

# 地震科技前沿快报

2023 年第 7 期（月刊总第 54 期）

中国地震局科学技术委员会  
中国地震局科技与国际合作司

中国科学院兰州文献情报中心  
中国科学技术信息研究所

---

## 本期概要

### 1、 $M_w$ 6 扩展断层情景下三维近场地震响应的宽频带数值盲预测：在法国卡达拉舍核设施的应用

情景构建是提高防震减灾能力的重要手段。文章采用基于物理模型的数值模拟方法，对法国卡达拉舍核设施进行近场地震响应情景模拟。

研究分析了地震数值模型对地质特征的敏感性，并突出卡达拉舍下方软沉积物引起的放大效应。通过综合四个不同的有限断层情景，对震级为  $M_w$  6 的设定地震进行了盲预测，预测结果与标准地面运动预测方程结果相比，在短周期下标准地面运动预测方程可能高估了伪谱加速度，从这个角度说明核设施安全。

该试验对震前重要设施的地震安全评估具有重要借鉴意义。

### 2、 用于加勒比和中美洲地区主权参数保险的地震危险模型

该研究开发了一个完全概率性的地震危险模型，具有足够准确的分辨率，可用于加勒比和中美洲地区国家尺度的分析，以支持加勒比巨灾风险保险基金提供给主权国家的地震设计参数。

该模型为 34 个国家提供新的地震危险和风险信息，允许在区域内的任何位置获取地震危险性结果。除了俯冲带和地壳源区划分外，模型还使

用了新的地震活动和构造数据。通过最先进的方法和工具，该模型用不同的地震活动性、几何和破裂模型。其主要输出是一个随机事件集，不仅用于计算长期地震危险性，同时也用于概率性估计全国范围内的地震损失。

为了参数保险在覆盖范围内的运行，研究还开发了一个震后工具，可以实时计算研究区域内与任何地震有关的地面运动强度。这是根据预定义规则从矩张量解中选择一个破裂平面，同时与概率地震危险分析做出的所有假设保持完全一致的前提下自动完成的。

然后，预测的地面运动和针对暴露资产开发的易损性函数被用于估计每个受影响国家的经济损失是否超过国家特定保险政策条件中规定的触发值，并确定是否应在的 14 天内发放赔付。

### 3、土耳其和叙利亚的双震

2023 年 2 月 6 日，在土耳其和叙利亚发生的 7.8 级双震，造成灾难性后果，而该地区未来地震危险性如何是大家关注的焦点。

在土耳其伊斯坦布尔南部的马尔马拉海下留下了地震空区，这一空区已经 250 年来没有发生过强震，该区域风险正在上升。另一个令人担忧的地区是 2023 年 2 月地震破裂以南的一个东安纳托利亚断层段，即死海断层，死海断层的北段需要特别关注，因为该段是一个公认的地震空区，850 多年来没有发生过大地震。以每年 7 mm 的平均滑动速率计算，该断层累积的滑动亏损量接近 6 m。因此，这种长时间的地震平静期可能代表着叙利亚和黎巴嫩的高度地震危险性。

总体而言，土耳其双震后，需迅速重新评估该地区地震风险。同时，政策制定者将致力于执行建筑和抗震规范，使用优质材料和熟练工艺及建筑保险。

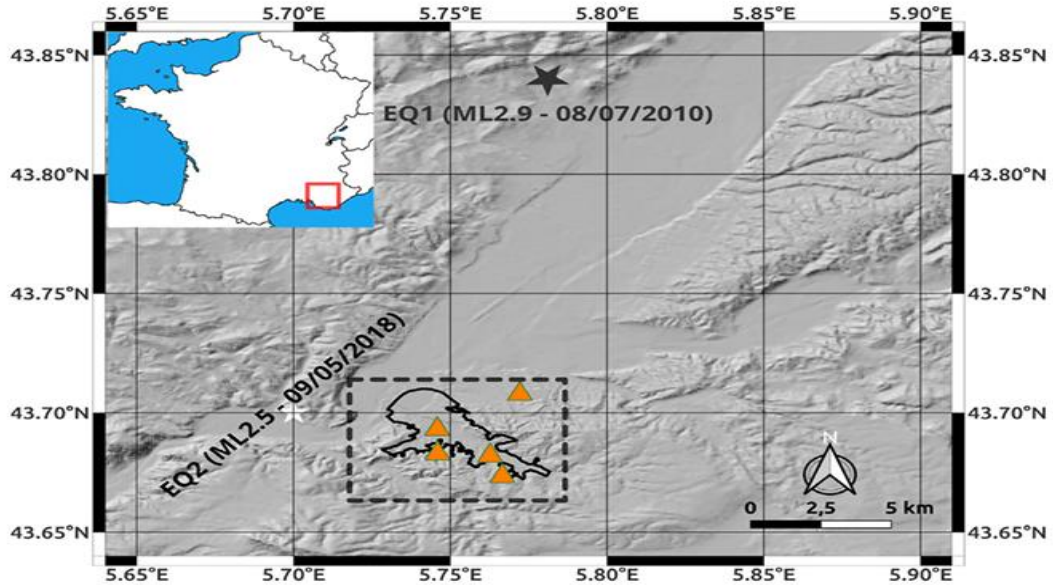
## M<sub>w</sub> 6 扩展断层情景下三维近场地震响应的宽频带数值盲预测：在法国卡达拉舍核设施的应用

本研究采用基于物理的数值模拟（PBS）方法，对位于法国东南部 **Middle Durance** 活动断层附近的卡达拉舍（**Cadarache**）核实验设施进行了近场地震响应的宽频带（0~10 Hz）模拟。通过与地球物理测量和过去的余震进行比较，分析了地震数值模型对地质特征的敏感性，并突出了卡达拉舍下方软沉积物引起的放大效应。通过综合四个不同的有限断层情景，对 **M<sub>w</sub> 6** 的目标地震进行了盲预测。将预测结果与标准地面运动预测方程（**GMPE**）进行比较后发现，在短自然周期下，**GMPE** 可能高估了伪谱加速度。该试验支持了在缺乏直接观测数据时整合综合预测（**synthetic prediction**）和经验预测的实际需求。相关研究成果发表在 2023 年 1 月的 *Geophysical Journal International*。

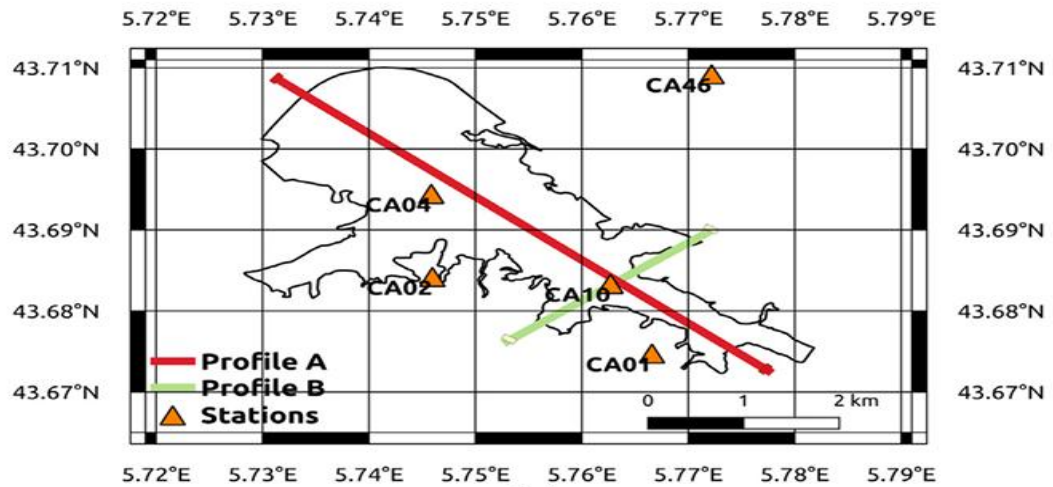
在法国，核电站（**NPP**）的地震响应是重要话题。其作为能源供应者，具有战略意义，并且与潜在核事故密切相关。福岛事故后，国际原子能机构（**IAEA**）引领了新的核电站地震风险安全标准的制定，并发布、更新了几个安全指南。核能公司则重新进行严格的地震评估，以确保现有核设施能承受更新后的地震荷载。补充性的后 2011 安全评估促使主要利益相关方确定超越最初考虑的地震水平，这些地震水平最初建立在确定性基础上，然后通过概率地震危险评估进行验证。地震风险的重新评估一般采用确定性地震危险分析（**DSHA**）或概率性地震危险分析（**PSHA**），现有的很多核电站在设计时多采用 **DSHA**。

近年来，基于从断层到结构的物理模拟（**PBS**）在地震研究中得到广泛应用，其可提供数十万年虚拟地震情景，并构建整体数字孪生模型。然而，模型不确定性和数据收集是 **PBS** 的挑战，包括破裂机制、构造应力分

布、地壳结构和土壤-结构相互作用等。科学家需要更多信息和初步验证，以将模型预测限制在现实可信范围内。



(a)



(b)

图 1 (a)卡达拉舍核设施周围地区的地形图，橙色三角形代表可用的记录站点，图中标注了记录的两次小地震，分别用黑色(EQ1)和白色(EQ2)星星表示，黑线表示冲积盆地的轮廓；(b)卡达拉舍地区周围的沉积盆地的细节

在本研究中，研究人员通过 PBS 绘制了法国卡达拉舍核研究中心（拥有大约 20 个核设施）的  $M_w$  6 地震的危险情景。目标是通过 PBS 揭示由附近的 Middle Durance 活动断层系统的一个断层段触发的近场强地面运动事

件的复杂性，并估计卡达拉舍下方软沉积物引起的三维、类盆地状场地效应。为此，研究人员构建了一个三维模型，包括主要界面的几何形状和进行数值模拟所需的地球物理属性。为了确定盆地的几何形状，采用了在卡达拉舍中心尺度上建立的局部模型，并通过名为 SEM3D 的引擎进行了地震模拟。同时，研究人员进行了 4 个运动源模型（EF1、EF2、EF3 和 EF4）的模拟。

上述 4 个 PBS 与经验性地面运动预测方程（GMPE）的对比结果表明，与 Berge-Thierry 等（2003）提出的 GMPE 相比，由于考虑到更紧密的不确定性边界，4 个 PBS 与 Kotha 等（2020）提出的 GMPE 似乎有所改善。这可能是由于 Kotha 等的模型由于引入了场地间的随机变异而带来的灵活性，并且在小到中等震级范围内进行了良好的校准。此外，尽管与其他运动源相比，EF3 情景的最大位移较低，但对于所有周期，它显示出第二大的烈度，这可能是由较大的平均破裂速度导致的。在盆地内，模拟结果主要在较高周期（ $T > 2$  s）处接近 EF1 情景的 GMPE。

EF4 在盆地内外以及两种 GMPE 中都显示出最低的烈度。有人可能会认为，这一结果与应力降的选择有关。然而，研究采用的应力降约为 1 MPa，对应着 0.2 Hz 的拐角频率，这与全球对于  $M_w$  6 级地震的观测是一致的。因此，没有证据表明，所选择的应力降值能够解释低周期下模拟结果与 GMPE 之间的差异。为了解决这个问题，需要对用于校准 GMPE 的地震数据库中的应力降值进行详细分析。

GMPE 模型的低估的另一个可能解释是，在数值模型中引入的地质信息不足以成功约束地面运动预测（数值精度达到约 0.1 s）。实际上，与数值模拟相比，之前相关学者的 GMPE 对场地效应的估计都相对简单。

值得注意的是，将 GMPE 与 PBS 的平均结果进行比较始终是一项相当棘手的任务。这是由于两种方法之间的本体差异，而它们都是为了应对同一个问题：在密集的空间网格上缺乏大规模的特定地点的地震观测。GMPE 是对记录数据进行复杂非线性回归的结果，但一般不包括在感兴趣的场地所记录的数据。幸运的是，除了通用 GMPE 之外，还开发了针对特定的构造背景的 GMPE。然而，GMPE 无法估计复杂的场地和盆地效应，也无法估计地面运动的空间变异性和不连贯性，主要是因为它们旨在将地震现象的巨大变异性和高复杂性压缩成一个方程。尽管与 PBS 相比，GMPE 的公式化在易用性方面更为友好，但它忽略了地面运动的一些复杂的场地特征，而这些特征可以通过 PBS 进行（先验）建模和估计（包括盆地效应、地表波和其他几个地震波传播中的复杂问题）。

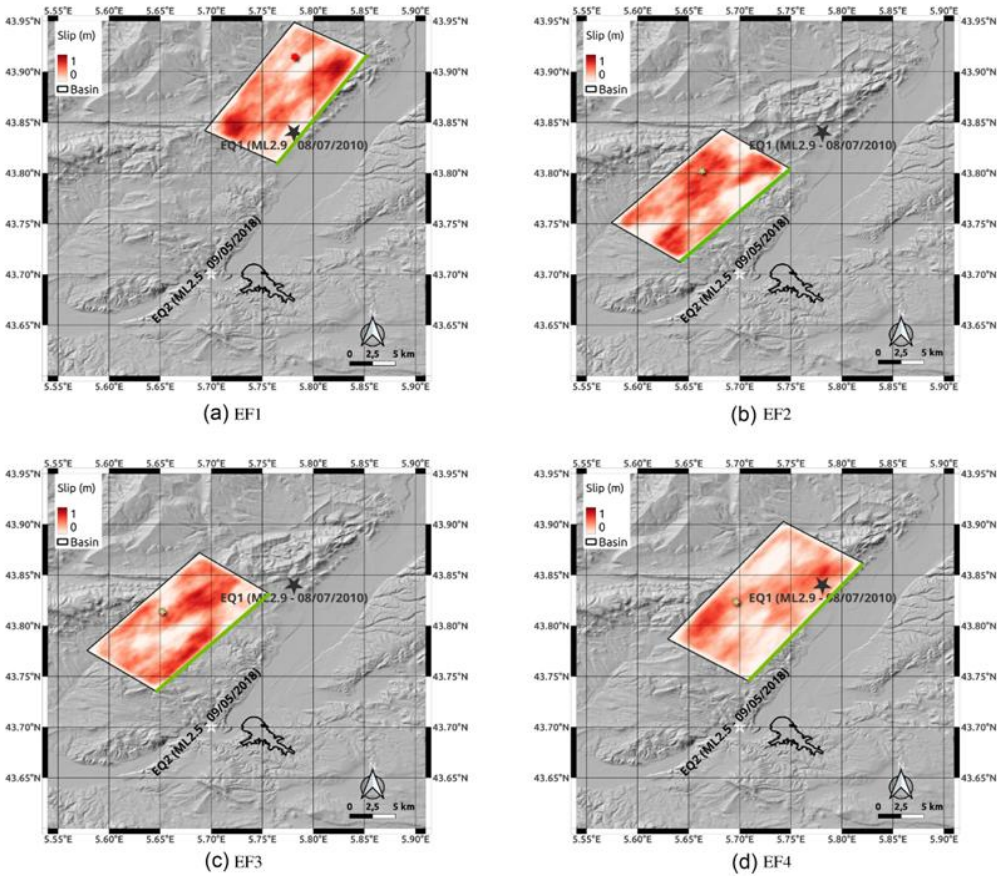


图 2 研究所采用的 4 个运动源模型的地图，对应于  $M_w$  6 的目标地震。颜色刻度表示滑移值，星

星表示震中位置，等高线表示深度，绿线表示顶部断层线

PBS 需要相当丰富的数值建模专业知识，以及相应的计算资源。此外，如果数值模型可以随着新的地球物理和地震学数据而更新，PBS 必须事先得到充分的验证。PBS 的代表性力量可能是无限的，这使得它极难局限于现实的预测。在估计关键场地（如卡达拉舍）的地震响应时，必须将这两种方法（指 PBS 与 GMPE）作为互补预测，而不是旨在使两者收敛到相似的结果。

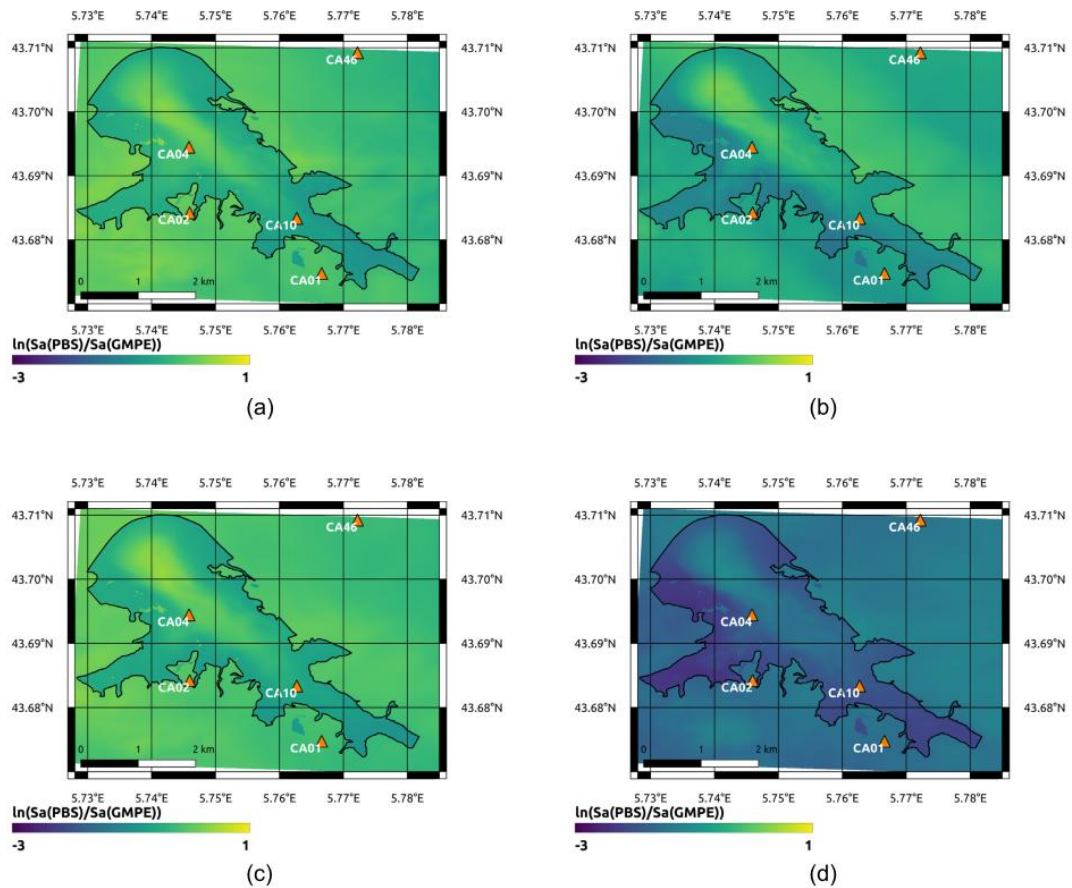


图 3 根据 Kotha 等的 GMPE 模型，绘制的 EF1(a)、EF2(b)、EF3(c)和 EF4(d)在 T=0.5 s 时的残差空间分布图

整体而言，本研究比较了在法国卡达拉舍核研究中心  $M_w$  6 目标地震的综合盲预测和经验性盲预测结果。数值模型是对 Castro-Cruz 等（2021）构建和验证的模型的改进，该模型的网格设计旨在达到 10.5 Hz 的最大精

度。基于原位实验活动，该模型实现了由法国原子能与可替代能源委员会（CEA）构建和维护的地区地质模型的最新更新。首先，该模型通过对小型  $M_L$  2.5 地震记录进行验证，进行公平比较（通过修改后的 Anderson 准则评估）——尽管在如此小的地震和如此大的频带范围内验证地质模型存在困难和不确定性。然后，使用  $k^{-2}$  运动模型生成四个  $M_w$  6 地震的扩展断层盲预测情景，并与其他学者提出的 GMPE 进行比较——这些方程在法国和欧洲地震背景中被广泛使用。

综合预测符合 GMPE 的中值 $\pm\sigma$ 估计，尽管对于高频段，综合预测受到每个扩展断层情景特有的直接效应的影响。此外，与将场地区分为岩石和冲积两种特征的 GMPE 估计有所不同，基于物理的模拟可捕捉到 3D 场地效应的空间分布。由于盆地的形状，在盆地横向轴线上获得了高频段的较强放大效应，而沿着纵向轴线观察到较低的放大效应。该数值模型代表了预测卡达拉舍地震场地响应的首个里程碑式工具。该研究结果支持利用 PBS 和经验 GMPE 的互补作用，以在低-中等地震背景下改进场地响应的分析。

来源：Castro-Cruz D, Gatti F, Lopez-Caballero F, *et al.* Blind broad-band (0–10 Hz) numerical prediction of the 3-D near field seismic response of an  $M_w$  6.0 extended fault scenario: application to the nuclear site of Cadarache (France). *Geophysical Journal International*, 2023, 232(1): 581-600.



## 用于加勒比和中美洲地区主权参数保险的地震危险模型

本研究开发了一个完全概率性的单域地震危险模型，其具有足够准确的分辨率水平，可用于加勒比和中美洲地区的国家尺度的分析，以支持加勒比巨灾风险保险基金提供给主权国家的参数地震政策的设计。该模型为该地区的 34 个国家提供了新的地震危险和风险信息，允许在区域内的任何位置获取详细的地震危险性结果。除了详细的俯冲带和地壳源区划分外，模型还使用了新的地震活动和构造数据。通过最先进的方法和工具，该模型采用了不同的地震活动性、几何和破裂模型。其主要输出是一个随机事件集，这是一种危险表示方法，不仅用于计算该地区的长期地震危险性，同时也用于概率性地估计全国范围内的地震损失（参数地震保险的触发器）。该模型还提供了不同周期的危险地图（**hazard map**）和一致危险谱（**uniform hazard spectra**），尽管这对参数保险而言没有直接作用。为了参数保险在覆盖范围内的运行，研究开发了一个震后工具，可以实时计算研究区域内与任何地震有关的地面运动强度。这是根据预定义规则从矩张量解中选择一个破裂平面，同时与概率地震危险分析做出的所有假设保持完全一致的前提下自动完成的。然后，预测的地面运动和针对暴露资产开发的易损性函数被用于估计每个受影响国家的经济损失是否超过国家特定保险政策条件中规定的触发值，并确定通常是否应在的 14 天内发放赔付。相关研究成果发表在 2023 年 2 月的 *Bulletin of the Seismological Society of America*。

在本文中，研究人员提出了一种针对加勒比和中美洲地区进行概率地震危险性分析（PSHA）的方法、数据来源和结果。全球范围内广泛应用的著名软件 R-CRISIS 已经用于不同尺度的 PSHA 分析，并已经通过不同的 PSHA 基准进行了验证，从而生成了超过 600 000 个合成地震的随机事

件集。本研究中描述的地震危险模型属于概率危害评估与风险评价（Probabilistic Hazard Evaluation and Risk Assessment, SPHERA）系统，该系统为加勒比巨灾风险保险基金（CCRIF）的参数化地震政策提供支持。

地震地面运动强度的生成在震后损失快速评估过程中发挥着基础性作用。这个阶段需要使用一些基础数据，同时还需要使用概率方法，且这个方法必须与先前用于估计物理损失的框架兼容。同时，地震地面运动强度测量值应与暴露资产的损害密切相关。

在过去的 30 年里，加勒比和中美洲的大多数国家进行了不同的 PSHA 分析。然而，这些研究中的大多数都是在国家级别进行的，没有考虑到跨越国家边界的地震危险的连续性。此外，这些研究中没有任何一个旨在支持参数保险的运作。因此，它们中的任何一个都没有关联到能够进行近实时地面运动估计的震后工具。

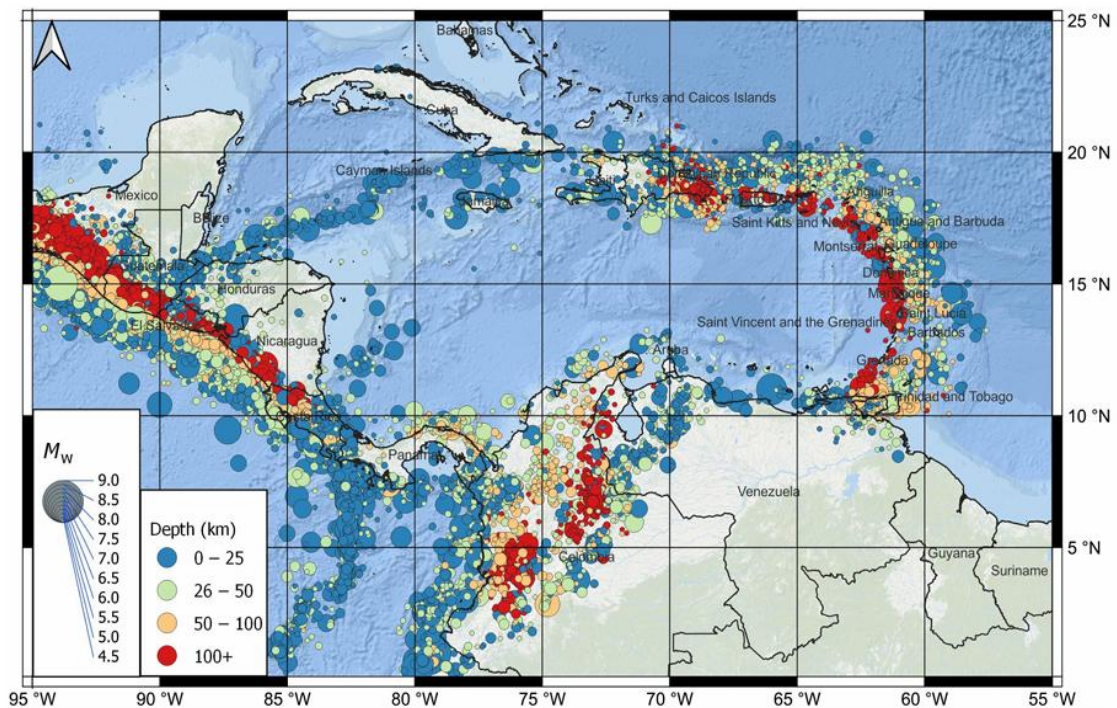


图 1 地震目录中的 15438 个地震事件的深度和震级分布

研究人员首先使用国际、区域和本地数据源构建了一个地震目录，然后进行去聚类（**declustering**）处理，以去除余震和前震。超过 250 个震源的表示采用了具有不同破裂方向、形状和特征的三维平面，所采用的震级重现关系主要基于修正的古登堡-里克特关系式。根据该地区的构造特征选择地面运动预测模型（**GMPM**），并以混合（或复合）**GMPM** 的形式将其结合在一起。研究人员在 **R-CRISIS** 软件上进行 **PSHA** 分析，结果以一致危险谱（**UHS**）和不同频谱序列与重现周期的危险地图的形式呈现。对研究区域进行 **PSHA** 分析后，可建立地面运动强度和给定时间段内的超标率（**exceedance rate**）之间的长期关系。随后，每个破裂的地面运动和基于谱加速度的易损性函数（面向所有暴露资产）被用来开展基于行业暴露数据库（**IED**）的经济损失评估。同时，研究人员开发了一种震后工具，以近实时地利用与位置、深度、震级和矩张量解相关的参数，来生成研究区域内任何地震的地面运动强度。

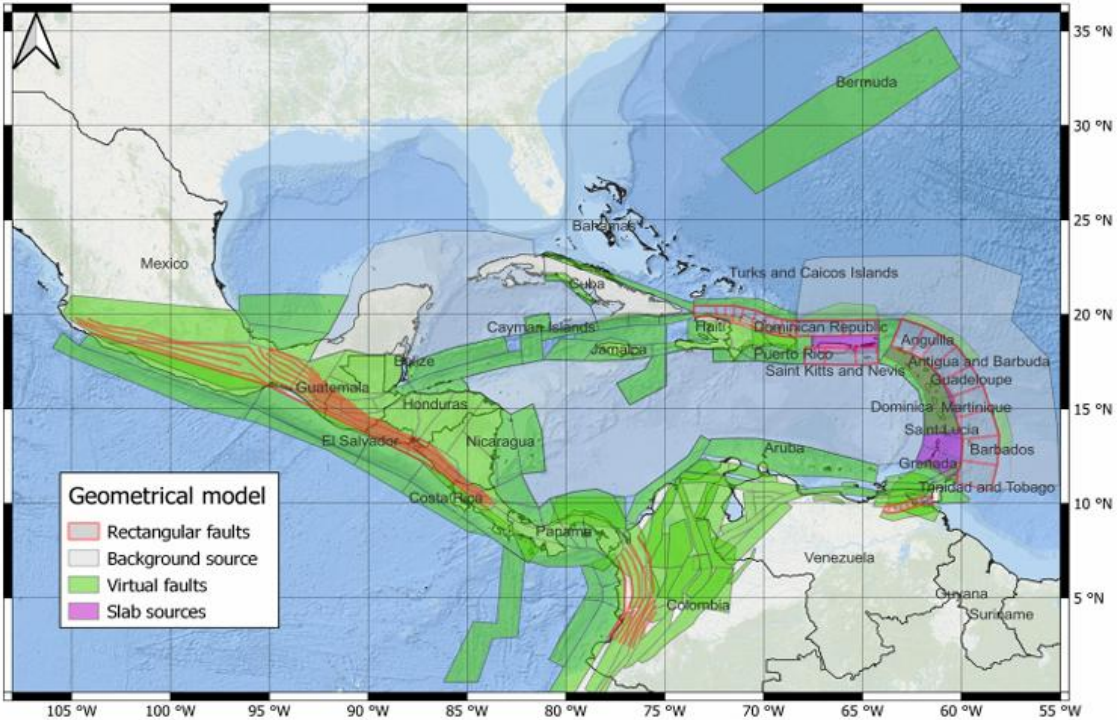


图 2 用于表示震源的几何模型

本研究中 PSHA 的输出结果可以分为两类：一个是随机事件集 (stochastic event-set)，另一个是不同重现期下的一致危险谱和危险地图。每个地震事件都具有独特的破裂特征、年发生频率和地面运动强度足迹的概率性表示——这些足迹的表示通过在每个位置测量的中位数和标准差来呈现。

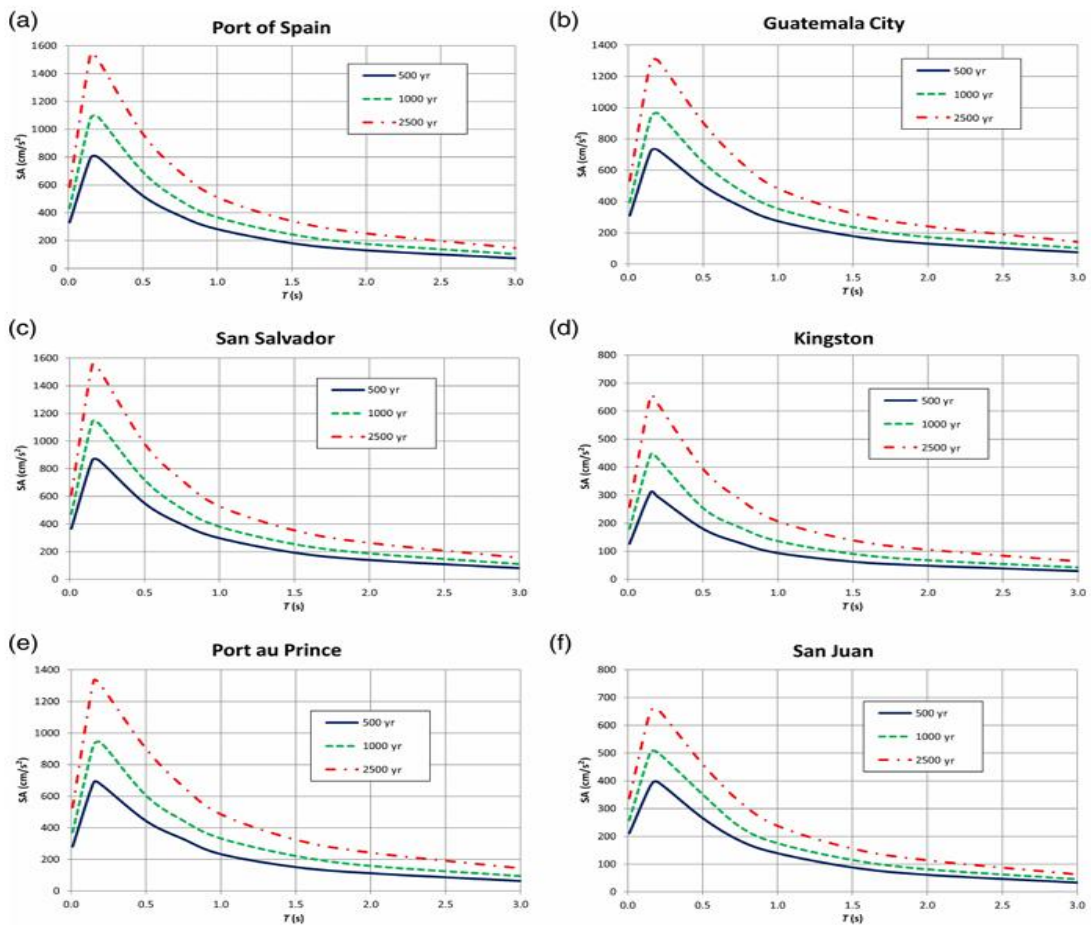


图 3 岩石条件下不同重现周期的一致危险谱：(a)西班牙港；(b)危地马拉城；(c)圣萨尔瓦多；(d)金斯敦；(e)太子港；(f)圣胡安

SPHERA 系统是一项多学科和全面的工作，旨在支持加勒比地区的灾害保险活动，增强各国的整体韧性。本研究中，持续而协调一致的 PSHA 在所有位置都具有足够的分辨率，可以在考虑研究区域不同地震构造特征的情况下进行详细的地震风险分析。该 PSHA 模型为研究区域内的任何地

点提供可靠的结果，并与地震后期的准实时工具完全结合，以允许地震参数保险政策的执行。地震危险模型覆盖了大范围的地区，其分辨率也与暴露数据库的分辨率相匹配（内陆位置为  $1 \times 1 \text{ km}$ ，沿海位置为  $0.2 \times 0.2 \text{ km}$ ）——该数据库包括所有相关资产的清单、位置和特征，用于估计地震损失。

PSHA 模型在不同位置都能很好地捕捉到地震活动的模式，不仅包括发生频率，还包括破裂特征。由于 R-CRISIS 软件的灵活性，它有很多表示方法。研究人员利用统一方法、根据构造环境选择一致的地面运动预测模型，并使用所有位置的输入数据，从而减少了国界上的明显不连续性，这在使用地震危险结果进行后续地震风险评估时是一个非常重要的问题。研究认为，认识之前的国家和区域级 PSHA 的关系是十分重要的，这些 PSHA 不仅是基准，而且也是宝贵的信息来源。

本研究采用的是混合 GMPM 方法，而不是逻辑树方法，这可以优化后续地震风险评估中的计算资源。与基于分支数目的随机事件集不同，该方法仅依赖于地震源的几何特征，因为通过权重对衰减模型进行组合是事先完成的。尽管在使用混合 GMPM 或逻辑树方法时存在方差差异，但这是由于不确定性的考虑方式不同，而且这些差异很小，对于破坏和损失估计几乎没有影响，这也是本研究所提出模型针对的主要问题。

该 PSHA 模型的结果与该地区先前的研究存在差异和相似之处。例如，相关结果表明，在牙买加的金斯敦，475 年重现期的地震的峰值地面加速度为  $0.41 \text{ g}$ ，而该模型显示为  $0.13 \text{ g}$ （针对岩石条件）。这种差异可以在通过滑动速率推导地震参数时假设采用 100% 的耦合系数，以及过度保守的滑动速率来解释。对于其他地点，如波多黎各、海地和多米尼加共和国，该 PSHA 模型的结果与先前研究中所有可用的频谱序列和重现期的震级水平相符。与全球地震模型（GEM）等其他近期研究相比，较大的差异出现

在活动断层附近。比如，在 Enriquillo-Plantain Garden 断裂带，该 PSHA 模型倾向于在危险水平之间呈现较平滑的过渡，这可以通过 R-CRISIS 中采用的几何模型来解释。

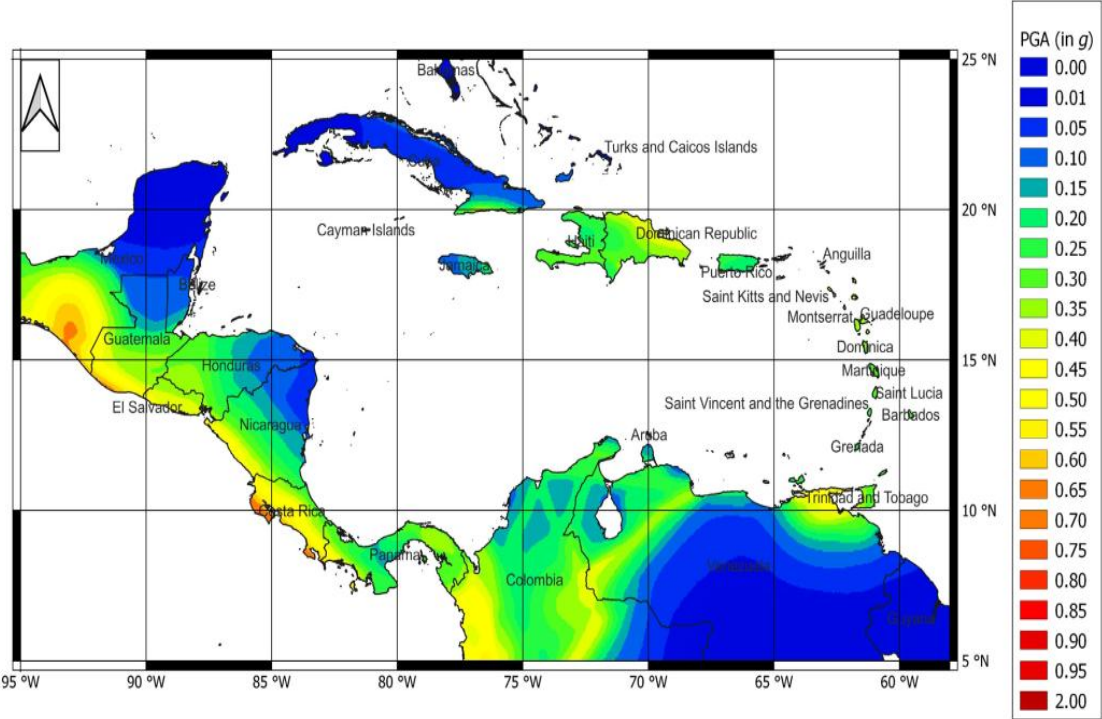


图 4 475 年重现周期时岩石条件下的地震危险图

新模型为更好地理解该地区的地震危险性作出了重要的科学和技术贡献，为灾害风险管理活动提供了宝贵的信息，同时促进了加勒比和中美洲地区的地震安全、预防和减灾。

来源：Salgado-Gálvez M A, Ordaz M, Singh S K, *et al.* A Caribbean and Central America seismic Hazard model for sovereign parametric insurance coverage. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2023, 113(1): 1-22.

## 土耳其和叙利亚的双震

2023年2月6日，在土耳其和叙利亚发生的双震所造成的悲剧令人难以理解。虽然地震科学家正试图了解这一地震事件，但它的灾难性影响突显了整个地区的高风险。苏黎世理工学院的研究人员发现，正如欧洲地震灾害图所示，毁灭性的地震和随后的余震突显了整个地区众所周知的地震风险，并且风险在断层的某些部分增加了。如果要防止灾难再次发生，减少脆弱性和建立复原力将非常关键。相关研究成果发表在2023年3月的 *Communications Earth & Environment*。

2023年2月6日，土耳其的南部和中部以及叙利亚的北部和西部发生  $M_w$  7.8 级地震，这次地震是土耳其 80 多年来最强的一次地震。大约 9 小时后，在第一次地震的东北偏北方向发生了  $M_w$  7.6 级地震。根据土耳其灾害与应急管理局（AFAD）的数据，截至 2023 年 3 月 6 日，两次地震和整个 2023 年卡赫拉曼马拉什（Kahramanmaraş）地震序列导致土耳其官方死亡人数超过 4.5 万人，加上叙利亚的死亡人数，总死亡人数超过 5.2 万人，使此次地震成为 21 世纪第五大致命地震。这两次地震并不完全出人意料，因为地震学家几十年来一直警告土耳其可能发生破坏性地震。然而，这两次地震都比该地区以前记录到的任何一次地震都要大，1893 年、1872 年、1822 年和 1513 年的地震估计震级为 7.0~7.52 级，均小于此次地震。

土耳其所在的安纳托利亚板块以两个主要断层为界：北安纳托利亚断裂带和东安纳托利亚断裂带。2023 年卡赫拉曼马拉什地震序列发生在东安纳托利亚断裂带，这是一个左旋走滑断层，将安纳托利亚板块与叙利亚所在的阿拉伯板块北部分开。整个东安纳托利亚断裂带的构造滑动亏损以每年约 10 mm 的速度累积。应变随着板块的汇聚而累积，并被偶尔的 7 级或更高级别的地震间歇性释放。

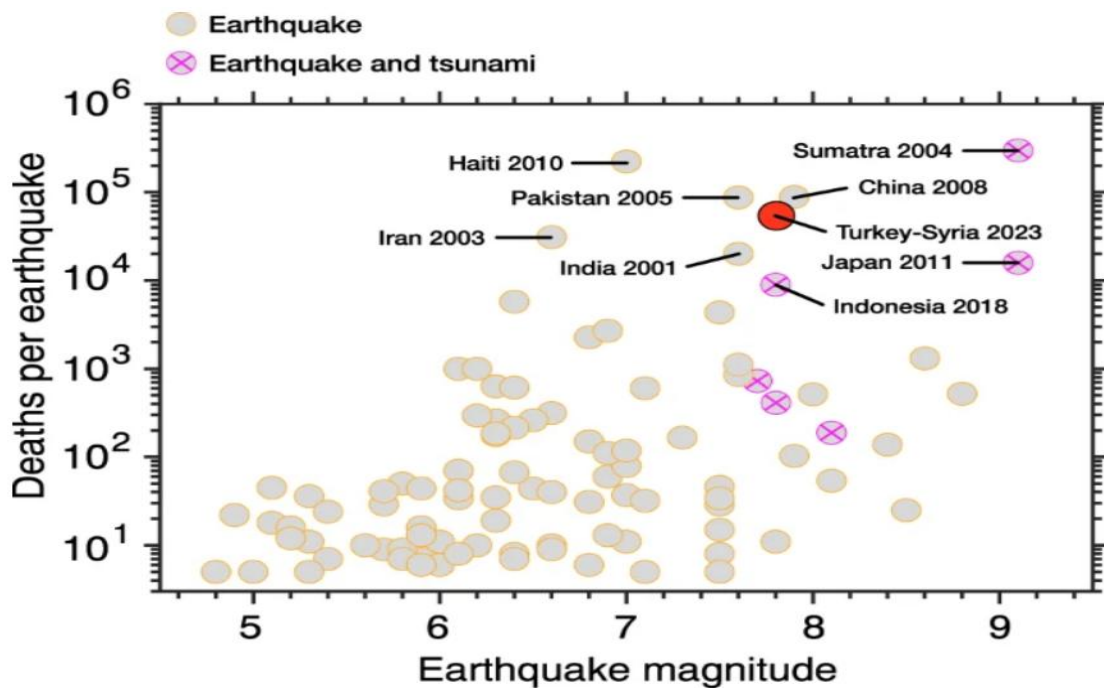


图1 2000年以来地震造成的死亡情况

数十万人居住在东安纳托利亚断层附近几公里的范围内，但这不是巧合，因为生物多样性、水和肥沃的土地等自然资源往往集中在活动断裂带附近。因此，人口、现代基础设施和经济中心通常集中在那里，进而面临地震危险。

### 1. 超出预期的破坏

2月份发生的两次地震不仅在规模上超出了预期，而且造成的破坏也超出了预期。一个原因在于破裂长度，观测和有仪器前的历史记录表明，东安纳托利亚断裂带的地震在震级上表现出很高的可变性，可能发生中等 ( $M_w$  6+) 和零星的大 ( $M_w$  7+) 地震，这些地震通常会使用不同的断层段 (fault segment) 部分或完全裂开。然而，2023年2月6日的双震一次就破坏了其中的几个断层段，产生了比前次大地震以来所积累亏损更大的滑动。事后来看，这种“超级事件”可能是超越普通地震周期的超级周期的一部分。超级周期在某种程度上与长期断层记忆 (fault memory) 有关，在长期断层



记忆中，大地震的概率反映的是累积的应变，而不是经过的时间。理解超周期对于地震危险性评估非常重要，因为它们可能有助于解释基于变形模型的古地震学与基于大地测量和其他数据集的古地震学之间的不匹配。

其次，对于主震，破裂延伸约 300 km，地表破裂位移高达 5 m。7.6 级余震发生在东安纳托利亚断裂带的两个分支——Surgu 和 Cardak 断层。虽然余震导致了约 100 km 的较短破裂，但它导致了高达 7~8 m 的较大陆地位移。美国地质调查局提供了这两次地震的震源时间函数（描述地震发生后的能量释放速率），对于主震，震源时间函数的表观复杂性由反映不同断层段之间相互作用的多个峰值来确定。7.6 级余震的震源时间函数显示出相对简单的破裂，单个主脉冲持续时间约为 30 s。由于两次地震一直向上传播到地表，两条断层周围地区的地面震动加剧。对这两次地震的比较还发现，更大的地震并不一定会产生更强的地面加速度——这最终会导致破坏，相反，它们会影响更大的地区。

使这次地震特别具有破坏性的另一个因素是受灾地区（与其邻近的断裂带发生了两次大地震）的大小。令人惊讶的是，2023 年卡赫拉曼马拉什地震序列中最大的余震在震级上与主震相对相似。通常情况下，最大的余震大约比主震小 1.2 级，这种关系被称为巴斯定律（Bath's Law）。然而，由于两次卡赫拉曼马拉什地震使两条不同的断层发生破裂，7.6 级地震可以被归类为由第一次 7.8 级地震触发的另一条断层上的次主震。数百次不同震级的余震继续震动受灾地区，进一步破坏了不稳定的建筑和其它基础设施，同时阻碍了救援和救灾工作。

根据早期的应力计算，7.8 级主震破裂在接近 7.6 级余震的位置增加的应力最大。因此，7.8 级主震破裂可能带来了 7.6 级余震，使其更接近于破

裂，并为已经承受巨大应力的断层提供了最后一击。令人担忧的是，由于这两次事件，它们的终点区现在都承受着巨大的应力。

为此，研究人员建议，迫切需要更新风险管理实践，量化该地区的应力转移对危险性概率的影响。此外，还必须计算主震在多大程度上改变了建筑物的脆弱性，并增加了它们对余震的脆弱性。

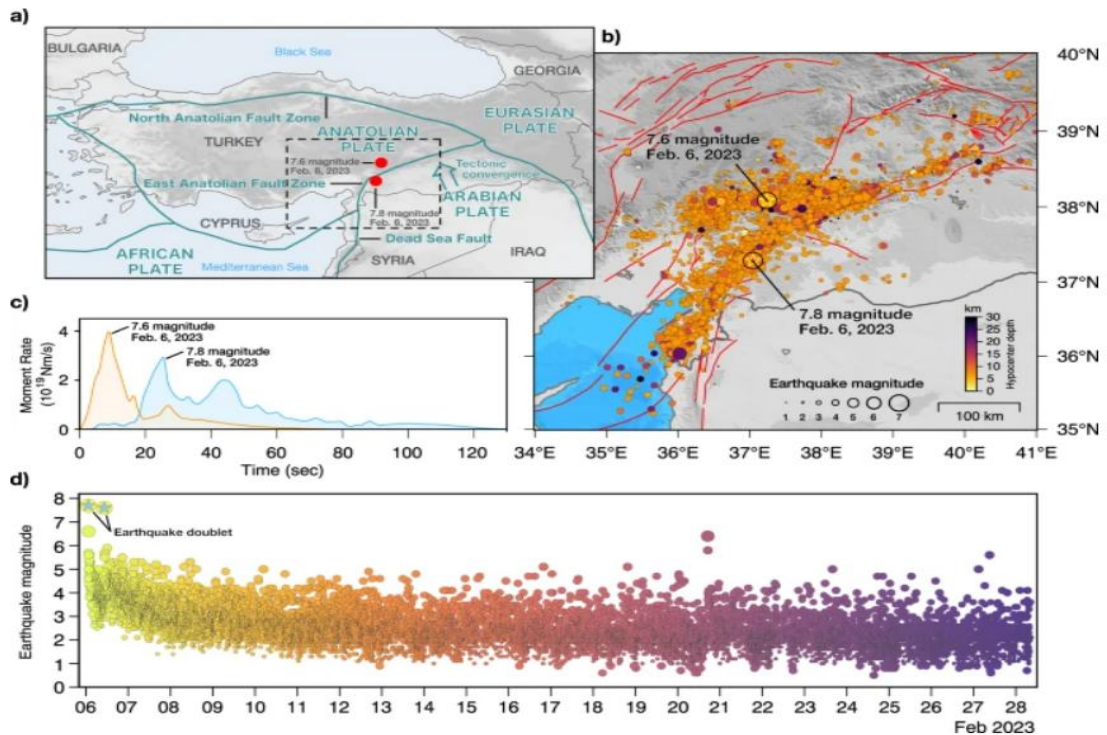


图2 卡赫拉曼马拉什地震序列的构造背景和地震活动

以上讨论的因素导致了危险和暴露。然而，风险和破坏还受到第三个因素的影响，即脆弱性。在饱受战争摧残的叙利亚，脆弱性尤其高，但事实证明，土耳其的许多建筑（其中一些是相对较新的）并不是为了抵御大地震而建造的。主震发生在当地时间凌晨4点17分，当时大多数人都都在室内，因此处于危险之中，这加剧了灾难性的后果。

## 2. 灾难的教训

当重大灾难发生时，最初几天的重点是救援工作和巨大的生命和财产损失。但随着从应急转向长期复苏，必须专注于如何避免重蹈覆辙。在残缺不全的废墟中，造成破坏的最终原因很明显：无筋砖砌体、低层混凝土框架、升降板和非韧性混凝土。因为现有的大多数建筑都是低层砖结构，建造的又非常近，所以严重的破坏被放大了。这种破坏反映在一句谚语中：地震不会杀死人，但建筑物会。

在土耳其，尽管存在适当的建筑抗震规范，但脆弱性依然存在。现在，援助必须把重点放在当地人民的优先事项上，即确定和减少脆弱性并建立长期复原力，这才是更安全未来的关键。为了提高抗震能力，建筑规范既需要存在，也需要得到遵守。然而，根据社会和政治环境的不同，这可能很困难。然而，在一个地震风险已知的地区，监管不善的建筑业才是真正的杀手。部分解决方案可能是开发具有成本效益的工具和消费者意识宣传活动，使公民能够核实他们考虑购买或租赁的房产的安全性。在叙利亚，战争已持续多年，建筑法规并不是当务之急，目前更需要关注建筑材料，因为其建筑物的建造和重建都是用一切可用的东西。

### 3. 下一次地震的位置

卡赫拉曼马拉什地震序列是断层系统在数小时到数十年内发生级联地震的一系列例子中的最新一个，预计受影响地区的地震活动将在数年甚至数十年内加剧。

东安纳托利亚断层的历史地震活动和近期地震活动与北安纳托利亚断层没有太大区别——1939年至1967年间的几次大地震就发生在北安纳托利亚断层。在过去的一个世纪里，北安纳托利亚断层的土耳其部分产生了一系列引人注目的大地震，这些事件在伊斯坦布尔南部的马尔马拉海下

留下了地震空区，这一空区已经 250 年来没有被填补过。目前，还不知道这个断层何时会破裂，但风险正在上升。

另一个令人担忧的地区是 2023 年 2 月破裂以南的一个东安纳托利亚断层段，即死海断层。长期的历史地震记录表明，整个死海断层发生了几次 7 级以上的地震，包括公元 859 年 **Sergilla** 段的地震、公元 1157 年 **Apamea** 段的地震和公元 1408 年 **Lattakia** 段的地震。死海断层北段的地震行为似乎涉及长时间的地震平静期，而后突然被罕见的大地震打断。死海断层的北段需要特别关注，因为该段是一个公认的地震空区，850 多年来没有发生过大地震。以每年 7 mm 的平均滑动速率计算，该断层累积的滑动亏损量接近 6 m。因此，这种长时间的地震平静期可能代表着叙利亚和黎巴嫩的高度地震危险性。

总体而言，现在是迅速重新评估该地区地震风险的时候了。同时，政策制定者将应致力于执行建筑和抗震规范，使用优质材料和熟练工艺及建筑保险。

来源：Dal Zilio L, Ampuero J P. Earthquake doublet in Turkey and Syria. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(1): 71.

---

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所