

# 3·11 日本东北特大地震

*The Great East Japan Earthquake, March 11, 2011*

中国科学院地质与地球物理研究所 李娟  
美国 Rice 大学地球科学系 钮凤林

2011年3月11日下午2点46分，日本东北地区沿海发生了9.0级超强地震。这次地震堪称日本有史以来最强的一次地震，其震级之巨大，破坏之强烈，影响之持久大大超乎了人们的预料。地震发生在仙台市以东130千米的太平洋海域。从地震起始点开始，破裂先是由南向北传播，然后由北往南，持续震动了150多秒，形成了长400多千米，宽100多千米的巨大断层面。地震导致的巨大海啸在10分钟后迅速登陆，以横扫千军之势袭击了包括宫城县、岩手县、福岛县、茨城县、千叶县在内的日本东北和关东地区沿海诸县，并陆续扩展至整个太平洋沿岸。地震海啸导致数以万计的人员伤亡，经济损失超过3000亿美元，而其核泄漏对环境、社会的影响以及对公共安全的威胁，至今仍在不断地继续、演变和扩大中。

## 震级大小的变化

稍留意一些，即可发现日本东北大地震发生后有关地震大小的信息总在不停地变化着。日本负责公布地震信息的气象局（JMA）给出的震级最初结果是里氏7.9级，后历经8.2级、8.4级等多次更新最终定为9.0级；美国地质调查局（USGS）也由最初的7.9级渐次调整为14日公布的9.0级；中国地震台网中心在震后30分钟内发布的快速测定结果为8.6级。这种震级上不断更新的现象在超强地震中较为常见。2004年苏门



答腊发生的 9.0 级地震是 20 世纪 60 年代以来第一个能量巨大、引发大规模海啸，并被全球地震台网普遍记录到的地震事件，多数研究机构最初都只给出了约 8.0 级的震级估计，这大大低估了诱发海啸的危险性。事实上，地震发生 4 个多小时后，哈佛大学才利用 2 个多小时的地震记录分析，发布了较为准确的震级估计。

出现这种震级上的差别，一方面是由于地震发生后，需要快速测定地震震中位置、发震时间和震级大小，因此只能利用极为有限的地震台站观测记录图中最先到达的几秒钟数据作出反应。而后续地震波，特别是传播较慢的面波却携带了更丰富的地震震源破裂信息，是客观估计地震大小的主要信息源。另一方面，这也体现了当下某些地震学家们的观点，即在地震刚发生的时候是无法知道它的大小的，地震的破裂似乎是个随机过程，只有当整个破裂都结束的时候，我们才有可能知道地震的确切大小。不可否认，对地震震级大小的快速、精准测定是有效应对地震灾害，减轻诸如海啸、滑坡等次生灾害的重要基础信息。

### 创伤累累的日本

地震并不是随机发生在地球的各个角落的。随意用 Google 检索，输入关键词“地震活动”就会发现，环太平洋有一圈密集的地震分布带，俗称“火环”（ring of fire），岛国日本就位于这个异常活跃的“火环”之上。

日本国土面积虽小，但在构造上却较为奇特和复杂。狭长的岛国地跨两大板块：东北部属于北美板块，古老的太平洋板块以每年 80~90 毫米的速度向西北方向俯冲至日本岛下，西面的欧亚板块则以每年 20~30 毫

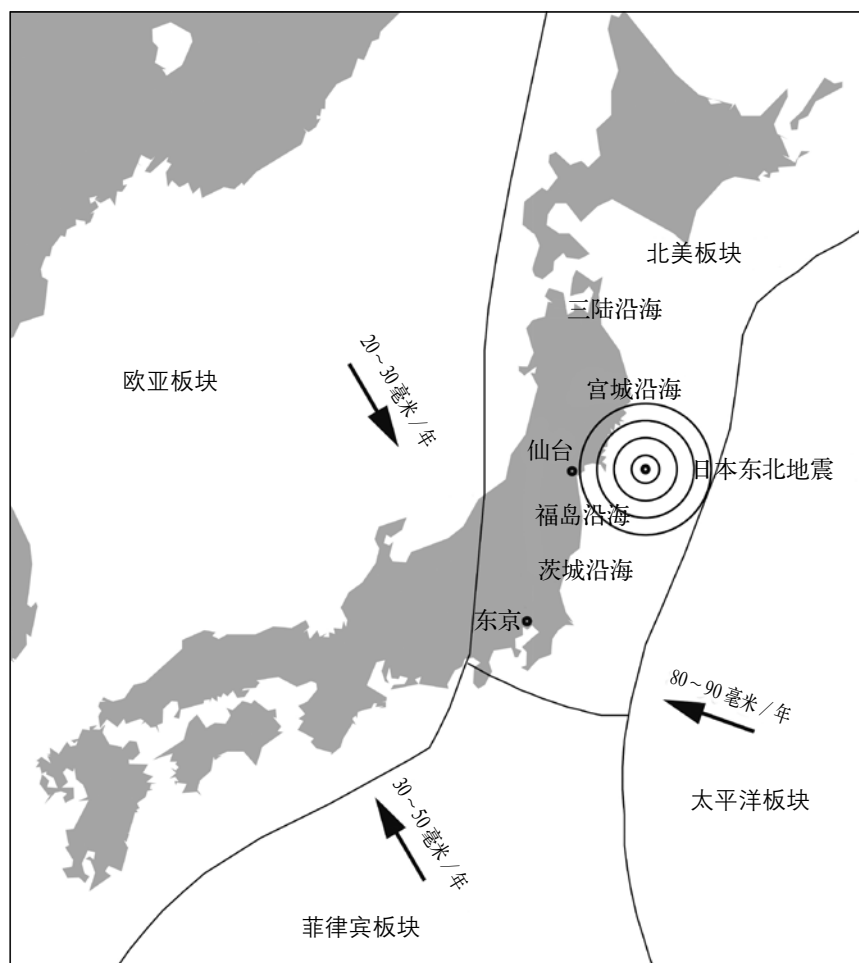


图 1 日本东北大地震发震位置以及邻近板块运动情况

米的速度与其碰撞，可谓是“双肋受压”；日本西南部则另属于欧亚板块，较为年轻的菲律宾板块以每年 30~50 毫米的速度向西北方向俯冲（图 1）。板块之间的相互挤压碰撞无疑会导致应力在此处大量累积，造成日本及其邻域“小震天天有，强震不间断，大震不稀罕”的极端情况，强震几乎遍布日本从南到北的每一处，仅 1950 年以来，日本东北地区就发生了十余次 7.0 级以上的地震。

正因为如此，日本国民很早就意识到生存环境的多变和脆弱性，从房屋建筑、堤坝的修筑等方面加强对地震的预防，乃至从孩童入幼儿园起就宣传和强化抗震自救意识等。可以

说，他们对地震危险的认识和准备远胜于世界上的其他国家和地区，但是这次花了 30 年时间沿日本东北修筑的海墙还是未能阻止十数米的高海浪入侵。

### 大地震的发生——意料之中还是意外

大地震的发生震撼、扭曲了整个地球，也惊诧、动摇了地震科学界。专家们都有一个共同的困惑，在仙台近海发生如此规模的超强地震似乎有些出乎意料。既然地震预测仍是一个世界性的科学难题，其位置、时间和大小都是不可预知的，缘何又会有如此的反应呢？

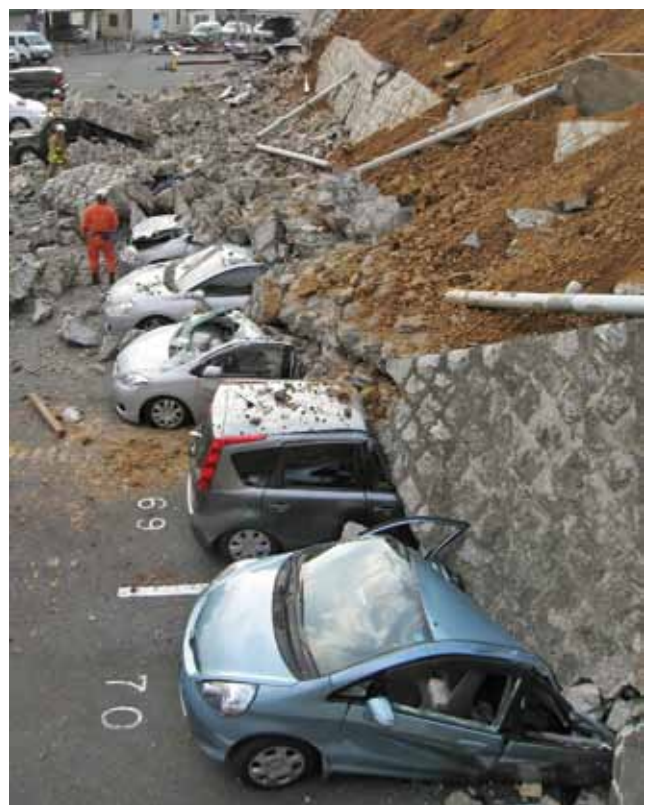


20 世纪初，里克特（Richter）提出了地震断层理论，认为应力的不断积累使得断层突然运动产生地震。因而，活动断层的存在和探测以及对断层性质的研究成为地震长期预测的重要依据。1980 年前后，基于对地震破裂过程的详细研究，地震学家们提出了一套似乎行之有效的“障碍体”（asperity）模型，用以解释在环太平洋俯冲地区观测到的地震活动。他们认为，断层内部是不均匀的，存在所谓的“障碍体”，即断层面上滑动较大的区域，大地震主要就发生在这些障碍体上。障碍体的面积控制了最终发生地震的大小，其面积可以根据余震的分布和 / 或海啸源区的面积来界定。以日本东北为例，70 多年来，十余个 7 级以上强震似乎都以约 30 年的周期重复发生在界面上 5 ~ 10 个大小约为 50 ~ 100 千米的固定障碍体上。根据这一特性，不少地震学家把从千叶至北海道沿海分成 6 个区：茨城沿海、福岛沿海、宫城沿海、三陆沿海、青森沿海和十胜沿海（图 1）。除北部的三陆和十胜海域，地震的强度一般不超过 8 级。这一观测结果也迎合了现有的俯冲动力学模型，即发生在较老俯冲板块上的地震通常都不会特别大，因为板块老，温度低，与周围物质的密度差大，板块的下拽力也就大，板块之间较易活动，不易耦合，无法积累起足够多的应力；而较年轻的板块由于温度较高，密度差小，下拽力小，板块之间不易滑动，更易耦合导致应力的大量聚集，因而容易发生超大的地震。如有仪器记录以来最强的 1960 年智利 9.5 级地震，就是发生在较为年轻的纳兹卡板块上。因而，人们对这一带地震的预期似乎止于一次 8.0 级的地震，而能量 30 多倍于此的超强地震的出现则大大出乎意料，这也部分解释了缘何多家机构最初只将震级定为 7.9 级。

### 被仪器蒙蔽了的眼睛

板块理论是 20 世纪应用最为广泛和最为成功的地球科学理论。对活动断层的探测、地震活动性的分析，对地球表面各种形变的解释以及对地震中长期预测的尝试都是以板块理论为基础的，而地震学家们对俯冲地区大地震发生的预期也是基于现代仪器的观测和板块构造理论这两大基石。如前所述，这次大地震的发生似乎撼动了曾经看起来的观测与理论的“完美结合”，究竟是哪里出了问题？

近代的地震观测仪器出现于 20 世纪初。我们基于观测获得的认知和经验也就局限在了这短短的百年时间尺度之中，正像如来掌中的孙猴子一样有个永远跨不出去的界限。如果我们把观测尺度从有仪器记录的 20 世纪放开到历史记录中去，也许可以看得更远、更客观些。早在公元 869 年，



即日本的贞观年间，史书上就有记载，一次巨大的海啸席卷了宫城、茨城沿岸。2006年，古地震学家们在盛产稻米的仙台平原上开挖了3个探槽，通过对沉积物特性的分析和动力学过程模拟，发现那次贞观海啸规模巨大，深入内陆范围超过4000米，直抵仙台，其罪魁祸首则为一次震级约8.3级的大地震，该地震的重复周期约为1000年。贞观地震海啸和这次3·11地震在震源破裂区、海啸规模上的相似程度似乎表明了这次大地震的发生与现有理论并不矛盾，只是我们被一叶障住了眼睛——基于有限观测得出的结论往往是片面的。不可否认，对这种巨大灾难性地震的确认和潜在危险性的共识来得太迟，如何事先将科学上的发现公诸社会并及时应用在灾害的评估、海啸的防范、建筑物的抗震规划上，将会是我们一直面临的课题。

### 阴影笼罩的东京及西南日本

东京位于本次地震震中370千米外，震感非常强烈，地面持续震动5分钟以上。总体而言，地震对东京造成的破坏并不严重。但震后几天里，余震活动由北向南，直逼位于东京东部的千叶县沿海海域，一度使地震学家们担忧：“1923年关东大地震”会不会卷土重来。东京地处东日本和西南日本的交界，正好位于北美板块、太平洋板块和菲律宾板块的交汇处。1923年发生的里氏7.9级关东大地震孕育于一条东南向西北下倾的断层上，该断层横跨东京湾，覆盖大部分东京地区（图2 K）。这个地震经常和所谓的东海地震相混淆（图2 E）。根据历史地震资料记载，关东地震的重复间隔约为220~415年。因此，下一个关东大地震也许还得等上100

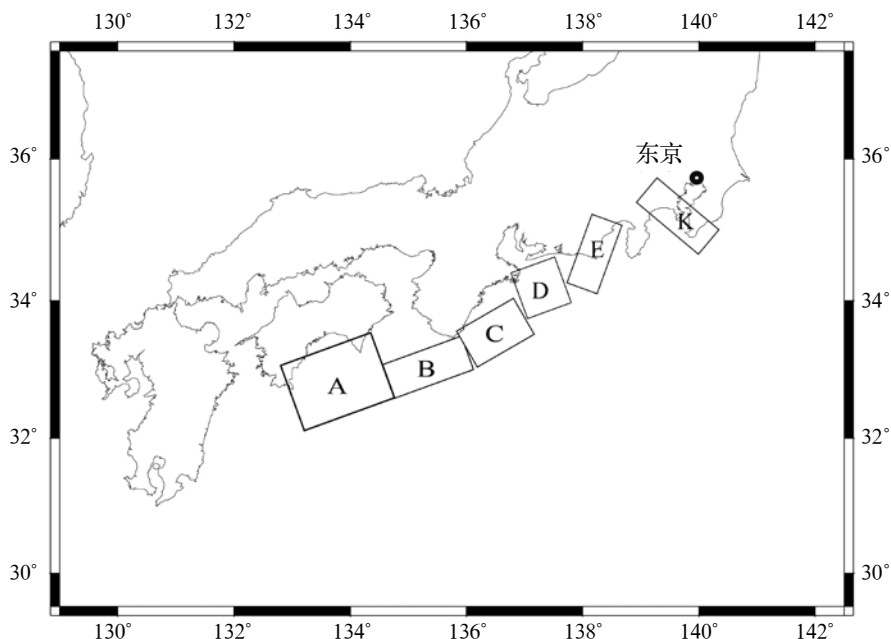


图2 关东及西南日本孕震区分布示意图

年。现阶段对东京构成巨大威胁的强震是东海地震，该地震的重复间隔为150~300年，而最近的一次东海地震发生于1854年，因此说它随时而至并不言过。

日本还处于另一个同样危险的俯冲带上。年轻的菲律宾板块向西北直插西南日本下方，导致了8级以上地震频频发生。过去的强震分布显示，在这个长约600千米的俯冲带上存在着至少5个孕震区（图2 A, B, C, D, E），分别被称为南海地震（A和B），东南海地震（C和D）和东海地震孕震区（E）。这些地震时而独来独往，交替发生；时而成双成对，同时现身，给西南日本沿海造成了巨大灾难。1944年C区和D区同时地动山摇，爆发了8.2级的东南海地震；两年后的1946年，A区和B区再次爆发了8.3级的南海地震；而前一次的东南海地震（C和D区）和东海地震（E区）则携手并进，同时发生在1854年。因而，如果出现5个孕震区同时破裂

的极端情况，就会爆发近9级的超强地震。这也许是从本次地震中所得到的经验教训吧。

### 结语

过去100年里，全球一共发生了5次9级以上超级强震，包括1952年堪察加地震，1960年智利地震，1964年阿拉斯加地震，2004年苏门答腊地震和这次日本大地震，它们都位于俯冲地区的板块边界上。1960年智利地震是人类历史上记录到的最大的一次地震，其威力相当于2万颗投放在广岛的原子弹，人类也正是在那次地震记录中第一次“看”到了由地震引发的地球整体震荡。这次日本东北地震则堪称最有影响的地震，它对传统理念的冲击，带给人们的思考将会持续很久。如果说，仙台附近的俯冲地区可以产生一次超大地震，那么，世界上其他具有相似的古老俯冲洋壳的地区也会有发生超大地震的可能，只是时间早晚的问题。☑