

地震科技前沿快报

2021 年第 9 期（月刊总第 33 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、基于双模型的联合分析探查加州的地震风险
- 2、利用全球导航卫星系统进行地震监测
- 3、最严重情景下孟加拉国中南部沿海地区的地震危险性分析

基于双模型的联合分析探查加州的地震风险

大地震是罕见事件，有关大地震的信息十分匮乏，这可能使人们对其风险视而不见，尤其是在确定某一特定地点或结构的危险程度时。现在，科学家们正致力于改进危险程度的计算方法——将已知断层的地图和历史记录与使用超级计算机模拟的加州潜在震动结合起来。

人们总是想知道下一次大地震什么时候来，但混乱或者噪音一直在妨碍人们回答这个问题。目前，人们能够得到的是，当地震发生时，情况会如何。该研究的成员之一，美国哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地球观测站的地震学家 **Bruce Shaw** 表示，他们的目的是确定地震发生在加州数百条地震断层中的任何一条上的可能性、预期的规模，以及地震造成的震动程度。

解决数据缺乏的一个传统方法是在断层之间挖掘关系以更多地了解

过去的断裂，分析、整理来自世界各地的许多地震的信息，最终创建一个灾害统计模型。或者，使用超级计算机模拟特定地点的特定地震。这项新的研究采纳了两种方法的有关要素，来预测整个区域发生地震的可能性及影响。基于速率-状态地震模拟器（RSQSim）的原型，研究人员模拟了数十万年来加州的地震活动，再结合另一个模型 CyberShake，计算出每次地震发生时的震动量。

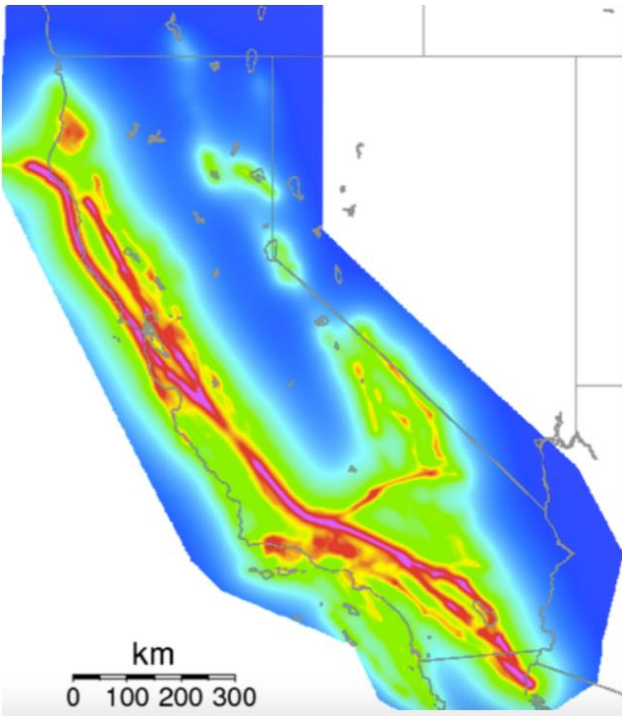


图 1 加州地震灾害模拟

RSQSim 将地球物理力在地震中的数学表示（破裂如何成核和传播的标准模型）转换为算法，然后在最强大的超级计算机上求解，如美国德克萨斯州高级计算中心的 Frontera 超级计算机、伊利诺伊大学美国国家超级计算应用中心的蓝水（Blue Waters）超级计算机等。基于加州复杂的地质结构，研究模拟了 80 多万年间（虚拟年），随着构造力作用于地球，应力如何形成和消散。通过这些模拟，生成了一个目录——虚拟地震以特定震级和属性发生在特定地点、特定时间的记录。然后，将 RSQSim 的这些结

果输入 CyberShake，再次使用地球物理学的计算机模型，根据地面加速度和持续时间，预测每次地震会发生多大的震动。

与历史地震和其他方法的结果相比，新方法的结果显示出了地震概率的真实分布。研究人员表示，新方法提高了确定特定位置在地震中的震动程度的能力。这将允许建筑规范开发人员、建筑师和结构工程师设计更有弹性的建筑，这建筑将能够在特定地点经受住地震的考验。

同时，研究结果表明，对于一些地点，相对于美国地质调查局(USGS)估计的实际情况，地震危险性有所下降。但对于一些具有特殊构造（如附近有断层）的地点，例如圣博娜迪诺（San Bernardino）附近，危险性有所增加。

来源：Supercomputers Simulate 800,000 Years of California Earthquakes to Pinpoint Risks

<https://www.ideo.columbia.edu/news-events/supercomputers-simulate-800000-years-california-earthquakes-pinpoint-risks>

Toward Physics - Based Nonergodic PSHA: A Prototype Fully Deterministic Seismic Hazard Model for Southern California

<https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/doi/10.1785/0120200216/593757/Toward-Physics-Based-Nonergodic-PSHA-A-Prototype?redirectedFrom=fulltext>

利用全球导航卫星系统进行地震监测

以现有的约 2000 颗全球导航卫星的亚秒级延迟测量为基础，美国中央华盛顿大学的研究人员利用 **Fastlane** 软件开发了全球地震形变监测系统，用于快速了解大地震和海啸的特征。在地球质心固定的参考系内，对全球 **GNSS** 站点的精确点位按时间序列进行连续估计，可获得当地的北、东和垂直坐标，其具有 1 秒的更新速度和全球亚秒级的延迟。通过信息交换，第三方用户（如美国地质调查局）可以获得连续的波形，内部则通过滤波触发同震偏移估计，驱动下游点源和有限断层震级与滑动特征分析算法。目前，已经建立了相应的分析系统，每一千个站点每天可以获得约 1 亿个位置。通过使用 1270 个全球分布的站点，在一周内进行的评估发现，从现场数据采集到中枢分析中心生成位置的延迟时间平均为 0.52 秒，并且在很大程度上与站点距离无关。与标称的北、东和垂向的平均位置差异分别为 8、9 和 12 厘米，主要由全球卫星时钟校正引入的约 4~5 分钟的谱带的随机行走噪声峰值引起。在一周的测试时间里，分析系统在 0.5、1 和 2 秒内的完成率分别是 55%、90% 和 99%。这种 **GNSS** 分析平台易于扩展，允许低成本的 **GNSS** 相位跟踪接收器的普及，包括那些日益嵌入消费者设备（如智能手机）的接收器，从而可提供一种比现有系统更快速地描述大地震和海啸的新方法。相关研究成果发表在 2021 年 6 月的 **Seismological Society of America**。

由于地震断层破裂的空间范围超过几十公里、持续时间超过几秒钟、本地地震仪所记录 **P** 波和 **S** 波的复杂性，以及惯性地震仪的拓展尾波和振幅饱和，仅使用本地地震阵列很难精确测定震级和破裂分布。点源振幅-震级关系通常会随着破裂长度的增加而变得不可靠，而对于复杂破裂（滑

移沿传播路径变化、跨越多个断层、地震序列中包含动态触发、缓慢破裂的地震——在用于测量震级的地震频率，辐射能量较小)，即使是分布式滑移估计策略也面临挑战。

现在，全球导航卫星系统（GNSS）为这些问题提供了一个补充解决方案。基本要求是：近场 GNSS 站必须存在、其连续数据可以实时获得和共享、电力和遥测在强地面运动发生时不中断、原始卫星可观测物的定位在事件发生期间和之后不中断。所有这些要求在过去十年中被证明是可以满足的。到目前为止，由于许多原因，将 GNSS 集成到地震监测中仍存挑战。尽管如此，GNSS 监测已经稳步地加入到传统的基于地震仪的监测中。

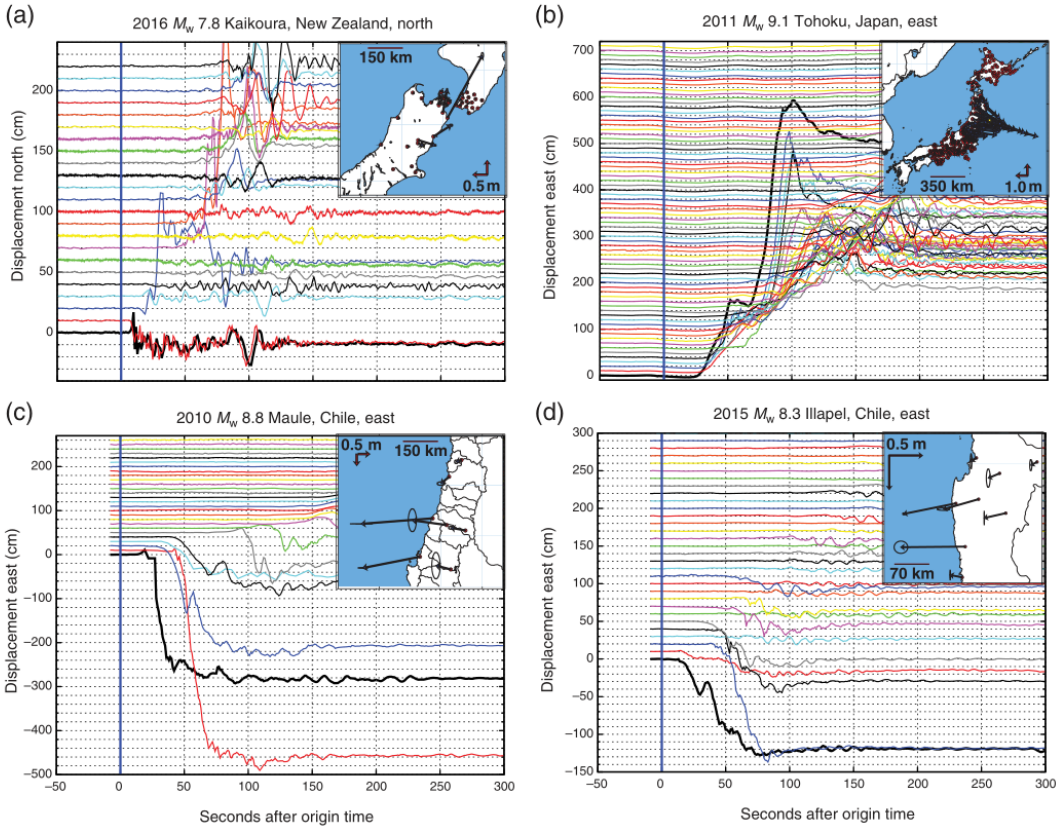


图 1 全球导航卫星系统（GNSS）的位置、波形、时间序列和同震偏移

研究人员介绍了一种全球、实时、亚秒延迟的 **GNSS** 地壳形变监测系统的分析框架。图 1 显示了四次大地震的 **GNSS** 位置记录剖面。所有事件位置的时间序列显示出清晰的同震形变且在成核后迅速演化，远早于震源时间函数的终止。图 2a 显示了内华达大学雷诺分校大地测量实验室至少一天的站点记录的后处理情况，总共超过 17000 次测量。这包括任何以 **GNSS** 测量的点，这些点比通过实时遥测技术持续运行的台站要多得多。2019 年，对面向公众的 **GNSS** 数据广播可用站点进行扫描，获得了约 2200 个实时反馈高速率（1 秒）测量结果的公共站点。

GNSS 相对定位（**RTK**）和精确点定位（**PPP**）都可以用于地震监测。相对定位的优点是某些定位误差源可完全抵消，包括卫星轨道误差和星载时钟误差。然而，其无法用于大地震，因为在同震偏移量完全形成之前，参考台站将发生显著移动，这取决于参考接收器相对于滑动质心的位置。另一种方法是 **PPP**，即站点的位置不是相对于附近站点估计的，而是在由地球质心和卫星星历表定义的全球参考框架内估计的。在这种方法中，卫星轨道、时钟和地球定向参数不被求解，而是固定于独立的全局分析值，并作为辅助数据产品被连续下载用于定位。在较短的基线上，**PPP** 的噪声水平高于 **RTK**，但随着辅助数据产品和全球大气球噪声模型的提高，**PPP** 的精度也提高了。由此形成的点位置流保存在一个高速的键值库中，其中，矢量偏移量通过从当前历元估计的位置减去每个站点的标称位置来计算，并旋转到当地的北、东和垂直参考坐标系中。然后，其被发送给消息代理，作为 **geoJSON** 序列化消息发布给第三方用户，包括地球中心、固定的地球笛卡尔坐标，以及北、东和垂直坐标，从而减少了接收者的元数据需求。**PPP** 数据也会进入一个聚合器，使时间序列的波形位置可用于任何浏览器

或其他基于 web 的应用程序。

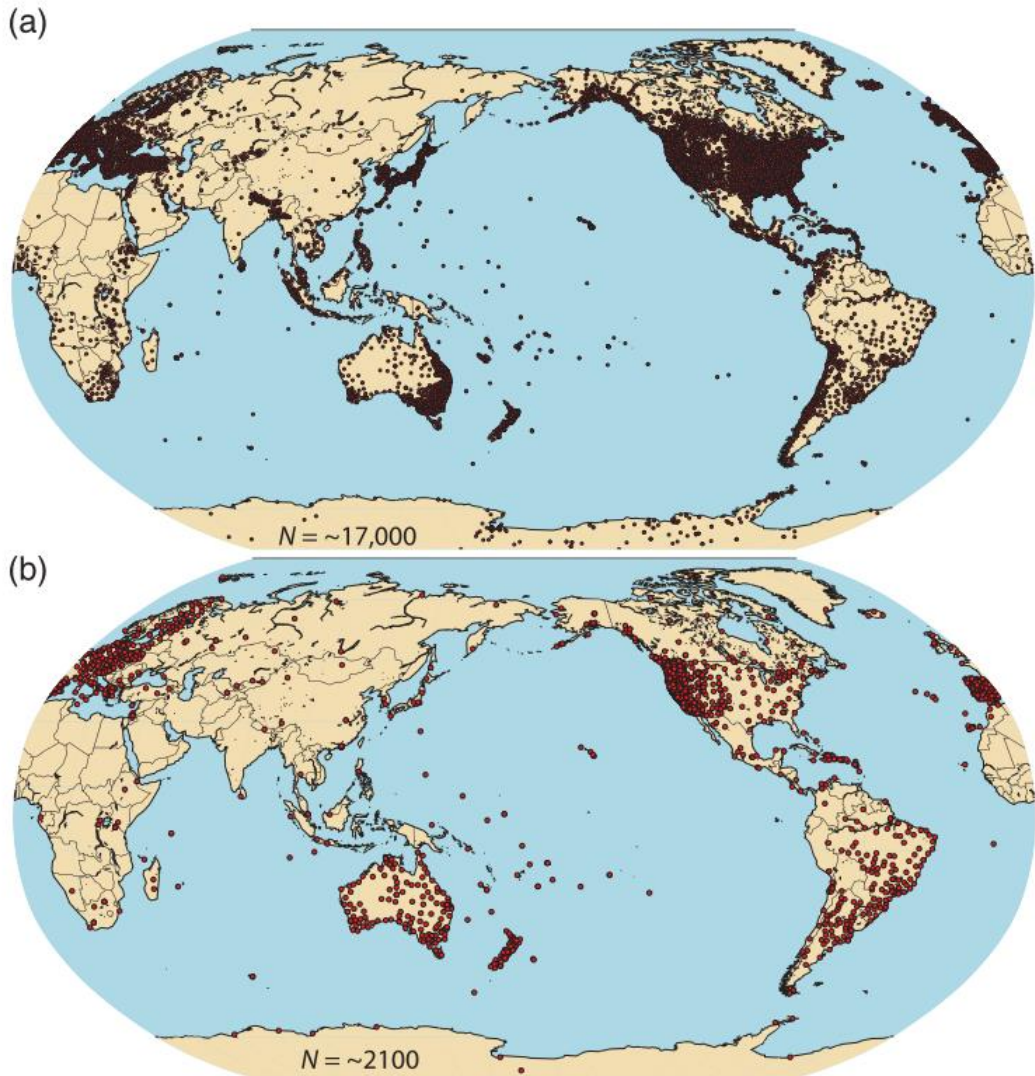


图2 GNSS 站点图

地震监测的厘米级精度要求国际地球参考框架 (ITRF) 内任何接收器的位置应定期更新。为此, 研究人员通过 ITRF 为每个站点生成一个长期轨迹模型——源于过去数年通过 ITRF 对每个站点独特轨迹的日测量, 然后, 将该轨迹外推到当前时间。轨道模型由函数系数组成, 这些函数被认为最能描述影响接收器数月至数十年轨迹的固体地球过程的特征。一旦得

到，轨迹模型可以按定期间隔（通常是每周）外推到当前历期，以提供当前站点的标称位置。然后，从瞬时位置减去这个值，得到一个与时间有关的站位偏移量。这意味着，一个新部署的站点并不会立即完全用于厘米精度的地震监测，直到它的轨迹模型可以被推导出来。

研究人员使用双态记忆卡尔曼滤波器来估计同震偏移量（称为偏移滤波器），将 GNSS 时间序列模拟为一个随机过程，包含一个常数加时间变量、非高斯、非白噪声，同时，假设站点与站点之间或给定站点的分量之间没有相关性。此外，还调整了过程噪声的添加，使位置的随机漂移被吸收，但位移作用超过几分钟的瞬态运动不能被过程噪声吸收。一旦积累了足够的数据库，实现了再收敛，同震偏移量就是再收敛时的状态与进入“可能事件”模式前最后状态之间的差值。

为了验证这一系统，研究人员开发了一个并行数据分析平台来量化延迟、静态准确性和完整性。图 3c 显示了延迟处理的完成度。研究人员假设在 1 秒时 100% 的完成率为每个站点每天 86 400 次处理（每秒一个位置）。在一周的测试中，现场原始卫星观测数据采集后，0.5、1 和 2 秒内的完成率分别为 55%、90% 和 99%。图 3d-f 显示了全球 1250 个站点在一周内的位置方差直方图，包括约 7.5×10^8 次处理。水平位置呈正态分布，平均值在 0 附近的 1 厘米内，表明标称位置的全球计算没有一致偏差。北分量、东分量和垂直分量的位置偏差分别为 8、9 和 12 cm。

动态定位的准确性用以衡量 GNSS 定位对不同频率的真实已知运动的跟踪情况，这对地震监测同样重要，但如果没有振动表就很难进行测试。在实时定位中，过阻尼时间变异性将最大限度地减少由对任意数量的误差源错误建模引起的偏移，在没有真实瞬态地面运动的情况下产生更“平坦”

的时间序列，虚假地出现更高的精度和准确性。然而，过阻尼会使定位对快速的动态运动没有反应，也无法准确跟踪，而这种动态运动通常在 2~0.05 Hz 范围内。

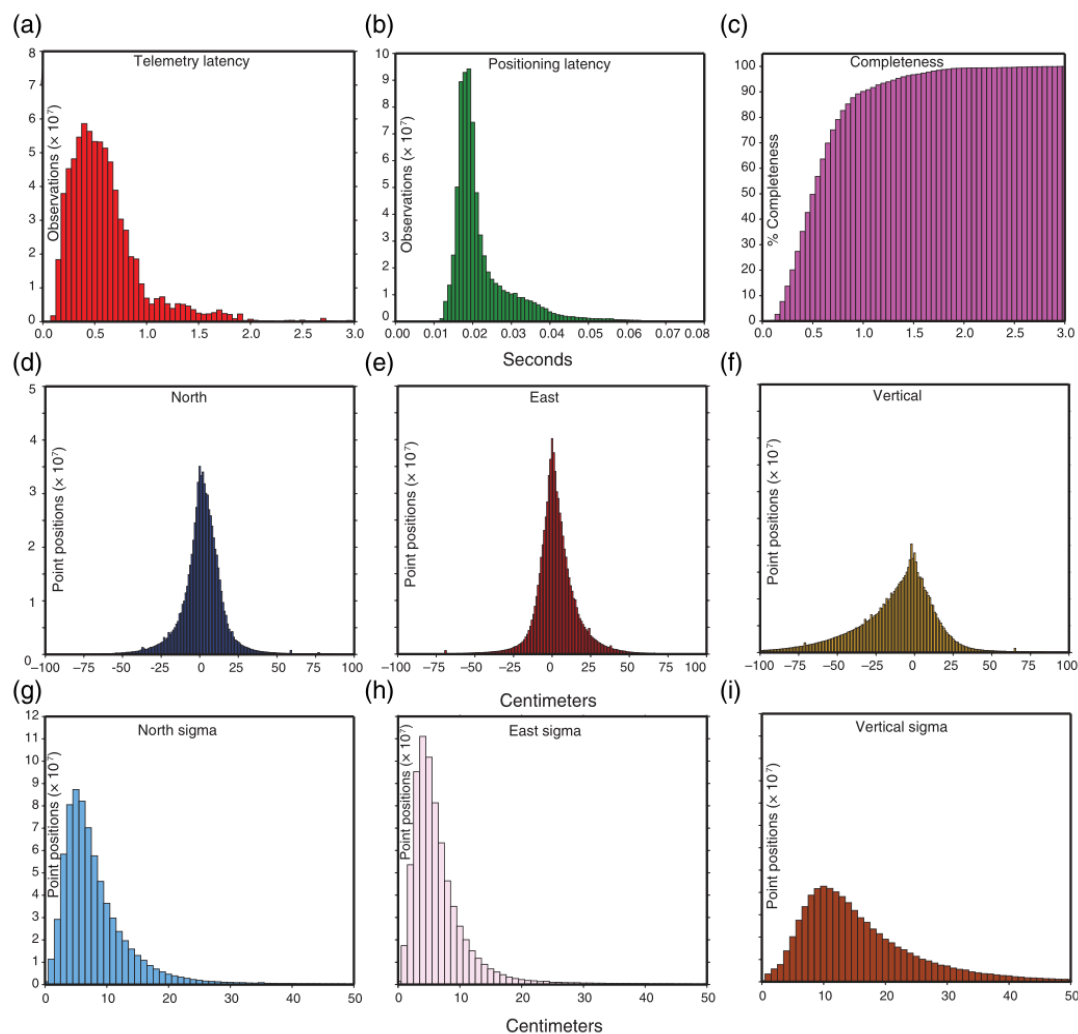


图3 中央华盛顿大学 Fastlane 软件的 PPP 性能分析

GNSS 全球位置的时间序列现已纳入美国地质调查局的国家地震信息中心和美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 的海啸预警系统，用做全球地震和潮汐测量网络及 DART 浮标系统的补充，而滑移和海啸触发的评估反演仍处于早期的审查和测试阶段。随着技术的发展、成本的降低，以及载波相位跟踪设备(如智能手机)的持续进步，这种发展预计将继续下去，

并可能最终实现众包预警。目前，从现有的网络获取已有的实时数据流以减轻危险，仍然是最大的问题。

来源：Melbourne, T I, Szeliga, W M, Marcelo Santillan, V. et al. Global Navigational Satellite System Seismic Monitoring. Seismological Society of America, 2021, 111: 1248–1262.

最严重情景下孟加拉国中南部沿海地区的地震危险性分析

由于印度和欧亚板块的持续碰撞，孟加拉国及其周边地区发生灾难性地震的历史由来已久。来自孟加拉国的几位科学家对孟加拉国中南部沿海的五个重点地区进行了定值法地震危险性分析（DSHA），用以了解地震发生时这些地区将遭受的破坏的程度。利用所有可能的震源、控制性地震和两套地面运动预测方程（GMPEs），研究者在考虑最严重情景的情况下，估计了基岩和地表条件下的峰值地面加速度（PGA）和谱加速度（SA）。结果表明，吉大港-特里普拉褶皱带（Chittagong-Tripura folded belt, CTFB）将会产生最大震级地震。在参考基岩条件下，Char Muntaz 地区将会产生最大 PGA（0.535g），而 Kumirmara 地区将会产生最小 PGA（0.301g）。无论地质条件与震源，Char Muntaz 地区都会经历最大的地面运动，而 Kumirmara 地区最小。该研究成果对于孟加拉国沿海基础设施建设地点的选择具有指导意义。相关研究成果发表在 2021 年 6 月的 *Pure and Applied Geophysics*。

由于天然气，石油等传统能源日渐枯竭，可再生能源（风能，太阳能等）的开发利用在孟加拉国将会有巨大的市场，而孟加拉国沿海地区最具潜力。考虑到地震将会带来难以估计的损失，在进行大规模基础设施建设之前需要对该地区进行地震危险性分析（SHA）。这种分析通过一些地表参数，例如峰值地面加速度（PGA）、谱加速度（SA）等，定量的描述地震发生时地面的摇晃程度。对地面参数的估计可以通过定值法地震危险性分析（DSHA）和概率地震危险性分析（PSHA）来进行。前者是分析一个控制性震源所产生的地震影响，而后者是分析所有震源同时发生地震所产生的影响。因此，DSHA 更具有现实性和参考意义。但是，在孟加拉国沿海地区，相关的地震危险性分析几乎空白，因此该项工作意义重大。

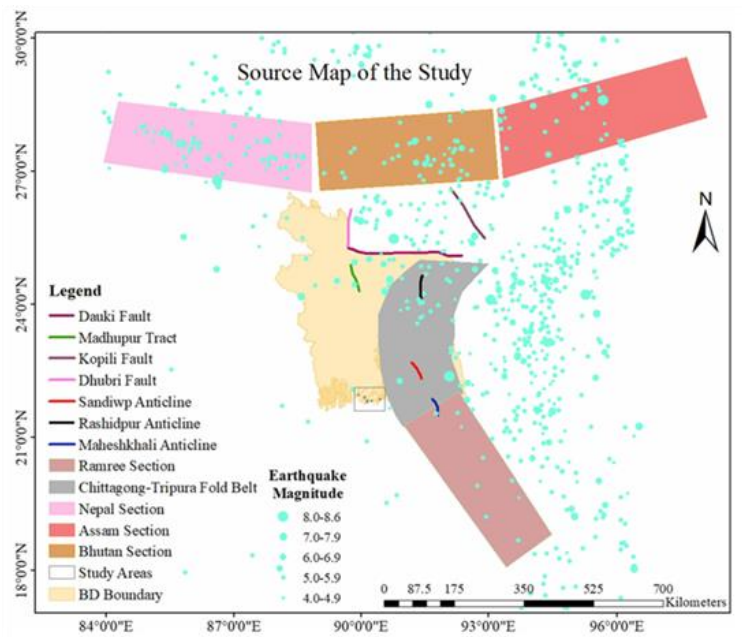


图 1 地壳震源与俯冲带震源

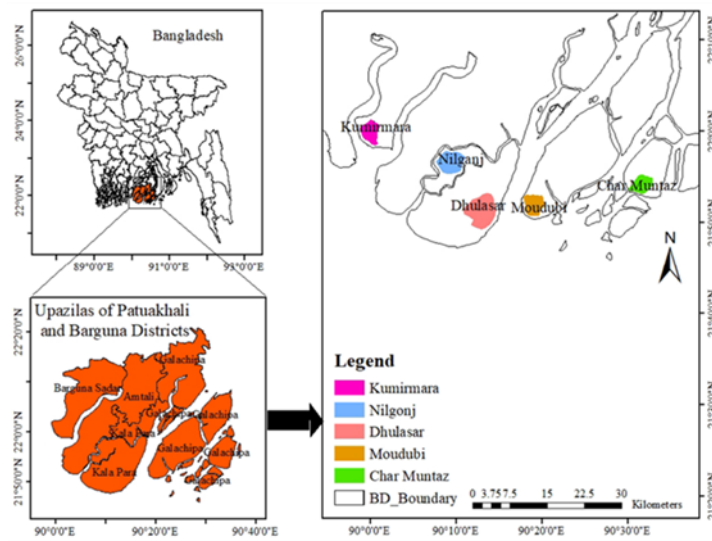


图 2 孟加拉国沿海研究区

进行地震危险性分析首先需要确定地震震源。研究者根据历史地震记录，选择 12 个可能发生大地震的震源（图 1）。这些震源可以分为地壳震源（7 个）和俯冲带震源（5 个）。然后，确定这些震源未来所能产生的最大地震震级。研究者通过比较历史上观测到的最大震级与通过破裂长度计算得到的最大震级，将较大震级作为可能产生的最大地震震级。之后，确

定震源与研究区之间最短距离，这对于计算地面运动参数至关重要。研究者利用 ArcMap 确定震源与研究区的最短距离，选取 Joyner-Boore 距离衡量该参数。最后，通过地面运动预测方程确定地面运动参数。

在所有 12 个震源中，俯冲带地震具有最大地震震级，因此被选作最大地震震源。其中，CTFB 不仅具有最大震级地震，而且距离研究区最近，因此成为控制性震源。在本研究中，分别以参考基岩和地表条件计算 PGA 和 SA。参考岩基条件下的 $V_s \geq 760$ m/s，而地表条件下的 V_s 为 180 m/s。研究结果表明，PGA 值随着条件的变化而变化。在基岩条件下，Char Muntaz 地区具有最大 PGA 值(0.535g)，Kumirmara 地区具有最低 PGA 值(0.301g)。而在地表条件下，两个值分别变为 0.708g 和 0.460g。PGA 的空间分布表示在图 3 和图 4 中，图 3 代表了基岩条件，而图 4 代表了地表条件。结果表明，当把 CTFB 作为控制性震源时，Char Muntaz 地区具有最大 PGA 值，而 Kumirmara 具有最低 PGA 值。

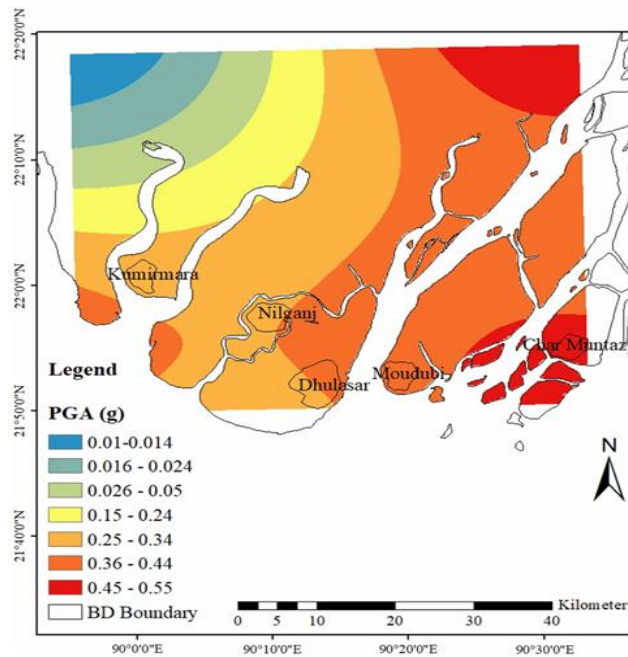


图 3 参考基岩条件下 PGA 值的变化

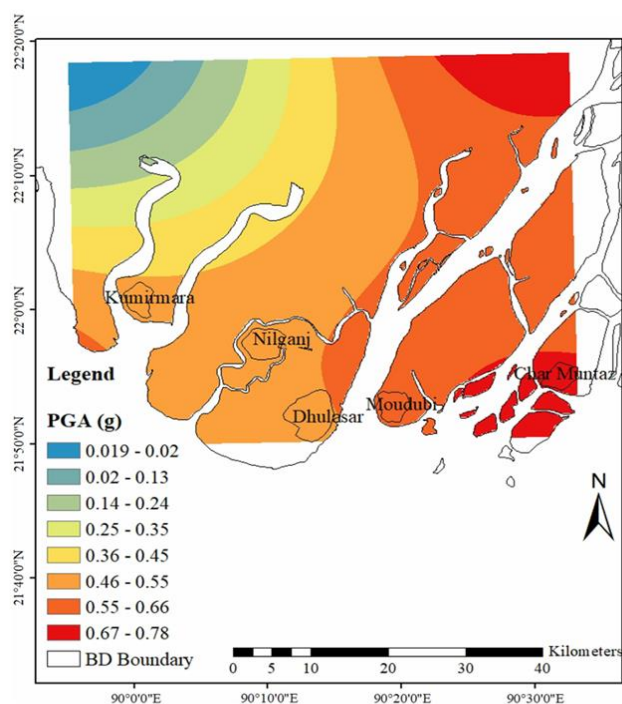


图 4 地表条件下 PGA 值的变化

对于同一震源，PGA 值随距离的变化而变化。从 Kumirmara 到 Char Muntaz，由于距离逐渐减小，PGA 值逐渐增大。同样，PGA 值也随着土壤种类的变化而变化。

在参考基岩和地表条件下，PGA 值和 SA 值被表示为统一的危险谱，其周期范围为 0.1~5 s。结果表明，地表条件下的 SA 值大于参考基岩条件下的 SA 值。这是由于地面条件下具有低的 V_{s30} 值。在这两种条件，Char Muntaz 地区的谱加速度最大，Kumirmara 地区的谱加速度最小。此外，SA 值相对于自然周期的增加或减少趋势在空间上也存在差异。例如，在地表条件下，Kumirmara、Nilganj、Dhulasar、Moudubi 和 Char Muntaz 的最大 SA 值都是在 0.2 s 的自然周期内观测到的，这些值分别为 0.870 g, 0.925 g, 0.947 g, 1.066 g 和 1.228 g。在 Char Muntaz 和 Kumirmara 地区自然周期为 0.2 s 时，SA 值最高，分别为 1.132 g 和 0.613 g。因此，在五个研究区中，Kumirmara 地区在各种周期下危险值最低。相反，Char Muntaz 地区在各种

周期下危险值最高。

该研究结果对孟加拉国沿海地区来说是全新的，因为使用定值法进行地震危险性估计在过去没有进行过。因此，这一分析结果并没有与该地区以前的研究进行比较。在该研究中，对地震危险性的估计考虑到了孟加拉国及其周边所有可能产生大地震的震源——从长远来看，其可能对孟加拉国的重要基础设施构成威胁。分析结果表明，除 CTFB 震源外，Ramree 段产生的地面运动值（PGA 和 SA）排名第二。在 DSHA 分析中，考虑了最大可靠震源产生的最大地震动值。因此，其他地震的影响不是很重要，所以没有考虑。

在孟加拉国沿海地区选择任何关键基础设施的建设区域时，除了地震灾害外，还需要考虑洪水、海啸、内涝和海岸侵蚀等其他灾害。任何不进行危险评估的基础设施建设都可能变成一场巨大的灾难。孟加拉国周围地震频繁，大地震有可能会影响这个国家。孟加拉国的沿海地区可能代表了一个潜在的基础建设集中区，因此，该研究选择了中南部沿海地区的五个地点作为案例研究。在孟加拉国及其周边地区考虑了 12 个潜在的发震源，并使用最新的技术和数据集估计了地震活动参数。结果表明，CTFB 可能是能产生大震级地震（8.6 级）的最近的震源。尽管最近 CTFB 不是很活跃，但研究人员预测，它可能在未来产生一场大震级地震。因此，该研究将 CTFB 作为控制性震源计算了该地区的地面运动值。研究结果表明，Charmuntaz 地区和 Kumirmara 地区将分别经历最大和最小的地震动。在地表条件下，Kumirmara、Nilganj、Dhulasar、Moudubi 和 CharMuntaz 的 PGA 值分别为 0.46g，0.5g，0.531g，0.588g 和 0.703g。因此，该研究认为最偏远的西部地区是最适合开发主要基础设施的地区，因为该地区地震危险性最低。

来源：Kamal A S M M, Mitu M, Hossain M S. et al. Seismic Hazard Analysis for the South-Central Coastal Region of Bangladesh Considering the Worst-Case Scenario. Pure and Applied Geophysics, 2021, Doi : 10.1007/s00024-021-02770-7.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所