

## 揭秘 2011 日本东北大地震

2011 年 12 月出版的 *Physics Today* 杂志刊登了加州大学圣克鲁兹分校地震学家 Thorne Lay 教授和加州理工学院(帕萨迪纳)地震学家 Hiroo Kanamori 教授关于 2011 年日本大地震相关研究进展的报告. 现摘译如下:

2011 年 3 月 11 日, 日本国民和全球的地球物理学家被一个巨大的地震惊呆了. 位于俯冲的太平洋板块与日本交界处的断层剪切滑动了 150s, 将日本海岸向东推移了 5m, 将超过 15000km<sup>2</sup> 的海床抬高了 5m. 海沟附近所观测到的位移达到了 60—80m, 这是目前单个地震所观测到的最大值. 这次的日本东北大地震是有记录以来最大的地震, 研究人员估计该地震矩震级为  $M_w 9.0$ . 断层滑动过程中释放的总应变能相当于 1 亿吨炸药. 该地震发生于日本东北, 因而被称为 2011 日本东北大地震.

频率高达 10Hz 且地表加速度达到 2.7g 的地震波振动着日本地面, 本州全岛的峰值速度达到 80cm/s. 造成巨大灾难的福岛核电站处地面振动超出了电站设计上限 0.45g 的 20%. 尽管海岸带沿线有强烈振动, 但很多建筑物只有中等或者轻微的破坏, 日本有效的建设和建设规范经受住了考验. 巨大海底位移引发了强烈的海啸, 波及数百公里的九州和北海道海岸沿线地区, 海啸波浪高达 3—15m, 越过了港口的海啸防护墙和海岸边缘, 冲入海边平原约 10km, 破坏了很多乡村城镇, 造成 20000 人死亡, 50 万人流离失所. 海啸还破坏了福岛核电站冷却水维持系统的电力供应, 从而导致中日本地区持续的核辐射灾难.

微倾的板块边界处巨大的逆冲断层两边岩石积累了千年以上的弹性应变能, 这一能量的突然释放导致了这一大地震(该区域曾于 869 年发生过超过  $M_w 8.3$  的大地震). 应变能的释放导致扩散到整个地球的地震、海啸和大气波动. 这些波动为全球成千上万的高密度地震台、GPS 台站、海啸观测仪及深水压力传感器等地球物理仪器所记录, 因而该地震是历史上被记录得最好的地震和海啸事件.

大地震指的是不小于  $M_w 8.0$  的地震. 大地震的活动性在不同俯冲区有显著差异. 在南智利、苏门答腊和西南日本等俯冲地区, 大地震破裂每隔一两百年来会有一次, 而其他象马里亚纳群岛和汤加等俯冲地区, 大地震破裂就比较罕见. 图 1(a) 展示了板块边界上摩擦特征的差别: 黑色区块对应着产生地震的活动断层部分, 而白色部分则为缓慢滑动但不产生地震的非震区域. 较浅处的地震区块可以破坏成能诱发海啸的大地震. 稳定区域通常连续滑动, 但是如果周边地震区块突然失稳, 则会造成稳定区域形成地震滑移. 地震区块面积与断层总面积二者之比值大的俯冲地区会频发大地震, 而比值小的区域则不常有大地震. 大型逆冲断层各区域上具有不同的破裂特性, 可能形成不同地震序列. 一个地震区域失

稳可以产生单个大地震, 但是当两个或更多个区块接连失稳, 其间的稳定区块也会跟着发生地震滑移, 进而导致比各地震区块独自产生的地震要大得多的地震.

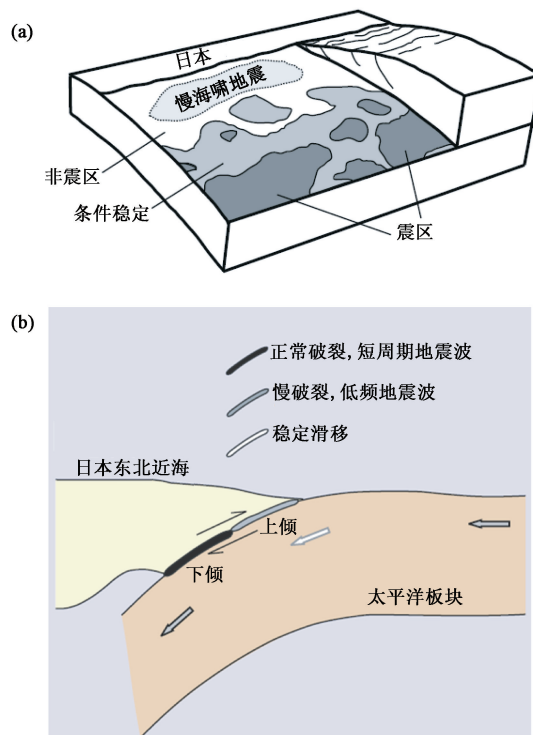


图 1 复杂摩擦断层 (a) 日本外海大型逆冲断层包含地震滑移、非震滑移以及缓慢破坏区; (b) 日本东北近海整个大型逆冲断层上倾区和下倾区均失稳

人们认为日本东北俯冲区是震区和非震区块相结合, 同时也是可引起非正常破裂的多种摩擦形态混合. 局部区域上反复失稳而频发小地震, 会导致其周边子区域发生非震滑移. 一般地震或海啸地震破裂速度为每分钟几公里, 而中等地震的大量慢前震滑移量只有每天几个厘米. 尽管日本拥有很长的历史地震记录, 研究者认为, 由于大型逆冲断层上不同部分反复滑动所造成的沿逆冲断层的滑动模式和从几年到几百年的大时间跨度复杂性, 该区域地震潜在性评估非常复杂. 2011 日本东北大地震破裂与连续大范围内区块失稳有关, 现有本区域地震灾害的模型均无法对其进行预估.

1996 年以来, 横跨日本 GPS 网络(现在超过 1200 个台

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权, 与 *Physics Today* 合作的项目

站)观测到本州岛向西方向位移梯度由东到西下降.近年来,海底 GPS 传感器追踪近岸地表位置变化,观测数据证实了大型逆冲断层浅部积累了应变.过去的一千多年断层较强部分积累着应变而没有发生破裂,但是其于 2011 年 3 月 11 日突然克服了摩擦阻力而释放了岩石中弹性应变能,驱动了断层破裂,加热了断层并产生了地震波和断层周边岩石永久形变,数十亿吨搅动了的海水产生了海啸波.地震和海啸波能量耦合作用于大气,产生了更多的波.这些波以不同的速度扩散开来,扰动着整个地球系统.地球物质重新分布导致地球日长减小了  $1.8\mu\text{s}$ .

地震波传遍全球并被地震仪感知,地震仪实时地将数据传输到数据中心,全球地震学家们能够快速分析信号.日本近场记录在破裂发生的三分钟内为日本气象厅海啸预警提供了基础数据.大量的海啸和海潮记录仪器记录着来袭及冲上海岸的海啸.海啸上岸最强处的岩手县(三陆)近海记录到一个明显的窄脉冲型波形.该峰在断层错断开始后约 20 分钟到达,与日本海沟附近狭窄区域内的海底抬升一致.海啸缓慢地在浅海区传播,很多人可以及时地跑到高地以躲避洪水.海啸也向海洋一侧扩展,当波扩散到北太平洋,其周期为 20 分钟,波高达米级.美国国家海洋与大气局(NOAA)迅速地分析太平洋中浮标传感器捕捉到的信号,准确地预测了海啸到达太平洋岛屿海岸线的时间和波高.

大气波将大地震的影响扩展到地球行星尺度,地表气压传感器广泛记录大气波.由于大气密度随高度而降低,所以大气波随高度而放大.大气波从波源以  $720\text{--}800\text{km/hr}$  的速度影响着电离层.日本全境的 GPS 台站记录到了电磁扰动对卫星广播信号传输所造成的影响.尽管波源区在震前几天大气红外热和震前电离层总电子异常,大地测量和地震数据并没有给出任何与大地震发生相关的清晰形变前兆.

丰富的震前、震中和震后的地面、海洋和大气等地球物理记录使得研究 2011 日本东北大地震的破裂物理成为可能.主震前几天,震区发生过一些前震,最大的是 2011 年

3 月 9 日的  $M_w 7.5$  级.这些前震聚集于主震起始点附近,可以确信其代表着该区域变形加速过程.微弱的起始如何扩大到如此巨大的破裂.根据资料分析,主破裂在断层上的扩展速度是相当低的,约为  $1\text{km/s}$ ,最初有持续大致 50s 的向仙台海岸方向的“下倾”(即断层深处);其后,破裂向浅部扩展了 40s,沿断层的最大的滑移量发生于外海超过 150km 近海沟处;进而,破裂沿海岸线以约  $2.5\text{km/s}$  的速度向南迁移下倾滑移.

海沟附近产生了巨大的滑移,大型逆冲断层的上 100km 的平均值大致为 40m,近海沟处的峰值为 60—80m.这是有地震记录以来最大的断层位移.研究人员估计大滑移区的应力降为 15—30MPa,显著高于典型的已知板块间破裂的几个兆帕.浅断层区附近岩石的地震成像表明,相对高的 P 波速度和上板块的一些向海一侧的拱形结构对着海沟.这些资料表明,断层周围存在硬、强且脆的岩石,这与传统认为的俯冲带浅部区域的弱且主要是非弹性变形相悖.北美的地球透镜流动阵列的高密度地震观测显示,与强短周期辐射相关的剧烈破坏似乎造成了本州的强烈振动,其更可能来自于大型逆冲断层的深部,而此处总滑移量远小于断层上部.这样,2011 日本东北大地震浅部破裂表现得更像 1896 年浅海啸地震.但是在该震后 50—90s,巨大浅部滑移似乎驱动断层中、深部破裂并沿着相对稳定邻区滑动,这造成了总的尺寸和能量衰减.因而,2011 日本东北大地震基本上是个混合事件,其在浅部是一个破裂型海啸地震,而在深部是一个典型的大型逆冲地震(见图 1(b)).2004 年苏门答腊大地震的破裂类似地经过多个子区域扩展而增强.

(中国科学院研究生院 周元泽 编译自 Thorne Lay, Hiroo Kanamori. *Physics Today*, 2011, (12): 33 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)