地震科技前沿快报

2022 年第 12 期（月刊总第 47 期）

中国地震局科学技术委员会　　中国科学院兰州文献情报中心
中国地震局科技与国际合作司　　中国科学技术信息研究所

本期概要

1、利用瞬时地震破裂函数基于应力预测诱发地震活动：在格罗宁根气藏的应用

加州理工学院的研究人员针对荷兰格罗宁根气田，以气藏的几何形状、详细的生产历史信息、有效的地面沉降测量结果和高质量的地震活动数据为基础，利用瞬时地震破裂函数基于应力预测诱发地震活动。该建模框架计算效率高，可以测试估计应力变化的建模假设的敏感性，不需要有关可能被激活断层的位置和方向的先验知识。该方法在原则上适用于任何环境下的诱发地震活动，只要有形变和地震活动数据。

2、三轴注入实验中断层特征和地震响应之间的关系

为了研究 CO_2 注入位置诱发微震的机理，研究人员对有断裂的砂岩开展了大尺度的三轴块体实验。实验由不同差应力条件下的注入实验构成，同时监测和记录了孔隙压和声发射。结果表明，断层面的碾磨和平化与断层面 50 mm 内声发射的时空分布有关，约 65%的声发射发生在小孔径区域内，相邻区域具有更厚的断层泥、更宽的孔径，相比于原岩发生了两倍的

颗粒粒径降低。该研究提供了断层表面演化的概念性理解，有助于地震滑移建模，已深入理解断层特征和地震发生之间的关系。

3、西印度-欧亚碰撞带应力分布及其运动学和地震构造意义

西印度-欧亚碰撞带，位于北纬29°—37°和东经72°—81°之间，经历了许多破坏性地震。地壳应力场制约着一个地区的运动学和地震构造。以更全面、更稳健和更分散的目录成像当前应力场对该区域具有重要意义。对该区域及其局部应力场和区域应力场进行研究，有助于了解不同应力场之间的相似性和差异性。文章通过对324个震源机制进行应力的迭代联合反演，评价了印度-欧亚碰撞带西部的应力分布。西印度-欧亚碰撞带的应力分布不均匀的，地震危险性亦分布不均，这有助于今后更好地进行地震危险性评估。

利用瞬时地震破裂函数基于应力预测诱发地震活动：在格罗宁根气藏的应用

加州理工学院的研究人员以荷兰格罗宁根（**Groningen**）气田为对象测试了一种新方法，以评估由于天然气开采引起的应力变化，并预测诱发地震活动。分析过程中，充分利用了气藏的几何形状、详细的生产历史信息、有效的地面沉降测量结果和高质量的地震活动数据。半解析格林函数的卷积被用于计算储层内外的应力变化，库仑应力变化在储层顶部和底部附近（此处储层被断层偏移）最大。为了评估地震概率，研究人员使用标准莫尔-库仑破坏准则来假设瞬时成核和非临界初始应力。过剩初始强度（**initial strength excess**）的分布，即初始库仑应力与破裂时临界库仑应力之差，被视为一个随机变量，并根据观测值和应力变化模拟情况进行估计。在生产开始后近 **30** 年，地震活动指数上升，为初始强度的分布提供了约束。研究人员假设广义的帕累托分布或高斯分布都能很好地再现地震活动的滞后性和指数性起始，但没有发现任何证据可表明格罗宁根的诱发地震活动已过渡到稳态。该建模框架计算效率高，可以测试估计应力变化的建模假设的敏感性。关于模型准确表示物理过程的能力的不确定性，预测是稳健的，且不需要有关可能被激活断层的位置和方向的先验知识。该方法在原则上适用于任何环境下的诱发地震活动，只要有形变和地震活动数据可用于校准模型。相关研究成果发表在 **2022** 年 **9** 月的 ***Earth and Planetary Science Letters***。

位于荷兰东北部的在格罗宁根气田，在生产开始近 30 年后检测到一些低震级的地震，其中一些浅层事件造成了非结构性破坏，并引发公众关注。诱发地震活动引起的担忧促使人们采取大量行动，以监测地震活动和

储层压实引起的地表变形，并开发关于储层作业引发地震活动的定量分析模型。

研究人员利用这个丰富的数据集来探索不同的模拟策略，以预测诱发地震活动性。研究人员遵循以前格罗宁根诱发地震活动性研究中所采用的既定范式，即地震活动由库仑应力变化驱动。利用受生产数据和地表变形测量数据约束的有关储层压实的改进模型，研究人员测试了不同的策略，以评估应力变化。

为了估计断层的破裂概率，需要模拟应力重分布，其主要由储层压实和储层内外孔隙压力变化（由孔隙弹性效应导致）引起。研究人员使用格林函数方法，但采用应变-体积公式，而不是点源公式。变形储层被表示为一系列具有孔隙弹性变形的立方体，此外，假设地震可以发生在未知断层上。研究使用了由天然气生产商 NAM 公司（Nederlandse Aardolie Maatschappij）开发的压力损耗模型。用水平维度为 500 m×500 m 的长方体表示储层，每个长方体的深度和高度设置为该 500 m×500 m 区域内储层的平均深度和厚度。考虑到地震可能在储层内部成核，可能在下伏岩层，也可能在上覆岩层，研究人员评价了储层内外的应力变化。

完整岩石的破裂点或现存断层的活化点使用莫尔-库仑破裂准则进行评估。为了给地震活动性预测提供信息，需采用不同的应力变化采样策略。研究人员测试了这些可能的采样方案，选择长方体中心的更稳健采样方案作为参考应力模型。此外，为了避免地震活动性预测与储层模型中所代表的特定断层集过于紧密地联系在一起，研究人员使用 3.2 km 标准偏差的高斯核函数对应力场进行平滑处理。

研究人员还测试了关于采样点深度的不同方案。考虑到不同深度的应力变化模式相似，研究人员将地震活动性与储层上方的单一参考高程联系

起来。鉴于震源深度分布的峰值正好在储层顶部上方，研究人员根据应变-体积模型，通过计算储层顶部上方 5 m 处的最大库仑应力变化，来估计地震活动性。

为了模拟地震活动在年至多年时间尺度上的演化，使用由模型计算的应力变化和观测到的地震活动性来估计过剩初始强度——使断块（fault patch）形成破裂所需的库仑应力变化。研究人员对导致最大库仑应力变化的断层方向进行了计算。根据极值理论，破裂概率分布的尾部可以用一个广义的帕累托分布表示，按此可改进破裂概率的计算方法。假如不同断块上的初始库仑应力值是独立的、分布相同的随机值，那么，根据中心极限定理，可以假设过剩初始强度呈高斯分布。最后，研究确定了模拟库仑应力变化与区域地震活动性的最佳拟合破裂函数的参数。

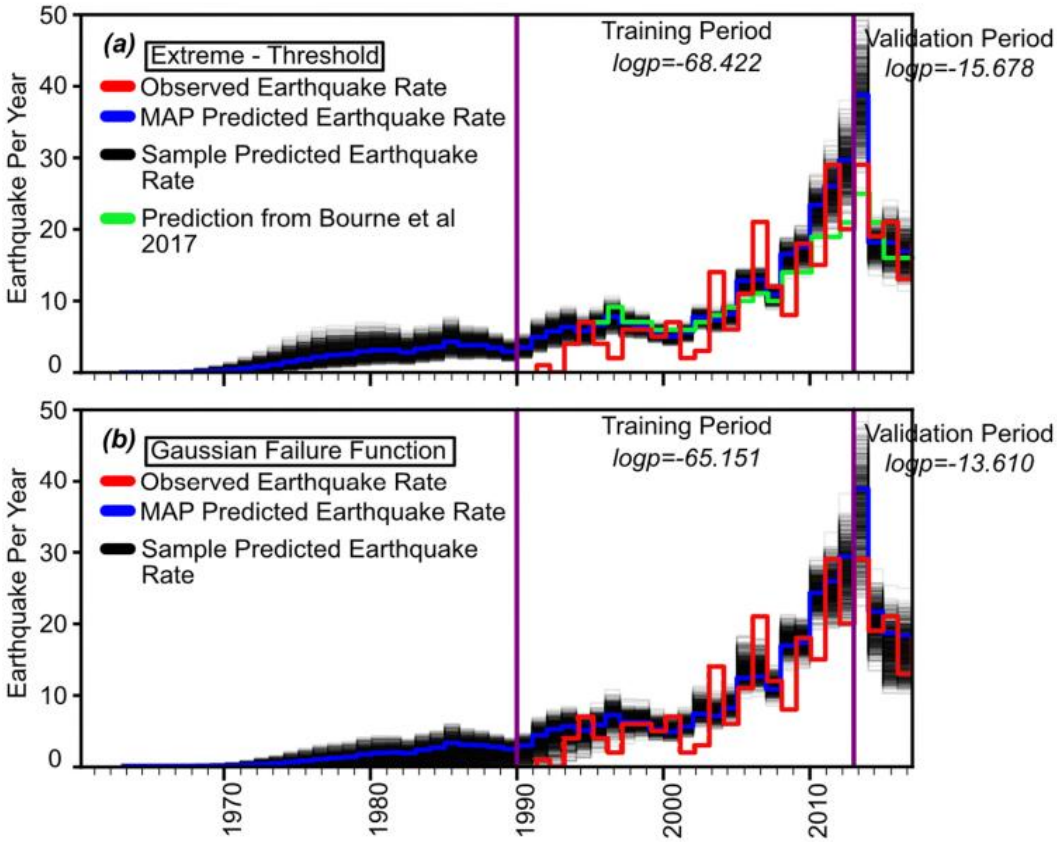

图 1　观测到的和预测的地震活动率比较

研究人员将地震活动性与在储层顶部以上 5 m 处计算的应力变化联系起来，结果显示，预测对特定参考深度的选择不敏感。与观测到的地震的时间演化做比较后，发现由极限阈值模型和高斯破裂模型推导出的地震活动率之间的差异不显著。后者预测得到了较长的地震活动延迟，要比前者获得的地震发生时间晚三年。结果证实，给定地震的震级-频率分布可以很好地用古登堡-里克特定律描述，这两个模型都符合 1990 年以前没有地震活动报告的事实。

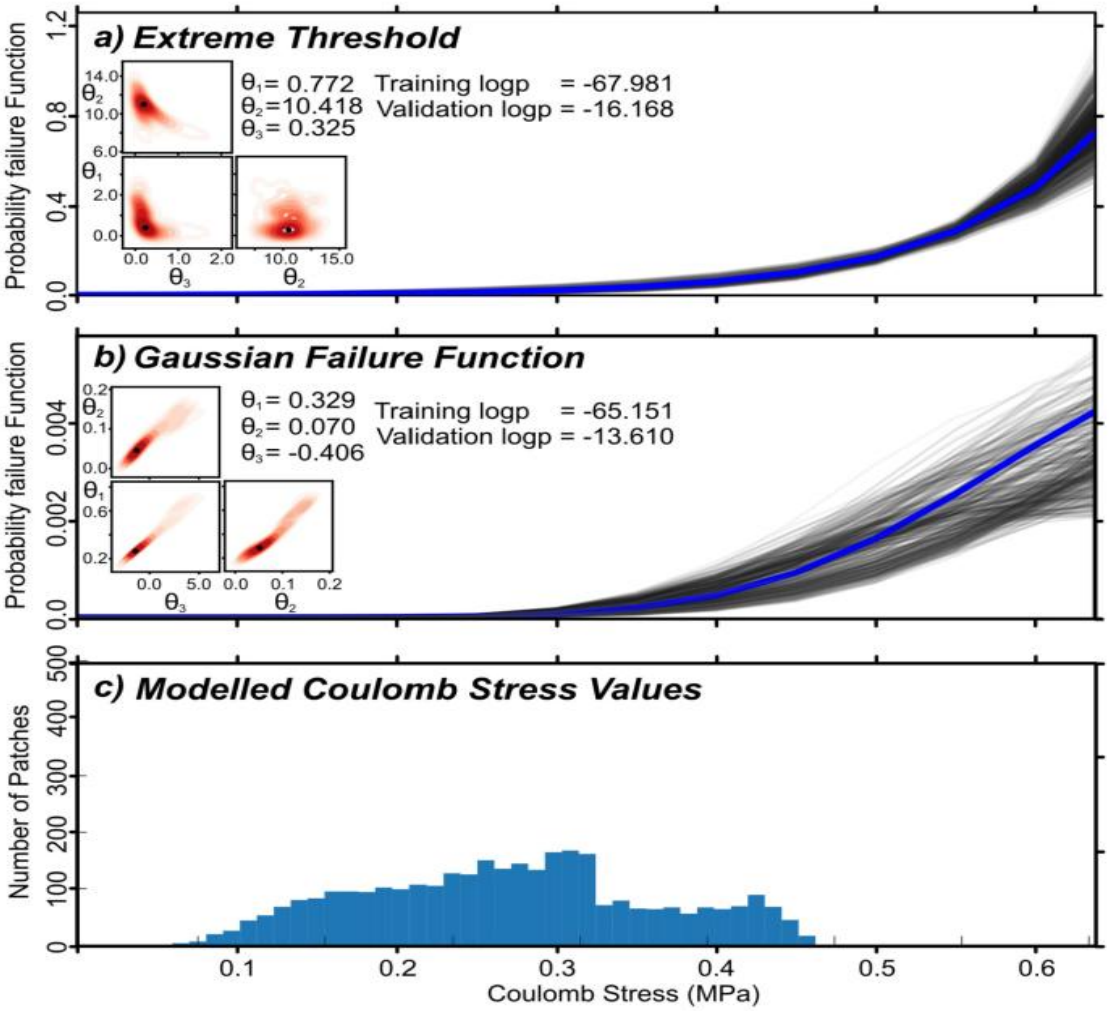

图 2　优化后的破裂概率函数

通过改变应力场的采样位置，并使用最大库仑应力变化或为断层方向而计算的库仑应力变化，研究人员发现所有模型在验证期内表现相似，也

产生相似的预测。将计算的震区库仑应力变化与反演的破裂函数进行对比后发现，即使是高斯模型，地震活动性数据也主要约束分布的尾部。一些可接受的高斯模型显示出一个反转，表明开始向一个更稳定的机制过渡。在任何情况下，两种模型参数在观测值约束范围内均产生了相似的破裂函数。这些分布取决于输入应力场，因此，如果选择另一个应力场作为输入，则应力场的实际值将被重置。关键在于，应力阈值的输入为解释气体开采的地震活动响应滞后提供了一种合理的方法。另一个关键点是，该阈值的随机分布可以很好地解释地震活动性指数的初期上升。另一种表述是，稳态以下的断层群的成核受速率和状态摩擦的控制。简而言之，初始状态变量的分布决定了速率和状态模型中地震的时间分布。

研究人员比较了模型预测的地震概率的空间分布和观测到的地震活动。通过测试应变-体积和薄板应力再分布模型，以及极限阈值和高斯破裂模型，得出了四种预测。下图显示了除参考模型外，各种模型预测的和观测到的地震活动性。所有这些模型都根据观测结果进行了校正。无论采用应变-体积公式还是薄板公式计算应力再分布，高斯和极限阈值破裂模型都预测了相似的地震概率空间分布。对于薄板公式，与极限阈值破裂准则相比，高斯破裂函数在储层西北部产生了更高的破裂概率。当输入应力场没有被平滑，并且在长方体中心或应力变化最大的长方体边缘采样时，对时间的预测很好。

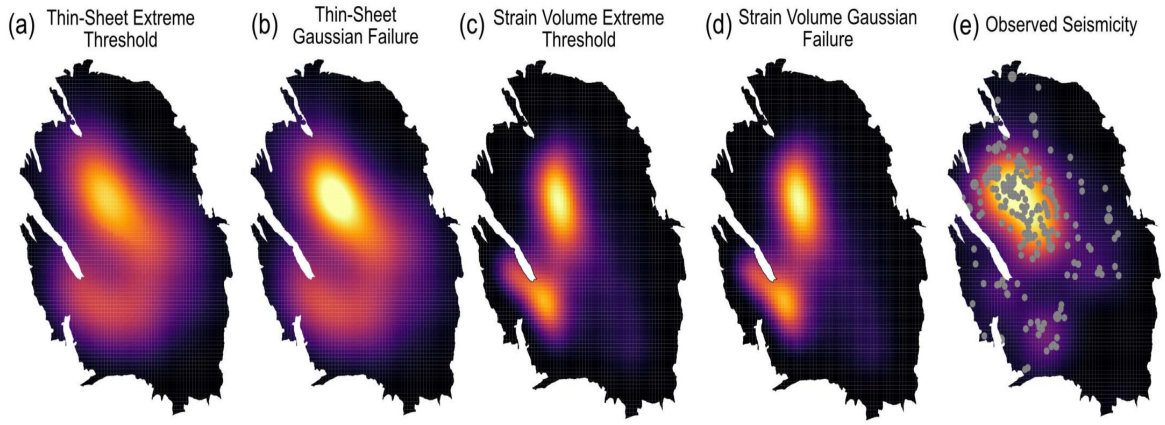

图 3　观测到的地震活动性与各种模型地震概率的空间分布对比

需要注意的是，对输入应力场和参考高程的选择，将使模型的最佳拟合参数产生显著差异。在参考模型中，地震位置的库仑应力变化可能被低估了。根据观测到的地震活动性对模型参数进行校准，可补偿这种偏差。总体而言，该方法对地震活动概率的预测有一定的价值，但模型参数存在偏差。

该研究中的模拟既考虑了储层内外的应力再分布，也考虑了储层被断层所偏移位置的应力局部化。对这一过程进行分析的重要性已在以前的一些研究中得到证明。在断层偏移储层形成的不连续面附近，储层顶部或底部的应力变化最大。模型与地震震源倾向于集中在盖层的观测结果是一致的，但地震破裂不需要局限于盖层，它可以扩展到储层或上覆岩层。最重要的是，一旦对模型参数进行校准（以符合观测结果），无论地震是在储层内部还是在储层外部形成核，预测结果几乎是相同的。

来源：Smith J D, Heimisson E R, Bourne S J, *et al*. Stress-based forecasting of induced seismicity with instantaneous earthquake failure functions: Applications to the Groningen gas reservoir. Earth and Planetary Science Letters, 2022, 117697.

三轴注入实验中断层特征和地震响应之间的关系

为了研究 CO_2 注入位置诱发微震的机理，研究人员对有断裂的 Castlegate 砂岩开展了大尺度的三轴块体实验。实验由不同差应力条件下的注入实验构成，同时监测和记录了孔隙压和声发射。在实验中，发生了约 33 000 次声发射和约 14 mm 的水平位移。为了解声发射响应并确定声发射附近断层的特征，研究人员通过激光扫描对实验前后每一块体的断层面地貌、断层孔径（fault aperture）以及断层泥厚度进行建模。同时，研究人员还对平行和垂直于滑移方向的断层面粗糙度进行表征。结果表明，断层面的碾磨和平化与断层面 50 mm 内声发射的时空分布有关，约 65% 的声发射发生在小孔径区域内，相邻区域具有更厚的断层泥、更宽的孔径，相比于原岩发生了两倍的颗粒粒径降低。该研究提供了断层表面演化的概念性理解，有助于地震滑移建模。相关研究成果于 2022 年 9 月发表在 *Journal of Structural Geology*。

CO_2 在卤水层中的封存是碳捕获与封存项目的重要方面，并被广泛认为是减少温室气体排放的可行技术。CO_2 的封存会由于注入时孔隙压的变化而导致断层面上的应力状态变化，进而诱发地震。大多数 CO_2 封存位置都有诱发微震的报道。美国伊利诺伊盆地 Decatur 项目的第一阶段在三年内将 100 万吨 CO_2 注入了寒武纪 Simon 山砂岩中。在 CO_2 注入开始后一个月，开始检测到微震事件，并持续到暂时性或永久性的停止期。注入井的井压比静压高 2.7 MPa，比破裂压力低 9 MPa。距注入井约 330 m 处，监测井砂岩中的最大孔隙压增加了约 1 MPa。即使如此低的孔隙压增加，也有近 4 800 个微震在距注入井 380~2500 m 的范围内发生。

断层/破裂表面的特征对地震周期或断层滑移中的应力分布、聚集和耗散具有重要影响。断层面地貌会影响其物理和水文性质。在 CO_2 注入过程

中，由于流体增压，剪应力增加，断层面上较高位置的应力易集中，从而发生破裂，同时，应力也会再分配到相邻的凹凸体。最终，断层面剪切强度下降，高强度的凹凸体破裂，引起准静态或者动态的滑动，进而改变断层面性质。

研究需要选择与Decatur项目注入位置性质一样的砂岩来表征其性质。Simon山砂岩具有颗粒支撑结构，由80%石英，13%长石，3%方解石和3%黏土矿物组成，孔隙度达27.5%，渗透率约1066 mD，岩石强度约为22~27 MPa。与之最接近的是科罗拉多州的Castlegate砂岩，因此，其被用作实验材料。

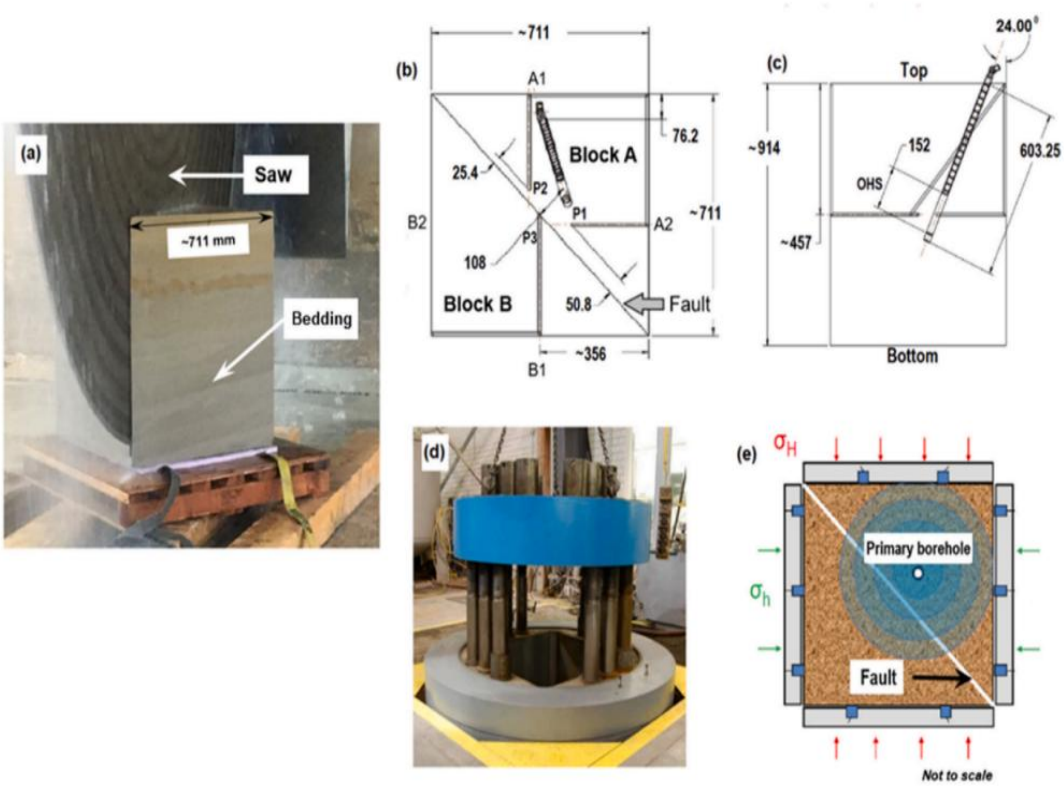

图1　实验设计

Castlegate砂岩的孔隙度和渗透率分别为27~29%和400~1400 mD，主要由86%石英，7%长石，2%方解石和5%黏土矿物组成。岩石强度约为

18~21 MPa。立方块体沿对角线切割成两半，之后通过细磨来降低锯切过程中的沟槽，并洗去岩石碎屑、晾干。最后，利用手持激光扫描仪量化断层面地貌。为了注入流体，在上部块体中心位置以一定角度钻取了一个距断层面 25 mm，603 mm 深、直径为 27 mm 的钻孔。在钻孔底部放置一个类似物来降低注入压力的应力集中。一个外径和内径分别为 25 mm 和 19 mm 的钢管被放入钻孔来制造一个 152 mm 的开放孔。同时，在 A1、A2 和 B1 钻孔来测量孔隙压。实验在三轴实验仪器上进行，围压设置为 15 MPa，注入之前，未发生剪切。

本研究中，研究人员分析了 Castlegate 砂岩中断层的四个性质：地貌、孔径（跨过断层两个块体之间的距离）、断层泥厚度和断层泥粒径，以进一步理解断层性质如何影响断层滑动和地震响应。

22 次注入实验在两天分两组连续完成。第一天用时 6.7 小时，完成 1—10 次实验，第二天用时 9.6 小时，完成 11—22 次实验。晚上，围压释放至 3.4 MPa，注入压力降低至零。每次注入都包含三个阶段，第一阶段差应力逐步增加，第二阶段流体注入，第三阶段流体释放。在 1—10 和 11—22 次注入实验中，分别发生了 22 353 次和 11 378 次声发射。约 90%的声发射在每次注入实验的第一阶段发生。2 天的实验之后，测得 1—10 和 11—22 次实验沿断层表面的水平位移分别为 3 mm 和 11 mm。声发射多与孔隙流体的高压注入有关，约 90%的声发射与水力致裂直接相关。

所有的声发射沿整个断层分布，从平行于断层的视角观察，声发射分布在断层面 50 mm 以内。为了研究断层面地貌对声发射位置的影响，研究人员利用激光扫描获得了断层面地貌、断层孔径和断层泥厚度。实验前的地貌模型表明，A、B 块体的最高和平均高程分别为 700 μm 和 319 μm，800 μm 和 437 μm。实验后 A 的平均高程增加了 6%，B 减少了 26%。

为了了解碾磨和平化过程的细节,分别对上部块体做了 3 个地形剖面。剖面分析表明，实验后断层面变得更平，但更粗糙。谱方法被用作描述断层面分形规律：

$$P(f) = C * f^{-\beta}$$

β表示粗糙度的变化，C 表示整个剖面的变化。另外，地形剖面也通过均方根（RMS）来表征。在 A 块体的断层面上，平行于滑移方向的II剖面，β值由于粗糙度的增加从实验前的 1.04 增加至实验后的 1.18，C 由于平均高程的增加从 0.3 增加至 0.35。垂直于滑移方向，β由于断层面变平从 1.19 下降至 1.15，C 由于高程的下降从 1.55 降至 1.16。在 B 块体的断层面上，平行于滑移方向和垂直于滑移方向β分别从 1.23 降至 0.9,从 1.2 降至 1.12，这种降低被归因于断层面最终的变平。平行和垂直于滑移方向的 C 分别从 0.77 增加至 1.14，从 2.61 降至 1.08，这种变化被归因于高程的改变。A 块体上平行和垂直于滑移方向的 RMS 皆增加，B 块上皆减小，RMS 的增加表明粗糙度增加。

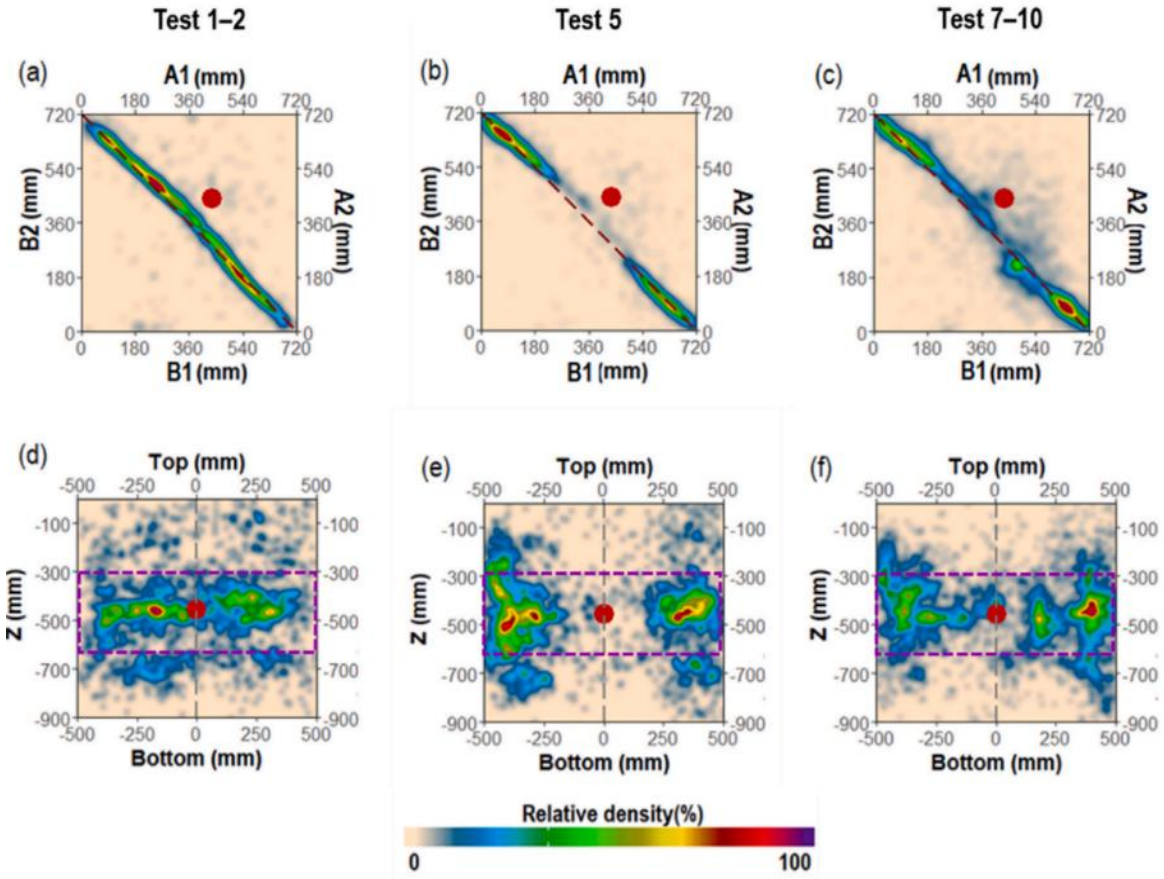

图 2　声发射沿断层面的分布

在实验前后，通过断层面之间的分割距离建立了孔径模型。体积分析发现，孔径体积分别为 256 ml 和 171 ml。33%的孔径体积降低被认为是碾磨、平化的断层泥再分布所致。实验前，小孔径（≤300 μm）位于接近断层面中央和左右边缘的位置。通过比较声发射位置和孔径模型，发现分别有 65%和 83%的声发射发生在实验前后的小孔径位置。同时，发生声发射的位置上具有更厚的断层泥。断层泥厚度模型表明，更厚的断层泥与 40 cP 注入流体前缘一致。Castlegate 砂岩表现出正偏态、单峰式分布，平均粒径约为 200 μm。断层泥的颗粒粒径具有多峰式分布，平均粒径约为 8 μm。

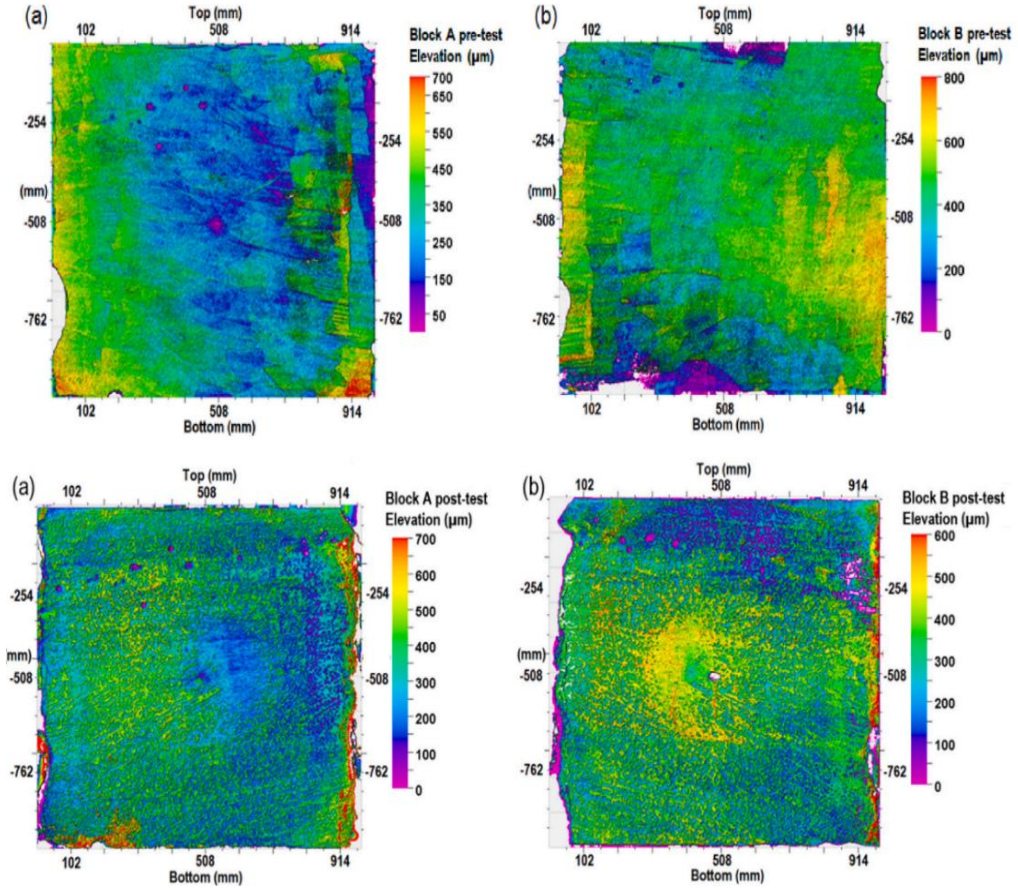

图 3　实验前后断层面地貌

整体而言，在断层滑移过程中，细粒断层泥的产生被认为由断层面上凹凸体的脆性破裂形成，甚至可能伴随生长。为了检验这一机制，研究人员假设不同粒径断层泥的体积百分比与注入过程中的声发射具有线性关系。通过比较 Castlegate 砂岩和断层泥中砂、粉砂和泥的比例，发现砂下降了 57%（体积分数），粉砂和泥分别增加了 142%和 129%。通过分析声发射数据和地貌模型，研究人员推断，声发射开始于凸出位置的破裂。在之后的注入实验中，由于断层面的相互靠近以及应力的再分配，声发射的位置可能会迁移到断层其他部分。

大块体实验证实了断层面凹凸体的破裂和断层泥的形成，进而通过改变断层面地貌可影响诱发地震活动。这些影响与声发射沿断层的时空分布

有关。断层滑动与沿断层的声发射分布具有相反的关系，沿断层面 25%的位移与断层面附近 80%的声发射有关。初始位移将影响主要凹凸体，并沿断层面重新分布应力，这与前人研究结果一致，即声发射速率与累积位移的下降与断层面和断层泥的演化有关。

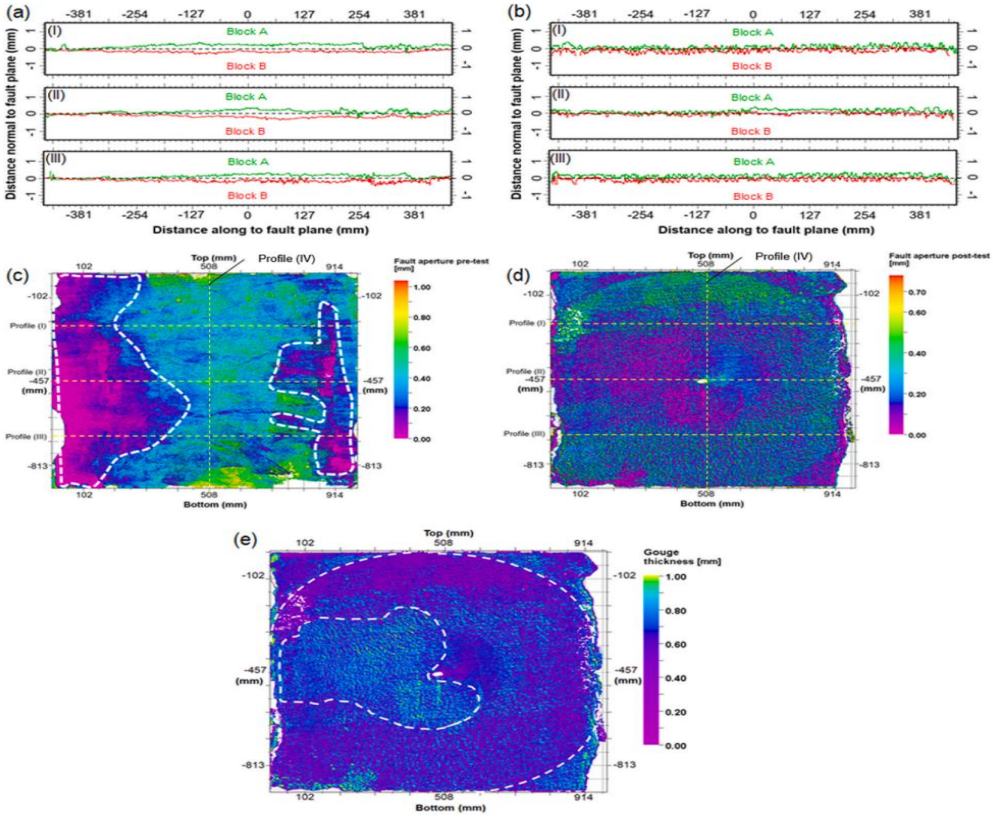

图 4　地形剖面、孔径和断层泥厚度

断层面上存在擦痕，说明断层滑移会增加粗糙度。谱方法分析发现，断层表面一些部分粗糙度的增加由滑移和断层泥的产生引起。断层面凹凸体的减小也表明断层面的变平。如同其他研究一样，本研究也表明，声发射的分布与断层面粗糙度、滑移机制有关。此外，自然界断层面上的矿物学特征改变可能会影响断层滑移行为。

来源： Babarinde O, Stanchits S, Bauer R, *et al*. Relationships between fault characteristics and seismic responses in a large lab-scale tri-axial injection test conducted on a faulted Castlegate Sandstone. Journal of Structural Geology, 2022, 162, 104684.

西印度-欧亚碰撞带应力分布及其运动学和地震构造意义

印度地球科学部（MOES）的研究人员通过对324个分散的震源机制进行应力的迭代联合反演，评价了印度-欧亚碰撞带西部的应力分布。结果表明，喜马拉雅地震带的主应力（σ1）为NE-SW向，具有挤压作用，喀喇昆仑-西藏的主应力为走滑型。即使在喜马拉雅地区，西区（东经75°—77°）显示斜交于弧的挤压作用（NE-SW），而超过东经77°的中喜马拉雅为垂直于弧的挤压作用（NNE-SSW），这与GPS矢量一致。2005年克什米尔地震余震序列的应力场与邻区（如帕米尔、南迦帕尔巴特、兴都库什等）不一致，但与喜马拉雅中部具有相似之处。在喀喇昆仑-西藏地区，喀喇昆仑断层主应力表现为NNE-SSW向，具有压扭性断裂运动特征，而Kaurik-Chango裂谷主应力呈N-S向，具有张扭性断裂运动特征。西印度-欧亚碰撞带的应力比在0.07~0.9之间变化，表明中间应力轴（σ2）在低应力比地区的作用最为突出。西印度-欧亚碰撞带的应力分布是不均匀的，地震危险性亦分布不均。相关研究成果发表在2022年6月的*Journal of Asian Earth Sciences*。

西印度-欧亚碰撞带，位于北纬29°—37°和东经72°—81°之间，在过去经历了许多破坏性地震。虽然大地震发生于喜马拉雅前缘的基底拆离带上，大部分震间活动呈线性走向，平行于喜马拉雅弧，即喜马拉雅地震带。地壳应力场的认识对于理解构造应力场状态、其多变性以及局部、区域乃至横向构造在地震产生中所发挥的作用至关重要，从而制约着一个地区的运动学和地震构造。一些研究曾尝试用现有的小范围内的震源机制解来绘制西印度-欧亚碰撞带的应力场，由于均未采用聚类目录，因此不能排除数据和结果中存在内应力扰动的可能性。考虑到这些因素，以更全面、更稳健和更分散的目录成像当前应力场对该区域具有重要意义。同时，对该区域

及其局部应力场和区域应力场进行研究，有助于了解不同应力场之间的相似性和差异性，也有助于今后更好地进行地震危险性评估。

研究人员使用了 324 个可靠的 2.0≤M≤7.6 的震源机制解（从 450 个初始震源机制解中选出）对地壳应力场及其变化进行成像，以了解该碰撞带的地震构造、断裂力学和主要构造力。使用的震源机制解根据早期发表的记录和全球质心矩张量目录（GCMT）编制。考虑到现有震源机制解的断层类型的空间变异性，将数据分为三组。同时，根据区域和局部地质和构造的变化以及地理上的邻近性，按照震源机制解，将该地区共划分为 9 个不同的地震构造带。在改进的 Michael 反演方法（1984、1987）的基础上，采用迭代联合反演技术获得应力和断裂方向。

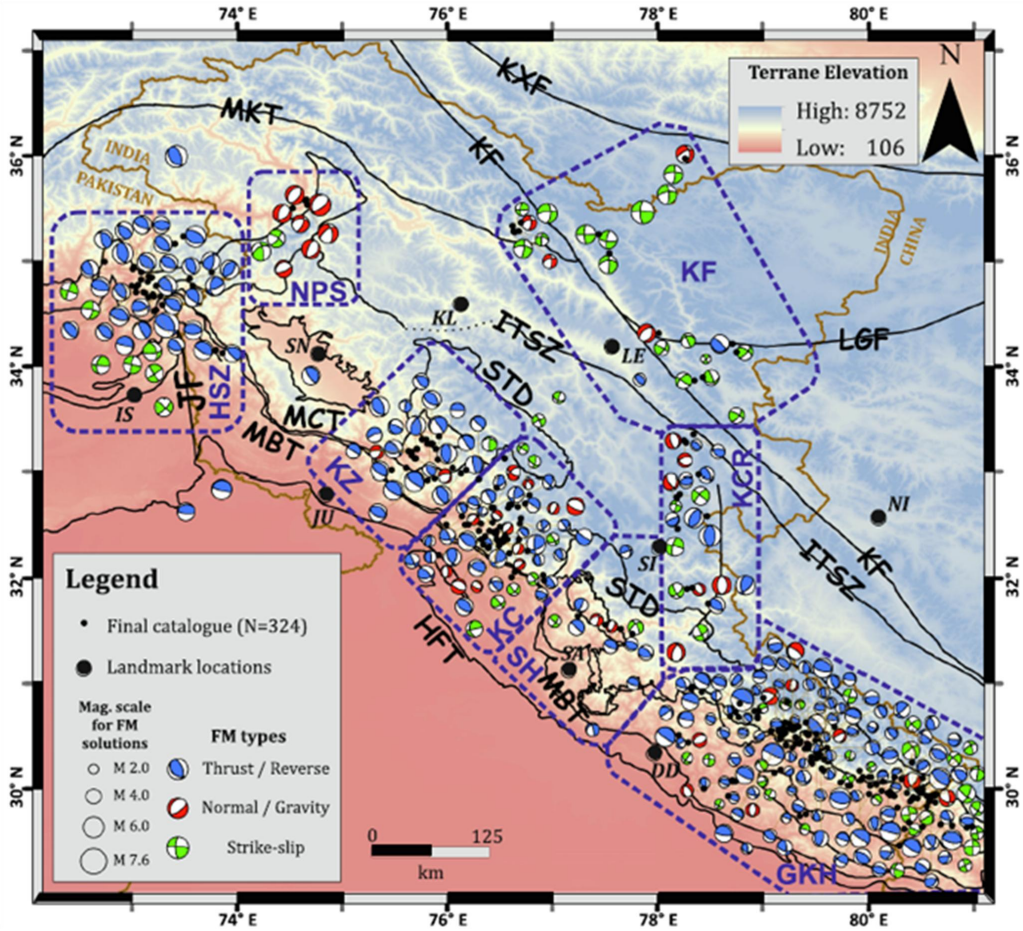

图 1　研究中采用的震源机制解

整个区域的分析结果显示挤压构造状态，主应力σ1 朝向 NE-SW（213.67°/14.5°±1.7°），R 值（应力比）为 0.88±0.03。在喜马拉雅地震带，主应力σ1 与持续进行的印度-欧亚碰撞方向斜交。高 R 值表明，σ1 在该地块中扮演着主要角色。σ1 的低倾伏角表明，拆离带中的中部地壳斜面可能是这种应力场的成因断层所在。此外，主震源机制解的第二个节点面对应的单个断层投影到莫尔圆图的倾角为 8.83°,表明具有 5°~10°倾角的缓倾拆离带是成因断层。

喜马拉雅和西藏地区的反演结果分别表现出不同的逆冲和走滑机制，喜马拉雅地区显示 NE-SW 向的σ1（220.84°/13.9°±1.7°），而喀喇昆仑-西藏地区显示 NNE-SSW 向的σ1（25.99°/4.2°±88.9°），这两个大区域的应力比分别为 0.76±0.02 和 0.07±0.27。在喀喇昆仑-西藏地区，从震源机制解中获得的陡倾角与区域的走滑或者横向构造是一致的。在走滑应力状态下，较低的 R 值表明σ1 的主导应力大小和σ2 的显著贡献，由此说明了喀喇昆仑-西藏地区局部构造和区域构造力的影响。

不同分区的构造应力场和方向不同。反演结果显示，喜马拉雅地区为挤压构造体系，σ1 为主，方向为 NNE-SSW 到 NE-SW。其中，SH（Shimla Hills）和 GKH（Garhwal-Kumaun Himalaya）两个区域的反演结果显示相似的、占主导地位的σ1（分别为 210.6/20.2±6.0 和 213.89°/8.85°±2.5）和高的 R 值（0.82±0.12 和 0.73±0.05）。二者合并为 GKH-SH 后，显示纯挤压且水平的σ1（213.32°/10.8±2.1）和σ2（112.85°/2.52±4.9°），以及垂直的σ3（19.8°/78.96°±4.9），R 值高达 0.80±0.03。上述结果表明，喜马拉雅中部地区的σ1 方向垂直于喜马拉雅弧，且与印度板块相对于欧亚板块的运动方向一致。该地区地震应力的产生主要受控于σ1，低的σ1 倾伏角和主震源机

制解的第二个节点面的倾角表明，活动变形沿着拆离带的中部地壳斜面发生，在该地区具有较缓的倾角（<20°）。

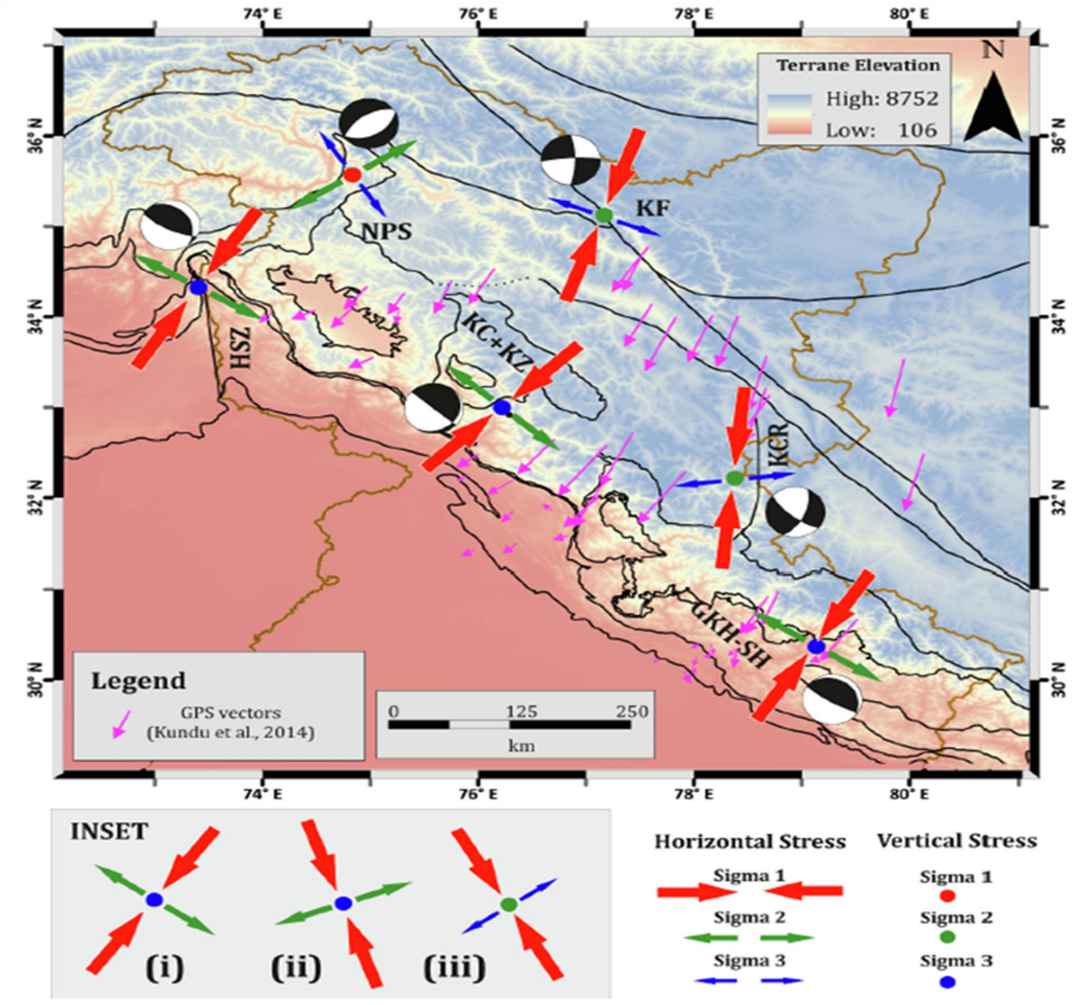

图 2　主应力轴和主震源机制解

尽管 KC（Kangra-Chamba）和 KZ（Kishtwar-Zanskar）地区的应力状态与喜马拉雅其他地方一致，但是应力方向，尤其是σ1 明显有别于 GKH-SH 之类的其他地方。这两个带的σ1 估计值分别为 233.21/18±9.5 和 220.3/18.4±8.0，R 值分别为 0.7±0.13 和 0.90±0.18，合并为一个单一的区域 KC-KZ 后，结果显示挤压且水平的σ1（226.06/21±4.6）和σ2（132.15/10±12），以及垂直的σ3（18.19/66.45±11.9），R 估计值为 0.87±0.04。该结果表明，

KC-KZ带的主要挤压应力与喜马拉雅弧斜交，倾伏角高于GKH-SH的10.8°，达到21°。然而，两个地区的R值和主震源机制解是近乎一致的。

在哈扎拉和南迦帕尔巴特构造结（syntaxis），HSZ（哈扎拉构造结）的反演结果以及克什米尔地震余震的单独反演结果显示，它们具有几乎相似的应力场，水平的σ1（分别为212.85/14±11.8和216.38/13.2±4.7）和σ2（分别为120.62/8.86±11.2和124.9/6.29±10.4）以及垂直的σ3（分别为359.2/73.34±7.7和9.96/75.35±9.9）。R值分别为0.39±0.09和0.66±0.07。HSZ较低的R值（0.39）表明，该地区经历了从纯粹的到径向的收缩断层活动，并强调了在σ1主导下σ2的重要贡献。这可能与在HSZ地区存在的多种构造应力有关，例如北西侧的兴都库什、北侧和北东侧的帕米尔以及南东侧的喜马拉雅。

克什米尔地震余震的单独反演结果中，R值（0.66）表明地震及余震活动过程中σ1在应力场占主导作用，这与其他地区（如GKH-SH、KC-KZ）是一致的，但其应力场与临近HSZ的兴都库什和帕米尔地区有鲜明差别，前者显示NNE-SSW方向的σ1，后者显示NNW-SSE向的走滑运动及具有变化的σ1方向。另外，被克什米尔山谷与HSZ隔开的、地震活动性低的KC-KZ（σ1为NE-SW）也与HSZ具有明显差别。HSZ地区的反演结果以及克什米尔地震余震的单独反演结果中得到的优选断层面显示类似的倾角（22°），接近喜马拉雅地区中部地壳断坡的倾角（≤25°）。此外，余震序列中较高的R值表明，在余震活动期间为σ1主导的近纯挤压，类似于喜马拉雅弧。

位于HSZ北东方向的的NPS（南迦帕尔巴特构造结）显示纯的伸展应力场，具有垂直的σ1（352.87/83.7±16.5）与水平的σ2（237.12/2.75±16.9）和σ3（146.9/5.67±11.8），R值为0.56±0.25。该反演结果排除了MMT（Main

Mantle Thrust）与该地区地震产生之间的关系。另外，成因断层发生了倾角较陡的伸展运动，中等的 R 值也指示沿着断层的纯伸展运动，σ1 占主导作用，σ2 和σ3 贡献很小。

KF（喀喇昆仑断层）的反演结果显示走滑运动状态，具有水平的σ1（119.5/15.3±4.7），σ3（292.4/10.62±7.7），垂直的σ2（55.93/71.2±8.8），R 值为 0.79±0.09。可以确定的是，其北部位于 33.5°—37°之间的部分为单一的走滑挤压运动。沿着横向构造 KCR（Kaurik-Chango 裂谷）的反演结果则显示，该区域的应力场为水平的σ3（262.8°/15.8°±18.3°），近垂直的σ2（154.88°/47.5°±70.9°）和σ1（5.71°/38.2°±70.9°），R 值为 0.14±0.15。上述结果表明，KCR 地区正在经历东西向的张扭性断裂运动。该区域地震应力反演得到的主震源机制解的节点面倾角较陡（83°和 55°），而优选断层面走向 147.21°、倾角 83.02°、斜度-137.92°，表明该断层受到 KCR 地区破裂的影响。反演结果也支撑了该地区垂直于区域最大主收缩应力方向的张扭性裂谷作用。

来源：Prasath R A, Bansal B K, Verma M. Stress distribution in the western India-Eurasia collision zone, its kinematics and seismotectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 230, 105208.