

地震科技前沿快报

2022 年第 9 期（月刊总第 44 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、用于埃及金字塔抗震保护的振动屏障系统

中国、埃及等文明古国，有着广泛分布的文化遗迹，如何保护其免受地震灾害的破坏，需要非传统的、特殊的抗震分析和设计。振动屏障是埋在土壤中的结构，能够吸收很大一部分由地面运动产生的动态能量。针对金字塔的研究表明，设置振动屏障后，金字塔中的应力明显降低，这表明这种策略在保护历史建筑免受地震引起的地面运动影响方面是可行的。文章提出的振动屏障，对于震害防御提出了新的业务方向。

2、地震损失在经济中扩散所引起的风险

国家经济易受天灾影响。本研究提出一组概率风险指标，包括地震造成的平均年度损失（AAL）和损失超越曲线（LEC）等，这使人们对地震的全部后果有了更好、更全面的理解，有助于更好地进行灾害风险的整体管理，并为政府和保险业设计金融对冲工具。研究认为，灾害管理措施和损害预防活动必须考虑经济中的跨部门和跨区域联系，供应链中断是极端事件所产生影响的传播渠道，这与区域面对此类事件时的脆弱性直接相关。研究人员以智利为例对这种方法进行了介绍，未来，这种方法的使用将有助于科学决策。

3、波兰北部稳定板块内部的当前应力状态：卫星大地测量、钻孔和地震数据的整合研究

关于应力状态的认识为地震研究、地质工程（如水力压裂、二氧化碳封存）设计等提供基础支撑。对于构造活动区（有震源机制结果）和进行油气勘探的沉积盆地区而言，有大量应力数据可用，但没有进行过工业勘探地区、无震地区（如欧亚板块的中心部分、活动地块内部）等，地应力数据几乎为空白。研究认为，钻孔或震源机制应力数据的缺失可部分被基于大地应变测量的模型所填补，而且这些模型适用于整个地表。在有越来越多 GNSS 等大地测量数据分布的无地应力数据地区，该方法值得跟踪研究。

用于埃及金字塔抗震保护的振动屏障系统

振动屏障 (ViBa) 是埋在土壤中的结构，能够吸收地面运动产生的大部分动态能量，其工作原理利用了位于顺应性半无限空间中的振动结构之间的动态相互作用，即结构-土壤-结构相互作用。本研究旨在分析将振动屏障作为缓解地震作用对左塞尔 (Zoser) 金字塔影响的策略的有效性。在代表塞加拉 (Saqqara) 地震活动的随机地面运动的作用下，研究人员对左塞尔金字塔和周围土壤进行了可靠的数值模拟。由于振动屏障独特的结构形式，研究人员通过 **ad-hoc** 程序对其进行了优化，以最小化响应应变能谱密度 (用以合成性能参数)。在考虑不同振动屏障布局的基础上，通过对振动屏障-土壤-金字塔系统有限元模型的数值模拟和实验室测试，评估了振动屏障的效率。蒙特卡洛分析表明，金字塔中的应力明显降低，表明这种策略在保护历史建筑免受地震引起的地面运动影响方面是可行的。在金字塔和周围区域的 **1:500** 比例明胶模型上的实验结果进一步证明了所提方法的功能和效率。相关研究成果发表在 **2022 年 4 月** 的 *Scientific Reports*。

埃及有着广泛的文化遗产，塞加拉 (Saqqara) 考古遗址距离开罗市约 20 km，被认为是世界上面积最大的墓地。在该区域中，左塞尔金字塔是需要保护的古代建筑中的重要遗产。在该地区自 20 世纪 80 年代末以来发生过两次地震——1992 年的开罗地震和 1995 年的亚喀巴湾 (Gulf of Aqaba) 地震，使左塞尔金字塔受到部分破坏。很明显，考古遗迹和遗址的保护需要非传统的、特殊的抗震分析和设计。由于很难在不改变其历史价值的情况下对其进行保护，古代遗迹通常不会受到针对未来灾难性地震的保护。因此，需要寻求非侵入性 (non-invasive) 的替代解决方案。

在此背景下，用来保护结构免受表面波影响的地震超材料（**seismic metamaterial**）得到迅速发展。同时，有学者提出了一种与非局部地震保护相反的策略，该策略利用了剪切波通过土壤引起的相互作用（即振动屏障的振动装置与每个周围结构之间的相互作用）来进行保护。振动屏障本质上是一个位于土壤中的振动弹簧-质量-阻尼器系统，其能够改变相邻结构的动态行为，以减轻其地震响应。结构-土壤-结构机制突出了与地震超材料概念的关键区别，即要保护的结构和设备不是两个单独的实体，而是互相作用的。这一关键特性为成功地将振动屏障概念应用于各种案例研究提供了机会，不少学者开始围绕振动屏障的抗震保护效率及其自身优化进行研究。

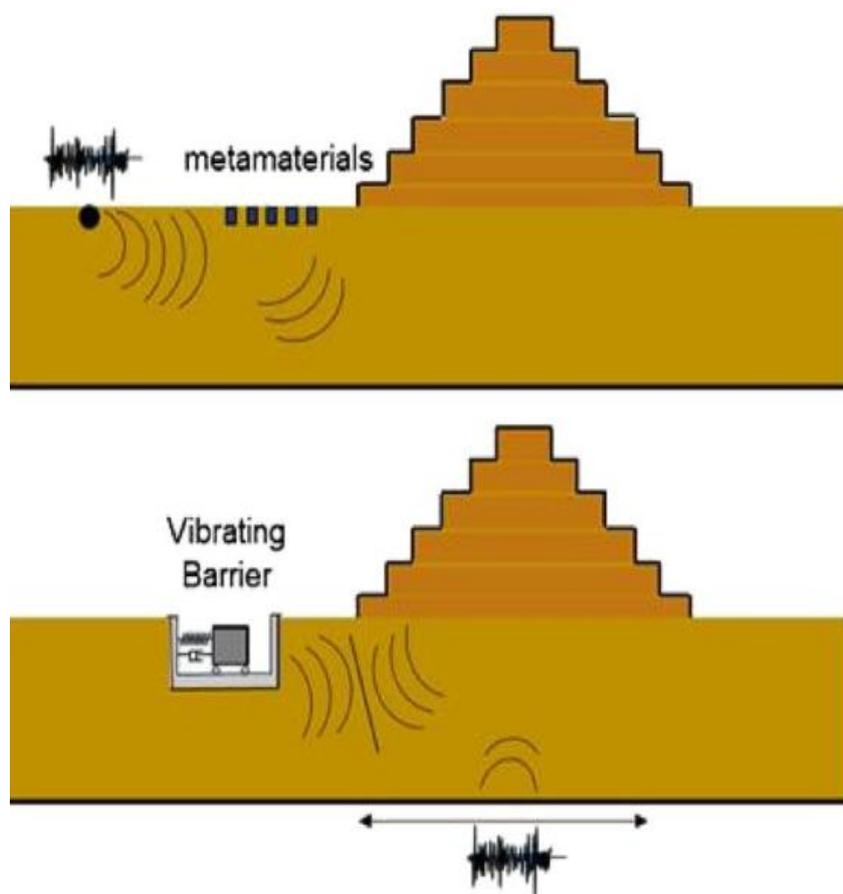


图 1 两种地震防护系统的工作原理示意。(a)：能够散射瑞利波的地震超材料；(b)：利用设备和待保护结构间相互作用的振动屏障技术

为了探讨传统振动屏障对左塞尔金字塔的地震保护性能，研究人员建立了左塞尔金字塔随机激励（**stochastic excitation**）数值模型。金字塔建模为实心阶梯结构，节点类型为八节点实体单元。通过土壤调查确定现场土壤特性，利用具有随机参数的功率谱密度函数，开发了能够捕捉塞加拉自然变异性的随机地面运动模型，提出了响应应变能谱密度，并将其作为金字塔对随机地面运动整体响应的度量。在此基础上，展开振动屏障的优化设计，并分析振动屏障对金字塔的抗震保护效果。最后，通过振动台模型实验，验证振动屏障的有效性。

由于大型数值模型由金字塔、振动屏障单元和周围土壤组成，因此提出了一种包含四个步骤的方法，该方法减少了振动屏障优化设计过程所需的迭代分析中的计算工作量，而无需对由金字塔、振动屏障和周围土壤组成的大型数值模型进行多次分析。

研究测试了振动屏障技术提供的两种地震保护配置（分别命名为情景 1 和情景 2），以评估这种新型地震保护系统的效率。选择这些配置的目的是最大限度地减少挖掘次数，并在距离和振动屏障性能之间保持平衡。此外，研究者首次采用响应应变能谱密度作为最小化设计问题的目标函数，该综合性能参数与金字塔所经历的峰值应力有关。因此，使其最小化将实现本工作的目标，即左塞尔金字塔的抗震保护。

为了验证所设计的振动屏障缓解金字塔地震响应的效率，利用由 **Boore** 模型生成的一组加速度地面运动进行蒙特卡洛模拟（**MCS**）。模拟结果表明，当使用振动屏障设备时，金字塔各个部分的峰值冯·米塞斯应力显著降低了其地震响应。在靠近振动屏障装置的位置，与目前现有场景（无地震保护）相比，地震响应大幅降低了 22%。另外，在金字塔的每一部分，特别是其核心部分，都观察到了有益的影响。

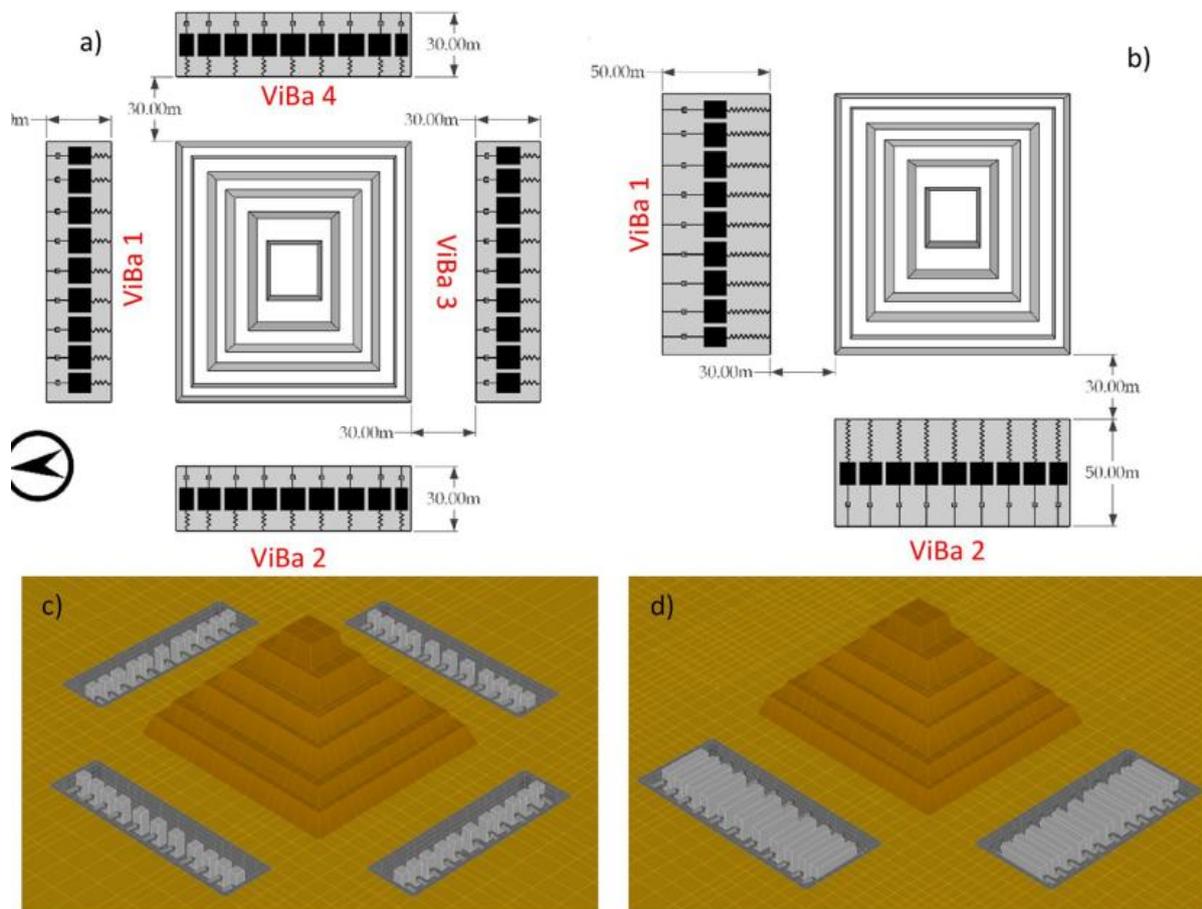


图2 情景1 (a、c) 和情景2 (b、d) 的振动屏障配置

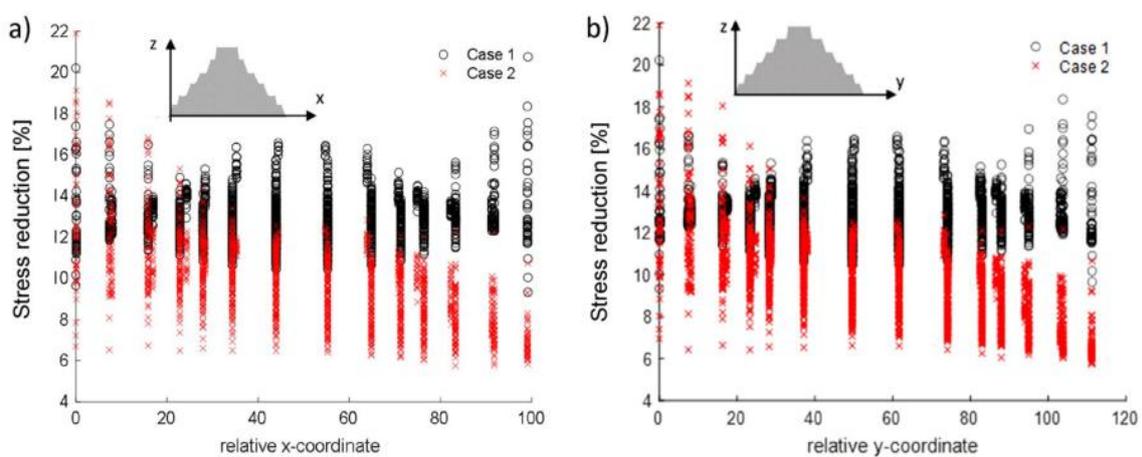


图3 根据每个有限元质心坐标排序的情景1 和情景2 的冯·米塞斯应力减少百分比 (a 代表 N-S 方向, b 代表 E-W 方向)

在模拟方法方面，使用多个盒子（振动屏障的放置容器）而不是单个盒子，显然没有什么优点（例如较小的挖掘量、覆盖多个频率的多功能性）。另一方面，从计算的角度来看，使用多个振动屏障需要对每个单独的交互（振动屏障-振动屏障和振动屏障-结构）进行繁琐的评估，还需要分析潜在的病态（ill-conditioning）问题。此外，必须强调，作为振动屏障工作原理基础的结构-土壤-结构相互作用可以通过其他方式实现。该项工作旨在表明，振动屏障技术能够保护大型遗产结构（如左塞尔金字塔）免受真实地震波的影响。

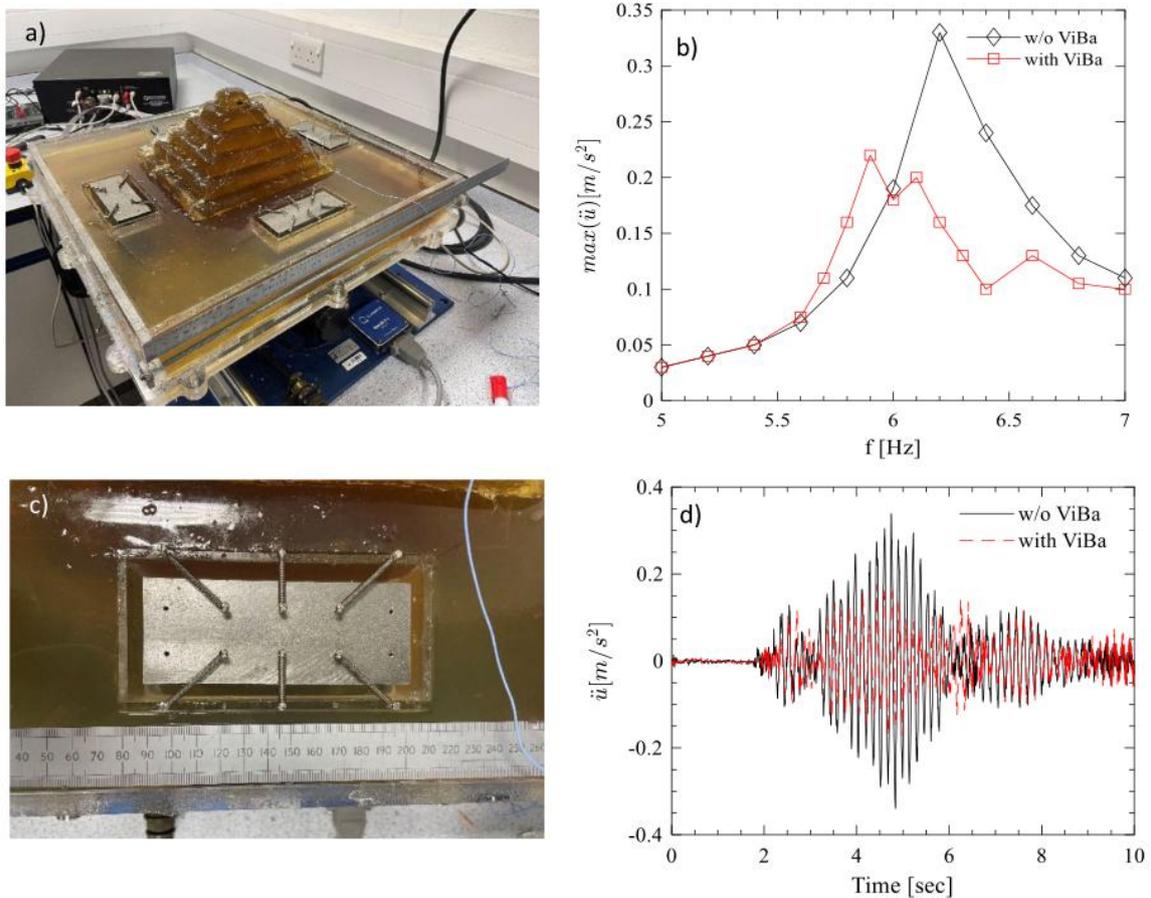


图 4 左塞尔金字塔 1:500 模型的实验测试。(a): 测试装置；(b): 有无振动屏障时的频率响应函数；(c): 振动屏障设置示例；(d): 模拟开罗地震发生时金字塔顶部的加速度变化

此外，研究还通过实验验证了振动屏障的有效性。研究人员使用明胶建立了金字塔及其周围区域的模型（1:500），并在模拟地面运动激励的振动台上进行了测试。首先，进行了一系列频率范围为 5~7 Hz、作用于 N-S 方向的地震动谐波激励。结果显示，振动对金字塔响应的影响在频率响应函数中表现为三个峰值，前两个对应于振动屏障频率响应函数的峰值，第三个是由于结构频率的偏移。同时，观测到在 6~7 Hz 内峰值响应附近的部分动能被吸收。对于 7 Hz 以上的频率，在有振动屏障和无振动屏障的情况下，没有发现显著差异。对于选定的地面运动，在金字塔顶部测得的峰值响应显著减少了约 33%，验证了振动屏障对左塞尔金字塔抗震保护的有效性。

来源：Cacciola P, Shadlou M, Ayoub A, *et al.* Exploring the performances of the vibrating barriers for the seismic protection of the Zoser pyramid. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1-12.

地震损失在经济中扩散所引起的风险

一个国家的经济容易受到天灾人祸的破坏。本研究提出了一组概率风险指标,主要包括地震造成的平均年度损失(AAL)和损失超越曲线(LEC)。相关指标的计算都采用了系统的概率方法,该方法将地震风险评估与空间上可计算的一般均衡模型结合在一起,考虑了大量事件(共同描述一个国家的整体地震灾害)的诱发损害和发生频率,使人们对地震的全部后果有了更好、更全面的理解。研究人员以智利为例对这种方法进行了介绍,未来,这种方法的使用将有助于领导者的科学决策。相关研究成果于2022年5月发表在*Nature Communications*。

有证据表明,灾害造成的经济生产损失(又称间接损失)有时可能比直接破坏造成的损失更为严重。因此,了解间接损失至关重要。并且,随着全球化时代供应链复杂性的增加,间接损失将变得更加突出。然而,仅用历史信息来解释地震的经济后果并不容易,因为这些灾难性事件并非频繁发生,所以缺少相关信息。与此同时,地震所造成物理损坏的建模已经成熟,因此可以以概率的方式估计单个资产的情况。相比之下,间接损失的建模远远落后,主要原因是难以根据经验将资产损失转化为间接损失,并且,缺乏将这两种损失联系起来的合适模型。此外,通常情况下,间接损失大致估计为物理损失的百分比,但这存在缺陷,而且可靠性很低。

目前,尽管有庞大而丰富的分析框架来研究灾害对经济的影响,但相关研究集中于对个别事件的分析,这些事件的发生概率会影响决策和政策。同时,似乎很少有人将基础设施或经济组成部分的物理损坏与更高层次的经济损失联系起来。鉴于此,研究人员提出一种方法,将概率地震风险与可计算一般均衡(CG E)建模框架系统地整合到高阶损失的估计中,这种估计考虑了以下方面:自然事件(如地震)在时间上是一个随机过程;事

件发生的频率对风险的评估很重要；经济组成部分的有形损害程度与资产存量的减少之间存在联系。进一步来看，研究人员使用了一种特殊类型的 CGE 模型，称作空间 CGE 模型，其考虑了经济主体和禀赋的地理位置。

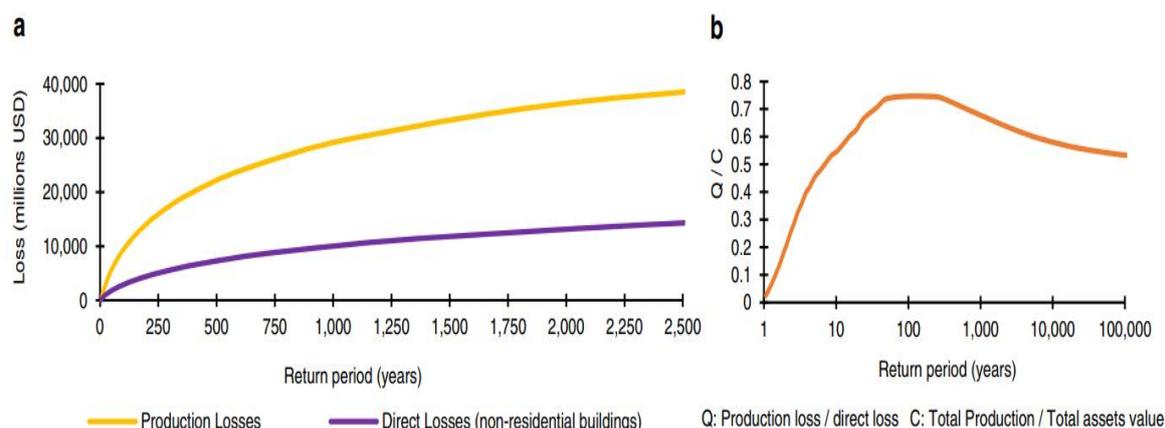


图 1 直接损失和生产（间接）损失的 LEC

为了对该方法进行说明，研究人员以智利为对象进行了案例研究。首先，生成一个随机地震目录，该目录与研究区域的地震危险性模型相一致。然后，模拟目录中第一次地震的发生，并使用传统的概率地震风险评估技术计算地震对建筑物、工厂和基础设施产生的物理损害（直接损失）。由于直接损失扰乱了 CGE 模型的初始平衡，因此重新运行该模型，直到其达到一个新的平衡。之后，对属于随机地震目录的每个事件再次进行分析。最后，使用所有地震事件的结果计算各种概率风险指标，包括间接损失的影响。

整体风险：智利全国直接损失的 AAL 估计为 3.02 亿美元，而生产损失的 AAL 达到年生产值的 0.132%（约 5.85 亿美元）。所计算的直接损失专门针对非住宅建筑，主要是因为研究人员试图仅对生产过程中使用的资产存量的损失进行建模，它们的物理破坏很容易在国家经济中扩散。生产损失的 LEC 可以估算预期生产损失，例如，智利与 250 年重现期（return period，意思是地震 250 年发生一次）相关的生产损失估计为 158.7 亿美元

（年生产值的 3.58%），而直接损失为 50.25 亿美元（占非住宅总价值的 4.85%）。当重现期为 1000 年时，生产损失和直接损失分别为 287.6 亿美元和 98.35 亿美元。

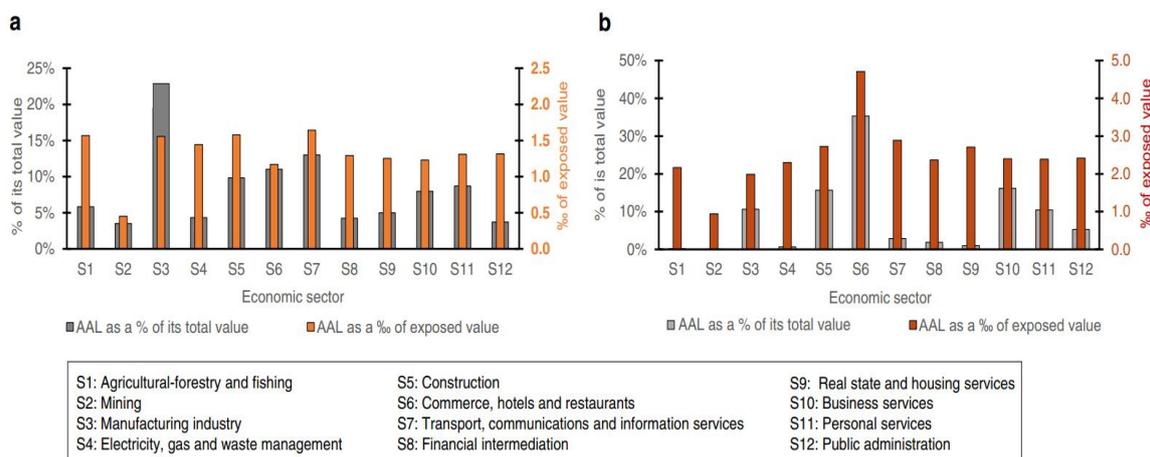


图 2 智利各经济部门的 AAL

研究发现，对于具有低重现期的、不太严重的事件，生产损失与直接损失呈正相关关系。对于重现期在 50~400 年之间的事件，生产损失大于直接损失。对于重现期高于 400 年的事件，生产损失与直接损失呈非常弱的负相关关系。风险矩阵分析表明，对直接损失和间接损失而言，按部门划分的 AAL 分布和经济部门的风险等级是不同的。就直接损失而言，风险最高的是 Atacama 地区（R4，该地区的编号），而就生产损失而言，风险最高的是 Valparaiso 地区（R6）。这表明了考虑高阶经济损失的重要性，因为虽然有些地区受地震灾害的物理影响最大，但就生产损失而言，其他地区受到的影响最大。

该方法能获得整个地区或经济部门的生产 LEC，从而能够计算一个地区或部门在任何重现期内的损失。例如，对于 250 年的重现期，R7 地区的损失为 106.74 亿美元。但相对于其对应的区域年生产总值而言，在 450 年左右的重现期中，受影响最大的地区是 R6，而重现期大于 450 年时，受影响

最大的地区是 R1。就经济部门而言，制造业的绝对损失最高，而运输、通信和信息服务业在任何重现期内的相对损失都最高（相对于其部门产值）。

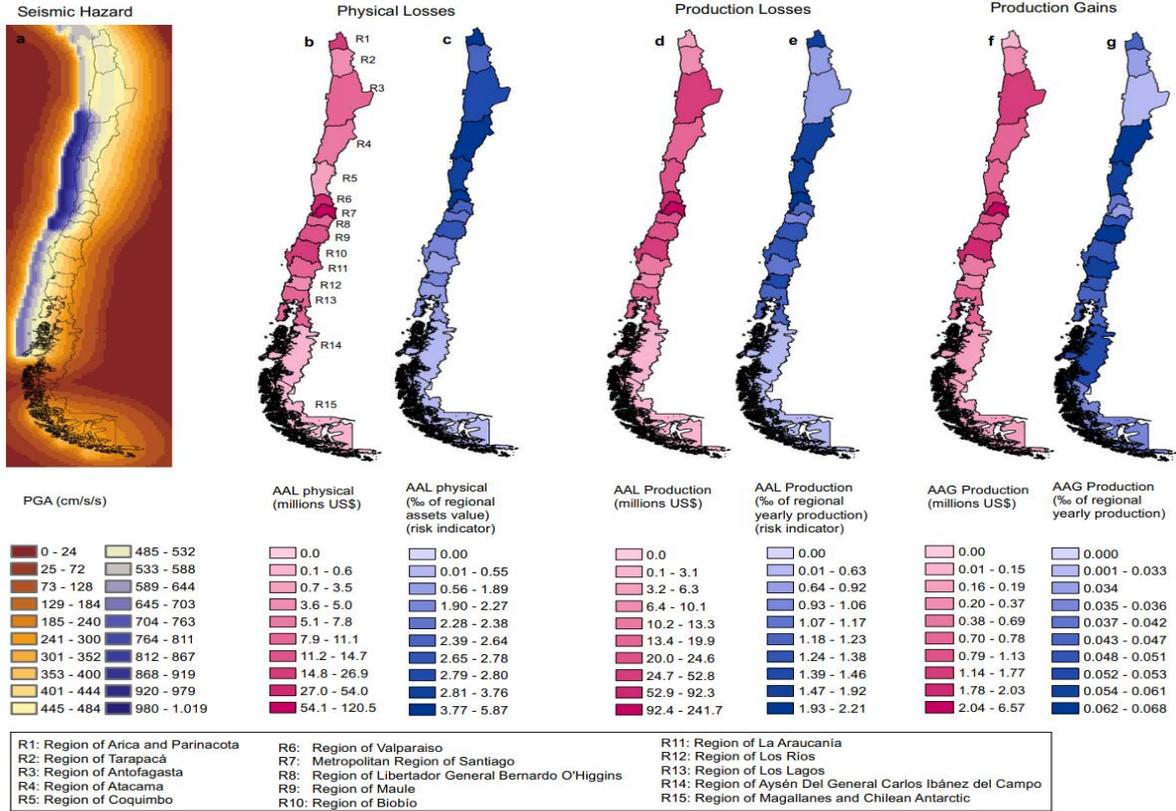


图 3 智利 AAL 的分布

除了在国家层面汇总的结果外，还可以通过计算特定区域生产损失的 AAL 和经济部门的生产 LEC 来分析该国区域经济所发生的变化，以此表明智利各地区经济部门生产损失行为的差异。

互补的风险指标：CGE 建模的丰富性涉及输出变量的数量，每个变量都反映了经济的不同方面，允许计算许多有趣和有价值的风险指标。除了根据生产损失计算风险外，还可以计算就业损失、国内生产总值（GDP）、地区生产总值（GRP）、关税收入、居民消费价格指数（CPI）、出口量等方面的风险指标。这些互补的指标有助于地震风险管理，它们提供了一种方法，可衡量面临地震灾害的经济体在各个方面所遭受的损失。

当地震发生时，通常会发生经济损失。然而，在某些地区，一个或多个经济部门可能受到积极影响。使用相同的指标，可以衡量相同经济组成部分的积极影响，这亦有助于更好地理解和管理地震风险。

讨论：该研究展示了 CGE 模型和用于地震风险评估的概率模型如何协同工作，进而可以对地震对整个经济产生的影响进行稳健而系统的概率分析。这有助于更好地进行灾害风险的整体管理，并为政府和保险业设计金融对冲工具。研究认为，灾害管理措施和损害预防活动必须考虑经济中的跨部门和跨区域联系，供应链中断是极端事件所产生影响的传播渠道，这与区域面对此类事件时的脆弱性直接相关。

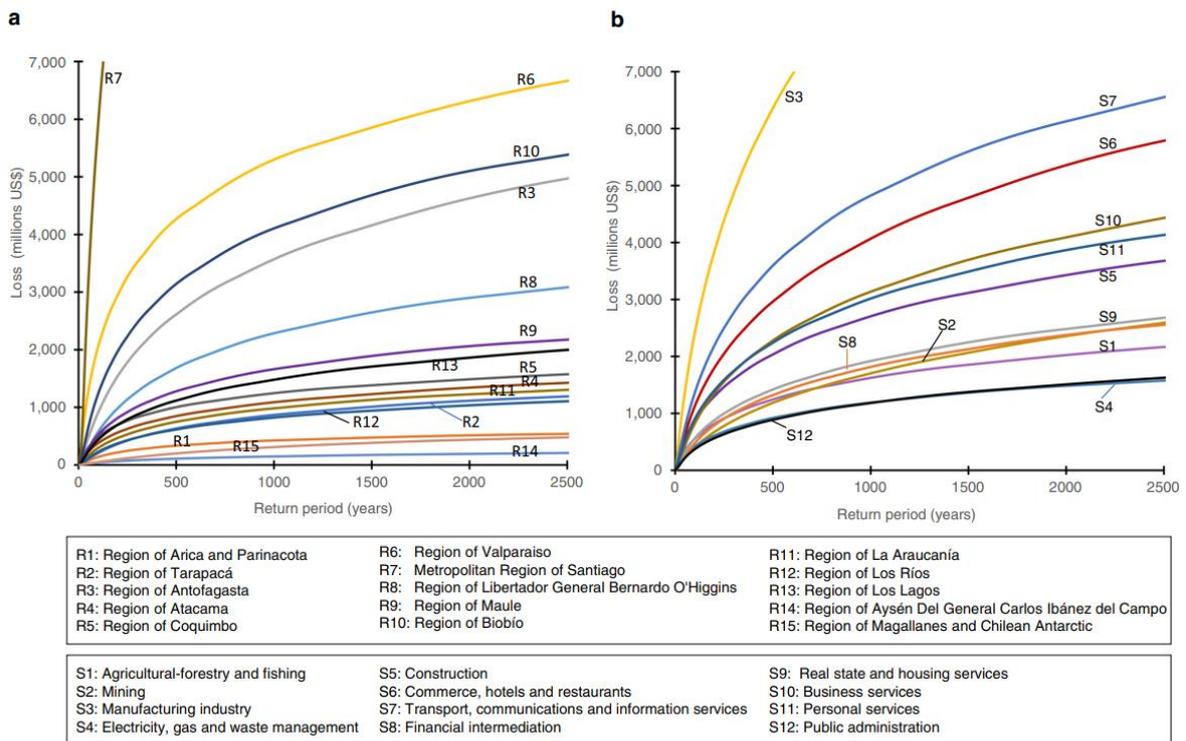


图 4 智利区域生产的 LEC

该建模方法在地震发生方面是完全概率性的，但目前在 CGE 方面是确定性的。虽然将灾害影响的宏观经济评估汇总并转移到区域适应和分析层面的可能性十分有限，但是，区域建模对于衡量供应链中断的系统性影

响至关重要。对自然灾害和气候变化所造成的广泛间接经济影响的区域评估仍然需要新的分析工具，因此，绘制自然灾害的经济影响图对风险的管理和预防十分重要，该研究建议使用空间 CGE 模型。

人类活动影响物理过程，反之亦然。当前的经济模型中缺少人与物理环境的相互作用，这一差距可以指导未来极端事件的建模工作。灾害模型的经验验证是一项艰巨的任务，但努力进行不同类型的部分验证，对完善模型至关重要。特定地区的自然灾害会影响该地区的资产，然而，损失可以通过各种渠道（如贸易链）转移到其他地区。更好地从空间和经济维度了解自然灾害，对正确衡量人员和经济损失及减灾工作至关重要。

来源：León J A, Ordaz M, Haddad E, *et al.* Risk caused by the propagation of earthquake losses through the economy. *Nature communications*, 2022, 13(1): 1-11.

波兰北部稳定板块内部的当前应力状态：卫星大地测量、钻孔和地震数据的整合

本研究测试了通过应变率数据（由大地测量卫星资料确定）估计波兰北部相对稳定地区当前应力大小的可能性，该地区由东欧克拉通、Teisseyre-Tornquist 构造带（TTZ）和古生代地台的碎片组成。应变率及其主要方向由 63 个缺乏特殊稳定性的全球导航卫星系统（GNSS）台站确定，过滤不稳定台站的方法使研究人员能够从最终应变率计算（包括相关半径为 150 km 的数据的平均值）中排除其中一半台站。通过比较大地测量方法确定的水平应变方向和利用钻孔数据确定的当前应力方向，发现存在高度的收敛性。此外，还发现应变率变化趋势与主要构造单元的岩石圈综合强度一致，获得的应变率与已公布的相邻区域的应变率一致。通过校准桑比亚半岛（Sambia Peninsula，位于加里宁格勒州）地震的弹性应变累积时间，并假设克拉通上的弹性应变处于瞬态，估计了应力大小。结果表明，研究所分析克拉通部分的结晶上部地壳处于走滑断层应力机制，而非正断层应力机制。弹性应变的当前状态是过去数百万年累积的结果，导致应力远离摩尔-库仑摩擦准则中的临界状态，但地震活跃的桑比亚半岛除外。相关成果发表在 2022 年 5 月的 *Tectonophysics*。

关于当前应力状态的知识为地质工程操作方案（如水力压裂、二氧化碳封存）的设计提供了重要支撑。对于构造活动区（震源机制）和进行油气勘探的沉积盆地而言，有大量应力指示数据可用，这些数据被连续地收集在世界应力图（WSM）数据库中。然而，一些稳定的无震克拉通没有进行过工业勘探，在其中被表示为明显的白点（white spots）。应力信息被忽略的最大区域是欧亚板块的核心部分，即东欧和西伯利亚克拉通。研究

者认为，钻孔或震源机制应力数据的缺口可部分被基于大地应变测量的模型所填补，这些模型适用于整个地表。

另外，近年来全球导航卫星系统（GNSS）的定位精度得到了显著提高。目前，国际 GNSS 服务中的永久测量所允许的定位精度高达 1 mm。自 21 世纪初以来，欧洲 GNSS 台站的数量从几个增加到 3500 多个，所测得的数据为了解板块边界的运动现状提供了新的线索，并提供了有关当前板块运动的全球图像。因此，GNSS 台站数据可用于不同的项目，例如欧洲板块观测系统（European Plate Observing System, EUPOS），其加入了在全球范围内收集的大量的卫星大地测量数据，可用于地球动力学研究。

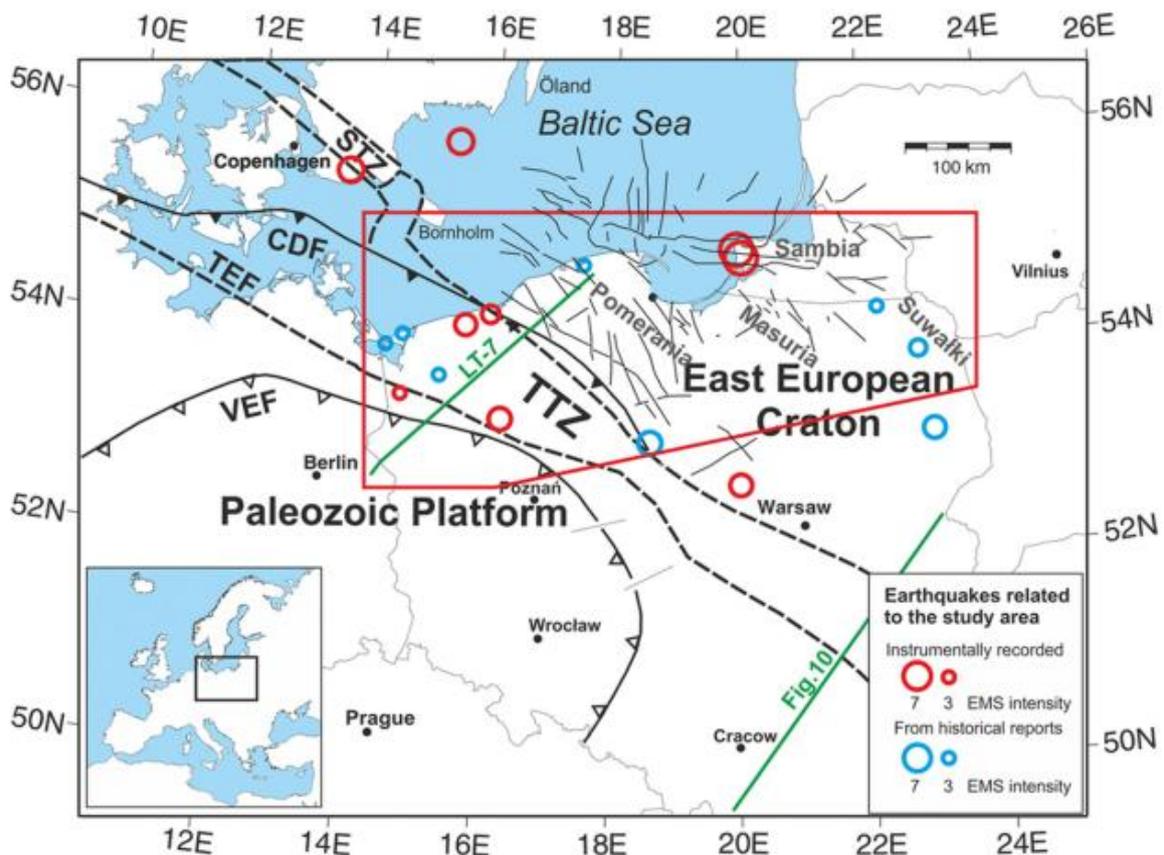


图 1 研究区域（红色多边形）在主要构造单元中的位置（圆圈代表仪器记录的和历史报告中的地震震中）。TTZ—Teisseyre Tornquist 构造带，STZ—Sorgenfrei-Tornquist 构造带，CFD—加里东变形锋，VEF—Variscides Externides 锋

本研究重点关注波兰北部的三个大型构造单元,即东欧克拉通(EEC)、Teisseyre-Tornquist 构造带(TTZ)和古生代地台(PP)。首先,进行钻孔破裂分析和水平应力(S_H)方向的确定,并基于波兰主动大地测量网络(ASG-EUPOS)63个永久台站的数据分析应变率。之后,考虑到岩石圈流变结构的差异,比较了主要构造单元之间的水平应力、应变方向以及应变率变化。接着,分析了桑比亚半岛地震的触发应力,并使用更新后的大地应变模式估计了EEC内部的应力大小。在此基础上,讨论了应变和应力估计的不确定性和局限性。

研究计算得到的位于EEC波美拉尼亚部分的四个钻孔的 S_H 方向为稳定的NNW-SSE方向,与迄今确定的区域方向一致。应变率分析基于ASG-EUPOS网络63个永久性台站的数据,其中只有3个台站具有良好的稳定性。在过滤掉不稳定的台站后,选择了35个经过验证的台站。通过平均相关半径在150 km内的台站的定位,分析了由应变评估台站(SEP)创建的每个三角形的中点的应变率。

最大水平收缩率(ϵ'_H)的方向落在一定范围内,从EEC波美拉尼亚部分的NNW-SSE方向到调查区域其余部分的NW-SE方向。主要构造单元的主要收缩方向与源于钻孔数据的 S_H 方向一致。最大收缩率的绝对值显著影响着垂直应变率,垂直应变率也主要处于收缩状态,但研究区域的东端和西端除外,在那里存在垂直拉伸。平均而言, ϵ'_H 从EEC波美拉尼亚段的 $4.3 \times 10^{-17}/s$ 和TTZ的 $5.43 \times 10^{-17}/s$ 变化到PP的 $8.7 \times 10^{-17}/s$ 。

对于位于EEC波美拉尼亚部分的四个SEP(SEP 13、15、17、20)而言,以NNW-SSE方向为主的收缩十分明显,其平均方位角等于167度。相对于TTZ中的收缩,其发生了明显的顺时针旋转。这四个SEP还揭示了一致的 ϵ'_H ,其范围为 $3.9 \sim 4.6 \times 10^{-17}/s$,平均为 $4.3 \times 10^{-17}/s$ 。 ϵ'_H 在构造单

元之间的差异与从流变模型推断的岩石圈强度成反比，岩石圈越热、越弱，应变率就越高。在研究区域最东端测定的 ϵ'_H 与克拉通内部稳定良好的 EPN（EUREF Permanent GNSS Network，欧洲参考框架的永久性 GNSS 网络）台站测定的 ϵ'_H 相似。

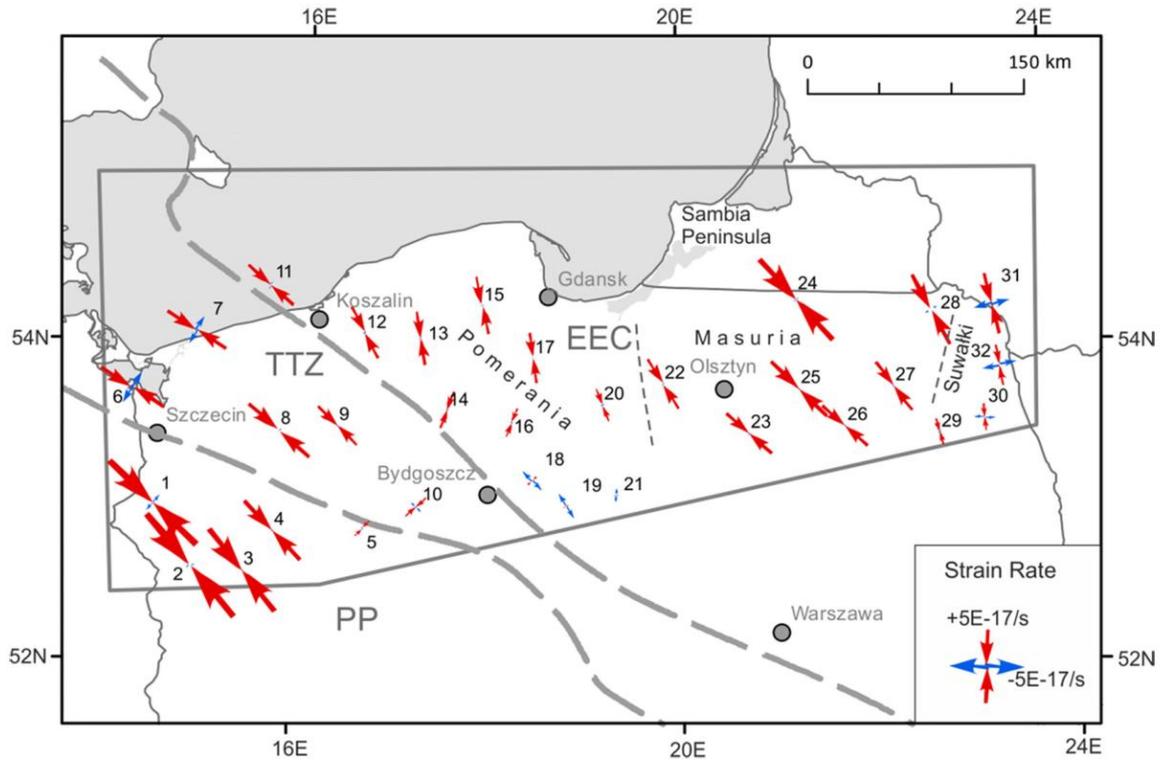


图2 基于 ASG-EUPOS 永久性 GNSS 台站的波兰北部应变率测量结果
(图中数字 1-32 代表 SEP 编号)

与 EEC 的背景特征相比，最靠近桑比亚半岛的验证台站显示收缩率加倍。研究人员认为，这一现象与表面热流正异常引起的克拉通岩石圈弱化有关。克拉通岩石圈的热弱化导致脆性上地壳中的应力集中，这可能引发了 2004 年桑比亚半岛的两次强震。

通过假设上地壳的力学性质，并使用临界应力断层理论和附近桑比亚半岛的地震震源机制解，研究人员估计了走滑断层应力机制下 $S_{HEq}=439$ MPa 和 $S_{hEq}=209$ MPa 时的破裂触发应力 (S_{HEq} 和 S_{hEq} 分别代表地震震源中

的最大和最小水平应力)。取距震中最近的 SEP 24 的应变率，估计了新构造收缩阶段之前正断层应力机制下的初始应力状态。结果发现，随着时间的推移，水平应变率呈线性增加，获得了 394 万年的弹性应变累积，这与上新世构造松弛期一致。

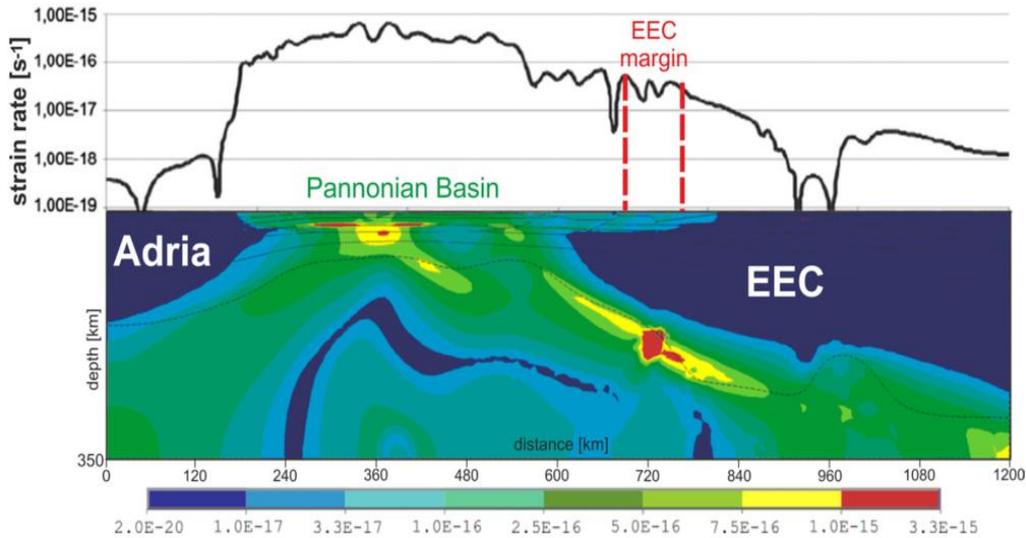


图 3 Adria EEC 横截面上当前最大应变率的有限元模型

此外，研究人员利用来自其他 SEP 的收缩时间和应变率计算了 EEC 中的近期应力，发现 EEC 波美拉尼亚部分主要处于走滑应力机制，其应力状态远离临界点，这与该区域的无震特征相一致。

该研究所展示方法在应用中的最基本问题是准确确定应变率，可以通过增加台站数量和更好地稳定现有台站来减少应变率。此外，必须完全满足瞬态应力条件（这适用于应力松弛相对较新的克拉通无震部分），并且必须对至少一个位置进行独立的应力值确定。

来源：Jarosiński M, Araszkiwicz A, Bobek K, *et al.* Contemporary state of stress in a stable plate interior (northern Poland): The integration of satellite geodesy, borehole and seismological data. *Tectonophysics*, 2022, 831: 229336.