

# 全球大地震破裂空间复杂度特征研究

王静<sup>1</sup> 盖增喜<sup>1,2,†</sup>

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 河北红山地球物理国家野外科学观测研究站, 邢台 054000;

† 通信作者, E-mail: zge@pku.edu.cn

**摘要** 基于有限断层反演得到的滑移数据, 用独立滑移单元的数量表征地震破裂复杂度, 据此对大地震破裂进行分组, 并研究破裂复杂度与主要震源参数之间的关系, 探讨破裂复杂度的全球及区域空间分布特征。结果表明, 矩震级很大( $M_w \geq 8.5$ )的事件, 地震破裂复杂度更大; 破裂复杂度较高的地震分布在浅层地壳( $\leq 30$  km)内的概率最大, 随着震源深度增加, 破裂复杂度对震源深度的敏感性逐渐消失; 走滑断层机制占比较大的事件, 破裂复杂度较高; 破裂复杂度与地震能矩比没有明确的关系; 破裂复杂度的空间分布特征与区域地质构造环境相关。破裂复杂度的空间分布特征可以分为3类, 第一类是板块之间简单碰撞产生的俯冲带, 板块交界处的滑动速率和方向较为一致, 这种情形下以比较简单的事件类型为主; 第二类是多板块交界处, 或者板块交界处的滑动速率和方向在整个区域内存在差异; 第三类是大陆内部的强烈挤压地带。与第一类空间分布特征相比, 第二类和第三类情形下破裂复杂度相对更高。地震破裂复杂度可以在一定程度上反映区域应力场的复杂性。

**关键词** 破裂复杂度; 震源参数; 空间分布; 断层; 构造背景

## Study on Rupture Spatial Complexity of Global Large Earthquakes

WANG Jing<sup>1</sup>, GE Zengxi<sup>1,2,†</sup>

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Hebei Hongshan National Geophysical Observation and Research Station, Xingtai 054000; † Corresponding author, E-mail: zge@pku.edu.cn

**Abstract** Based on the displacement data obtained from finite fault inversion, the number of independent slip units is used to characterize the magnitude of the seismic rupture complexity and group the events statistically, to study the relationship between rupture complexity and source parameters, to explore the global spatial distribution and regional characteristics of fracture complexity. The results show that for events with a large moment magnitude ( $M_w \geq 8.5$ ), the rupture complexity tends to be greater; the earthquake with higher rupture complexity is more likely to be distributed in the shallow crust ( $\leq 30$  km), and the sensitivity of the rupture complexity to the focal depth gradually disappears as the focal depth increases; the events with higher strike-slip fault mechanism components tend to have higher fracture complexity; there is no clear relationship between rupture spatial complexity and seismic energy-moment ratio; the spatial distribution characteristics of rupture complexity is associated with regional geological tectonic environment. The spatial distribution characteristics of fracture complexity can be divided into three categories. The first category is the subduction zone caused by simple collisions between plates and the slip rate and direction at the boundary of the plates are relatively high, and relatively simple event types are main in this case. The second type is the junction of multiple plates, or the sliding rate and direction at the junction of the plates are different in the whole area. The third type is the strong compression inside the continent. The rupture complexity of the second and third types of cases tends to be higher than that of the first type. The rupture complexity can reflect the complexity of the regional stress field to a certain extent.

**Key words** rupture complexity; source parameters; spatial distribution; fault; tectonic background

地震破裂的方式有多种,有些事件会是简单的断层破裂,并具有相对均匀的滑移分布<sup>[1]</sup>,另一些事件则具有非均匀的滑移分布<sup>[2-5]</sup>。例如,2004年12月26日的苏门答腊-安达曼 Mw 9.2 地震和2011年3月11日的日本东北 Mw 9.1 地震,二者震级相近,滑移分布却有很大的差别,前者涉及多个滑移单元<sup>[3]</sup>,后者只在海沟附近有一个主要的滑移单元<sup>[1]</sup>。破裂分布相对均匀的事件,破裂的空间复杂性相对较低。反之,具有多个离散分布滑移块体的事件,其破裂的空间复杂性则相对较高。比较大地震破裂复杂度在全球不同构造单元的差异,有助于理解各构造单元区域应力场的复杂性、断层的摩擦特性、破裂过程中的动力学因素以及全球大地震的破裂特征跨度<sup>[6]</sup>,并且可能在地质灾害防御方面发挥重要的应用。

大地震破裂的复杂性可能受介质因素影响,也可能受地震破裂的动力学因素影响。在前一种情况下,地震破裂的复杂性应该显示出系统性的空间变化<sup>[6]</sup>。为量化地震破裂的复杂度, Ye 等<sup>[6]</sup>提出辐射能量增强因子(radiated energy enhancement factor, REEF),并基于对全球 Mw $\geq$ 7.0 的 119 个逆冲大地震的研究,发现大地震破裂的复杂性具有系统性的区域特征,说明破裂复杂性受到持续的地质因素的强烈影响。宋金等<sup>[7]</sup>针对2013年岷漳地震和2014年景谷地震这两个矩震级相同(Mw 6.1)地震的相同地震烈度覆盖面积差异显著问题,采用区域 P 波资料,利用经验格林函数方法提取震源谱,计算并对比二者地震矩、地震波辐射能、视应力、破裂半径、应力降和辐射效率等震源参量,结果表明,震源破裂特征的显著差异导致岷漳地震单位地震矩释放的地震波辐射能更多,是导致两矩震级相同事件地震烈度差异显著的重要原因,震源参数能矩比可能会影响地震的破裂复杂性。Yin 等<sup>[8]</sup>利用动态时间规整(dynamic time warping)算法,测量震源时间函数的动态时间规整距离(DTW distance),通过比较不同地震之间震源时间函数动态时间规整距离的相似性,对全球 1995—2018 年 Mw $>$ 5.5 的 3529 个地震进行分类,发现不同类别事件的震源时间函数表现出不同程度的复杂度,表明震源时间函数复杂度与地震震级无关,逆冲事件的复杂度较低,复杂度较高的地震位于复杂构造区域中较小深度且震源机制为走滑机制的概率较大,很可能表现出较大的能矩比。

前人的工作多着重于从时间的维度研究地震破

裂的复杂性,有的着眼于辐射能量增强因子<sup>[6]</sup>,有的着眼于震源时间函数<sup>[8]</sup>,在对结果进行解释的时候,又回归到从区域地质和区域摩擦特性等空间性的角度去分析全球不同区域地震破裂的复杂性。

有限断层反演的位移结果可以直接给出地震破裂滑移的空间分布。如果直接使用断层面上破裂滑移信息定义一个表征地震破裂复杂度的标准,探究破裂复杂度与震源参数之间的关系,就有可能得到更加直接的结果和解释,还可以探究破裂滑移的空间复杂度与震源时间函数复杂度的异同。

本文通过分析有限断层反演得到的断面上的破裂滑移数据以及震源参数数据,研究震源参数对全球 Mw $\geq$ 7.0 大地震破裂复杂度的影响以及破裂复杂度随震源参数的变化规律,并分析大地震空间破裂复杂度的全球分布特征,探究不同区域地震破裂复杂度的影响因素。

## 1 数据和方法

有限断层反演所用的滑移数据以及矩震级、震源深度和震源机制数据来自美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)网站(<https://earthquake.usgs.gov>),地震波辐射能和地震矩数据来自地震学联合研究机构(Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS)网站(<http://ds.iris.edu>)。

本文获得 197 个发生于 1990 年 1 月至 2021 年 3 月的 Mw $\geq$ 7.0 大地震的有限断层反演结果,图 1 展示所有地震事件的空间分布,这些事件主要位于俯冲带和印度板块与欧亚板块碰撞带。

复杂度的衡量基于反演得到的断面上的滑移分布。滑移分布的反演受地震台站分布和地球速度模型等因素制约,存在非唯一性。使用不同的数据或方法反演得到的破裂分布不完全相同,通过比较同一地震的反演结果可知,不同结果的主要破裂特征具有较高的相似性,但滑移分布的具体位置有所差别。对于 2011 年 3 月 11 日的日本东北 Mw 9.1 地震,众多学者做了相关研究<sup>[9-15]</sup>,USGS 网站也给出该地震有限断层反演的滑移结果,所有的反演结果中都仅存在一个独立滑移单元。因此,本文忽略滑移分布的细节,取其主要特征——独立滑移单元的个数作为反映地震破裂空间复杂度的指标。

### 1.1 破裂复杂度的计算及分类方法

本文以断层面上独立滑移单元的数量作为衡量破裂复杂度的依据,将全球大地震进行分组。独立

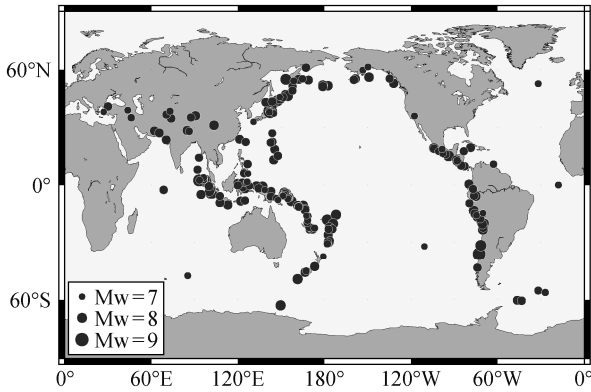


图1 本研究中所有地震事件的位置及震级分布

Fig. 1 Location and magnitude distribution of all events in this study

滑移单元指断层局部滑移极大值大于或等于全局滑移最大值的50%，并且围绕该局部极大值点向外辐射，呈现位移逐渐减小的破裂区域。断层面上独立滑移单元之间要有明显的分隔，通过遍历搜索的方式，得到独立滑移单元的数量。

独立滑移单元的数量与地震破裂复杂度正相关，并且，有限断层反演的位移结果不仅能反映断层面上破裂空间的复杂度信息，而且不会丢失破裂时间复杂度的信息。这是因为，震源时间函数是断层面上所有破裂单元在时间上的综合体现。大多情况下，独立滑移单元的数量与震源时间函数中突出峰的数量相关。图2展示不同复杂度地震的滑移分布及相应的归一化震源时间函数，可见两者具有很强的相关性，破裂中滑移单元个数越多，对应的震源时间函数峰值也越多。其中，归一化震源时间函数MR由地震矩率函数除以其峰值得到，地震矩率表示地震发生过程中地震矩的变化速率，单位为达因厘米每秒(dyne-cm/s)。

以断层面上独立滑移单元的数量为依据，将全球大地震分为4个组，组1~组4分别包含94, 57, 26和20个事件，对应的独立滑移单元数量分别为1, 2, 3和 $\geq 4$ 。从组1到组4，地震破裂复杂度不断增加。

## 1.2 与破裂复杂度相关的震源参数

地震破裂复杂度受到地震破裂时断层面附近的物理条件、构造环境中的应力状态的强烈影响。震源深度和震源机制与断层面附近的物理条件有密不可分的联系，震级、震源机制可能与能矩比以及构造环境中的应力状态有关。为了探究可能影响破裂复杂度的震源参数，本文统计每组事件的4个震源参数(震级、震源深度、震源机制和能矩比)在各个

区间的分布频率，探究地震破裂复杂度对这些参数的敏感度。

震源机制解的多参数特征不利于研究其与破裂复杂度的相关性。为了满足使用单个变量值来表征震源机制的需求，本文使用Shearer等<sup>[16]</sup>提出的参数化震源机制类型的方法来处理震源机制数据。设震源机制解中两个节点平面的滑动角rake分别为 $r_1$ 和 $r_2$ (单位为度)，通过以下公式计算参数化的震源机制类型：

$$r_1 = \min(\text{abs}(r_1), 180 - \text{abs}(r_1)) \times (r_1 / \text{abs}(r_1)), \quad (1)$$

$$r_2 = \min(\text{abs}(r_2), 180 - \text{abs}(r_2)) \times (r_2 / \text{abs}(r_2)), \quad (2)$$

$$r = \min(r_1, r_2), \quad (3)$$

$$f_{\text{ptype}} = r / 90. \quad (4)$$

$f_{\text{ptype}}$ 值将在-1~1之间变化，越靠近-1，事件的震源机制中正断层的成分越多；越靠近1，事件的震源机制中逆冲断层的成分越多；越靠近0，事件的震源机制中走滑断层的成分越多。

地震能矩比 $\tilde{e}$ (energy-moment ratio)是地震波的辐射能 $E_R$ 与地震释放的地震矩 $M_0$ 的比值，即单位地震矩辐射的地震波能量<sup>[7,17-19]</sup>：

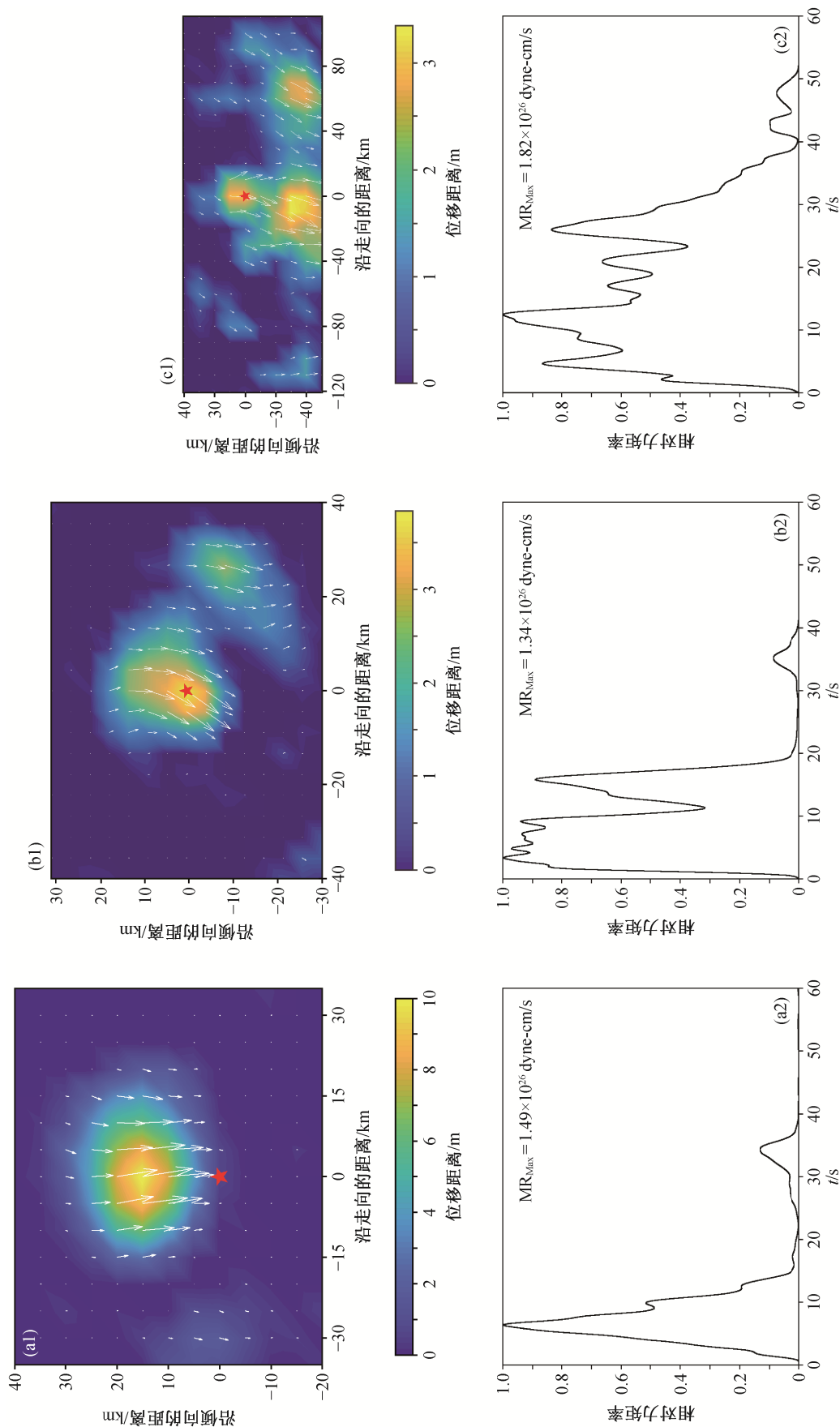
$$\tilde{e} = E_R / M_0. \quad (5)$$

本研究使用从IRIS网站获取的高频地震波辐射能 $E_R$ 和地震矩 $M_0$ 数据，根据式(5)计算事件的地震能矩比。

为了研究地震破裂复杂度在全球的空间分布，在地震分布较为集中的区域，画出地震断裂带的区域剖面图，探究这些区域中各组事件数量的占比，分析地震破裂复杂度的全球空间分布特征，结合地震发生的深度、区域地质构造、俯冲板块的断层耦合程度、板块的俯冲角度和俯冲年龄等进行解释。

## 2 破裂复杂度与震源参数的关系

首先统计4个组别的事件在矩震级 $7.0 \leq Mw < 7.5$ ,  $7.5 \leq Mw < 8.0$ ,  $8.0 \leq Mw < 8.5$ 和 $Mw \geq 8.5$ 这4个区间的相对占比，结果见图3。从组1到组4， $7.0 \leq Mw < 7.5$ 这类事件在每组中的占比分别为41.49%，24.56%，26.92%和5.00%，而 $Mw \geq 8.5$ 这类事件在每组中的占比分别为0, 1.75%, 0和15.00%。可见，对于震级相对较小的地震，高复杂度的占比较小；对于震级相对较大的地震，高复杂度占比较大。原因可能是，震级更大的地震，破裂断层的面积更大，可能包含的凹凸体更多，因此破裂就更复杂。



(a1)-(c1) 断层面的有限断层反演位移结果, 红色五角星为震中位置, 白色箭头表示位移的方向和相对大小; (a2)-(c2) 对应事件的归一化震源时间函数,  $MR_{Max}$  表示震源时间函数的峰值。(a1)和(a2) 2000年3月28日发生在日本地区火山岛的地震, 断层面上有一个独立滑移单元, 震源时间函数仅有一个突出峰; (b1)和(b2) 2020年3月25日发生在俄罗斯的地震, 断层面上有两个独立滑移单元, 震源时间函数有两个突出峰; (c1)和(c2) 1992年12月12日发生在印度尼西亚的地震, 断层面上有3个或以上的独立滑移单元, 震源时间函数有3个或以上的突出峰

图 2 断层面上有限断层反演位移结果以及对应的震源时间函数

Fig. 2 Displacement results of finite fault inversion and source time function

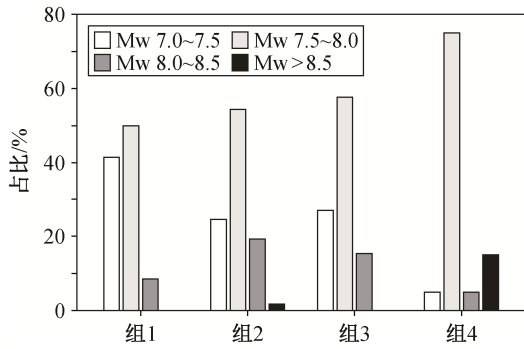


图3 组1~组4事件在各个矩震级区间的占比  
Fig. 3 Proportions of events in group 1 to 4 in each moment magnitude interval

图4显示4个组别事件在震源深度  $0 \leq \text{depth} < 30 \text{ km}$ ,  $30 \text{ km} \leq \text{depth} < 100 \text{ km}$  和  $\text{depth} \geq 100 \text{ km}$  这三个区间的相对占比。从组1到组4, 浅源( $0 \sim 30 \text{ km}$ )地震的占比逐渐增加, 分别为41.49%, 49.12%, 65.38%和75.00%, 表明破裂复杂度较高的地震位于浅层( $\leq 30 \text{ km}$ )地壳的概率较大。主要原因是, 地球浅层介质的横向非均匀性更强, 随着震源深度逐渐增加, 温度和压强升高, 介质非均匀性降低, 破裂复杂性也相应地降低。这与Yin等<sup>[8]</sup>的研究结果有相似之处, 他们发现, 震源时间函数复杂度更高的地震分布在浅层的概率更大。Houston<sup>[20]</sup>也发现, 震源时间函数的复杂度与深度相关, 在较小( $\leq 40 \text{ km}$ )的深度, 震源时间函数复杂度较大, 在 $> 40 \text{ km}$ 的深度, 震源时间函数复杂度骤降。

本文使用Shearer等<sup>[16]</sup>的方法计算所有事件的参数化震源机制的 $f_{\text{ptype}}$ 值, 据此将所有事件分为五类, 分别属于正断层机制( $-1.00 \leq f_{\text{ptype}} \leq -0.75$ )、正断层带走滑机制( $-0.75 < f_{\text{ptype}} \leq -0.25$ )、走滑断层机制( $-0.25 < f_{\text{ptype}} \leq 0.25$ )、逆冲断层带走滑机制( $0.25 < f_{\text{ptype}} \leq 0.75$ )和逆冲断层机制( $0.75 < f_{\text{ptype}} \leq 1.00$ )。

图5显示, 每种震源机制事件中, 组1事件的占比都较大。在走滑断层机制事件中, 较复杂事件(组3和组4)的占比为43.59%, 相对于其他震源机制中较复杂事件的占比(17.65%, 23.53%, 18.18%和11.76%)都显著地提升, 说明走滑机制占比较大的事件, 其地震破裂复杂度较高的可能性比较大。Yin等<sup>[8]</sup>和Houston<sup>[20]</sup>的研究结果也表明, 相对于逆冲事件, 走滑事件震源时间函数的复杂度更高。Danre等<sup>[21]</sup>通过研究子事件数量与主事件地震矩的线性关系, 也发现走滑事件的地震复杂度更大。浅层走滑地震破裂的发展在几何条件上受到顶部的地表和底部的地震发生深度的限制, 往往由分段的断层构成<sup>[22]</sup>。破裂的发展往往伴随着运动的高能滑动脉冲<sup>[23]</sup>, 并随着它们在各段之间的移动, 反复出现破裂加速和减速<sup>[5,24-25]</sup>, 因此可能是高能滑动脉冲使得走滑断层机制占比较大事件的破裂复杂度较高。

Convers等<sup>[26]</sup>和Denolle等<sup>[27]</sup>的研究结果表明, 能矩比与地震的规模无关。我们计算了所有事件的地震能矩比, 为了便于比较, 取地震能矩比的常用对数值进行分析。统计4个组的事件在 $\lg(E_R/M_0) \leq -14$ ,  $-14 < \lg(E_R/M_0) \leq -13$ ,  $-13 < \lg(E_R/M_0) \leq -12$ 和 $\lg(E_R/M_0) > -12$ 这4个能矩比对数区间的分布, 结果如图6所示。4组事件在地震能矩比这个震源参数上没有表现出系统性差异, 说明破裂复杂度可能与地震能矩比无关。Ye等<sup>[6]</sup>研究全球 $M_w \geq 7.0$ 的119个逆冲大地震的破裂复杂度, 也发现能矩比不具有明显的区域变化或震级依赖性, 与破裂复杂度无关。但是, Yin等<sup>[8]</sup>的研究结果表明, 震源时间函数复杂度较大的事件通常具有更粗糙的震源时间函

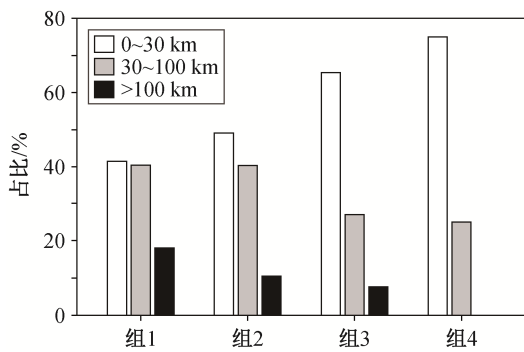


图4 组1~组4事件在各个震源深度区间的占比  
Fig. 4 Proportions of events in group 1 to 4 in each depth interval

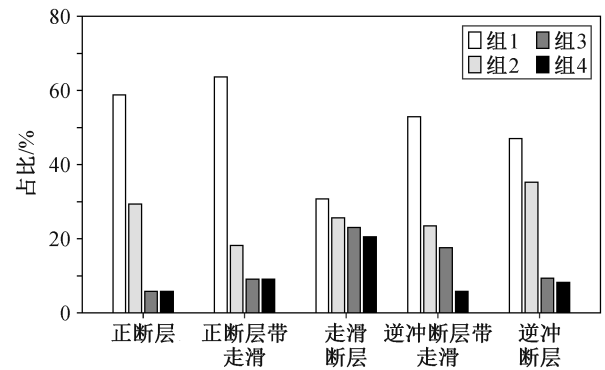


图5 各类震源机制事件中组1~组4事件的占比  
Fig. 5 Proportions of groups 1 to 4 in various focal mechanism

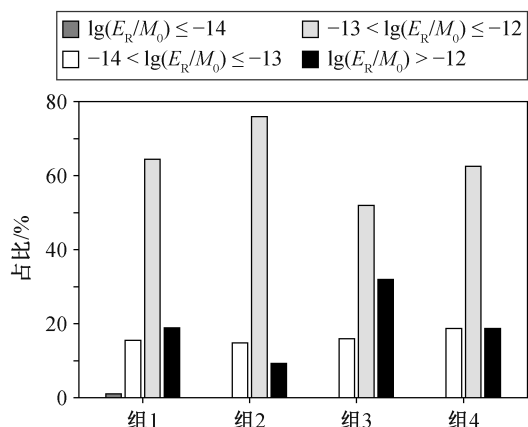


图 6 组 1~组 4 事件在各个能矩比区间占比  
Fig. 6 Proportion of events in groups 1 to 4 in each energy-moment ratio logarithmic interval

数,并且在统计学意义上具有更大的能矩比。

综上所述,震源深度较浅的走滑断层上发生复杂度高的地震概率更大,地震的复杂度与地震的能矩比无明显的关联。

### 3 破裂复杂度空间分布特征

为了进一步探究不同区域之间复杂事件分布的异同,根据地震的分布,将研究区域划分为 8 个剖面(A-A<sub>1</sub>, B-B<sub>1</sub>, C-C<sub>1</sub>, D-D<sub>1</sub>, E-E<sub>1</sub>, F-F<sub>1</sub>, G-G<sub>1</sub>和 H-H<sub>1</sub>)。剖面位置见图 7,其震源深度、震级和组别信息见图 8。这 8 个剖面的构造特征和区域事件破裂复杂度的空间分布特征大致可以分为下述 3 类。

第一类是板块之间简单碰撞产生的俯冲带,板块交界处的滑动速率和方向较为一致。在这种情形下,以低复杂度事件为主,高复杂度事件较少,包括剖面 A-A<sub>1</sub>, B-B<sub>1</sub>, C-C<sub>1</sub>和 E-E<sub>1</sub>附近的区域。剖面 A-A<sub>1</sub>附近区域,纳斯卡板块向南美西部秘鲁-智利海沟附近的南美板块下方俯冲,以 70~80 mm/a 的速度向南美板块的东北偏东方向移动。该区域属于组 3 和组 4 的事件占 15.00%,其中只有 1 个事件属于组 4。剖面 B-B<sub>1</sub>附近区域,科科斯板块以 70~80 mm/a 的速度,相对于加勒比板块和北美板块向东北移动。该区域属于组 3 和组 4 的事件占 12.00%,有两个事件属于组 4。剖面 C-C<sub>1</sub>附近区域,太平洋板块俯冲到千岛-堪察加半岛海沟和日本海沟附近的大陆板块之下,以约 80 mm/a 的速度向西北偏西移动,与鄂霍次克微板块汇合。该区域属于组 3 的事件占 14.29%,没有属于组 4 的事件。剖面 E-E<sub>1</sub>附近区域,太平洋板块俯冲到菲律宾海板块下方,以

约 40 mm/a 的速度相对于菲律宾海板块向西移动。该区域所有事件都属于低复杂度事件。

第二类是多板块汇聚处,或板块交界处的滑动速率和滑动方向在整个区域内存在差异,复杂事件的占比较大,主要包括 F-F<sub>1</sub>, G-G<sub>1</sub>和 H-H<sub>1</sub>附近的区域。剖面 F-F<sub>1</sub>附近的苏门答腊地区位于印度-澳大利亚板块与欧亚板块边界的碰撞俯冲区,构造活动十分活跃。该板块交界处北部区域,澳大利亚板块以约 40 mm/a 的速度相对于巽他板块向东北方向移动;该板块交界处南部区域,澳大利亚板块以约 60 mm/a 的速度相对于巽他板块向北移动。在苏门答腊地区,深部纵横交错的苏门答腊大断裂分割为很多小段,不同微断裂的滑动速率和滑动方向有差异,从其西北部区域到东南部区域,滑动速率逐渐减小<sup>[28-29]</sup>。该区域属于组 3 和组 4 的事件占 35.00%,与第一类区域相比,组 3 和组 4 的事件占比明显增大。数量众多的滑动速率不同的微断裂类似具有不同相对运动速率和运动学特征的微板块,使得该区域的地震破裂复杂度相对较高。类似的情况也发生在剖面 H-H<sub>1</sub>附近区域。该区域从北往南,太平洋板块分别在汤加海沟、克马德克海沟和希库朗伊俯冲带以约 80, 60 和 40 mm/a 的速度相对于澳大利亚板块向西俯冲,太平洋板块与澳大利亚板块之间的汇合速度自北至南逐渐减小,区域内部板块交界处滑动速率的差异可能对破裂复杂度产生系统性的影响。该区域属于组 3 和组 4 的事件占 23.53%,有两个事件属于组 4。剖面 G-G<sub>1</sub>附近是多板块(印度-澳大利亚板块、欧亚板块、西太平洋板块和菲律宾板块)交界的区域,构造背景极其复杂,数量众多的微板块(莫卢卡海微板块、伯德斯海德微板块、俾斯麦板块,卡罗琳板块和伍德拉克微板块、所罗门海微板块和南比斯马克微板块)的边界表现出不同的相对运动速率和运动学特征<sup>[30]</sup>。该区域属于组 3 和组 4 的事件占 24.07%。

第三类是大陆内部的强烈挤压地带,包括剖面 D-D<sub>1</sub>附近的区域,属于组 3 和组 4 的事件占比较大。该区域西南部是阿拉伯板块与欧亚大陆板块的交界处,阿拉伯板块以约 30 mm/a 的速度相对于欧亚板块向北移东,板块间的汇聚推动扎格罗斯山脉和高加索山脉隆升。该区域的东南部是印度-澳大利亚板块与欧亚大陆板块的交界处,印度板块相对于欧亚大陆板块以约 46 mm/a 的速度向北移动,这种汇聚推动喜马拉雅山脉和青藏高原以每年约 10

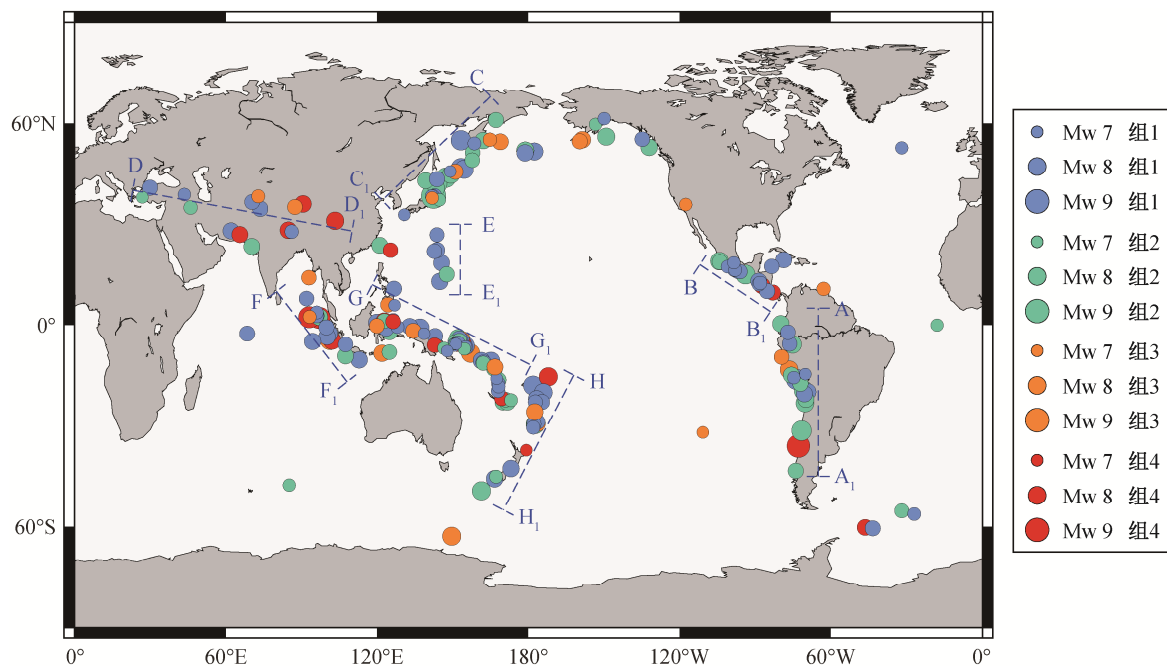


图 7 组 1~组 4 事件的位置分布及各剖面的位置

Fig. 7 Location distribution and magnitude of events in group 1 to 4 and location of all sections

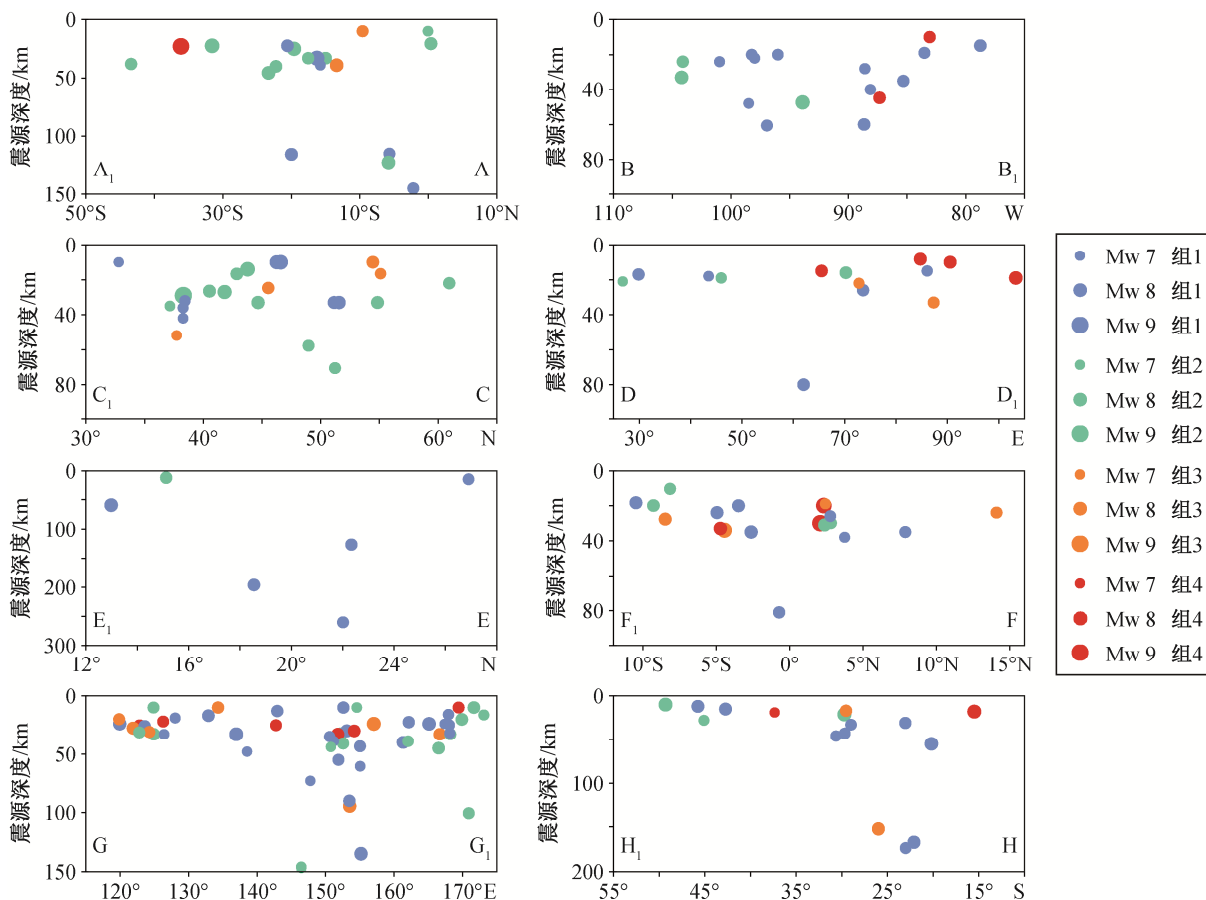


图 8 8 个剖面的震源深度、震级和组别信息

Fig. 8 Depth, magnitude and group information of earthquakes in eight sections

mm/a 的速度隆升。大陆内部板块间的强烈挤压很可能导致区域内部地震破裂复杂度较高。该区域属于组 3 和组 4 的事件占 40.00%，其中有 4 个事件属于组 4。

综上所述，地震破裂复杂度的空间分布与构造环境的变化有关。因此，我们认为地震破裂复杂度可以在一定程度上反映区域构造环境的复杂性。关于剖面 A-A<sub>1</sub>, B-B<sub>1</sub>, C-C<sub>1</sub>, E-E<sub>1</sub>, F-F<sub>1</sub> 和 G-G<sub>1</sub> 附近区域，本文研究结果与 Yin 等<sup>[8]</sup>对震源时间函数复杂度的研究结果相似；关于剖面 D-D<sub>1</sub> 和 H-H<sub>1</sub> 附近区域，本文研究结果与 Yin 等<sup>[8]</sup>相反，可能说明某些情况下地震的时间复杂度与空间复杂度并不一致；关于剖面 B-B<sub>1</sub>, F-F<sub>1</sub> 和 G-G<sub>1</sub> 附近区域以及剖面 C-C<sub>1</sub> 附近区域的北部，本文研究结果与 Ye 等<sup>[6]</sup>一致。本文研究结果与 Ye 等<sup>[6]</sup>研究结果的异同，可能主要是由于 Ye 等<sup>[6]</sup>对区域的划分更细，而本文给出的是较大尺度区域内事件的系统性特征。

## 4 结论

本文统计了 1990 年以来全球大地震(Mw≥7.0)的有限断层反演滑移数据和震源参数数据，根据独立滑移单元的数量进行分组，用来衡量地震破裂复杂度。通过研究破裂复杂度与震级、震源深度、震源机制以及地震能矩比之间的关系，并探究破裂复杂度的全球空间分布以及区域特征，得到以下结论。

1) 矩震级很大的事件(Mw≥8.5)，地震破裂复杂度更高。

2) 破裂复杂度较高的地震分布在浅层地壳(≤30 km)内的概率较大，并且随着震源深度增加，破裂复杂度对震源深度的敏感性逐渐消失。

3) 走滑断层机制占比较大的事件，地震破裂空间复杂度趋于更高。

4) 地震破裂空间复杂度与地震能矩比之间没有明确的关系。

5) 地震破裂复杂度可以在一定程度上反映构造环境的复杂性。在简单碰撞的板块俯冲带，板块交界处的滑动速率和滑动方向较为一致，这种情形下以比较简单的事件类型为主；在多个板块交界处以及大陆内部碰撞造山带，地震破裂复杂度相对更高。

地震破裂的复杂度受区域构造、应力分布以及断层非均匀因素影响，在构造环境复杂、震源较浅

的走滑断层带以及多个板块汇聚的区域，更容易发生破裂复杂度高的地震。今后的工作中，需要结合震源动力学的模拟，开展更深入的研究。

## 参考文献

- [1] Yagi Y, Fukahata Y. Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake and absolute elastic strain release. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L19307
- [2] Li Y G, Aki K, Vidale J E, et al. Fine structure of the landers fault zone: segmentation and the rupture process. *Science*, 1994, 265: 367–370
- [3] Ammon C J, Ji C, Thio H K, et al. Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, 2005, 308: 1133–1139
- [4] Meng L, Ampuero J P, Stock J, et al. Earthquake in a Maze: compressional rupture branching during the 2012 Mw 8.6 Sumatra earthquake. *Science*, 2012, 337: 724–726
- [5] Cesca S, Zhang Y, Mouslopoulou V, et al. Complex rupture process of the Mw 7.8, 2016, Kaikoura earthquake, New Zealand, and its aftershock sequence. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 478: 110–120
- [6] Ye L, Kanamori H, Lay T. Global variations of large megathrust earthquake rupture characteristics. *Science Advances*, 2018, 4(3): eaao4915
- [7] 宋金, 陈运泰, 张勇. 2013 年岷漳地震和 2014 年景谷地震的能矩对比研究. *地球物理学报*, 2020, 63(9): 3324–3337
- [8] Yin J, Li Z, Denolle M. Source time function clustering reveals patterns in earthquake dynamics. *Seismol Res Lett*, 2021, 92(4): 2343–2353
- [9] Iinuma T, Ohzono M, Ohta Y, et al. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) estimated based on GPS data — was the asperity in Miyagi-Oki ruptured?. *Earth Planet & Space*, 2011, 63(7): 643–648
- [10] Ito T, Ozawa K, Watanabe T, et al. Slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake inferred from geodetic data. *Earth Planet & Space*, 2011, 63(7): 627–630
- [11] Ozawa S, Nishimura T, Suito H, et al. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, 2011, 475: 373–376
- [12] 邵志刚, 武艳强, 江在森, 等. 基于 GPS 观测分析日本 9.0 级地震同震位错与近场形变特征. *地球物*

- 理学报, 2011, 54(9): 2243–2249
- [13] Hashimoto C, Noda A, Matsu'ura M. The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity. *Geophysical Journal International*, 2012, 14: 1–5
- [14] 王阅兵, 金红林, 付广裕, 等. 利用 Yabuki & Matsu'ura 反演方法计算 2011 年日本东北地区太平洋海域 Mw 9.0 级地震同震滑动分布. *地球物理学报*, 2012, 55(8): 2551–2560
- [15] 王振, 孟国杰, 横田佑助, 等. 利用 1-Hz GPS 波形数据反演 2011 年日本东北大地震震源破裂过程. *地震*, 2013, 33(3): 13–23
- [16] Shearer P M, Prieto G A, Hauksson E. Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California. *J Geophys Res*, 2006, 111: B06303
- [17] Ben-Menahem A, Singh S J. *Seismic waves and sources*. New York: Springer-Veslag, 1981
- [18] Kanamori H, Heaton T H. Microscopic and macroscopic physics of earthquakes // Rundle J B, Turcotte D L, Klein W. *Geocomplexity and physics of earthquakes*. *Geophysical Monograph Series*, 2000, 120: 147–163
- [19] Kanamori H, Rivera L. Energy partitioning during an earthquake // Abercrombie R, McGarr A, Kanamori H. *Earthquakes: radiated energy and the physics of faulting*. *Geophysical Monograph Series*, 2006, 170: 3–13
- [20] Houston H. Influence of depth, focal mechanism, and tectonic setting on the shape and duration of earthquake source time functions. *J Geophys Res*, 2001, 106(B6): 11137–11150
- [21] Danre P, Yin J X, Lipovsky B P, et al. Earthquakes within earthquakes: patterns in rupture complexity. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 7352–7360
- [22] Klinger Y. Relation between continental strike-slip earthquake segmentation and thickness of the crust. *J Geophys Res*, 2010, 115: B07306
- [23] Kaneko Y, Lapusta N. Supershear transition due to a free surface in 3-D simulations of spontaneous dynamic rupture on vertical strike-slip faults. *Tectonophysics*, 2010, 493: 272–284
- [24] Kanamori H, Thio H K, Dreger D, et al. Initial investigation of the Landers, California, earthquake of 28 June 1992 using terrascope. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19: 2267–2270
- [25] Peyrat S, Olsen K, Madariaga R. Dynamic modeling of the 1992 Landers earthquake. *J Geophys Res*, 2001, 106(B11): 26467–26482
- [26] Convers J A, Newman A V. Global evaluation of large earthquake energy from 1997 through mid-2010. *J Geophys Res*, 2011, 116: B08304
- [27] Denolle M A, Shearer P M. New perspectives on self-similarity for shallow thrust earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121: 6533–6565
- [28] Bellier O, Bellon H, Sebrier M, et al. K-Ar age of the Ranau Tuffs: implications for the Ranau caldera emplacement and slip-partitioning in Sumatra (Indonesia). *Tectonophysics*, 1999, 312(2): 347–359
- [29] Natawidjaja D H, Sieh K, Galetzka J, et al. Interseismic deformation above the Sunda Megathrust recorded in coral microatolls of the Mentawai islands, West Sumatra. *J Geophys Res*, 2007, 112: B02404
- [30] Bird P. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, 4(3): 1027