

## “慢滑移”与地震

(中国地震局地球物理研究所 尹凤玲、宋贵娟 编译自 Sophia Chen. *Physics World*, 2017, (7): 29)

“慢地震”指的是微小且难以察觉的震颤，这种震颤可以持续数周。然而，这些奇怪的事件一定先于或者甚至直接导致了我们所熟知的“快”地震吗？Sophia Chen 对此进行了研究。

美国西北部和加拿大不列颠哥伦比亚省地下大约每14个月都发生怪事：地下开始运动。这个称为卡斯卡迪亚(Cascadia)俯冲带的地区，包含一条长达1000 km的断层，数个构造板块在此汇聚。当地下35—55 km处岩石发生滑动时，它还会每秒钟沿前后方向振动几次。今年这样的滑移始于2月22日，并且持续了几周。

但是与地震不同，这样的地下运动并没有造成破坏。在地球表面，人们不会有任何感觉。甚至连地球物理学家使用地震仪器数十年以来也未能注意到这些运动。“运动如此之小，以致被认为只是风和波浪引起的噪声”，研究卡斯卡迪亚地区滑移现象的美国华盛顿大学地球物理学家 Heidi Houston 如是说。

这种滑动发生在俯冲带，即遍布全球的、一个板块滑向另一个板块下方的边界。1999年，日本和加拿大的两个独立研究小组几乎同时首次发现这一现象，在此之前两个小组均在各自研究区域内布置了更好、更密集的传感器网络。从那以后，这些“慢地震”或“慢滑移事件”便从根本上改变了地球物理学家对地壳深部作用力的理解。地球内部基本上仍是个谜，但是研究慢地震使地球物理学家们距离他们的“圣杯”——准确的地震预测更进一步。这些静地震可能对描绘一些大地震如何形成有所帮助。

### 微弱震颤

在地幔放射性元素衰变产生的热的驱动力作用下，构造板块以平均每年2—5 cm的速率在地表运动。板块因构造运动压缩变形，贮存增加的弹性应变能。

1999年以前，研究人员认为受压板块只能通过两种途径释放贮存的应变能，或者快速地在数秒内以地震的形式，或者稳定地以均匀蠕变的形式释放。但慢地震的发现揭示这两种途径并非全部。“这

是我们第一次意识到断层有全频谱行为”，在GNS Science研究新西兰海岸附近慢地震的新西兰地质学家 Laura Wallace 如是说。

慢滑移从构造板块传递应力不是在数秒内完成的，而是一个数天、数周或数年的时间过程。这种持续的慢滑移效果是显著的。已经检测到一些慢地震可以释放等同于常规7级地震的能量。而且，在很多地区，这种慢滑移是间歇周期性的。例如，在卡斯卡迪亚地区每14个月一次，在墨西哥地区每4年一次。

最简单的慢地震模型由两个板块构成，在俯冲带地区一个板块俯冲于另一板块之下(图1)。断层最浅部处于闭锁静止，积累势能；在大约33—55 km深度范围，慢滑移零星地发生；在更深的深度上，地质学家则认为断层全年都在进行稳定地滑移。

摩擦，取决于岩石的成分组成，又决定了断层岩石的运动方式。但直接测量岩石的摩擦性质非常困难，因为岩石太深而无法直接采样或者成像。取而代之，研究人员通过其他方法来间接推断岩石的摩擦性质。例如，通过地震台网测量获得穿过地壳的地震波速度来计算岩石弹性，进而推断岩石的摩擦性质。但是这些弹性计算过于简化，通常假定岩石非均匀含水，对此，研究人员还需要详细

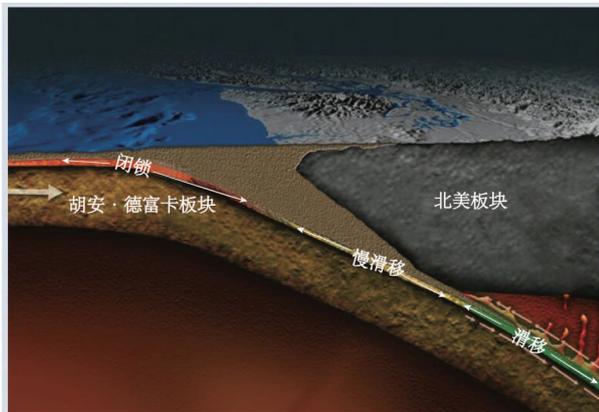


图1 卡斯卡迪亚俯冲区(Steve Malone/华盛顿大学)。在俯冲带地区，一个构造板块俯冲到另一个之下。在靠近地表处板块闭锁在一起，此处只以地震的形式运动；在深部，板块会自由地滑动；而中间则会发生缓慢震动的滑移

研究。

研究人员仍然不能完全确定是什么驱动着慢滑移事件，它们对非常规地震强度弱得多的动力即有所反应。例如，我们知道来自于太阳和月球的重力可以影响慢滑移。研究者观测到在卡斯卡迪亚地区发生慢滑移期间，与慢滑移相伴随发生的另一种称为颤动(tremor)事件的频次，随着海洋潮汐发生波动。“这表明，这些极微弱的应力，尽管非常微弱难以影响普通地震，但相对于慢滑移来说则相当强大”，Houston说道。

研究慢滑移最有用的工具之一是过去十年间建成的GPS传感器网络。它们足够敏感，可以检测毫米量级的地表运动。在日本和卡斯卡迪亚地区，GPS测量结果显示慢滑移以每天10 km的速率从一个地区向下一个地区迁移。另外，通过测量地表位移，研究人员可以进一步模拟造成地表位移的深部慢滑移事件。不同区域的模型不同，取决于特定断层的几何形状。例如，在墨西哥西南海岸，那里常发生一些大的慢滑移事件，某些GPS站检测到5 mm的地表位移，对应于滑移界面上约3 cm的位移量。然而，在卡斯卡迪亚俯冲带地区，研究人员们模拟发现5 mm的地表位移则相应于深部2 cm的滑移量。

建立这些台网富有挑战。GPS传感器一般只能安装在陆地上，但许多俯冲带都在水下。例如，引发海啸造成15000多人死亡并导致福岛核事故的2011年日本东北地震，始于距离海岸70 km的地方。于是，研究人员正在探索在海洋中进行测量的新方法。例如，Wallace的团队在新西兰海岸的海床上安装了

压力计。她说：“如果海底在一次慢滑移事件中向上移动，那么其上面的水会减少。”压力计可以测量慢滑移期间海底上下移动造成的水压波动。

#### 更深层次的理解

关于慢滑移事件，最吸引人的神秘之处在于为什么它们经常发生在俯冲带大的“大逆冲

型”地震之前。例如，我们知道，在2011年日本东北地震之前发生了慢滑移事件，持续近十年之久。类似地，研究人员后来发现在2014年智利伊基克8.1级地震几周之前发生了慢滑移。

有一个例子，慢滑移事件确实触发了2014年4月墨西哥西南海岸7.3级的大地震。震后的分析中，法国格勒诺布尔阿尔卑斯大学的一位地球物理学家Mathilde Radiguet和她的同事在绘制该地区的地震活动时发现了慢滑移。两个多月的时间，慢滑移沿断层迁移到地震起始点。Radiguet说：“慢滑移使应力增加，当应力达到一定的阈值时，岩石发生破坏，于是破裂开始。”Radiguet的团队在地震发生的两年后发表了分析结果，但地球物理学家能否最终利用慢地震来预测大地震仍耐人寻味。也许某一天终会实现。Radiguet说：“我们距离利用慢滑移作出地震预测还很遥远。”她又补充说，现在还不可能归纳不同区域的慢滑移的特征。慢滑移恰巧触发了2014年墨西哥7.3级地震，

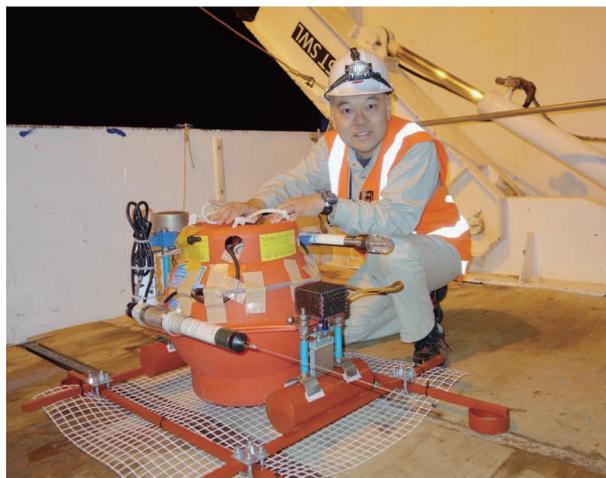


图2 深部物理(Yoshihiro Ito/京都大学)。24个海底压力表中  
的一个安装在远离新西兰东北海岸的希库朗伊俯冲带

是因为它向断层的特定部位迁移，但如果它沿另一个方向迁移，它可能降低断层的张力甚至阻止此次地震。Wallace说，“它们是一把双刃剑，在某些地方慢滑移事件有助于降低发生地震的可能。”

为什么慢滑移如此之慢？它究竟是如何使地球变形？许多关于慢滑移的基本科学问题悬而未决。Radiguet说，摆在面前的简单任务是安装更多的传感器，特别是在海洋中。由此开展的研究将是及时的，因为地震学家预计每年至少有一次8级以上地震发生在世界的某个地方。她说，“我们不清楚地震如何开始，慢滑移可能发挥了作用。”

目前卡斯卡迪亚俯冲带下一次巨大地震的发生已经逾期。该地区大地震之间的平均时间约为240年。317年前该地区发生的最近一次的大地震引起了太平洋另一侧的日本发生了海啸。同时，明年4月左右，地下将再次开始缓慢移动，而人类对此毫无察觉。