最大事件的震级约为 $M = 5.65$, 而 2004 年 9 月 28 日发生的最大事件震级为 $M = 5.95$. 这一震级明显偏大的事件被视为帕克菲尔德特征地震事件. Amitrano (2012) 使用 ANSS 目录分析了 1990—2010 年间美国加州地震能量的观测分布, 发现震级大于 6.0 级的事件分布显著偏离幂律分布. 这一差异表明, 这些较大的事件可以被视为特征地震.

然而, “存在特征地震” 这一结论仍然存在很大争议. Kagan 和 Jackson (1991) 通过考察 1979 年后的地震事件, 发现大地震更频繁地发生在 McCann Jr 和 Shah (1979) 认为地震危险性较低的地区. Nishenko (1989, 1991) 改进了特征地震模型, 并将其应用于不同地区进行高置信度的预测性检验. 然而, Kagan 和 Jackson (1995) 观察到 1989 年后的地震数据并不支持 Nishenko (1989, 1991) 的改进, 且 Rong 等 (2003) 也支持 Kagan 和 Jackson (1995) 的结论. Jackson 和 Kagan (2006) 对特征地震模型及其检验进行了详细批判. 1999 年在《自然》上关于 “地震是否可预测” 的讨论中, 特征地震假设也引发了激烈争论, 许多地震学家要么忽视了检验结果, 要么将这个概念的失败归因于 Nishenko (1989, 1991) 在其应用中选取的特定断层. Field 和 Page (2011) 提出了一种相对客观且可重复的反演方法, 该方法可用于确定断层或断层系统上不同破裂的地震活动率, 以消除之前方法中断

层分段假设的随意性. 他们的结果表明, 南圣安德列斯断层的现有地震活动性数据遵循古登堡-里克特分布, 无需引入特征地震模型. 但他们也指出, “需要更多工作来检验这一论断的稳健性”. Main 和 Naylor (2012) 回顾了特征地震的证据, 并将其与实验室中的材料失效和火山喷发进行了比较. 他们认为尽管不能完全排除特征地震的存在, 但是其存在的证据也非常薄弱. 这些研究认为, 鉴于特征地震假设的以往应用均告失败, 并且自 20 世纪 90 年代中期以来也没有提出新的可检验模型, 因而基本可以得出结论: 特征地震这一假设缺乏足够数据支持.

Page 等 (2011)、Main 和 Naylor (2012) 强调, 幂律分布本质上允许显著的波动, 有时可能导致有限随机样本中最大事件的数值会非常大. 这种性质意味着, 来自幂律分布的最大事件有时可能比第二大事件大 10 倍甚至更多. 在这种情况下, 可能会错误地认为存在特征地震事件, 而这实际上只是统计上的波动. 比如, Sachs 等 (2012) 观察到的最大事件仅为通过幂律外推预测最大事件的两倍, 这进一步突显了区分真正的特征事件与古登堡-里克特分布偏差的困难. 然而, Sachs 等 (2012) 分析的地震活动与假定的断层段地震周期持续时间基本一致, 这可能主要是由 2004 年 9 月 28 日的美国帕克菲尔德 $M6.0$ 地震的余震所主导. 这便是地震学中描述震级相关性的巴特 (Bath) 定律, 其量化了幂律分布中最大事件和第二大事件之间的典型差距. 使用自激励霍克斯条件泊松模型 (即地震学中的传染型余震序列 ETAS 模型), Helmstetter 和 Sornette (2003) 证明了主震与最大余震之间约 1.2 的震级差距可以通过结合地震能量的幂律分布与余震生产率相关的标度关系 (即主震震级与余震数量的关系) 得以精确解释. Main 和 Naylor (2012) 则警告说, 在将特征地震事件的潜在重要性归因于大震级差距时, 或在将观察到的大地震频次与从较小震级分布外推趋势进行比较时须格外小心. 寻找特征地震事件本身可能引入隐藏的偏差, 这需要在检验大震级差距重要性的统计检验中加以详细考虑.

3 “龙王” 地震事件的可能物理机制

本文将那些发震机制完全与小地震不同的大地震事件称为 “龙王” 地震事件. 这些极端事件在统计上表现为偏离古登堡-里克特定律的离群值. 本

节将讨论几个“龙王”地震事件起源的可能物理机制。

3.1 强断层耦合机制

该机制属于前面 1.2 节部分全局同步机制的一类。这里以弹簧-滑块模型 (Burrige and Knopoff, 1967; Carlson and Langer, 1989a, 1989b) 为例来描述断层间耦合与滑动的机制。Sachs 等 (2012) 的数值模拟实验证明, 随着弹簧-滑块系统弹簧刚度的增加, 会产生越来越大的滑动事件。在某个特定大的刚度之上, 将产生出系统规模级的滑块滑动事件 (即“龙王”地震事件), 并且这些事件不再遵循小事件的幂律分布。弹簧-滑块系统可以被视为相互耦合的阈值松弛振荡器网络 (Gil and Sornette, 1996; Osorio et al., 2010; Schmittbuhl et al., 1993, 1996; Sornette et al., 1994)。当系统耦合强度 (通过弹簧刚度量化) 足够大时, 振荡器倾向于同步成系统规模级的极端事件。俯冲带的地震学证据也表明, 当正应力很大时, 断层会高度耦合, 而地震破裂的凹凸体与这些高耦合断层区域高度相关 (Scholz, 2010; Scholz and Campos, 2012)。

3.2 有限断层破裂机制

有地震学研究认为, 尽管断层上较小地震通常遵循幂律分布 (即古登堡-里克特定律), 但断层区域大部分形变则与大震级的准周期性特征地震相关 (Dahmen et al., 1998; Wesnousky, 1994)。特征地震是那些能够破坏整个有限断层系统或断层段的显著地震, 被认为是最具代表性的“龙王”事件 (Sachs et al., 2012)。这类地震主要发生在板块边界断层上 (Wesnousky, 1994), 对应于破裂贯穿整个脆性地壳深度的地震。板块边界和板块内部断层规模的不同, 是导致特征地震不同于其他地震的主要原因。也有研究发现, 特征地震主要发生在晚第四纪断层或处于整个地震周期中的活动断层上 (Ishibe and Shimazaki, 2008; Scholz, 1997)。此外, 断层滑动速率较快 ($> 20 \text{ mm/a}$) 的断层带也常见特征地震, 且多断层破裂在特征地震中非常普遍 (Thingbaijam et al., 2024)。特征地震在统计上表现为向上偏离古登堡-里克特定律的离群值, 是典型的“龙王”地震事件。

此外, 还有地震目录在统计上表现为向下偏离古登堡-里克特定律的现象。此类目录中, 大震端和小震端分别遵循不同斜率 (即 b 值) 的古登堡-里

克特定律 (Pacheco et al., 1992; Pisarenko and Sornette, 2004; Scholz, 1997; Triep and Sykes, 1997)。很多分析认为大震端实际上已经属于其他分布, 如伽马分布 [也称 Kagan 分布; Kagan, 1991a; 也可参见 Sornette (2006) 的 3.3.5 节, 其提供了伽马分布的数学推导]。伽马分布引入了“拐角震级”的概念, 认为拐角震级以下震级分布满足古登堡-里克特定律, 而拐角震级之上则为指数分布 (Kagan, 2002a, 2002b; Serra and Corral, 2017)。此类分布的截断被认为与脆性地壳的有限厚度有关, 即位错同时沿走向和倾向传播的破裂一旦贯穿断层整个宽度, 则破裂的进一步发展就只能沿二维的走向方向继续进行。这种破裂传播机制的差异可能会导致大震和小震在统计上表现出差异, 但是这种机制不会导致“龙王”地震事件的发生。

然而, 也有研究和分析认为, 上述统计上的离群可能仅仅是统计分析时的偏差, 因此特征地震的真实性受到一定程度的质疑 (Kagan, 1993; Kagan et al., 2012; Main, 2000; Page et al., 2011)。尽管特征地震的概念在学术上仍存在争议, 但在地震危险性分析和地震工程实践中, 特征地震模型仍被广泛用于评估潜在灾害风险 (如, Zafarani et al., 2019)。因此, 将“龙王”理论引入地震活动性分析, 可以为思考什么是特征地震提供了一个原则框架, 从而可产生系统且有效的量化分析工具以严谨地检验特征地震概念。

3.3 复杂断层破裂结构

“龙王”地震的另一种潜在机制是多段复杂破裂, 表现为间歇性级联破裂行为。古地震学数据证实, 许多大地震由多个断层级联破裂产生 (Scholz, 2010)。根据 Vere-Jones (1977) 的断层分支破裂模型, 当前破裂的断层段会触发其他断层段发生破裂, 由此级联破裂产生地震。如果考察每个断层段破裂直接触发的其他断层段破裂平均数量, 即分支率, 可见如果分支率小于 1, 则断层系统处于亚临界状态, 破裂会自停止。但是如果分支率大于或等于 1 (临界或超临界), 则破裂会在断层系统 (以一个有限正概率) 无限传播, 直到贯穿脆性地壳或是遇到障碍物阻挡。此类情况与特征地震相关, 对应了整个断层系统规模的“龙王”地震事件。

此外, 能量辐射物理表明, 一个破裂断层的能量辐射功率 (即单位时间向外辐射的能量) 与位错加速度的平方成正比, 即 $P \propto \dot{u}^2$, 其中 u 为断层

位移 (Johansen and Sornette, 1999). 这意味着凹凸体的存在会增大断层能量的释放效率. 因此, 断层几何复杂性可能导致不同的加速度模式, 换句话说, 更复杂的断层破裂类型可能强化能量辐射率, 最终导致大规模的能量释放形成 “龙王” 地震事件. 该机制还可与 3.1 节的强断层耦合机制共同作用, 即一旦出现整个断层系统规模的高度耦合, 此时将可能出现在多断层破裂且能量辐射功率被加强的超大规模凹凸体, 产生 “龙王” 地震事件.

3.4 破裂失稳机制

近年来, 陈晓非教授课题组基于滑移弱化摩擦定律开展破裂动力学模拟, 发现断裂应力降 T_u 、动态应力降 T_c 、临界滑移距离 D_c 、成核凹凸体的有效半径 R_a 以及介质剪切模量 μ 共同决定了地震破裂的类型, 即地震可分为自停止地震、失稳破裂 (即亚剪切和超剪切地震) 以及自停止慢地震 (Wei et al., 2021; Wen et al., 2018). Sornette 等 (2024) 最近提出了一个用以理解上述不同地震类型成核的统计热力学方法, 认为自停止地震可类比为经典成核理论中的稳定成核现象, 如裂纹或滴的自停止生长. 相反, 如果成核区域超过了临界尺寸, 破裂将不断扩展, 直至遇到障碍体后被迫停止. 这一现象类似于经典成核理论中新热力学相的不稳定成核, 揭示了稳定和失稳破裂的共存. 失稳破裂 (亚剪切和超剪切地震) 受到正反馈影响, 即随着破裂的发展, 释放的弹性能进一步促进破裂继续扩展, 而摩擦力则未能阻止破裂的继续, 需要通过地震波能量辐射的额外耗散机制来达到动态平衡. 相对地, 自停止地震中的摩擦力和地震能量辐射则共同作为耗散机制来终止破裂. 显而易见, 自停止地震和失稳破裂具有完全不同的机制, 前者属于遵循古登堡-里克特定律的常规地震, 而后者则是离群的 “龙王” 地震事件. 在 Sornette 等 (2024) 的成核视角下, 属于 “龙王” 地震事件的失稳破裂相比自停止的常规地震应该更为罕见, 同时也具有更大整体规模. 换句话说, “龙王” 地震事件的发生概率和大小均与阻止其不稳定破裂的障碍体存在概率有关. 这两类地震能否从地震目录中区别开来还有待进一步确定.

4 “龙王” 理论应用于地震学前瞻

将 “龙王” 理论应用于地震学, 可帮助系统地震量化分析现有地震学诸多幂律分布的稳健性和有效

性范围, 以及尾部是否具有离群值 (即 “龙王” 事件). 借用 “龙王” 理论, 可以从统计物理的视角重新审视地震破裂类型的分类, 将极大丰富统计地震学的分析手段和研究内容. 本节将展望将 “龙王” 理论应用于地震学分析的前景.

4.1 “龙王” 地震事件检验框架初探

该框架应该包含三个部分:

(1) 估算 m_c 、 m_t 、 β 和 r

此处, m_c 为地震目录的最小完整性震级, 在此震级之上地震将被完整记录. 地震活动性分析中已经发展了许多算法可以对此进行估计 (如, Mignan and Woessner, 2012). m_t 则为转换震级, 在此震级之下地震的震级-频次分布遵循斜率为 $\beta (= b \ln 10)$ 的古登堡-里克特分布, 该震级之上则定义了 r 个待检验的备选离群事件. m_t 的估计可以采用强调分布尾部差异的距离指标进行估计, 如 Anderson-Darling 距离 (Malevergne and Sornette, 2006). 由此, 数据的震级频次分布将被分为三个部分, 即不完整的地震目录部分、遵循古登堡-里克特幂律分布的部分和 r 个待检验的备选离群值部分.

(2) “龙王” 地震事件检验

采用序列 (向内或向外) 检验法结合表 1 中对应的统计量从 r 个待检验的备选离群值中识别真正的离群值, 即 “龙王” 地震事件. 为此, 可对零假设 H_0 进行多次 (如 10000 次) 蒙特卡洛随机样本模拟, 使用的参数则是从上一个步骤估计得到. 给定显著性水平 α (如 0.1 或 0.05), 计算所有模拟地震目录对应序号样本的统计量. 临界值 (S_c) 则定义为计算得到的所有模拟样本检验统计量分布的 $(1-\alpha)$ 百分位数. 如果从实际观测数据计算得出的统计量超过了 S_c , 则拒绝零假设 H_0 . 完成检验后, 于是得到 k 个 “龙王” 地震事件.

(3) “龙王” 地震事件验证

这一过程需采用区块检验法来进一步检验和确定已识别出的 k 个 “龙王” 地震事件的统计显著性. 为了计算零假设 H_0 的 p 值, 首先针对零假设再次进行多次 (如 10000 次) 蒙特卡洛随机样本模拟, 使用的参数仍是从之前步骤估计得到. 此时, p 值可通过计算 k 个 “龙王” 地震事件统计量大于模拟计算统计量的比例得到. 为了确保 p 值可精确到小数点后至少两位, 因此最好将蒙特卡洛模拟的次数

设定为 10000 次以上。

4.2 分析的时空窗选择

地震活动性分析不可避免地要预设相应的时空

窗范围. 因此, 在应用“龙王”理论进行相应地震学分析时, 需要首先选定一个或一系列合适的时空窗以确定待分析的研究资料. 如图 2 所示, 时空窗的选择在很大程度上决定了震级-频度分布的形状,

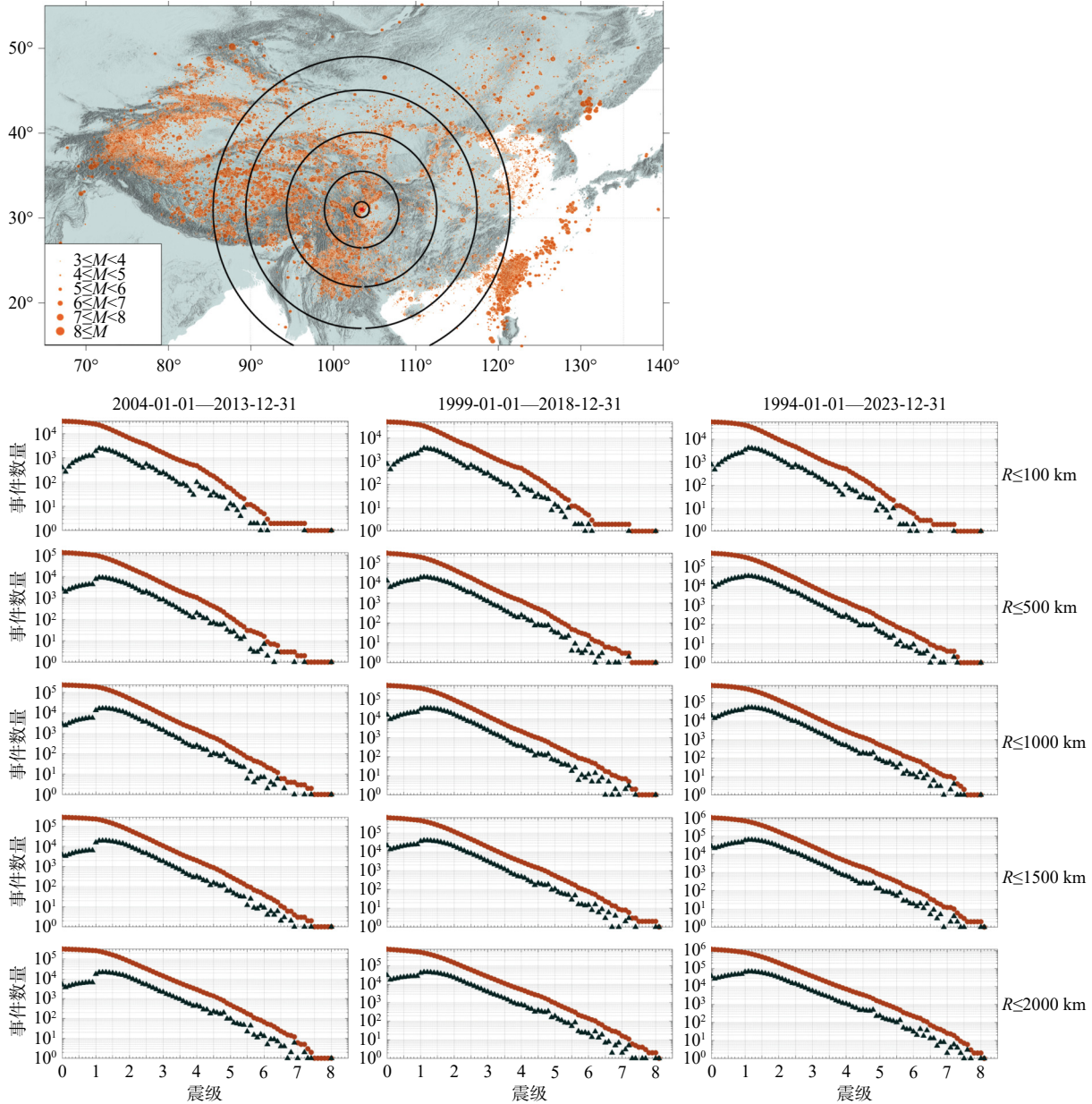


图 2 不同时空窗组合下地震活动性的震级-频度分布, 其中三列为三个时间段, 五行则为五个震中距. 以 2008 年四川汶川 $M_S8.0$ 地震的震中和发震时刻为中心, 分别选择距离其震中距 $R \leq 100$ km、500 km、1000 km、1500 km 和 2000 km (从上到下) 以及发震时刻前后合计 10 年、20 年和 30 年 (从左到右) 的地震. 震级-频度分布图中, 深绿色圆点为概率密度函数, 橙色圆点为互补累积分布函数. 简单地观察可见, 汶川地震在除 30 年和 2000 km 时空窗外, 均表现出了疑似“龙王”地震事件的离群特征. 此外, 2013 年四川芦山 $M_S7.2$ 地震也在较小空间窗 ($R \leq 500$ km) 时可能是离群值

Fig. 2 5×3 Matrix of earthquake frequency-magnitude distributions obtained for various spatiotemporal window combinations where the three time periods define the three columns and the five epicenter distances define the five rows. Centered on the epicenter and time of the 2008 Sichuan Wenchuan $M_S8.0$ earthquake, earthquakes are selected within epicenter distances of $R \leq 100$ km, 500 km, 1000 km, 1500 km, and 2000 km (from top to bottom) and within a total of 10 years, 20 years, and 30 years before and after the earthquake occurrence (from left to right). Both probability density function (PDF) in dark green and complementary cumulative distribution function (CCDF) in orange are represented. Except in the 30-year and 2000 km spatiotemporal window, the Wenchuan earthquake exhibits a dragon-king characteristics among all earthquake events. Additionally, the 2013 Sichuan Lushan $M_S7.2$ earthquake also appears as a possible outlier in smaller spatial windows ($R \leq 500$ km)

而考虑到时空窗的选择在相当大程度受到人为主观因素的影响, 因此“龙王”地震事件的检验需要排除这些影响, 以避免识别出伪“龙王”地震事件.

“龙王”理论在其他领域的应用并无这样的需要, 在诸如滑坡灾害、金融学、社会学等应用中最多涉及到到时间窗的选择.

一个可能的分析方法是确定一条断层, 并考虑多个时间和空间分辨率的组合, 以考察对“龙王”地震事件识别的稳健性(如图 2). 其中一个重要技术瓶颈是如何独立且客观地确定地震发生的断层. 考虑到断层是大致自相似或分层断层网络的元素(Ouillon et al., 1996), 并且通常由更小的次级断层聚合而成, 因此通过逆向工程^⑥从地震活动中重建断层系统的聚类技术(Ouillon et al., 2008; Ouillon and Sornette, 2011)可能为一致地处理地震-断层“鸡与蛋”问题提供基础(Sornette, 1991). 识别断层段仍然是大多数地震危险性分析方法的基础. 然而, 断层分段方法导致了对东日本地区地震危险性的显著低估, 因此在该地区, 震级为 $M_w = 9.0$ 的地震被认为几乎不可能发生. 事实上, 2011 年日本东北(Tohoku) $M_w 9.0$ 地震涉及复杂的破裂过程, 包括激活了至少三个主要断层段.

另外, 还可以结合数值模拟实验, 确定“龙王”地震事件的可识别域边界. 有必要证明的是, 即使随着时间窗口的延长, “龙王”地震事件现象仍然稳健地存在. 另一个可能的分析方法是在地震丛集“家族”内部进行“龙王”地震事件检验. 当前已有许多有效的统计地震学工具可将地震序列聚类映射为分支过程, 以构建地震活动性之间的触发“谱系”(如传染型余震序列 ETAS 模型; Hawkes and Oakes, 1974; Kagan, 1991b; Li et al., 2024; Ogata, 1988, 1998; Ogata and Zhuang, 2006; Sornette and Werner, 2005).

4.3 待检验量的选择

古登堡-里克特定律是地震大小频度分布的描述, 而地震大小的表征有不同度量方式, 常见的如地震矩/矩震级(M_w)、辐射能量/能量震级(M_e)、面波震级等. 尽管多个地震可能有相同矩震级(M_w), 它们的能量震级(M_e)却可能不同, 这反映了震源破裂过程的不同动态特征, 其中最极

端的例子是慢地震(Ide et al., 2007; Obara and Kato, 2016). 矩震级测量的是地震前后地壳静态弹性能量的变化, 而能量震级则描述了破裂动力学导致的不同频率辐射能量总和, 两种度量方式呈现的差异来源于整个破裂过程中破裂加速与减速的不同. 有很多研究已经证明, 具有相似矩震级(甚至相似震源机制)的地震, 其辐射能量差异巨大(Choy and Boatwright, 2009; 宋潇潇等, 2016). 值得考虑的是, “龙王”地震事件可能会以 M_e 而非 M_w 、或者通过分析多变量对象(例如每次地震的不同震级向量和其他物理特性)的形式发生. 这需要将离群值检验方法扩展到多变量分布领域.

4.4 古登堡-里克特关系之外

实际上, “龙王”理论的检验框架不仅适用于古登堡-里克特震级-频度关系, 对于其他地震学中的类幂律分布(如断层破裂尺度的频度分布、地震活动性和断层系统的分形/多重分形/分层缩放特征、地震的级序排列、时空网格地震活动率的频度分布、大地震间隔时间和震中距的频度分布、地震破裂位错的累积频度分布等), 系统严格地检验其幂律行为及考察其中“龙王”事件存在与否, 将开启丰富的研究议程, 且有望得到重要的新见解.

从图 2 来看, 地震中的离群值可能出现单个、多个甚至离群值群的情况, 且上述情况的出现很大程度上依赖于时空窗的选择. 鉴于当前并没有开展过针对地震学的测试, 因此, 在地震学中测试“龙王”事件的检验方法及检验量, 以及开发一个可根据具体数据特征动态自适应选用最优化检验策略的框架, 均是下一步可以努力的方向. 此外, 在实际的概率分布中发现, 古登堡-里克特定律有时并不是纯粹的幂律分布, 而是具有指数分布尾部的截断幂律分布(Kagan, 1994; Main, 1996; Sornette and Sornette, 1999)或者在考虑特定地震触发的地震丛集时甚至可以呈现双分支结构(Nandan et al., 2019, 2022; Saichev and Sornette, 2005; Vere-Jones, 2005). 因此在构造检验的零假设时, 可能也需要对此予以考虑.

5 展望

在未来的地震学研究和防震减灾实践中, 对大

^⑥ 逆向工程, 也称逆向技术, 是一种产品设计技术的再现过程. 通过对目标产品进行逆向分析与研究, 演绎出其处理流程、组织结构、功能特性和技术规格等设计要素, 从而制作出功能相似但不完全相同的产品.

地震发生过程的理解和预测仍然面临重大挑战. 尽管大地震的发生机制可能与小地震在某些方面相似, 但特定区域大震群与小震群的分布特征以及一些物理性质的差异表明, 大地震在其孕育和破裂机制上可能具有独特性. 本文旨在“龙王”理论框架内提出大地震在物理和/或统计上是否与小地震有差异的问题. 基于这一结构概念, 本文引入了一个系统严谨的内源性地震离群值统计检验框架, 并梳理了产生此类内源性离群行为的可能物理机制. 结合地震学理论, 本文讨论了若干个可能产生内源性地震离群值 (即“龙王”地震事件) 的断层破裂机制, 并展望了将“龙王”理论用于地震学实践的可操作性. 在地震活动性研究中, “龙王”事件的概念与特征地震有明显的重叠. 两者都涉及异常巨大且相对可预测的地震事件, 且都表现为古登堡-里克特关系中的离群值. “龙王”事件描述了由独特机制引发的极端离群值, 而特征地震则指特定断层段上反复发生的大地震. 总体而言, 这两个概念都强调了理解极端地震现象对提升地震预测和灾害评估的重要性.

需要注意的是, 不正确或不完整的统计分析可能产生人为的虚假“龙王”结果, 因此对每一个疑似“龙王”地震事件的结果都要始终保持怀疑, 并不断完善和开展分析. “龙王”理论认为“龙王”事件产生的机制具有一些独特性, 并在发生前可能会产生不同于同一系统其他事件发生前的前兆, 从而使“龙王”事件相比其较小的同一系统其他事件具备更好的可预测性. “龙王”理论强调针对这些前兆现象动态监测以及风险实时建模分析的重要性, 这也是我们计划开展中国及全球地震预测系统以整合多类型前兆观测及多学科交叉合作研究的初衷 (Li et al., 2023; Mignan et al., 2021).

数据与来源

本文英文版本请参见: arXiv:2408.10857. 本文所用地震目录来源于中国地震台网中心 (CENC) 提供的中国地震局地震编目系统内部链接 (<http://10.5.160.18/console/index.action>; 最后访问日期: 2023 年 12 月 18 日; DOI: 10.11998/SeisDmc/SN).

致谢

作者感谢中国地震台网中心臧阳在获取中国地震目录数据方面提供的帮助, 感谢庄建仓教授与作者进行的相关讨论, 感谢王馨怡、张清源、邱仲普和杨春梅在文献检索和整理方面提供的帮助, 感谢三位匿名评审专家提供的意

见和建议.

References

- Amitrano D. 2012. Variability in the power-law distributions of rupture events: How and why does b -value change[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 199-215.
- Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. 1987. Self-organized criticality: An explanation of the $1/f$ noise[J]. *Physical Review Letters*, 59(4): 381.
- Bak P, Tang C. 1989. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94 (B11): 15635-15637.
- Bak P, Paczuski M. 1995. Complexity, contingency, and criticality[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92(15): 6689-6696.
- Burridge R, Knopoff L. 1967. Model and theoretical seismicity[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 57(3): 341-371.
- Carlson J M, Langer J S. 1989a. Mechanical model of an earthquake fault[J]. *Physical Review A*, 40(11): 6470.
- Carlson J M, Langer J S. 1989b. Properties of earthquakes generated by fault dynamics[J]. *Physical Review Letters*, 62(22): 2632.
- Chen Y, Kam-ling T, Chen F, et al. 1988. The Great Tangshan Earthquake of 1976: An Anatomy of Disaster[M]. Oxford: Pergamon Press, UK.
- Chen Y, Booth D C. 2011. The Wenchuan Earthquake of 2008: Anatomy of a Disaster[M]. Beijing: Science Press cooperating with Springer, China.
- Choy G L, Boatwright J. 2009. Differential energy radiation from two earthquakes in Japan with identical M_w : The Kyushu 1996 and Tottori 2000 earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3): 1815-1826.
- Clark R M, Cox S J D, Laslett G M. 1999. Generalizations of power-law distributions applicable to sampled fault-trace lengths: Model choice, parameter estimation and caveats[J]. *Geophysical Journal International*, 136(2): 357-372.
- Dahmen K, Ertaş D, Ben-Zion Y. 1998. Gutenberg-Richter and characteristic earthquake behavior in simple mean-field models of heterogeneous faults[J]. *Physical Review E*, 58(2): 1494.
- Davy P. 1993. On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B7): 12141-12151.
- de Arcangelis L. 2012. Are dragon-king neuronal avalanches dungeons for self-organized brain activity?[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 243-257.
- de S Cavalcante H L D, Oriá M, Sornette D, et al. 2013. Predictability and control of extreme events in complex systems[J]. *Physical Review Letters*, 111: 198701.
- Dorogovtsev S N, Mendes J F F, Samukhin A N. 2000. Structure of growing networks with preferential linking[J]. *Physical Review Letters*, 85: 4633.
- Field E H, Page M T. 2011. Estimating earthquake-rupture rates on a fault or fault system[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(1): 79-92.
- Filimonov V, Sornette D. 2015. Power law scaling and "Dragon-Kings"

- in distributions of intraday financial drawdowns[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 74: 27-45.
- Galis M, Ampuero J P, Mai P M, Cappa F. 2017. Induced seismicity provides insight into why earthquake ruptures stop[J]. *Science Advances*, 3(12): eaap7528.
- Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, Mulargia F. 1997. Earthquakes cannot be predicted[J]. *Science*, 275(5306): 1616-1616.
- Gil L, Sornette D. 1996. Landau-Ginzburg theory of self-organized criticality[J]. *Physical Review Letters*, 76(21): 3991.
- Gluzman S, Sornette D. 2001. Self-consistent theory of rupture by progressive diffuse damage[J]. *Physical Review E*, 63(6): 066129.
- Gluzman S, Sornette D. 2002. Classification of possible finite-time singularities by functional renormalization[J]. *Physical Review E*, 66(1): 016134.
- Golosovsky M, Solomon S. 2012. Runaway events dominate the heavy tail of citation distributions[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 303-311.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4): 185-188.
- Hawkes A G, Oakes D. 1974. A cluster process representation of a self-exciting process[J]. *Journal of Applied Probability*, 11(3): 493-503.
- Hawkins D M. 1980. Identification of Outliers (Vol. 11) [M]. London: Chapman and Hall.
- Helmstetter A, Sornette D. 2003. Båth's law derived from the Gutenberg-Richter law and from aftershock properties[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2069.
- Herrero A, Bernard P. 1994. A kinematic self-similar rupture process for earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 1216-1228.
- Hirabayashi T, Ito K, Yoshii T. 1993. Multifractal Analysis of Earthquakes[M]// *Fractals and Chaos in the Earth Sciences*, 591-610. <https://doi.org/10.1007/BF00876340>.
- Hirata T, Imoto M. 1991. Multifractal analysis of spatial distribution of microearthquakes in the Kanto region[J]. *Geophysical Journal International*, 107(1): 155-162.
- Ide S, Beroza G C, Shelly D R, Uchide T. 2007. A scaling law for slow earthquakes[J]. *Nature*, 447(7140): 76-79.
- Ishibe T, Shimazaki K. 2008. The Gutenberg-Richter relationship vs. the characteristic earthquake model: Effects of different sampling methods[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 83: 131-151.
- Ishibe T, Shimazaki K. 2012. Characteristic earthquake model and seismicity around late Quaternary active faults in Japan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(3): 1041-1058.
- Ito K. 1995. Punctuated-equilibrium model of biological evolution is also a self-organized-criticality model of earthquakes[J]. *Physical Review E*, 52(3): 3232.
- Jackson D D, Kagan Y Y. 2006. The 2004 Parkfield earthquake, the 1985 prediction, and characteristic earthquakes: Lessons for the future[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4B): S397-S409.
- Johansen A, Sornette D. 1998. Stock market crashes are outliers[J]. *The European Physical Journal B—Condensed Matter and Complex Systems*, 1: 141-143.
- Johansen A, Sornette D. 1999. Acoustic radiation controls dynamic friction: Evidence from a spring-block experiment[J]. *Physical Review Letters*, 82(25): 5152.
- Johansen A, Sornette D. 2001. Large stock market price drawdowns are outliers[J]. arXiv preprint cond-mat/0010050. DOI: [10.2139/ssrn.244563](https://doi.org/10.2139/ssrn.244563).
- Johansen A, Sornette D. 2010. Shocks, crashes and bubbles in financial markets[J]. *Brussels Economic Review*, 53(2): 201-253.
- Johnson N, Tivnan B. 2012. Mechanistic origin of dragon-kings in a population of competing agents[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 65-78.
- Kagan Y Y. 1991a. Seismic moment distribution[J]. *Geophysical Journal International*, 106(1): 123-134.
- Kagan Y Y. 1991b. Likelihood analysis of earthquake catalogues[J]. *Geophysical Journal International*, 106(1): 135-148.
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1991. Seismic gap hypothesis: Ten years after[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B13): 21419-21431.
- Kagan Y Y. 1993. Statistics of characteristic earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(1): 7-24.
- Kagan Y Y. 1994. Observational evidence for earthquakes as a nonlinear dynamic process[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 77(1-3): 160-192.
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1995. New seismic gap hypothesis: Five years after[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B3): 3943-3959.
- Kagan Y Y. 2002a. Seismic moment distribution revisited: I. Statistical results[J]. *Geophysical Journal International*, 148(3): 520-541.
- Kagan Y Y. 2002b. Seismic moment distribution revisited: II. Moment conservation principle[J]. *Geophysical Journal International*, 149(3): 731-754.
- Kagan Y Y, Jackson D D, Geller R J. 2012. Characteristic earthquake model, 1884-2011, R. I. P[J]. *Seismological Research Letters*, 83(6): 951-953.
- Krapivsky P L, Redner S, Leyvraz F. 2000. Connectivity of growing random networks[J]. *Physical Review Letters*, 85: 4629.
- Laherrere J, Sornette D. 1998. Stretched exponential distributions in nature and economy: "fat tails" with characteristic scales[J]. *The European Physical Journal B—Condensed Matter and Complex Systems*, 2: 525-539.
- Lavallée D, Archuleta R J. 2003. Stochastic modeling of slip spatial complexities for the 1979 Imperial Valley, California, earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(5): 1245.
- Lavallée D, Liu P, Archuleta R J. 2006. Stochastic model of heterogeneity in earthquake slip spatial distributions[J]. *Geophysical Journal International*, 165(2): 622-640.
- Lei Q, Sornette D, Yang H, Loew S. 2023. Real-time forecast of catastrophic landslides via dragon-king detection[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(6): e2022GL100832.
- Li J, Wyss M, Wu Z, Zhou S. 2022. Estimated casualty risk for disaster preparation in five scenario great earthquakes, Sichuan-Yunnan region, China[C]// *China Seismic Experimental Site: Theoretical Framework and Ongoing Practice*. Springer, 315-328.

- Li J, Mignan A, Sornette D, Feng Y. 2023. Predicting the future performance of the planned seismic network in Chinese mainland[J]. *Seismological Research Letters*, 94(6): 2698-2711.
- Li J, Sornette D, Wu Z, et al. 2024. Revisiting seismicity criticality: A new framework for bias correction of statistical seismology model calibrations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (under review, arXiv: <https://arxiv.org/abs/2404.16374>).
- Liu Y, Wu Z L, Zhang Y X. 2024. The January 1, 2024, Noto Peninsula M_w 7.5 earthquake as a possible 'Dragon King' event[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(4): 493-499 (in Chinese).
- L'vov V S, Pomyalov A, Procaccia I. 2001. Outliers, extreme events, and multiscaling[J]. *Physical Review E*, 63(5): 056118.
- Main I. 1996. Statistical physics, seismogenesis, and seismic hazard[J]. *Reviews of Geophysics*, 34(4): 433-462.
- Main I. 2000. Apparent breaks in scaling in the earthquake cumulative frequency-magnitude distribution: Fact or artifact?[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(1): 86-97.
- Main I, Naylor M. 2012. Extreme events and predictability of catastrophic failure in composite materials and in the Earth[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 183-197.
- Malevergne Y, Sornette D. 2006. *Extreme Financial Risks: From Dependence to Risk Management*[M]. Springer Science & Business Media.
- McCann Jr M W, Shah H C. 1979. Determining strong-motion duration of earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(4): 1253-1265.
- Mearns E, Sornette D. 2021. *The Great 1976 Tangshan Earthquake: Learning from the 1966-1976 Chinese Prediction Program*[M]. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing, UK.
- Mignan A, Woessner J. 2012. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs[R]. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, 1-45. doi: [10.5078/corssa-00180805](https://doi.org/10.5078/corssa-00180805).
- Mignan A, Ouillon G, Sornette D, Freund F. 2021. Global earthquake forecasting system (GEFS): The challenges ahead[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 230(1): 473-490.
- Mitzenmacher M. 2004. A brief history of generative models for power law and lognormal distributions[J]. *Internet Mathematics*, 1(2): 226-251.
- Nandan S, Ouillon G, Sornette D. 2019. Magnitude of earthquakes controls the size distribution of their triggered events[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(3): 2762-2780.
- Nandan S, Ram S K, Ouillon G, Sornette D. 2021. Is seismicity operating at a critical point?[J]. *Physical Review Letters*, 126(12): 128501.
- Nandan S, Ouillon G, Sornette D. 2022. Are large earthquakes preferentially triggered by other large events?[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127: e2022JB024380.
- National Institute of Standards and Technology. 2007. *Engineering Statistical Handbook*[R]. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc16.htm>.
- Newman M E. 2005. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law[J]. *Contemporary Physics*, 46(5): 323-351.
- Nishenko S P. 1989. Earthquakes: hazards and predictions[C]//James D E. *The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. New York: Van Nostrand Reinhold, 260-268.
- Nishenko S P. 1991. Circum-Pacific seismic potential: 1989-1999[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 135: 169-259.
- Obara K, Kato A. 2016. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes[J]. *Science*, 353(6296): 253-257.
- Ogata Y. 1988. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 83(401): 9-27.
- Ogata Y. 1998. Space-time point-process models for earthquake occurrences[J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 50(2): 379-402.
- Ogata Y, Zhuang J. 2006. Space-time ETAS models and an improved extension[J]. *Tectonophysics*, 413(1-2): 13-23.
- Ōmori F. 1894. On the aftershocks of earthquakes[J]. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7: 111-120.
- Osorio I, Frei M G, Sornette D, et al. 2010. Epileptic seizures: Quakes of the brain?[J]. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 82(2): 021919.
- Ouillon G, Castaing C, Sornette D. 1996. Hierarchical geometry of faulting[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B3): 5477-5487.
- Ouillon G, Ducorbier C, Sornette D. 2008. Automatic reconstruction of fault networks from seismicity catalogs: Three-dimensional optimal anisotropic dynamic clustering[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B1): B01306.
- Ouillon G, Sornette D. 2011. Segmentation of fault networks determined from spatial clustering of earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B2): B02306.
- Pacheco J F, Scholz C H, Sykes L R. 1992. Changes in frequency-size relationship from small to large earthquakes[J]. *Nature*, 355(6355): 71-73.
- Page M T, Alderson D, Doyle J. 2011. The magnitude distribution of earthquakes near Southern California faults[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B12): B12309.
- Pisarenko V F, Sornette D. 2004. Statistical detection and characterization of a deviation from the Gutenberg-Richter distribution above magnitude 8[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 839-864.
- Pisarenko V F, Sornette D. 2012. Robust statistical tests of dragon-kings beyond power law distributions[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 95-115.
- Rong Y, Jackson D D, Kagan Y Y. 2003. Seismic gaps and earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108 (B10): 2471.
- Sachs M K, Yoder M R, Turcotte D L, et al. 2012. Black swans, power laws, and dragon-kings: Earthquakes, volcanic eruptions, landslides, wildfires, floods, and SOC models[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205: 167-182.
- Saichev A, Sornette D. 2005. Distribution of the largest aftershocks in branching models of triggered seismicity: Theory of the universal Båth law[J]. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(5): 056127.
- Saichev A, Sornette D. 2006. Power law distribution of seismic rates: Theory and data analysis[J]. *The European Physical Journal*

- B—Condensed Matter and Complex Systems, 49(3): 377-401.
- Saichev A, Sornette D. 2007. Power law distributions of seismic rates[J]. *Tectonophysics*, 431(1-4): 7-13.
- Sammis C G, Sornette D. 2002. Positive feedback, memory, and the predictability of earthquakes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 (suppl_1): 2501-2508.
- Satake K, Fujii Y, Harada T, Namegaya Y. 2013. Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2B): 1473-1492.
- Schmittbuhl J, Vilotte J P, Roux S. 1993. Propagative macrodislocation modes in an earthquake fault model[J]. *Europhysics Letters*, 21(3): 375.
- Schmittbuhl J, Vilotte J P, Roux S. 1996. A dissipation-based analysis of an earthquake fault model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B12): 27741-27764.
- Scholz C H, Dawers N H, Yu J Z, et al. 1993. Fault growth and fault scaling laws: Preliminary results[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B12): 21951-21961.
- Scholz C H. 1997. Scaling properties of faults and their populations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4): 273-e1.
- Scholz C H. 2010. Large earthquake triggering, clustering, and the synchronization of faults[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3): 901-909.
- Scholz C H, Campos J. 2012. The seismic coupling of subduction zones revisited[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B5): B05310.
- Schröder M, Araújo N A M, Sornette D, Nagler J. 2017. Controlling percolation with limited resources[J]. *Physical Review E*, 96: 062302.
- Schwartz D P, Coppersmith K J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7): 5681-5698.
- Serra I, Corral Á. 2017. Deviation from power law of the global seismic moment distribution[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 40045.
- Song X X, Wu Z L, Jiang C S, Li J W. 2016. Differences in radiation energy of earthquakes with similar moment magnitude and focal mechanism—Comparison of broadband body-wave magnitudes of the 2014 Ludian and Jinggu earthquakes[J]. *Earthquake Research in China*, 32(4): 653-662 (in Chinese).
- Sornette A, Sornette D. 1989. Self-organized criticality and earthquakes[J]. *Europhysics Letters*, 9(3): 197.
- Sornette A, Sornette D. 1999. Renormalization of earthquake aftershocks[J]. *Geophysical Research Letters*, 26(13): 1981-1984.
- Sornette D. 1991. Self-organized criticality in plate tectonics[C]// Spontaneous formation of space-time structures and criticality, Geilo, Norway, 2-12 April 1991. Eds. Riste T, Sherrington D. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 349: 57-106.
- Sornette D, Miltenberger P, Vanneste C. 1994. Statistical physics of fault patterns self-organized by repeated earthquakes[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 142: 491-527.
- Sornette D, Knopoff L, Kagan Y Y, Vanneste C. 1996. Rank-ordering statistics of extreme events: Application to the distribution of large earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B6): 13883-13893.
- Sornette D. 1999. Complexity, catastrophe and physics[J]. *Physics World*, 12(12): 57.
- Sornette D, Werner M J. 2005. Apparent clustering and apparent background earthquakes biased by undetected seismicity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B9): B09303.
- Sornette D. 2006. Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos, Fractals, Self-organization and Disorder: Concepts and Tools (2nd edn. 2nd print)[M]. Springer Series in Synergetics, Heidelberg.
- Sornette D. 2009. Dragon-kings, black swans and the prediction of crises[J]. *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2: 1-18.
- Sornette D, Woodard R. 2009. Financial bubbles, real estate bubbles, derivative bubbles, and the financial and economic crisis (2009)[R]. Reproduced by the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), Swiss Finance Institute Research Paper No. 09-15. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1407608>.
- Sornette D, Ouillon G. 2012. Dragon-kings: Mechanisms, statistical methods and empirical evidence[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 1-26.
- Sornette D, Cauwels P. 2015. Financial bubbles: mechanisms and diagnostics[J]. *Review of Behavioral Economics*, 2(3): 279-305.
- Sornette D, Wei R. 2024. Multiple outlier detection in samples with exponential & pareto tails[J]. Swiss Finance Institute Research Paper No. 24-48, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4957557> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4957557>.
- Sornette D, Wei X, Chen X. 2024. Self-arresting earthquakes and critical sliding nucleation theory[EB/OL]. arXiv preprint, arXiv: 2402.14626.
- Stauffer D, Aharony A. 2018. Introduction to Percolation Theory[M]. Taylor & Francis.
- Thingbaijam K K S, Gerstenberger M C, Rollins C, et al. 2024. Characteristic versus Gutenberg-Richter nucleation-based magnitude-frequency distributions in the New Zealand national seismic hazard model 2022[J]. *Seismological Research Letters*, 95(1): 226-238.
- Triep E G, Sykes L R. 1997. Frequency of occurrence of moderate to great earthquakes in intracontinental regions: Implications for changes in stress, earthquake prediction, and hazards assessments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B5): 9923-9948.
- Turcotte D L. 1997. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics[M]. Cambridge University Press.
- Utsu T. 1970. Aftershocks and earthquake statistics (1): Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelations[J]. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 3(3): 129-195.
- Vere-Jones D. 1977. Statistical theories of crack propagation[J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 9: 455-481.
- Vere-Jones D. 2005. A class of self-similar random measure[J]. *Ad-*

- vances in Applied Probability (SGSA), 37: 908-914.
- Wei X, Xu J, Liu Y, Chen X. 2021. The slow self-arresting nature of low-frequency earthquakes[J]. *Nature Communications*, 12(1): 5464.
- Wen J, Chen X, Xu J. 2018. A dynamic explanation for the ruptures of repeating earthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(20): 11-116.
- Werner T R, Gubiec T, Kutner R, Sornette D. 2012. Modeling of super-extreme events: An application to the hierarchical Weierstrass-Mandelbrot continuous-time random walk[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 27-52.
- Wesnousky S G. 1994. The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, which is it?[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(6): 1940-1959.
- Wheatley S, Sornette D. 2015. Multiple outlier detection in samples with exponential & pareto tails: Redeeming the inward approach & detecting dragon kings[J]. arXiv preprint arXiv: 1507.08689.
- Wheatley S, Sovacool B, Sornette D. 2017. Of disasters and dragon kings: A statistical analysis of nuclear power incidents and accidents[J]. *Risk Analysis*, 37(1): 99-115.
- Wyss M. 1997. Cannot earthquakes be predicted?[J]. *Science*, 278(5337): 487-490.
- Xu D, Gong W, Zhang Z, et al. 2023. The 2016 Menyuan earthquake: The largest self-arrested crustal earthquake ever observed[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(11): e2023GL103556.
- Yamanaka Y, Shimazaki K. 1990. Scaling relationship between the number of aftershocks and the size of the main shock[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 38(4): 305-324.
- Yukalov V I, Sornette D. 2012. Statistical outliers and dragon-kings as Bose-condensed droplets[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 205(1): 53-64.
- Zafarani H, Hajimohammadi B, Jalalalhosseini S M. 2019. Earthquake hazard in the Tehran region based on the characteristic earthquake model[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(9): 1485-1511.
- Zhang Y, Wu Z, Romanelli F, et al. 2023. Earthquake early warning system (EEWS) empowered by time-dependent neo-deterministic seismic hazard assessment (TD-NDSHA)[J]. *Terra Nova*, 35(3): 230-239.
- Zhuang J, Ogata Y, Vere-Jones D. 2004. Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B5): B05301.

附中文参考文献

- 刘月, 吴忠良, 张永仙. 2024. 2024 年 1 月 1 日能登半岛 M_w 7.5 地震作为一个可能的“龙王”事件[J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 55(4): 493-499.
- 宋潇潇, 吴忠良, 蒋长胜, 李佳威. 2016. 矩震级及震源机制相似地震的辐射能量差别——2014 年鲁甸地震与景谷地震宽频带体波震级的比较[J]. *中国地震*, 32(4): 653-662.