Spatial Distribution Patterns of Static Complex Slip on Fault Rupture Surfaces of Large Earthquakes

Jiawei Li[1,*]

[1] *Institute of Risk Analysis, Prediction, and Management, Academy for Advanced and Interdisciplinary Studies, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055*

[*] Corresponding author. Email: lijw@cea-igp.ac.cn

ABSTRACT

In-depth studies of large earthquake rupture characteristics are crucial for understanding earthquake physics, the Earth system, and mitigating seismic risks. Characterizing static complex slip distribution on fault rupture surfaces remains a key unsolved issue in seismology. Advances in source process inversion techniques have yielded abundant static slip data over recent decades. This paper reviews recent progress, introduces five models for characterizing slip distribution patterns, and evaluates their performance. Results show the power-law decay model performs best, while the homogeneous model performs worst. These findings may enhance seismic risk assessment and real-time disaster mitigation strategies.

Keywords: *Source physics, finite fault rupture of earthquakes, static slip distribution, source inversion.*

大地震断层破裂面上静态复杂位错的空间分布模式

李佳威 [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*

[*] *通讯作者. 电子邮箱：lijw@cea-igp.ac.cn*

摘要

深入研究大地震震源破裂特征不仅对认识地震物理具有重要科学意义，也是为了更好理解地球系统并应对地震灾害风险而进行的一项重要基础科学研究。大地震断层破裂面上的静态复杂位错分布究竟应该如何表征，仍是一个亟待解决的地震学基本问题。过去几十年，震源过程反演技术的快速发展提供了大量可供研究的静态位错分布结果。本文在归纳总结现有最前沿震源破裂特征认识的基础上，构建了五个可表征震源破裂静态位错分布模式的模型，并考察了这些模型表征静态位错分布结果的表现。结果显示，幂律衰减型位错模型表现最好，均匀位错模型表现最差。本文针对大地震破裂静态位错分布特征的分析和讨论，将有望进一步优化地震灾害风险评估和实时地震减灾策略。

关键字： *震源物理，地震有限断层破裂，静态位错分布，震源反演.*

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_9

1. 引言

探索可表征大地震（如 $M>\sim6$）复杂地震震源破裂的合适模型一直是地震学研究的一个基本问题。对地震震源的认识经历了由简单到复杂、由局部到整体、由一维到多维、由静态到动态、由时空到波数、由运动学到动力学、由单一断层到复杂断层系统的过程[1,2,3,4,5]。实际可以借用统计学术语“自由度（degree-of-freedom, df）”来描述在震源破裂特征考查中模型特征值可独立自由变化的个数，即震源模型所能提供的信息量。每一次对震源破裂过程物理理解的加深，都将进一步推动实际应用场景下震源模型自由度的增加。对震源模型最早的定性认识是弹性回跳模型[6]，真正意义的定量模型构建则始于 1923 年[7]。震源最初被模拟为点源，可表征时-空-强等基本信息，这也是现在一般地震目录中所包含的参数信息，即发震时刻、经纬度、深度、震级等信息。随着观测技术发展，点源双力偶震源机制模型开始被广泛采用以更好解释观测 P 波初动的四象限空间分布[8]，其包含了矩心的时空参数信息以及断层走向、倾向和位错信息。

具有较长破裂时间的大地震（如 $M>\sim6$），对其破裂时-空细节的刻画具有明显更重要的意义。Ben-Menahem 构建有限移动点力源并考查了其波场辐射[9]。第一个具有破裂尺度的空间表面有限震源模型同时被提出[10,11]。此后关于地震震源破裂过程的更多概念和模型被陆续提出以更全面刻画其中物理细节，本文将其归纳为三类：

(1) 空间模式类。此类特征或模型主要刻画了震源破裂位错在断层空间中的整体或局部特征。如断层面均匀位错模型[12,13,14]，地震矩及矩震级即基于此概念而来；圆盘破裂模型[15,16,17,18]；凹凸体模型[19,20]；障碍体模型[21]；“狗尾”/“彩虹”型位错模型[22]；非对称“三角形”位错分布模型[23,24]以及在断层或破裂末端的位错“锥灭”特征[25]。

(2) 波数模式类。此类主要刻画了震源位错在波数域中的衰减特征。其中 k-指数衰减型最为常用，针对该模型幂指数的具体取值有广泛讨论，比如取 3[26]、取 1[27]等。目前讨论最多且在工程地震学中应用最广的当属幂指数取 2 的 k^{-2} 模型[28,29,30]。也有研究讨论了位错在波数域中的其他衰减型，如高斯型、指数型等[31]。

(3) 统计模式类。此类描述了震源位错的统计分布特征，如认为断层破裂面上位错值符合正态分布[32]，也有讨论了累积位错分布的截断指数、指数、韦伯、对数正态和伽马分布描述[33]。

需要指出的是，震源模型自由度越多，其通用性越好，在当前越能接近大地震震源破裂真实情况，但同时模型也越复杂。因此，一个能够最大程度客观刻画震源破裂特性，同时具有合适（较少）自由度的震源模型对实际工作具有重要意义，对该模型的提炼也是对当前地震学知识的深刻归纳过程。如 Li 等利用一个强震破裂位错剖面研究了若干震源模型的表征能力，认为 k^{-2} 模型整体而言是表现最好（AIC 值最小）的模型[34]。本文在此基础上，讨论了空间模式类的几个模型表征静态位错分布结果的表现。本文研究对大地震破裂静态位错分布特征的分析和探讨，预期将为改进地震灾害风险评估与实时地震减灾策略提供新的思路和参考。

2. 断层破裂面上位错空间分布的简化模型

在震源物理学研究中，破裂断层通常沿走向和倾向方向分别划分为 I 和 J 个子断层。假设断层破裂面上任意位置 (x_{ij}, y_{ij}) 处 $(i = 1, 2, ..., I; j = 1, 2, ..., J)$ 的静态位错 s_{ij} 可表征为：

$$s_{ij} = \sum_{n=1}^{N} P_n(x_{ij}, y_{ij}) \tag{1}$$

其中，$P_n(x_{ij}, y_{ij})$为第 n 个凹凸体在 (x_{ij}, y_{ij}) 处的位错 $(n = 1, 2, ..., N)$。此处，凹凸体（asperity）被定义为断层破裂面上位错值较大的区域，断层性质在该区域通常更粗糙，导致应力在此处积累并在地震时释放。式 (1) 表示断层破裂面上的总静态位错实际为所有凹凸体位错空间分布的叠加。研究表明，单个凹凸体的形状可近似为椭圆[35,36,37,38]。因此，本文假定第 n 个凹凸体的边界方程近似为一个中心在 (X_n, Y_n)、半长短轴距分别为 a_n 和 b_n，且旋转角度为 θ_n 的椭圆 $E_n(x_{ij},$

y_{ij})，其方程可写为：

$$E_n(x_{ij},y_{ij})=[\frac{(x_{ij}-X_n)\cos(\theta_n)+(y_{ij}-Y_n)\sin(\theta_n)}{a_n}]^2 +[\frac{(y_{ij}-Y_n)\cos(\theta_n)-(x_{ij}-X_n)\sin(\theta_n)}{b_n}]^2 \quad (2)$$

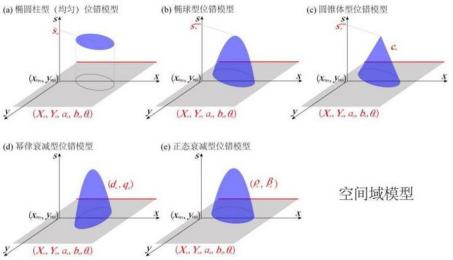

图 1 断层破裂面空间位错分布模式的简化模型示意图。这五个空间域简化模型表征了单个凹凸体的静态位错空间分布 $P_n(x_{ij}, y_{ij})$。红色字母为待拟合的参数。

本文通过广泛的文献调研，梳理总结了若干经典的断层破裂面位错空间分布模式，并从中归纳推导出了 5 个数学模型（图 1）。5 个模型分别用于构建每个凹凸体的静态位错空间分布 $P_n(x_{ij}, y_{ij})$，它们分别为：

(a) 椭圆柱型（均匀）位错模型（Model 1）。椭圆柱型位错模型（图 1a）假设断层破裂面上位错在第 n 个凹凸体椭圆边界内以平均位错$\bar{s}_n$均匀分布，其方程为：

$$P_n(x_{ij},y_{ij})=\begin{cases}\bar{s}_n & E_n(x_{ij},y_{ij})\le 1\\ 0 & E_n(x_{ij},y_{ij})>1\end{cases} \quad (3)$$

该模型源自 Haskell 模型[12,13,14]，是 Haskell 模型在时间上的积分。与 Haskell 模型假设平均位错均匀分布于整个矩形断层破裂面不同，该模型采用了椭圆形凹凸体，并假设平均位错均匀分布于该凹凸体内。式 (1)、(2) 和 (3) 显示，该模型的待拟合参数集为$\Phi(\bar{s}_n, \theta_n, a_n, b_n, X_n, Y_n)$，合计 $6 \times N$ 个参数。该模型可提供表征有限断层破裂位错分布的特征参数包括：平均位错$\bar{s}_n$、有效断层破裂面积 $A_{\text{eff-rup}}$ 和地震势能 P ($P = \bar{s}_n \times A_{\text{eff-rup}}$)。

(b) 椭球型位错模型（Model 2）。椭球型位错模型（图 1b）假设断层破裂面上位错在第 n 个凹凸体椭圆边界内以椭球方程衰减，其方程为：

$$P_n(x_{ij},y_{ij})=\begin{cases}s_n^{\max ES}-E_n(x_{ij},y_{ij}) & E_n(x_{ij},y_{ij})\le 1\\ 0 & E_n(x_{ij},y_{ij})>1\end{cases} \quad (4)$$

其中，$s_n^{\max ES}$ 是第 n 个凹凸体的拟合最大位错。该模型源自具有常数应力降的圆盘裂纹模型[39,40]。式 (1)、(2) 和 (4) 显示，该模型的待拟合参数集为$\Phi(s_n^{\max ES}, \theta_n, a_n, b_n, X_n, Y_n)$，合计 $6 \times N$ 个参数。该模型可提供表征有限断层破裂位错分布的特征参数为：每个凹凸体椭球型位错分布的最大值 $s_n^{\max ES}$。

(c) 圆锥体型位错模型（Model 3）。圆锥体型位错模型（图 1c）假设每个凹凸体的位错随断层位置呈线性衰减，形似倒扣的“雪糕筒”，其方程为：

$$P_n(x_{ij},y_{ij})=\begin{cases}s_n^{\max C}-c_n\sqrt{E_n(x_{ij},y_{ij})} & E_n(x_{ij},y_{ij})\le 1\\ 0 & E_n(x_{ij},y_{ij})>1\end{cases} \quad (5)$$

其中，参数 c_n 为位错在各方向上随断层位置的线性衰减率，它决定了圆锥体形状的开口大小。该模型假设沿不同方向 c_n 均为相同值，即意味着位错在各方向上遵循同样的衰减率。$s_n^{\max C}$ 是第 n 个凹凸体的最大位错。该模型源自 Scholz 和 Lawler 以及 Manighetti 等的研究[24,25]，他们发现在断层破裂末端部分，位错呈现线性衰减的特征，因此位错剖面（走向或倾向方向）形状表现为不对称的三角形，呈现出自相似特征。结合式 (1)、(2) 和 (5)，该模型的待拟合参数集为$\Phi(s_n^{\max C}, c_n, \theta_n, a_n, b_n, X_n, Y_n)$，合计 $7 \times N$ 个参数。该模型可提供的特征参数包括：位错线性衰减率 c_n 和圆锥体型位错分布的最大值 $s_n^{\max ES}$。

(d) 幂律衰减型位错模型（Model 4）。幂律衰减型位错模型（也可称空间自相似型位错模型，图 1d）假设每个凹凸体的位错随断层位置呈幂律衰减，其衰减方程为：

$$P_n(x_{ij},y_{ij})=\begin{cases}[E_n(x_{ij},y_{ij})+d_n]^{-q_n} & E_n(x_{ij},y_{ij})\le 1\\ 0 & E_n(x_{ij},y_{ij})>1\end{cases} \quad (6)$$

其中，常数 d_n 保证了底数不会为零，幂指数 q_n 决定了位错的空间衰减率，$d_n^{-q_n}$ 为拟合的最大位错值。该模型源自位错在空间域和波数域中表现出的自相似性特征[30,41]。式 (6) 借鉴了传染型余震序列（ETAS）

模型的幂律型空间核函数[42,43]。结合式 (1)、(2) 和 (6)，该模型的待拟合参数集为$\Phi(d_n, q_n, \theta_n, a_n, b_n, X_n, Y_n)$，合计 $7 \times N$ 个参数。该模型可提供的特征参数包括：幂律型衰减率 q_n 和幂律衰减型位错分布的最大值$d_n^{-q_n}$。

(e) 正态衰减型位错模型（Model 5）。正态衰减型位错模型（也可称高斯衰减型位错模型，图 1e）假设每个凹凸体的位错随断层位置呈二维正态分布型函数衰减，其方程为：

$$P_n(x_{ij}, y_{ij}) = \begin{cases} \frac{\beta_n}{2\pi a_n b_n \sqrt{1-\rho_n^2}} \exp[-\frac{1}{2(1-\rho_n^2)} E_n(x_{ij}, y_{ij})] & E_n(x_{ij}, y_{ij}) \le 1 \\ 0 & E_n(x_{ij}, y_{ij}) > 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中，常数β_n确保了凹凸体 $P_n(x_{ij}, y_{ij})$具有合理的最大位错值，相关系数ρ_n量化了沿走向和倾向方向线性关系的强度和方向。式 (7) 借鉴了传染型余震序列（ETAS）模型的正态衰减型空间核函数[42,43]。该模型目前并未找到相关震源物理学模型研究的文献支撑，但是本项目认为针对这一模型的研究对震源物理学而言仍然具有重要意义。最大熵原理指出，当对一个分布除了它属于某个特定类别以外其他一无所知的情况下，应该选择熵最大的分布作为最不具信息的默认分布。而正态（高斯）分布是在给定均值和方差的情况下最大化香农信息熵的最优分布，它在满足这些约束条件的同时最小化了先验信息量。正态分布函数在最大熵原理下具有最优性，并且在自然界和数学模型中被广泛应用，能够提供不确定性和随机性表示，因此在信息有限的情况下是一个安全的假设模型[44,45]。结合式 (1)、(2) 和 (7)，该模型的待拟合参数集为$\Phi(\rho_n, \beta_n, \theta_n, a_n, b_n, X_n, Y_n)$，合计 $7 \times N$ 个参数。该模型可提供的特征参数包括：相关系数ρ_n和正态衰减型位错分布的最大值$\beta_n/(2\pi a_n b_n \sqrt{1-\rho_n^2})$。

3 大地震震源反演位错分布数据

在震源物理研究中，震源破裂反演的位错分布结果有时也被称为“震源模型”。为了避免混淆，本文及之后的研究中约定，“模型”特指针对震源破裂特征及位错分布模式的描述（即第 2 节中的 5 个简化模型），而反演的震源位错分布称“结果”或直接称“震源位错分布”。

随着数据观测质量和反演技术的发展，现在已有许多机构和研究组会在大地震后第一时间发布其反演的震源破裂位错分布结果。目前具有较多地震震源反演结果累积案例的数据库主要有美国地质调查局（USGS）有限断层反演数据库和震源反演验证（SIV）计划数据库。本文整合了 2000 年至今两个数据库中全部有限断层破裂位错分布反演结果。其中，地震数据仍是最主要的基础研究资料，而测地数据及地震/测地数据联合反演也是重要补充。两个数据库中，SIV 数据库共有针对 116 个地震事件的 233 个地震震源静态位错分布结果，USGS 数据库则有 186 个地震的震源静态位错分布，这是因为前者会出现多个研究组共同上传针对同一地震研究结果的情况。因此总计有 419 个地震震源静态位错分布结果。相较而言，USGS 数据库具有更加一致的研究人员、数据和方法。图 2 展示了两个数据库中全部地震事件的空间分布及频次统计。在具体的数据使用过程中，不同研究组针对同一地震的研究结果将被给予相同权重。这主要是因为本文认为，不同研究组采用不同频率特性的数据反演结果实际均只反映了复杂（宽频带）地震能量辐射的一定频段侧面，因此可能将这些不同结果综合起来考虑反而更有利于认识地震破裂过程的复杂性和随机性。

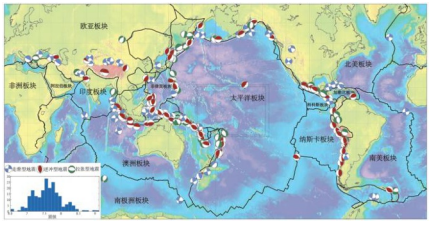

图 2 本文采用的两个数据库（USGS 和 SIV）中地震事件的空间分布。

整体而言，两个数据库中的震源破裂静态位错分布结果均以单个平直断层破裂面占绝大多数。事实上，这种震源描述距离真实地震震源复杂破裂模式还有较大差距。但是，这两个数据库已是针对大地震震源描述的物理合理性和案例累积目录完整性之间最好的权衡。比如，以 2000 年至今美国地质调查局（USGS）

发布的 6 级以上地震目录为例，其中震中目录有近 4000 条，矩心矩张量目录约 2000 条，而有限断层破裂位错分布仅不足 200 条。更加符合真实情况但也更复杂的有限断层系统破裂位错分布案例则更少，目前基本只能在对应的研究文献中找到。因此，现有数据库已经是比较贴近大地震真实震源破裂情况同时具有较多案例积累、适合作为基准数据进行大地震震源破裂模式研究的最优选择了。

4 结果

针对 5 个在空间域中表征断层破裂位错的模型，需要首先基于作为拟合基准数据的反演位错分布结果确定待拟合的凹凸体数量 N 及其中心位置 (X_n, Y_n)。其中的难点在于既要在三维平面准确识别位错分布的有效局部极大值，还要能够规避因反演不确定性造成的噪声位错分布局部极大值。因此，本文拟采用基于峰突（prominence）思想的有效局部极大值检测方法。峰突是地形学中广泛应用的一个衡量山顶独立性的指标，其被定义为山顶到围绕其山谷的相对高度最小值。

粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization，简称 PSO）是智能优化算法的一种，是 James Kennedy 博士和 Russell Eberhart 博士受鸟群捕食行为的规律性启发，于 1995 年建立的一种基于群体的随机优化技术[46,47]。不同于其他进化算法采用群体解的竞争机制迭代产生最优解，粒子群优化算法采用了群体解的合作机制。粒子群优化算法具有算法概念简单易实现、需调参数量少、收敛速度快等优点，但它也存在陷入局部最优解的问题。本文基于作为拟合基准数据的反演位错分布结果对多种拟合优化算法（如模拟退火、梯度下降、拟牛顿等算法）进行了测试，粒子群算法是表现最稳定也整体最好的算法。

本文利用粒子群算法，基于 419 个地震震源静态位错分布结果拟合 5 个简化震源模型，并计算每个简化震源模型的 AIC 值。赤池信息准则（Akaike information criterion，AIC）建立在信息熵的概念之上，是评估模型复杂度和衡量模型拟合优度的指标[48]，其一般表达式写作

$$AIC = 2df - 2\ln(L) \tag{8}$$

其中，df 为模型自由度（即可独立自由变化的参数数量），L 为似然函数。

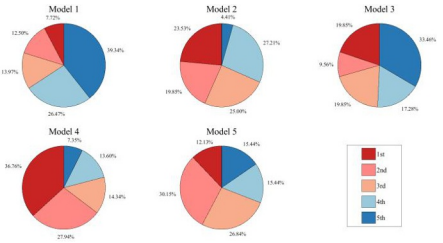

图 3 5 个简化震源位错模型在 419 个地震震源静态位错分布结果中，其根据 AIC 值排名表现最好（1st）、次好（2nd）、一般（3rd）、较差（4th）和最差（5th）的比例。

图 3 展示了 5 个简化震源位错模型，即：椭圆柱型（均匀）位错模型（Model 1）、椭球型位错模型（Model 2）、圆锥体型位错模型（Model 3）、幂律衰减型位错模型（Model 4）和正态衰减型位错模型（Model 5）在 419 个地震震源位错分布结果中，根据 AIC 值排名表现最好（1st）、次好（2nd）、一般（3rd）、较差（4th）和最差（5th）的比例。具体来说，就是针对每一个地震震源位错分布结果，分别计算 5 个模型的 AIC 值，然后根据其 AIC 值进行排序。表现最好（1st）意味着该模型不仅具有较好的拟合优度，同时还具有合适的模型自由度。然后统计每个模型在所有 419 个地震震源位错分布结果中，表现最好（1st）、次好（2nd）、一般（3rd）、较差（4th）和最差（5th）所占的比例。

结果显示，幂律衰减型位错模型（Model 4）在刻画地震震源位错分布结果中整体表现最好，36.76% 的位错分布结果中，该模型都是 AIC 得分最低的，将近 80%（即该模型表现最好、次好和一般的比例）的位错分布结果都可以用该模型很好地刻画。如果看表现最好（1st）的比例，分别是幂律衰减型位错模型（36.76%）、椭球型位错模型（23.53%）、圆锥体型位错模型（19.85%）、正态衰减型位错模型（12.13%）和椭圆柱型（均匀）位错模型（7.72%）。

相反，如果看表现最差（5th）的比例，分别是椭圆柱型（均匀）位错模型（39.34%）、圆锥体型位错模型（33.46%）、正态衰减型位错模型（15.44%）、幂律衰减型位错模型（7.53%）和椭球型位错模型（4.41%）。其中，椭圆柱型（均匀）位错模型和圆锥体型位错模型看起来在表征地震震源位错分布结果时，大部分时候都是很差的选择，即表现最差和较差的比例总和分别为 65.81%和 50.74%。

5 结论和讨论

为了考察大地震断层破裂面上的静态复杂位错空间分布究竟应该如何表征，本文梳理总结了 5 个断层破裂面位错空间分布模式的简化数学模型，并利用 2000 年以来累积的 419 个地震震源位错分布反演结果，研究了每个简化模型在表征这些结果时的表现。结果显示，在 36.76%的震源位错分布结果中，幂律衰减型位错模型都是表现最好的，而表现在前三名的情况甚至达到了 80%左右。相比之下，椭圆柱型（均匀）位错模型和圆锥体型位错模型在表征地震震源位错分布结果时往往表现不佳。其中，这两种模型分别在 65.81%和 50.74%的情况下表现为最差或较差的选择。

深入理解震源位错的空间分布模式，对于解决震源破裂的可预测性、强震预测以及强地震动模拟等核心科学问题具有重要意义。研究表明，反演得到的震源位错空间分布通常呈现显著的衰减特性（如幂律型）。此外，使用均匀位错分布的概念来描述现代地震学背景下的震源已难以满足实际需求。这一现象对新一代地震目录的构建提出了新的挑战，特别是在表征震源有限性和位错不均匀性方面。

致谢

作者感谢吴忠良研究员和 Didier Sornette 院士针对震源等问题提供的意见和建议，作者感谢杨飙博士在数据获取方面提供的帮助。本文数据来自：震源反演验证（SIV）计划数据库（https://earthquake.usgs.gov/data/finitefault/; 最后访问日期：2023 年 6 月 20 日）和美国地质调查局（USGS）有限断层反演数据库（http://equake-rc.info/srcmod/; 最后访问日期：2023 年 6 月 20 日）。本文工作受到广东省基础与应用基础研究基金资助项目（2024A1515011568）、深圳市科技创新委员会资助项目（GJHZ20210705141805017）和南方科技大学计算科学与工程中心的支持和资助。

参考文献

[1] K. Aki, Earthquake mechanism, Tectonophysics 13 (1972) 423–446.

[2] B.V. Kostrov, S. Das, Principles of earthquake source mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

[3] 张勇, 震源破裂过程反演方法研究(博士学位论文), 北京大学, 北京, 2008.

[4] C.H. Scholz, The mechanics of earthquakes and faulting (3rd edition), Cambridge University Press, Cambridge, 2019.

[5] 岳汉, 张勇, 盖增喜, 王腾, 赵里, 大地震震源破裂模型: 从快速响应到联合反演的技术进展及展望, 中国科学: 地球科学 50(4) (2020) 515–537.
Yue H, Zhang Y, Ge Z, Wang T, Zhao L. 2020. Resolving rupture processes of great earthquakes: Reviews and perspective from fast response to joint inversion. Science China Earth Sciences, 63: 492–511,https://doi.org/10.1007/s11430-019-9549-1

[6] H.F. Reid, The California earthquake of April 18, 1906, vol. 2: The mechanics of the earthquake, Report of the State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 1910.

[7] H. Nakano, Note on the nature of forces which give rise to the earthquake motions, Seismological Bulletin of the Central Meteorological Observatory

of Japan 1 (1923) 92 – 120.

[8] A.M. Dziewonski, T.A. Chou, J.H. Woodhouse, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys. Res. 86 (1981) 2825 – 2852.

[9] A. Ben-Menahem, Radiation of seismic surface-waves from finite moving sources, Bull. Seismol. Soc. Am. 51 (1961) 401 – 435.

[10] T. Maruyama, On the force equivalents of dynamical elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo 41 (1963) 467 – 486.

[11] R. Burridge, L. Knopoff, Body force equivalents for seismic dislocations, Bull. Seismol. Soc. Am. 54 (1964) 1875 – 1888.

[12] N.A. Haskell, Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults, Bull. Seismol. Soc. Am. 54 (1964) 1811 – 1841.

[13] N.A. Haskell, Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. Part II. A statistical source model, Bull. Seismol. Soc. Am. 56 (1966) 125 – 144.

[14] N.A. Haskell, Elastic displacements in the near-field of a propagating fault, Bull. Seismol. Soc. Am. 59 (1969) 865 – 908.

[15] V.I. Keilis-Borok, On estimation of the displacement in an earthquake source and of source dimensions, Annali di geofisica 12 (1959) 205 – 214.

[16] R. Burridge, Theoretical seismic sources and propagating brittle cracks, J. Physics Earth 16 (1968) 83 – 92.

[17] J.N. Brune, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res. 75 (1970) 4997 – 5009.

[18] R. Madariaga, S. Ruiz, Earthquake dynamics on circular faults: A review 1970 – 2015, J. Seismol. 20 (2016) 1235 – 1252.

[19] T. Lay, H. Kanamori, An asperity model of large earthquake sequences, in: D.W. Simpson, P.G. Richards (Eds.), Earthquake Prediction: An International Review, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1981, pp. 579 – 592.

[20] T. Lay, S.P. Nishenko, Updated concepts of seismic gaps and asperities to assess great earthquake hazard along South America, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 119 (2022) e2216843119.

[21] K. Aki, Characterization of barriers on an earthquake fault, J. Geophys. Res. 84 (1979) 6140 – 6148.

[22] S.N. Ward, Dogtails versus rainbows: Synthetic earthquake rupture models as an aid in interpreting geological data, Bull. Seismol. Soc. Am. 87 (1997) 1422 – 1441.

[23] I. Manighetti, G.C.P. King, Y. Gaudemer, C.H. Scholz, C. Doubre, Slip accumulation and lateral propagation of active normal faults in Afar, J. Geophys. Res. 106 (2001) 13667 – 13696.

[24] I. Manighetti, M. Campillo, C. Sammis, P.M. Mai, G. King, Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes: Implications for earthquake and fault mechanics, J. Geophys. Res. 110 (2005) B05302.

[25] C.H. Scholz, T.M. Lawler, Slip tapers at the tips of faults and earthquake ruptures, Geophys. Res. Lett.

31 (2004) L21609.

[26] T.C. Hanks, b values and ω γ seismic source models: Implications for tectonic stress variation along active crustal fault zones and the estimation of high-frequency strong ground motion, J. Geophys. Res. 84 (1979) 2235 – 2242.

[27] J. Lomnitz-Adler, P. Lemus-Diaz, A stochastic model for fracture growth on a heterogeneous seismic fault, Geophys. J. Int. 99 (1989) 183 – 194.

[28] D.J. Andrews, A stochastic fault model, 2, time-dependent case, J. Geophys. Res. 86 (1981) 10821 – 10834.

[29] A. Frankel, High-frequency spectral falloff of earthquakes, fractal dimension of complex rupture, b value, and the scaling of strength on fault, J. Geophys. Res. 96 (1991) 6291 – 6302.

[30] A. Herrero, P. Bernard, A kinematic self-similar rupture process for earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am. 84 (1994) 1216 – 1228.

[31] P.M. Mai, G.C. Beroza, A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, J. Geophys. Res. 107 (2002) 2308.

[32] S.N. Ward, Earthquake simulation by restricted random walks, Bull. Seismol. Soc. Am. 94 (2004) 2079 – 2089.

[33] K.K. Thingbaijam, P.M. Mai, Evidence for truncated exponential probability distribution of earthquake slip, Bull. Seismol. Soc. Am. 106 (2016) 1802 – 1816.

[34] J.W. Li, Z.L. Wu, C.S. Jiang, S.Y. Zhou, Y. Zhang, Simple models of complex slip distribution? A case study of the 2011 MW 7.1 Van (eastern Turkey) earthquake, Pure Appl. Geophys. 177 (2020) 387 – 395.

[35] S. Di Carli, C. François-Holden, S. Peyrat, R. Madariaga, Dynamic inversion of the 2000 Tottori earthquake based on elliptical subfault approximations, J. Geophys. Res. 115 (2010) B12328.

[36] F. Leyton, S. Ruiz, R. Madariaga, Focal mechanism, magnitude, and finite-fault rapid estimation using the elliptical patch method in Chile, Seismol. Res. Lett. 89 (2018) 503 – 511.

[37] S. Sangeetha, S.T.G. Raghukanth, A stochastic source model for the 2015 MW 7.9 Gorkha, Nepal, earthquake using multi-dimensional ensemble empirical mode decomposition technique, in: MATEC Web of Conferences, vol. 148, EDP Sciences, 2018, p. 08004.

[38] H. Aochi, S. Ruiz, Early stage and main ruptures of the 2015 MW 8.3 Illapel, Chile, megathrust earthquake: Kinematic elliptical inversions and dynamic rupture simulations, J. Geophys. Res. 126 (2021) e2020JB021207.

[39] P. Segall, Earthquake and volcano deformation, Princeton University Press, Princeton, 2010.

[40] R. Madariaga, S. Ruiz, Earthquake dynamics on circular faults: A review 1970 – 2015, J. Seismol. 20 (2016) 1235 – 1252.

[41] M. Nakano, S. Murphy, R. Agata, Y. Igarashi, M. Okada, T. Hori, Self-similar stochastic slip distributions on a non-planar fault for tsunami scenarios for megathrust earthquakes, Prog. Earth Planet. Sci. 7 (2020) No. 45.

[42] Y. Ogata, Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, J. Am. Stat. Assoc. 83 (1988) 9 – 27.

[43] E.W. Fox, F.P. Schoenberg, J.S. Gordon, Spatially

inhomogeneous background rate estimators and uncertainty quantification for nonparametric Hawkes point process models of earthquake occurrences, Ann. Appl. Stat. 10 (2016) 1725 – 1756.

[44] T.M. Cover, J.A. Thomas, Elements of information theory (2nd edition), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.

[45] N. Ebrahimi, E.S. Soofi, R. Soyer, Multivariate maximum entropy identification, transformation, and dependence, J. Multivariate Anal. 99 (2008) 1217 – 1231.

[46] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in: Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, pp. 39 – 43.

[47] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, in: Proceedings of IEEE-International Conference on Neural Networks, vol. 4, 1995, pp. 1942 – 1948.

[48] H. Akaike, A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control 19 (1974) 716 – 723.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.