

地震科技前沿快报

2022 年第 11 期（月刊总第 46 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、光纤分布式声学传感（DAS）在地震预警应用中的潜力

地震预警（EEW）系统依赖于各种仪器（如地震计、加速度计、大地测量仪器）收集的数据，目前未被充分利用的数据主要包括动态应变或变形。钻孔应变仪（BSM）的记录已被证明在地震预警中具有重要潜力，但 BSM 的数量和部署成本等使其未来的应用可能受限。光纤应变传感技术成为可扩展的应变传感选项之一。光纤分布式声学传感（DAS）阵列测量的频率范围广，DAS 记录的地震波数据与传统地震仪记录的地震波数据之间显著一致，DAS 可能是一个地震预警系统数据补充的可行方案。

2、双重构造活动降低了喜马拉雅前缘的推进和地震矩亏损

双重构造（duplex）在挤压断裂带的演化中非常重要，可引起系统内部缩短，进而影响地震矩亏损，最终影响地震危险性评估结果的可靠性。但内部缩短在挤压构造地区的研究中并未得到重视。研究人员计算了喜马拉雅弧地震矩的累积，发现在过去 1000 年中，因双重构造的地震矩减少

量相当于一次 Mw 8.72 地震，地震矩亏损下降约 23%~54%，这解释了喜马拉雅地震矩的长期不平衡原因。

3、城市地震韧性图：以土耳其伊斯坦布尔的交通网络为例

震后，交通对疏散、救援资源供应及加快恢复等至关重要。交通系统在地震时的崩溃可能会带来毁灭性的后果。为防止此类灾难性后果，须准确评估这些系统的抗震韧性。文章首先确定了系统功能的测度方法，以土耳其伊斯坦布尔交通网络为例开展了地震韧性概率分析，获得了韧性测度图。该研究还分析了涉及数千个结构的大型系统，提供了可用于其他交通网络韧性评估的通用概率模型。

光纤分布式声学传感（DAS）在地震预警应用中的潜力

随着地震学界开始采用光纤分布式声学传感（DAS）技术，DAS 阵列正在成为获取应变和地面运动数据的一种合乎逻辑的、可扩展的选择。最近，钻孔应变仪的记录证明了应变数据在地震预警中的应用潜力。然而，当前的钻孔应变仪网络比较稀疏，安装钻孔应变仪成本高昂，且通常难以实施。另外，钻孔应变仪在海洋环境中与其他传统地震仪器具有相同的局限性。在本研究中，研究者以美国西海岸的 **ShakeAlert** 地震预警系统为例，提供了有关如何在现有地震预警应用中使用 DAS 数据的路线图。研究者检查了地震预警系统的数据要求，研究了在不进行重大修改的情况下，将应变衍生的地面运动数据合并到此类系统中的方法，并确定了在这些应用中充分利用 DAS 数据的其他需求。重要的是，地震预警算法需要地震动幅值信息来快速进行震源表征。因此，准确的应变幅值以及相位信息的观测，对于从 DAS 数据中推导出这些地面运动指标是十分必要的。为了获得高质量的地面运动观测，兼容地震预警系统的 DAS 阵列需要具有多分量、耦合良好和低噪声的特点。研究者建议使用现有 DAS 技术实现此类数据要求，并对需要进一步研究以优化用于地震预警的 DAS 阵列的性能进行了讨论。相关成果发表在 2022 年 6 月的 *Bulletin of the Seismological Society of America*。

地震预警（EEW）系统依赖于各种仪器（如地震计、加速度计、大地测量仪器）收集的数据，以对即将发生的地震发出警告。在地震预警系统中，未被充分利用的数据类型主要是由于地震波通过岩石传播而引起的动态应变或变形。应变仪能测量很宽频率范围内的信号，可以在现有的 EEW 数据流中提供额外的帮助，以确认大地震正在发生。虽然钻孔应变仪（BSM）的记录已经证明应变地震学在 EEW 中的潜力，但 BSM 的数量和部署成本

等因素使其未来的应用可能性降低。相比之下，光纤应变传感技术则成为可扩展的应变传感选项。

光纤分布式声学传感（DAS）阵列由光纤电缆和仪器（询问器）组成。当光纤受到入射弹性波场的影响时，阵列部分的长度会发生非常小的变化，以此原理可将测量结果转化为应变。光纤 DAS 阵列测量的频率范围很广，并且 DAS 记录的地震波数据与传统地震仪记录的地震波数据之间存在显著的一致性。鉴于安装新 BSM 的难度和费用，DAS 可能是一个可行的替代方案。

本研究使用美国西海岸的地震预警系统 ShakeAlert 作为可集成 DAS 数据的地震预警系统示例。研究人员先全面梳理了 EEW 的源参数和地面运动估计的数据要求与规范，相关数据主要包括地震数据、大地测量数据和应力数据。然后，介绍了光纤 DAS 在陆上 EEW 应用中的潜在优势，以及在海洋 EEW 应用中的注意事项，同时，分析了一般应变数据和 DAS 数据如何在此 EEW 系统中使用。最后，研究者讨论了 EEW 应用的 DAS 阵列部署和校准要求，并提出了未来的研究建议。

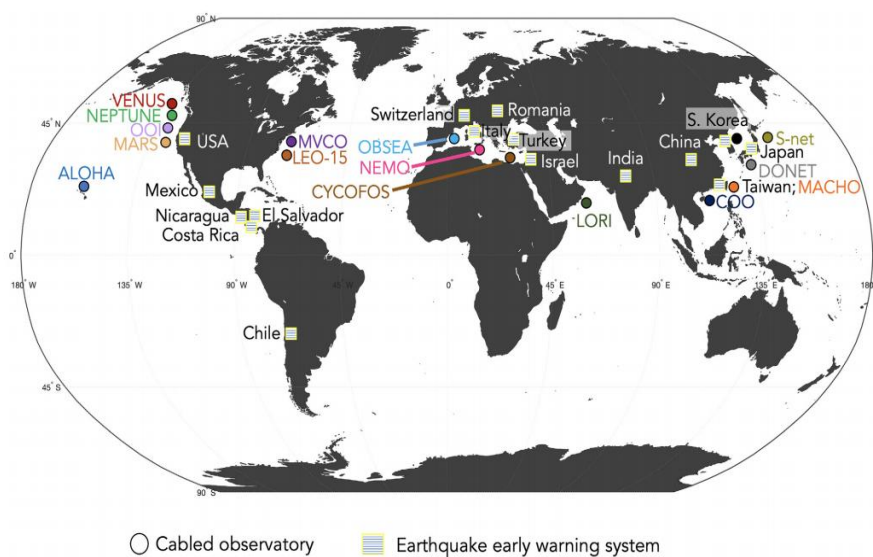


图 1 缆系海洋观测系统网（按名称颜色编码的圆圈）和目前运行中的地震预警（EEW）系统的大致位置（按条纹方块标记的国家/地区）

峰值动态应变标度 (**peak dynamic strain scaling**) 可以提供独立的、未饱和的震级估计, 并帮助确认大地震正在发生。应变数据辅助地震检测的方式之一是利用现有的光纤装置, 或在海洋和传统仪器难以部署的区域额外部署阵列, 特别是在人口稠密的地区。通过在关键位置加密 EEW 监测网络 (包括应变观测), 可以通过对地震的早期检测提高 EEW 系统的性能, 这将减少初始晚报区的规模。当前, 城市地区日益丰富的光纤为在人口稠密的陆上地区使用 DAS 数据加密地震观测网提供了强大的潜力。

近海断层和俯冲带对 EEW 系统构成了重大挑战。由于台站方位覆盖较差, 海洋地震通常很难通过仅使用陆上仪器的 EEW 系统准确定位, 并且显著的震中估计误差可能导致震级估计和由此产生的警报区域出现较大误差。在海洋地震发生时, 依赖于峰值地面运动的 EEW 算法可能具有较大的初始和后期警报区, 因为震动必须到达陆上仪器才能被此类算法检测到。海洋光缆可为基于 DAS 的地震监测提供有利的机会, 将 DAS 询问器安装到现有的暗光纤上, 可以大大扩展全球海底网络的地震监测能力。

各种 DAS 应用需要考虑不同的阵列, 对于某种应用有效的阵列配置可能不一定适合于 EEW。将 DAS 数据中的振幅信息校准为 EEW 频率范围内的真实地面应变, 是 DAS 应用于 EEW 的一个重大挑战, 这对于获得各种 EEW 算法所使用的面运动振幅信息是必要的, 更是将 DAS 最大程度应用于 EEW 的需要。

尽管已经证明, 来自 BSM 的应变数据可用于估计 EEW 系统的基本参数, 如到达时间和震源特性, 但迄今为止, 它们并未被纳入全球任何运行的 EEW 系统, 包括 ShakeAlert 系统。传统 BSM 和 DAS 阵列能提供宽带、高频的应变观测, 将其转换为传统的地面运动指标, 可供现有的 EEW 算法摄取, 或被用于峰值动态应变标度估算。研究人员讨论了 DAS 阵列如

何成为传感点的可行且成本相对较低的方案，以扩展基于应变的地震预警功能，尤其是现存光纤可被使用的情况下。在 EEW 系统中应用 DAS 之前，应考虑不同的 DAS 阵列，具体取决于地震预警的特定应变观测要求。

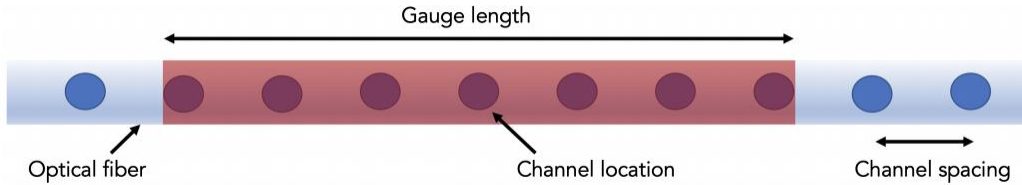


图 2 标距长度、通道位置和通道间距之间的关系示意图

现有的 EEW 算法不使用应变数据作为输入，但从 DAS 数据衍生的地面运动参数可以合并到现有算法数据流中。此类数据需要采用以下形式：用于点源算法的 P 波到达时间和峰值 P 波位移；用于基于有限断层源算法的峰值地面加速度 (PGA)；用于基于波传播算法的峰值地面速度 (PGV) 和 PGA。理想情况下，这些 DAS 衍生的地面运动参数将使用与地震数据相同的频率带宽来确定，以提供跨所有仪器类型的一致观测数据集。此外，可以为应变数据量身定制新的 EEW 算法，以执行地震检测和震级估计，或在与其他 EEW 算法并行运行的情况下直接预测震动强度。

由应变衍生的地面运动观测需要准确的应变幅值信息，因此需要准确校准 DAS 阵列。尽管使用传统的地震仪和应变仪进行现场校准是最好的，但来自远震的勒夫波（如果可用）可能更能代表 EEW 所需的频率。在未连接的光纤中，由于缺乏良好的耦合以及从地面到光纤的应变转移，校准问题可能会加剧，并导致光纤测量的应变振幅与岩石所经历真实应变之间的误差。如果需要所有地面运动指标，连接良好的光纤将是 EEW 应用的理想选择。同时，应变到峰值地面振幅的准确转换还需要多分量应变观测。这需要对纵波和横波进行最佳感测，螺旋缠绕的光纤或其他布局模式较为适用。根据指向性和断层相对于光纤轴的方向，这可能会对已部署的光纤

（暗光纤）的使用造成一些限制。对于 EEW 而言，未来需要对光纤相对于大断层的最佳方向进行更多研究。

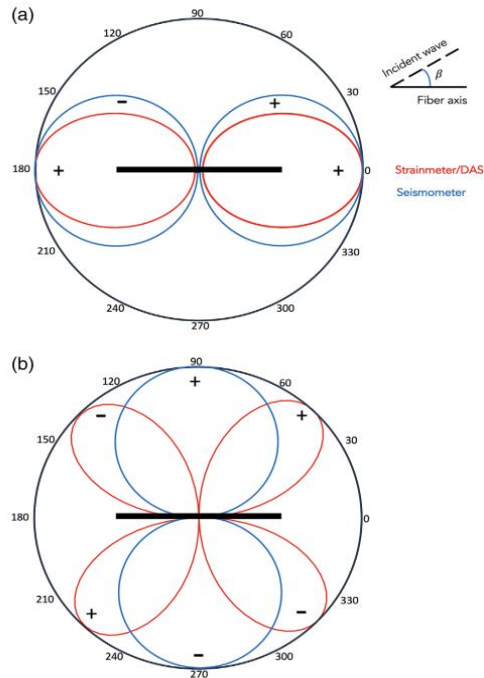


图3 应变仪或 DAS（红色）的方位角响应。(a)与地震仪的纵波水平分量（蓝色）相比，(b)与地震仪的横波水平分量（蓝色）相比

现有的、分布空间广泛的暗光纤型装置是在陆上和海洋环境中实现灾害监测的一种非常有前途、快速且经济的方法。光纤阵列可以提供密集的灾害监测，尤其是在海洋环境中。DAS 阵列中的其他噪声源可以通过选择更高质量的询问器模型（interrogator models）或通过工程光纤来减少，同时，DAS 阵列的许多其他潜在问题还需充分研究。总体而言，将 DAS 纳入 EEW 系统有很大的潜力，这可能会提高 EEW 系统高效、准确预警各种地震灾害的能力。

来源：Farghal N S, Saunders J K, Parker G A. The Potential of Using Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing (DAS) in Earthquake Early Warning Applications. Bulletin of the Seismological Society of America, 2022, 112(3): 1416-1435.

双重构造活动降低了喜马拉雅前缘的推进和地震矩亏损

双重构造 (**duplex**) 在褶皱-逆冲断裂带、增生楔的演化中扮演着重要角色，并可引起系统内部缩短，进而影响前缘推进速率和地震矩亏损。尽管如此，内部缩短在喜马拉雅及其他地方的研究中并没有得到重视。研究人员引入几何学方法来限定喜马拉雅楔中部地壳断坡（中部地壳双重构造中最活跃的断坡）的滑移转换比（用 **R** 表示上滑和下滑的比例）。结果表明，**R** 大约为 **0.9**。然后，通过这一比值计算了地震矩的累积，发现在过去 **1000** 年中，整个喜马拉雅弧所累积地震矩的减少至少相当于一次 **M_w 8.72** 地震，地震矩亏损下降约 **23%~54%**，这与喜马拉雅地震矩的长期不平衡一致。相关研究成果于 **2022** 年 7 月发表在 *Geology*。

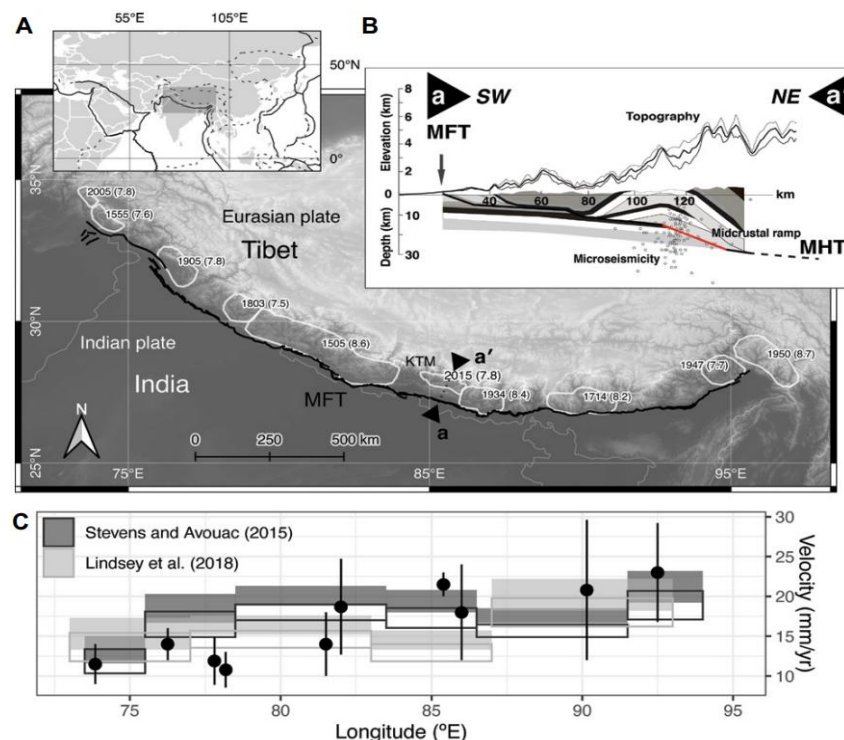


图 1 A: 主前缘逆冲断裂; B: a-a'剖面图; C: 沿主前缘逆冲断裂的地貌滑移速率和大地缩短率

喜马拉雅造山带下的大型逆冲断裂延伸超过 2000 km，调节着欧亚和印度板块的汇聚。这一逆冲断裂可能产生大地震 ($M_w > 8$)，从而威胁在主

喜马拉雅逆冲断裂（MHT）上的数百万居民。MHT 是一个向北缓倾的拆离断层，发育着断坪-断坡-断坪的几何形态，形成了喜马拉雅楔的主要地震构造。MHT 沿着主前缘断裂（MFT）到达地表。上部拆离断层（向北延伸达 100 km）与喜马拉雅山脉和西藏之下的下部拆离断层通过中部地壳断坡相连。断坡位置与脆韧性转换带位置相当，此位置也与地表异常的剥蚀和热年代相对应。2015 年尼泊尔 M_w 7.8 地震突显了喜马拉雅的地震灾害，也反映出 MHT 更加精确的几何形体，使得研究人员能够进行详细的计算。

整个喜马拉雅的数十年的大地缩短率（geodetic shortening rate）常被用来估计地震矩累积率。仪器和历史地震目录与古地震观测的比较表明，过去 500 年释放的地震矩仅仅是同一时间所累积地震矩的 20%。为了平衡已释放和累积的地震矩， $M_w > 8.0$ 地震应远超已知发生率，这将导致惊人的地震矩亏损。地震矩的亏损常用对地震矩释放的过低估计或者地震矩累积的过高估计来解释。过高估计可能是因为所有的震间变形都是弹性变形，而没有永久的内部缩短。然而，内部缩短可能会由于 MHT 之外的非弹性变形、无序逆冲或者中部地壳双重构造引起。在这里，研究人员分析了双重构造相关的内部缩短对地震矩的影响。

中部地壳双重构造沿整个喜马拉雅发育。通过中部地壳双重构造引起的内部缩短可以降低地震矩累积，从而减小地震矩的释放、亏损，但它的相对贡献还未得到评估。如果发生内部缩短，喜马拉雅汇聚速率应该超过在 MFT 观察到的喜马拉雅向南推进的速率。然而，限定中部地壳双重构造相关的内部缩短是具有挑战性的，因为内部缩短发生在 MHT 间震期闭锁位置附近，另外从野外估计的沿 MFT 地表地貌滑坡的空间分辨率很小，

有很大的不确定性。本研究采用几何方法从理论上评估了穿过中部地壳双重构造的滑移变化。

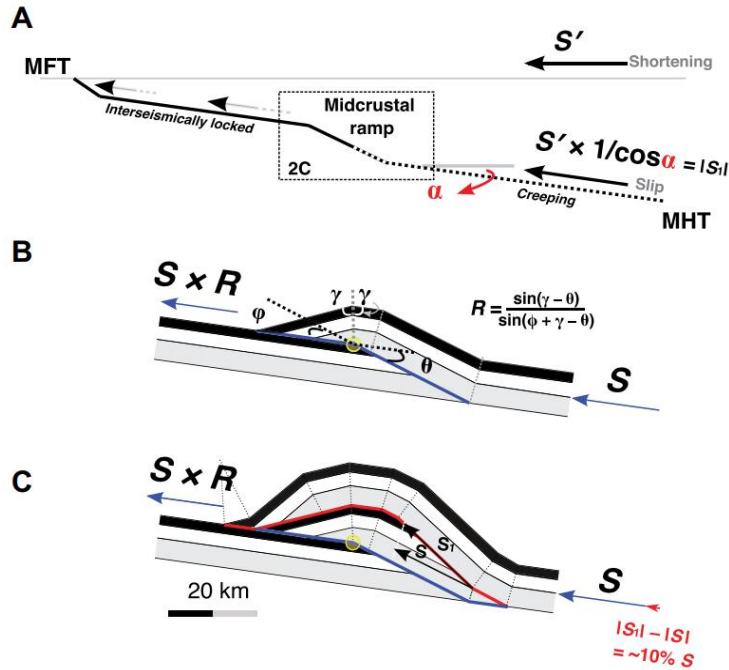


图 2 双重构造演化过程

滑移转换比计算之双重构造形成中的滑移变化：陆内双重构造通过下部拆离断层向前破裂进入下盘，产生新的断片，形成断层弯曲。当新的断层滑动时，这一断片就会发生旋转和弯曲。同时，内陆断裂和上覆逆冲片会由于下方褶皱而再褶皱，再褶皱的断层部分可能会活化。在双重构造发育过程中，滑移会通过两级构造发生变化。首先，滑移会在前陆断裂上的断坡（一级构造）的背斜上部弯曲位置由于褶皱的形成而减弱，因此能够采用几何方法量化跨过上部断弯的滑移变化。根据断层相关褶皱模型，对于任何给定的断弯， R 可以通过三个几何学参数被确定，断弯之前上盘的切割角 (θ)，轴角 (γ) 和断层倾角 (Φ)

$$R = \frac{\sin(\gamma - \theta)}{\sin(\phi + \gamma - \theta)}$$

其次，陆内断裂（二级构造）可能会进一步改变跨过断弯的滑移变化。同时，还需要额外的活化滑移（reactivated slip）来调节再褶皱断层部分的长度改变，以保持平行行为。在喜马拉雅，中部地壳双重构造被认为是一个向前破裂的序列，MHT 上的中部地壳双重构造被认为是最活动的断坡。然而，二级构造的几何形态沿喜马拉雅弧是变化的，同一剖面上有多解性。因此，研究人员主要计算了跨过一级构造中部地壳断坡的上部断弯位置的滑移转换比，并假设整个喜马拉雅有相似的形态。

滑移转换比计算之中喜马拉雅中部地壳断坡的几何学形态：中喜马拉雅中部地壳断坡倾角约 26° ，上部拆离断层倾角约 8° ，因此断层倾角的变化约为 18° 。因为中部地壳断坡相互重叠，所以中部地壳断坡的滑移转换比可以被定义为穿过中部地壳断坡上部断弯的滑移比例。断层倾角和切割角度的变化是一致的，轴角可以用以下公式计算：

$$\varphi = \theta = \tan^{-1} \left[\frac{\sin 2\gamma}{1 + 2\cos \gamma^2} \right]$$

结果：假设 φ 和 θ 的角度为 $18^\circ \pm 3^\circ$ ，中部地壳断坡 R 将约为 0.91。这意味着有 91% 的滑移从下部拆离断层转换到上部拆离断层。换句话说，9% 的滑移转变为内部缩短。沿着近地表构造的滑移是通过地表大地缩短情况来推测的，而 R 也可以被用到大地缩短率，从而用以计算地震矩的累积。Lindsey (2018) 发现整个喜马拉雅的大地缩短率约为 15mm/yr，而 Stevens 和 Avouac (2015) 获得的这一数值为 20 mm/yr。这种差异使地震矩的累积减少了 30%，出现这种差异的原因有很多，例如不同的数据集，模拟方法和假设。

之后，研究人员分析了 R 和不同的大地缩短率对地震矩累积和亏损的影响。如果使用 Stevens 和 Avouac (2015) 的大地缩短率和耦合系数，利用 R 发现喜马拉雅过去 1000 年减少的地震矩累积与 M_w 8.72 地震相当，

与 Stevens 和 Avouac (2016) 的结果相比, 减少了 23% 的地震矩亏损。如果使用 Lindsey (2018) 的大地缩短率, 减少的地震矩累积与 M_w 8.94 地震相当, 与 Stevens 和 Avouac (2016) 结果相比, 减少了 36% 的地震矩亏损。如果将 R 用到 Lindsey (2018) 的大地缩短率, 减少的地震矩累积与 M_w 9.06 地震相当, 减少了 54% 的地震矩亏损。另外, R 对断层几何形态很敏感。

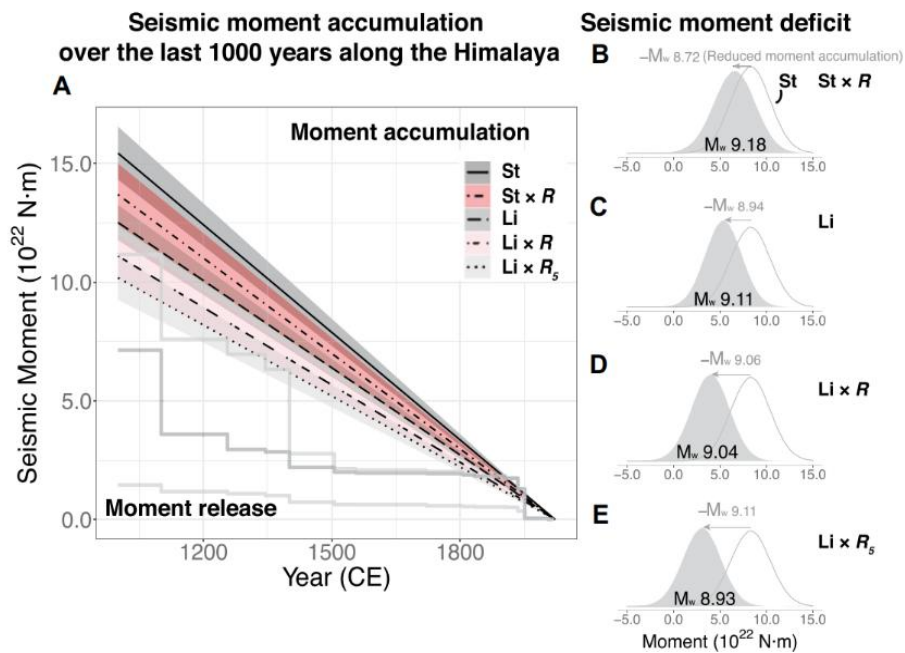


图 3 地震矩的累积和亏损

内部缩短的意义: 由于 MFT 远场大地测量和地貌测量之间的相似性, 之前的研究认为, 喜马拉雅楔无内部变形, 因此 MHT 的地震矩累积可以通过整个喜马拉雅楔的大地缩短率获得。在本研究中, 研究人员强调了中部地壳双重构造内一级构造在喜马拉雅楔内部变形中的作用。研究人员估计, 在过去 1000 年沿 MHT 减少的地震矩累积至少相当于一次 M_w 8.72 地震。研究结果暗示, 即使发生少量的内部变形也会极大地影响地震矩累积。此外, 由于不能很好地限定近地表断层结构等原因, 沿 MFT 通过地貌研究获得的滑移速率有很大的不确定性。

降低地震矩累积的其他因素：研究人员仅考虑了在中部地壳双重构造中简化的一级构造，更加真实的结构，例如断层内的多个断弯和二级构造的活化会进一步降低滑移转换比。另外一些因素，例如弥散变形、喜马拉雅逆冲带的叠瓦构造以及双重构造内的多个活动断坡，可能会进一步降低沿 MHT 前缘的推进和整体的地震矩累积。一些小的断层部分可能会由于测量的空间分辨率限制而不能识别，大地测量模型的选择也会对地震矩累积的估计产生很大影响。此外，2015 年尼泊尔地震及其余震揭示了之前未发现的断层，表明更加复杂的构造样式以及无序逆冲不能被排除。

参考文献： Hu W L, Stevens V L. Duplex kinematics reduces both frontal advance and seismic moment deficit in the Himalaya. *Geology*, 2022, 50(10): 1161-1165.

城市地震韧性图：土耳其伊斯坦布尔的交通网络

当地震发生时，交通网络在灾后疏散和救援资源供应等应急活动中发挥着关键作用。因此，为了确保其功能，需准确评估其韧性。本研究对土耳其伊斯坦布尔交通网络的地震韧性进行了严格的概率分析，通过考虑道路的结构损坏以及附近受损物体所掉落碎片对交通网络性能的额外破坏，提高了分析精度。研究者以韧性测度图的形式展现结果，从而能够调查整个研究区域的破坏不平等性，并确定控制系统韧性的关键因素。为了实现复杂的概率分析，研究者开发了贝叶斯网络（BN）模型，该模型涉及从灾害过程到结构和系统性能的各种类型的信息。然后，通过识别和编译数据集的综合列表来量化贝叶斯网络。因此，本研究分析了涉及数千个结构的大型系统，同时提供了可用于其他交通网络的通用概率模型和数据模式。相关成果发表在 2022 年 5 月的 *Scientific reports*。

在面临地震等破坏性事件时，交通网络对于实现紧急活动、疏散和救援资源供应以及加快恢复正常状态等至关重要。这些系统在地震下的崩溃可能会带来毁灭性的后果。为防止此类灾难性后果，必须准确评估这些系统的抗灾韧性。然而，韧性分析需要对系统内变量之间的复杂依赖性进行建模和评估，这对于具有许多道路的大型交通网络来说是一个特别关键的问题。同时，过程中存在额外的破坏模式（相邻物体产生的碎片落到道路上，可能会发生进一步的破坏），给系统评估带来极大挑战。要评估系统韧性，一个基本的先决条件是确定系统功能的测度方法。尽管计算成本更高，但在系统级别进行定义能够更准确地反映现实。此外，由于韧性分析的目标是实现风险知情决策，因此建立韧性指标对于有效地服务有意义的决策目标，并在操作方面传达损失和恢复信息是至关重要的。

真实世界的城市交通网络通常根据道路的连通性、交通量、车速和可达性划分出清晰的道路等级（主干道、集散道路和地方道路）。从地方道路到主干道的连接稳健性使得在危险事件期间居民区可以继续继续进行紧急活动。运输网络是在紧急情况和恢复阶段开展多项活动的基础，因此应在网络分析的工具和规模上做出适当的选择。

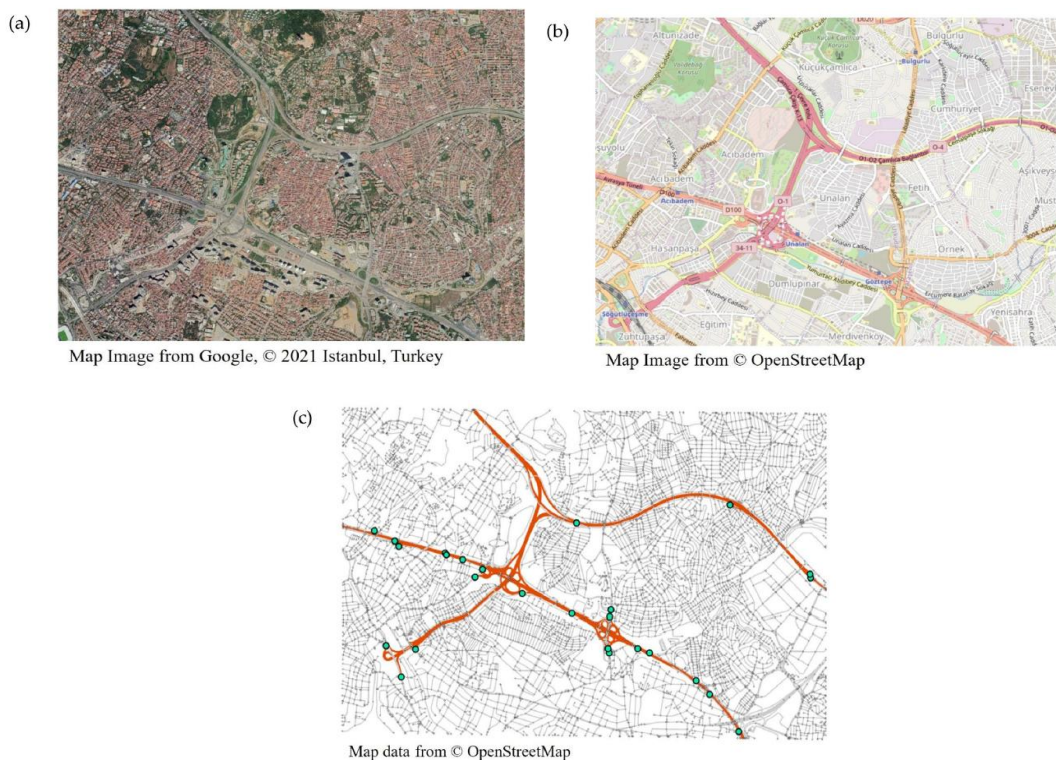


图 1 案例研究网络：(a) 卫星图像（来自 Google ©2021）；(b) 交通地图（来自©OpenStreetMap）；(c) 包含主干道（橙色粗线）、非主干道（黑色细线）和主干道入口顶点（绿色圆圈）的道路数据

本研究选择土耳其伊斯坦布尔 Kadıköy 和 Üsküdar 地区的一个交通网络作为研究对象，该区域具有建筑物密集和道路狭窄的特点。研究者采用先进的建模方法，即贝叶斯网络，建立详细的概率模型。系统功能被定义为从地方某处到主干道的可达性，为此，研究人员分析了从一组地方位点（起始地顶点）到主干道接入点（目的地顶点）的最大流量。之后，使用 ArcGIS Pro 软件提供的反向距离加权 (IDW) 工具对计算的韧性损失值（在

该研究所分析的时间段内，可到达目的地顶点的流量损失总量)进行插值，评估系统内不同区域的韧性损失及其相关影响因素，从而对交通网络的抗震韧性进行评估。

研究结果表明，与直接破坏相比，间接破坏可能会产生重大影响，导致选定区域产生更大的韧性损失。建筑密度对系统韧性有很大影响，因此，通过解决建筑物的高密度问题，而不是改造道路结构，可以有效地增强该地区的抗震韧性。同时，高发生率的建筑物倒塌（间接破坏）也意味着更高的伤亡率，因此更需要紧急服务在地震发生后立即介入，而道路上的杂物可能会严重影响道路的连通性。另一方面，研究发现建筑类型对系统韧性的影响很小。

进一步研究发现，邻域级别的本地道路网络拓扑结构和建筑密度在交通网络的功能丧失和恢复时间方面发挥着关键作用。连接良好的道路（大多数道路的两端都与其他道路相连）可以减少高建筑密度和高比例的易损建筑带来的韧性损失，连接不良的拓扑结构可能会导致意外后果。

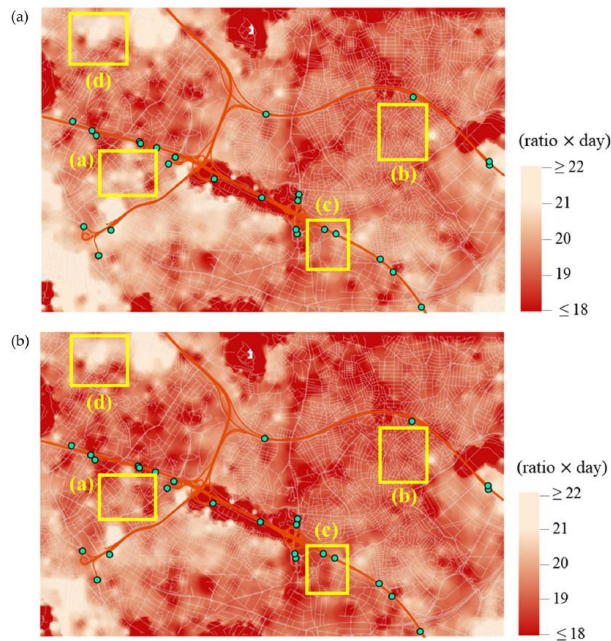


图2 系统韧性损失的空间分布：（a）边缘受到直接和间接破坏；（b）边缘仅受到直接破坏

本研究所开发的分析框架对先前的研究进行了创新，不仅考虑了直接破坏（由道路结构损坏造成的破坏），还考虑了间接破坏（由附近受损物体所掉落碎片造成的破坏），同时，分析结果以韧性损失图的形式展示，能够对研究区域内的灾害不平等性进行空间可视化和动态分析。因此，除了韧性状况的分布外，分析结果还可以全面了解交通网络的抗震性能，包括恢复过程、系统性能的决定因素以及变量之间的相互作用，从而为交通基础设施的规划和运营决策提供支持。此外，所提出的分析可以突出本地网络拓扑结构与主干道网络接入点之间的动态关系，这也是整个网络韧性的主要决定因素。这一发现对城市更新计划具有重要意义，例如确定新的建筑类型、占地面积和最大高度等。

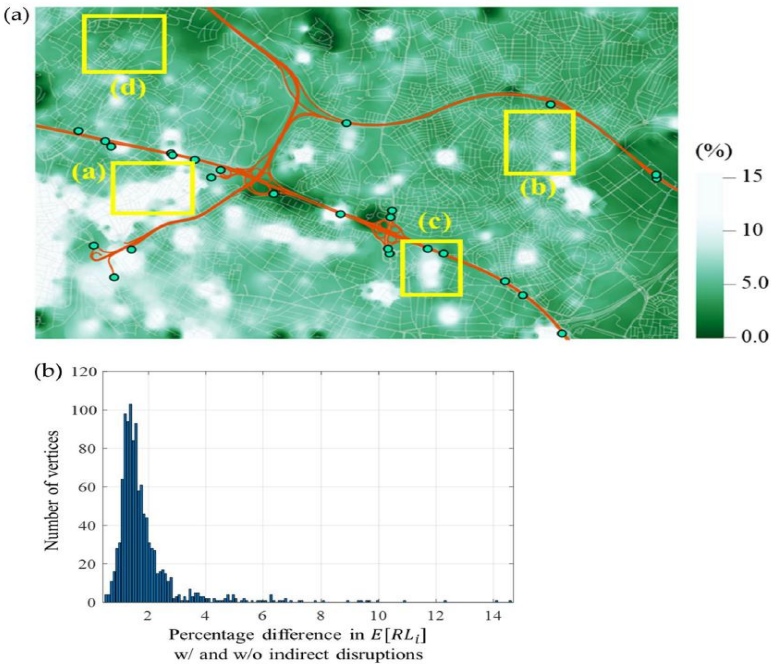


图3 在有和没有间接破坏的情况下平均韧性损失的百分比差异：

(a) 地图可视化； (b) 差异直方图

研究者开发了一个贝叶斯网络的概率模型来表示交通网络的地震韧性，然后，对该模型按照提出的数据模式进行量化。因此，该模型可以对

大量变量进行复杂的分析，包括地震危害、结构损坏、恢复过程（结构修复和碎片清除）、道路和系统的功能等，从而确定系统层面的韧性-损失指标。以伊斯坦布尔交通网络为对象的应用研究展示了使用模型、假设和数据进行大规模韧性分析的过程。所提出的贝叶斯系统和数据模式是通用的，因此可以用来反映案例研究中交通网络的特征和具体调查的目的。在这种情况下，可通过执行最大流量分析来评估从地方某处到主干道的可达性。另外，本研究从私有和开源数据库中识别、汇编和关联了与抗灾能力分析相关的数据集的综合列表。所开发的数据模式不仅可以进行详细分析，还可以为数据汇编提供一般指南。

虽然本研究提供了有用的见解，但现实世界中系统的韧性分析涉及大量模型和假设，这说明了进一步研究以提高准确度的必要性。特别是，如何更好地了解相邻物体倒塌在那些只有少数数据可用的道路上时所造成的交通破坏。此类研究主题还包括不同碎片的影响，这取决于结构类型和碎片清除/修复过程。另一方面，由于要引入一组假设来解决知识缺口，因此需要采用敏感性分析和不确定性量化分析来把握和控制它们对分析结果的影响。同样，通过真实数据对社区层面的韧性分析进行模拟验证也是一个关键的问题。最后，定义和评估交通系统的灾害韧性值得彻底的研究，以反映它们的多方面作用，包括社区内的连通性，或到避难所、医院和主要道路等关键目的地的可达性。

来源：Byun J E, D'Ayala D. Urban seismic resilience mapping: a transportation network in Istanbul, Turkey. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 1-16.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所