

2011 年日本大地震的科学解读

文_孙文科



孙文科，博士，研究员，中国科学院研究生院国家计算地球动力学实验室主任。科研领域：大地测量学，地震位错理论，重力观测与解释，重力卫星 GRACE 的应用研究。

3·11 日本大地震的基本情况

最近发生在日本的大地震在社会上产生了很大的影响。这次大地震发生在 3 月 11 日下午当地时间 14 点 46 分，地点是 38.03N、143.15E，震源深度为 25 公里，震级为 9 级。震源距仙台镇 129 公里、距东京 373 公里。震源机制是低角（14 度）的俯冲型地震。断层的长度约为 700 公里、宽度约为 200 公里，断层面上最大滑动量是 18 米。

此次地震主要有三个特点：一是震级非常大，9 级地震在历史上并不多见；二是震动的时间比较长，约为 300 秒；三是引发了高达 10 米的海啸，并伴有核泄漏等事故发生，这也是这次地震最大的特点。

地震发生后，我跟日本的几位朋友进行了联系，特别是仙台东北大学地震火山预报中心的几位朋友，他们都回复了。其中的一位朋友在邮件中详细地介绍了他的亲身感受。他介绍，在地震发生的时候，他相信建筑物是坚固的，所以没有逃出去，躲在了房间里。尽管这样，他也不能确信这样是安全的。因为，这次经历与以往不同。以往在地震发生时，通常是十几秒、半分钟左右的强烈晃动，觉得东西要掉下来，有一种危险的感觉，然后逐渐消失、平静。而这次地震，一次震动之后又来一次，总共有四五次，换算成时间有两三分钟时间的震动。他猜想，这次地震可能是一个地方破裂带动另一个地方破裂，连续破裂造成的。

他的这种感觉是有道理的。图 1 所示是日本东京大学地震研究所在震后公布的断层模型。左图中圆圈部分为当初地震震源分布，红色五星为主地震位置。右图为断层分布和滑动的分布情况，是一块一块的，发生地震后，大约以每秒 2 公里的速度从震源向四周扩散，接连发生错动，这样给人的感觉是连续的破坏行为。

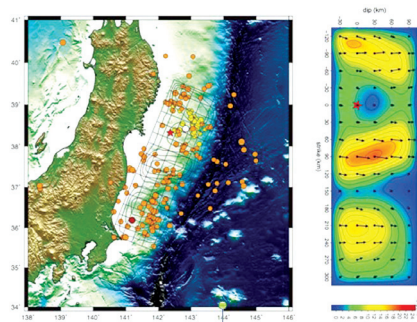


图 1 东京大学地震研究所在震后公布的断层模型

3·11 地震成因与日本地震特点

截止到 3 月 21 日，本次大地震一共引发了 657 次余震，整个日本东部到海

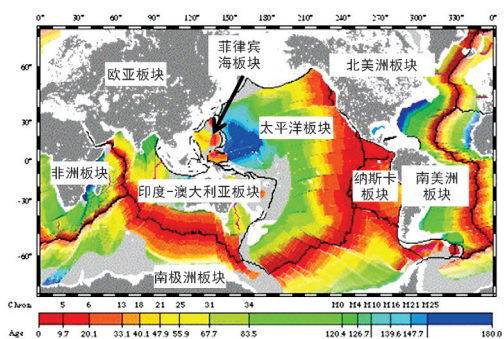


图2 不同年龄板块的分布

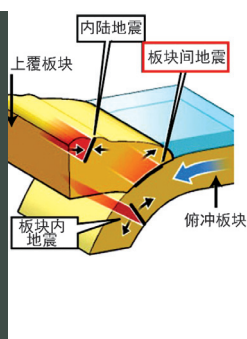


图3 三种不同类型的地震

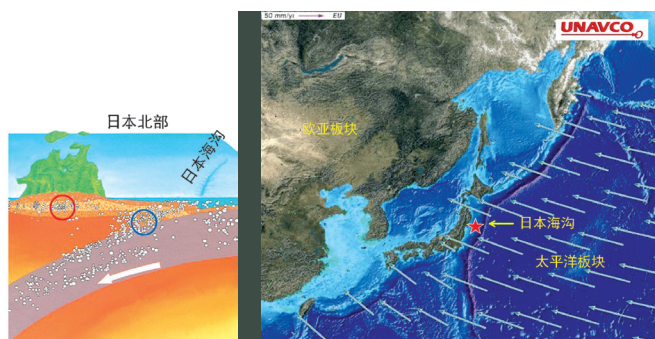


图4 日本海沟的位置

沟都在不断破裂，不断发生地震。这次地震引发的海啸、核泄漏，已经导致超过1万人死亡，16000多人失踪。为什么会发生这么大的地震？它的成因和背景是什么呢？

在半个世纪以前，科学家已经提出地球是板块构造，并且板块之间存在相互运动。GPS等现代观测技术都证明了这一点。基本上，地球可以分为六大板块，还有一些小的板块。六大板块之间的运动速度是非常大的，有的达到每年8厘米、5厘米、3厘米等。在这样的板块构造背景下，就会产生很多的能量积累，当能量积累到一定程度时便以地震的形式释放。这就是地震的基本成因。

图2给出的不同板块的年龄，显示了世界地震分布的基本构造背景。红色是最“年轻”的板块，集中在洋脊，是大洋里中心的地方，是洋脊地震带的区域。这里产生了新的板块向两边移动，这就是所谓的板块漂移。移动到陆地边缘，就向下面俯冲，产生了现在最大的地震带：环太平洋地震带。另一个大地震带是欧亚地震带，中国基本上处于欧亚地震带上。具体来讲，比如太平洋板块，洋脊产生板块以后，向两边移动，然后冲入大陆的下面。冲撞的部位就是地震产生的地方，叫做俯冲带型地震带。

日本东边是太平洋板块，南面是菲律宾板块，基本上日本整个列岛都是在板块俯冲带的上面，即处于世界三大地震带的环太平洋地震带上。该地震带上的地震大多属于低角俯冲带型地震。太平洋板块运动的速度是每年8.5厘米左右，基本上都俯冲到日本的岛屿下面，这就是一个大的构造背景，也是产生地震的能量或者动力来源。

在日本列岛上，震源深度大约在0～150公里。从立体空间可以看到，按照板块俯冲的方向，沿着边界上发生了大量的地震。

日本列岛的地震类型基本上可以分为三类：一个是内陆型地震，这也是受板块俯冲作用发生的；再一个最主要的类型就是板间的地震；最后就是板内地震。内陆地震和板内地震能量一般都不太大，一般为六七级，板间地震通常较大，世界上9级以上大地震几乎都属于板间地震。

这个地方为什么会发生地震？我们知道，板块向下移动的时候，如果是慢慢滑动，两个板块之间随着板块推移也在逐渐相互运动，这个时候，能量通过热或者其他形式已经释放出来了，不发生地震。

如图4所示，太平洋板块与欧亚板块（部分北美板块）相互运动，太平洋板块向西位移突然收敛的地方（深蓝色的条带）为日本海沟（五星表示这次地震震

中)。这个海沟深十多公里,其深度大于喜马拉雅山的高度。在太平洋板块刚刚向下俯冲的部分是没有地震的,因为有海水的作用,板块之间是慢慢滑动的,在非常深的地方也没有地震,因为那里比较热、比较软,通常也可以自由地滑动。但是中间有一部分,平时是耦合不动的,英文叫 Asperity,汉语叫做凹凸体或者是障碍体,因为板块不断向下俯冲,这个地区可以累积非常大的能量,到一定时候突然破裂,就是地震,这次地震就是这样发生的。

板块的慢滑动可以通过 GPS 的观测或者其他手段测出来,也可以反演出这个地方的滑动。如果有的地方耦合不动,就是危险区,这里发生地震之后,破裂的范围或者大小和慢滑动是互补的。

为什么有的地方是慢滑动,有的地方是耦合不动的,目前还不十分清楚。但有一种可能,就是海洋下面的所谓海山。海底跟陆地上一样,也有山和丘陵。这些山随着俯冲,最后进入到陆地板块下面,和陆地板块有一个很强的摩擦力,不太容易滑动,这就是地震容易发生的地方。地震不断地发生,并且有一个明确的时间规律,例如,在茨城附近大致以 20 年为一周期。所以,1940 年发生比较集中的地震,到 1960 年又会发生地震,接下来是 1980 年,等等。因此,日本研究地震的时候,基本找到了俯冲带型地震的基本规律。因为哪里慢滑动发生,哪个地方不滑动,是可以观测出来的,没有滑动的地方,就是地震的危险区。当能量积累到一定的时间,根据滑动的速率、不滑动区域的大小,基本上可以确定震级的大小,所以地震的长期预报或者趋势性预报,相对来讲要容易得多。

海山作为耦合体或者两个板块之间耦合不动的地方,研究者在日本四国岛的海域处找到了证据。所以,海山的前后段,就是危险区,就是地震发生的地方。

和中国相比,日本基本上是以俯冲带型地震为主,中国则是以内陆型地震为主。日本地震多伴随海啸,但不是所有的地震都发生海啸。中国的地震,除了台湾地区,基本上无海啸。还有,日本地震多数发生在海域,但是陆地上也有,相对来讲震级不是那么大。中国的地震大都发生在陆域。日本地震次生灾害比较大。所谓次生灾害就是除了地震直接震塌或者倒塌的灾害以外,经常会产生火灾、海啸,这些造成的灾害往往比地震直接造成的灾害多;而中国地震直接造成的灾害比较多。日本地震引起的死伤人数,这次比较大,但相对来讲比中国地震产生的伤亡小一些。中国是因地震造成死亡人数最多的国家。仅在上世纪,或者过去 100 年中,超过 20 万人死亡的 3 次大地震都发生在中国。

3.11 地震预报失败的原因

地震预报失败的原因是什么呢?地震的孕育或者发生是一个非常复杂的过程,人类对它的认识还处于初级阶段,这是最根本的原因。日本地区超过 8 级的地震不多,虽然历史上也有过 8.6 级、8.3 级,但是 9 级的地震确实出乎所有人意料。另外历史地震统计表明,下一个 8 级地震可能发生在日本东海地区。

图 5 为日本预测 30 年内发生强地震运动可能的分布图,红色表示概率最大的地方,也就是说在日本东海地方或者南海地方,是非常有可能发生地震的。北海道发生地震的可能性也比较大,但是这个地区人少,可能引起的灾难并不太大。日本根据研究成果对地震进行了预测。1978 年日本制定了《大规模地震对策特别措施法》,据此在东海地区 21 处设置探测地下板块运动的设备,不断完善大地震预测系统。2003 年,东海大地震对策专门调查委员会还预测,大地震将导致最多 1 万人死亡。同年 5 月 29 日,日本中央防灾会议出台了《东海地震对策大纲》,针对东海大地震进行预想并制定应对措施。2009 年,日本政府再发预测,

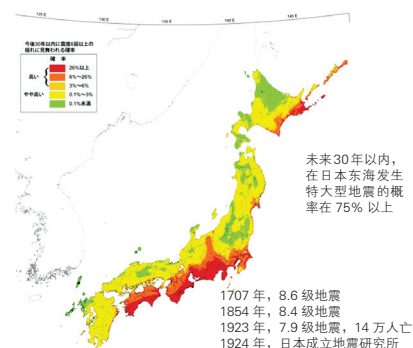


图5 日本30年内发生强地震的概率预测图

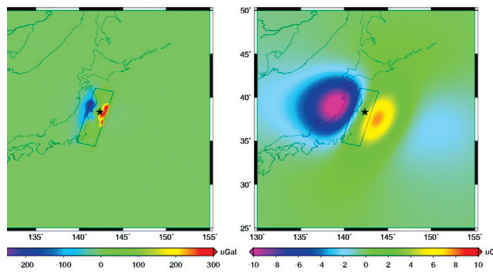


图 6 左 从卫星上观察到的重力场变化

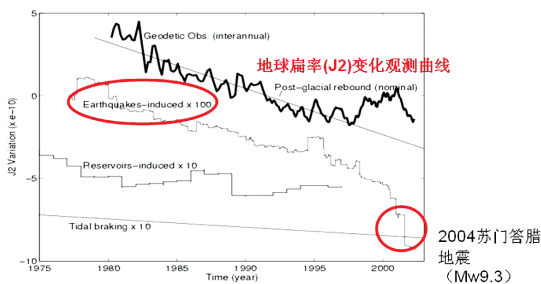


图 7 右 地球扁率 (J2) 变化观测曲线

30 年内东海地区发生大地震的几率为 87%。

俯冲带型地震往往是单个障碍体的破裂，为什么这次是大范围地发生地震？为什么多个耦合区同时破裂？其原因目前还不是很清楚，这是今后一个很重要的研究课题。

3·11 地震灾害与地球物理场变化

这次地震引发了巨大的海啸。海啸作为地震的伴随现象不奇怪，这是自然现象。海啸预警比地震预警花的时间长，需要时间计算，然后发出预警。由于日本东海岸在此次地震时普遍下沉了很多，最大的地方超过 1 米，助长了海啸灾害的扩大。

据日本方面用 GPS 观测网观测，水平位移结果是 5.2 米，下降的最大值是 1.2 米。我们实验室用理论根据断层计算的结果也表明，日本沿海处都是下沉的，产生了位移场，对中国的最东部会产生约 2 厘米的变化，对中国东北地区普遍产生大约 5 毫米的位移。这是不是意味着日本一定向东移呢？不一定。因为太平洋板块的俯冲引起的通常是向西的移动，这种移动是不发生地震的，一旦能量积累到一定程度的时候，就发生地震，向东移动，这两个移动大体上是平衡的。

如图 6 所示，这次地震同时引发了重力场的变化。左图为空间固定点的重力变化分布图，达到约正负 300 微伽；右图为经过 300 公里平滑后的重力场变化结果，达到约正负 10 微伽，这样大的重力变化完全可以被重力卫星 GRACE 观测到。待几个月后 GRACE 数据公开后，这个结论便会得到证实。

社会上关注，地震是否使地球旋转加快。理论来说是这样的，但没有实际意义，对我们的生活、对人类的生存没有任何影响。地球扁率 (J2) 变化观测曲线见图 7。近年来发生地震所产生的影响也绘于其中，结果是产生的地球旋转变化乘上 100 倍。图中也显示了 2006 年苏门答腊地震产生的变化，乘上 100 之后，变化也是非常微小。所以地震产生的地球旋转的变化是微乎其微的，一点儿不用担心。

3·11 地震带给我们的启示

通过这次地震可以得到的几点认识。首先，地震是不可避免的自然现象，今后还会发生大地震，甚至还会发生 9 级以上的地震，这是不可避免的，是地球动态变化的自然结果。其次，地震预报还需要进一步探索，加强地震科普教育也很重要。大家通过电视可以看到日本民众对地震的反应态度非常平静，这说明平时的科普教育非常重要。另外，要加强地震科学基础研究和地震应急的研究。最后是要加强抗震救灾。现在中国富裕了，有些建筑的设防标准、抗震标准应该提高。我们的标准和世界上建筑强度的标准相比，目前还比较低。■