

# 地震科技前沿快报

2019 年第 3 期 （月刊 总第 3 期）

中国地震局科学技术委员会  
中国地震科学实验场

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、断层泥带记录的重复地震滑移事件：来自日本西南 Nojima 断层的钻孔资料
- 2、机器学习可预测模拟地震的时间和大小
- 3、用于固体地球科学中数据驱动发现的机器学习

## 断层泥带记录的重复地震滑移事件：来自日本 西南 Nojima 断层的钻孔资料

钻探调查和岩芯的构造分析显示，与 Nojima 断层（NF）相交的 9 个钻孔中，在 260~900 m 深处观察到 10~30cm 宽的断层泥带，1995 年在这一断层发生了 6.9 级神户地震。记录的数据以及岩芯中的宏观构造和显微构造分析表明：在 NF 中形成了一个约 60 m 宽的断层破坏区，其中包含 10~30 cm 厚的断层泥带；断层泥带有 11~20 个不同颜色的薄层，每个颜色层含有不同颜色的角砾，它们被破裂和填充破裂的方解石与石英细脉错开或切割。研究结果表明，断层泥带可能记录了在晚更新世-全新世期间沿 NF 的 11~20 多个古地震断层事件。相关研究成果发表在 2019 年 2 月的 *Geophysical Research Letters* 上。

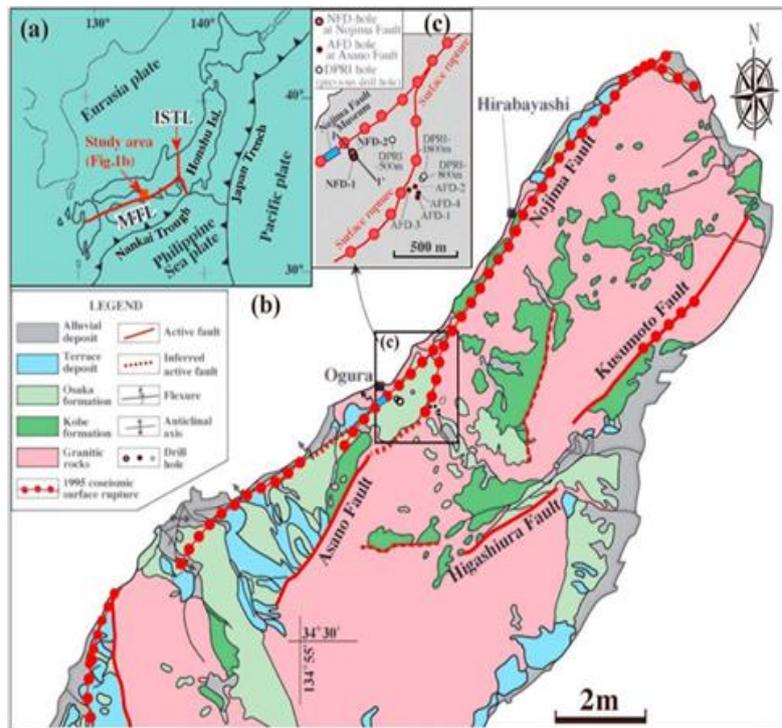


图1 Awaji 岛地质图

众所周知，大的陆内地震常沿成熟的活动断层反复发生，地震滑动可能由碎裂岩记录，包括在上地壳浅层形成的断层泥岩带。由主断层面界定的断层泥带被认为代表了地震滑动带，地震滑动带调节了大部分累积断层位移。因此，沿成熟活动断层泥带的研究将为重建这类断层的长期地震行为提供重要信息，并为活动断层的各个地震滑动过程及其古地震历史提供新的信息。

在过去的3年中，研究人员开展了“断层破坏带钻探计划 (Drilling into the Fault Damage Zone, DFDZ)”的研究项目，以开发一种综合方法来评估近期在基岩中发育的断层活动。该项目涉及在日本西南部钻探 Nojima 断层 (简称 NF)。在本研究中，重点研究了在 Ogura 的9个钻孔中断层泥带的构造特征，这些钻孔在不同的深度从260~900 m处穿过 NF 断层。这种深部的岩芯没有受到类似于地表附近的物理和化学风化的影响，因此提供

了新鲜样品，可用于研究由断层带内的地震滑动引起的断层构造和化学变化。

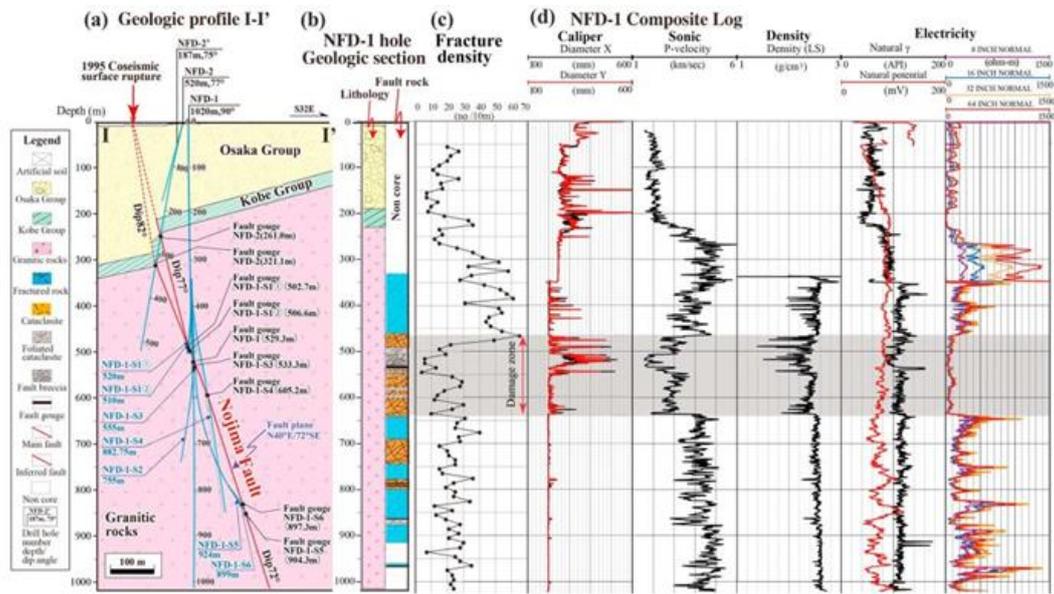


图 2 a: I - I'地质剖面图; b: 钻孔 NFD-1 地质剖面图;  
c: 钻孔 NFD-1 不同深度破裂密度图; d: 钻孔 NFD-1 资料图

研究区位于 Awaji 岛的西北侧，研究区的基底岩石由前新近纪花岗岩、中新世神户组和上新世-更新世大阪组组成，所有这些岩石都被晚第四纪冲积层和阶地沉积物不整合覆盖。花岗岩为中粒，主要由石英、长石、黑云母和副矿物角闪石组成。神户组主要由砂岩、砾岩、砂质泥岩和薄夹层褐煤层组成，大阪组主要由弱固结至疏松沉积物组成，包括粉砂粘土、砂砾和砂砾交替层。Awjai 岛东北部发育了四条主要活动断层，包括组成 Nojima 断裂带 (NFZ) 的 Nojima 和 Asana 断层，以及 Kusumoto 和 Higashiura 断层。所有这些断层的走向均为 NE-SW，并切断了中新世-更新世的神户和大阪组以及第四纪冲积物。1995 年神户 6.9 级地震沿着已有的 NFZ 产生了 18km 的同震表面破裂带，沿着 Awaji 路岛东北侧的 Kusumoto 断层产生了约 2 km 的同震表面破裂带。在 NFZ 内发育的碎裂岩的宏观构造和显微构

造特征表明断层有右旋走滑主导的构造历史。

在这项研究中,研究人员选择了位于 Nojima 断层以东约 100m 的 Ogura 的一个钻井。钻孔被设计用于约束主断层面的位置,以便可以通过使用受控钻孔技术弯曲分支(侧壁)孔,从同一孔中取出 NF 上不同深度的断层泥样品。这种方法使得研究人员以有限的经费从同一断层的不同深度获取更多断层泥岩芯样品。设计了两个导孔来了解断层带构造,包括大阪和神户组沉积岩内断层的倾角,从而能够在孔深 261 m 和 321 m 处恢复断层泥带,断层倾角估计分别为  $77^\circ$  和  $82^\circ$ 。在试钻后,设计了 NFD-1 深钻孔,深度达到约 1000 m。

除导孔(NFD-2')外,所有钻孔均通过 NF,并在 261~902 m 的 9 个深度处采集了断层泥(15~30 cm 宽)。在 NFD-1 孔中,岩芯的深度在 350~1000 m 之间。钻芯中断层岩的构造分析和井眼图像的破裂密度以及测井数据显示,在 460~650 m 深度的 NFD-1 井中存在异常,其中破裂密度、P 波速度、岩石密度和电流显示出低于孔壁中其他有界部分的值,并且在深度为 529 m 时观察到一个宽约 20 cm 的断层泥带,由一个倾角约为  $75^\circ$  明显的断层面所界定。断层面倾角在 500 m 上下由  $77-82^\circ$  变化到  $72^\circ$ 。断层破坏带由碎裂岩组成,包括碎裂岩、断层角砾岩和断层泥。之后,将含有断层泥的岩芯磨制薄片,进行光学显微镜观察、以及能量色散 X 射线光谱(EDS)分析。

断层泥带的构造特征分析表明,样品来自不同的深度。断层泥带在岩芯中的长度范围为 15~90 cm,这对应于垂直于  $72-77^\circ$  倾角断层面的 10~30 cm 宽。除了 NFD-2 钻孔,其中断层泥带沿着花岗岩和神户组沉积岩之间的边界发育,所有其他断层泥岩芯都来自花岗岩。断层泥带具有 11-20 层从浅棕灰色到深灰色不同的颜色,通常具有明显的颜色边界。这些不同颜色的层宽度从 1~2mm 到 10 cm (一般 $<1\text{cm}$ ) 不等,它们通常包含不同颜

色的断层角砾岩，其中一些由主断层面和微破裂错开或者切割，微破裂中填充了方解石和粘土细脉，并由细粒方解石胶结。一些断层泥层表现出假玄武玻璃脉的外观，与带有方解石脉的面理化的断层泥形成互层，并被许多方解石细脉错开或注入。细粒的断层泥也注入邻近的断层泥层和假玄武玻璃状的脉体中，与方解石局部混合，表明断层泥物质的液化。主要断层面由两个断层泥层之间的明显边界所鉴别，表明最近的地震滑动事件发生在主断层面上。相反，位于远离主断层面的各个断层泥层之间的边界显示出不规则弯曲的几何形状，表明在这些断层泥层形成之后发生了变形。假玄武玻璃状的脉体由细到超细晶粒的角砾状颗粒和碎屑组成，其粒径从亚微米到  $5\ \mu\text{m}$ ，但通常  $<3\ \mu\text{m}$ ，与未固结的软断层泥层相当。

过去二十年的研究表明，由单个大地震引起的大部分同震滑动被小于几厘米的高度局部化的滑移带所调节。同震滑动区域主要位于  $1\sim 10\ \text{mm}$  宽的断层泥构成的狭窄区域内，但通常宽度为  $2\sim 3\ \text{mm}$ 。这个断层泥带主要受到同震位移发生的条纹状断层面的限制，如 1995 年神户 6.9 级地震，1999 年 7.6 级 Chi-Chi（台湾）地震和 2008 年 7.9 级汶川地震。宏观构造和显微构造特征表明，在近期大地震中观测到的同震滑动带与先前存在的断层泥带内的主断层平面有明显的界限，表明断层面限定的断层泥层可能记录了至少一次地震滑移事件。地质观测还发现了过去同震滑动的可靠指标，如沿着明显的滑动面形成以及注入的假玄武玻璃，沿着尖锐的断层面截断的碎屑，发生液化的断层泥层。如本研究所述，表现为假玄武玻璃的外观的断层泥层，由细粒物质组成类似于未固结的断层泥，这也被认为是一种假玄武玻璃脉，已经被野外观察和沿着 NF 的岩芯所证实。NF 中的假玄武玻璃存在流体包裹体证明该部分发生了熔融，由此表明发生了地震滑动事件。在断层泥层和假玄武玻璃脉中注入的断层泥脉表明细粒的断层泥物质在地震过程中发生了液化并注入到围岩中。

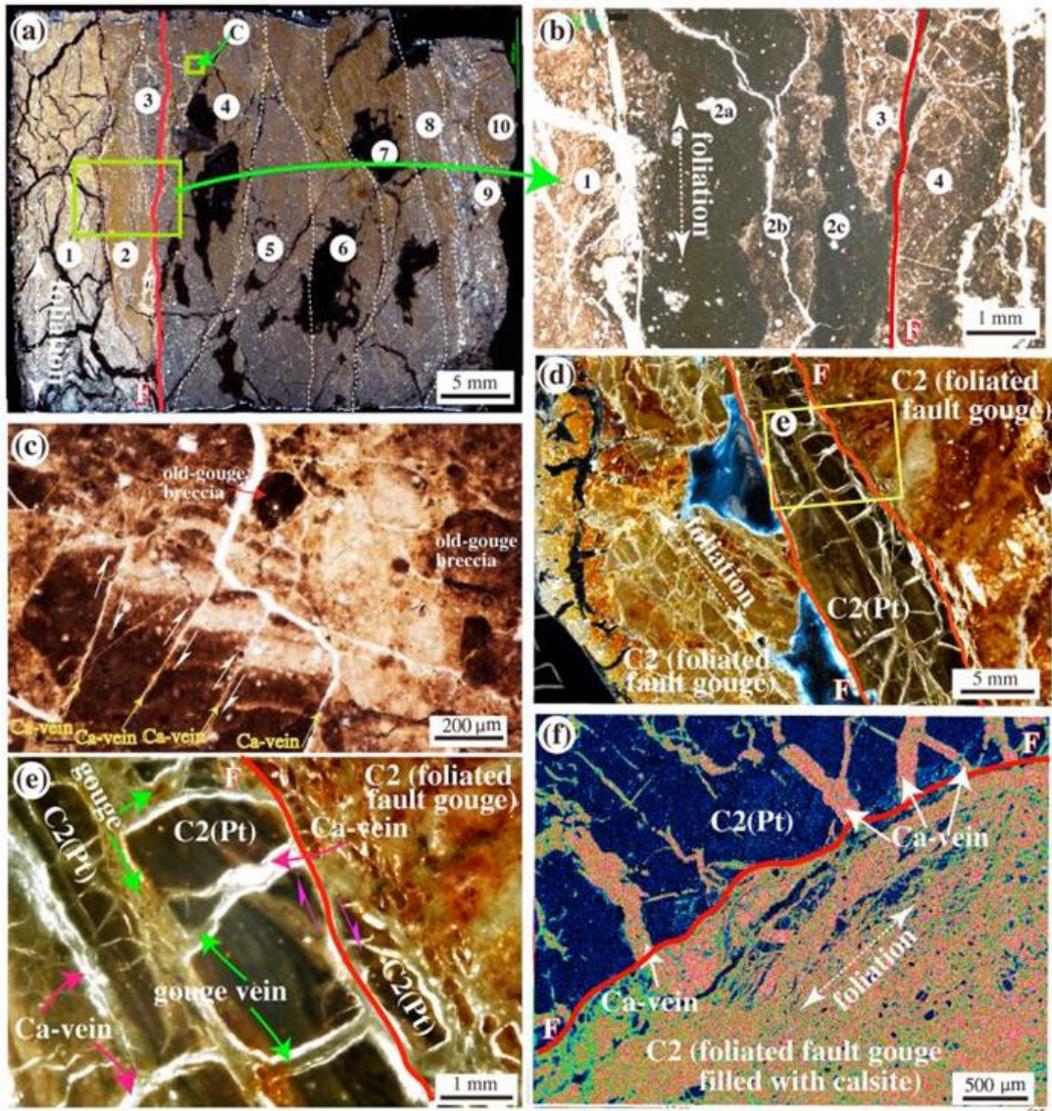


图3 断层泥样品显微构造及EDS特征

基于上面记录的宏观结构和显微构造特征，包括分层结构、假玄武玻璃脉脉、截断的碎屑和涉及岩层的旧断层泥角砾岩，以及层状面理化或者未面理化的断层泥层，研究人员认为每个颜色层代表了至少一次地震事件。因此，在NF的钻芯中发现的断层泥带的11~20个颜色层可以被认为记录了超过11~20个地震断层事件。地质证据和测井资料显示，NFD-1井在460~650 m深处存在异常，表明一个约60 m宽的断层破坏带，包括一个10~30 cm厚的断层泥带。野外调查和构造分析还表明，一个断层带有一个

断层泥区。受钻孔和岩芯数据约束的地质剖面显示，只有一个由主断层面界定的断层泥带（10~30 cm 宽）。

以前的研究表明，Awaji 岛周围地区的主要活动断层在第三纪末或第四纪期间被活化，并且在地形标志物以及断层破坏带上积累了位移。NFZ 的特征是山脊、河道、冲沟和田埂的系统偏转/错开区域，并且沿着这个现有区域形成 1995 年神户地震的同震表面破裂带。在 Ogura 钻井周围的研究区域，NFZ 右旋偏移了 Nojima 河和晚更新世-全新世冲积扇约 48 m，表明过去约两万年的累积位移量。最近的海沟调查显示，1995 年神户地震之前的最新地震发生在公元 1000 年，而且 NFZ 上的大地震的平均复发间隔约为 900 年。因此在晚更新世-全新世沿着主断层面发生的多次断层事件期间形成了这个断层泥岩带。

来源：Lin A, Nishiwaki T. Repeated seismic slipping events recorded in a fault gouge zone: Evidence from the Nojima fault drill holes, SW Japan. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46, 1276–1283.

## 机器学习可预测模拟地震的时间和大小

尽管俯冲带（subduction zones）地球物理观测的时空密度不断增加，但预测未来地震的时间和规模仍然是一个挑战。科学家缺乏足够长的地震目录，这些目录对于分析统计数据 and 开发预测模型是十分必要的。在这里，研究者在实验室规模的俯冲带中模拟多个地震周期。该模型产生部分和全部边缘破裂，模拟矩震级为 6.2~8.3 级的地震，这些地震类似于真实的缓冲带，其复发间隔的变异系数为 0.5。研究表明，根据滑差（slip - deficit）估算下一次地震大小的常用程序是不可靠的。相反，机器学习（一组基于过去“经验”中获得的“信息”进行预测的算法）可通过重建和正确解释系统的时空复杂载荷历史来很好地预测实验室地震的时间和大小。该研究中的“信息”由地震之间的模拟构造板块中的缓慢变形提供。研究者认为地质调查员在俯冲带记录的复杂运动有可能用于地震紧急情况的分析，因此这些结果有望在实际地震预测中取得实质性进展。相关研究成果于 2019 年 2 月发表在 *Geophysical Research Letters* 上。

大型逆冲区（俯冲和仰冲构造板块之间的界面）承载着地球上最大的地震，例如 2011 年的矩震级 9.0 Tohoku-Oki 级地震（日本）。这些事件起源于沿着巨型逆冲区传播数百公里的突然滑动事件，它们使地壳移动了数十米，并释放了由于构造板块会聚和沿着巨型地震的摩擦而累积的弹性应力。在理想情况下，即①完全弹性板块；②上冲和俯冲板块之间恒定耦合；③板块收敛速率恒定；④沿大型逆冲区的摩擦性质及预应力均匀，地震应该以规律的时间间隔发生，震级只有很小的变化（即特征地震模型）。其他地震复发模型，包括时间和滑动可预测模型和非周期非特征模型，考虑到断层强度、应力下降和加载速率的时间变化。这些变化使系统朝着更复杂的复发模式发展。大型逆冲区遵循不规则的破裂模式，在该模式中，大

地震的复发时间从几个小时到几个世纪或更长。这种可变性可以通过板间耦合的时空变化间的相互作用、摩擦特性的空间变化、板间粗糙度的差别、以及板块运动的不稳定性来解释。

尽管国际上采用了前所未有的分辨率来观察俯冲带，但仍然不知道如何精确地预测地震的时间和大小。越来越多的地震学证据表明，与巨型逆冲区高度锁定区域（也称为凹凸体）的失稳相关的现象，如前震的增加和围绕凹凸体在交界面的缓慢滑移的重复事件，会使逆冲区失稳。大地测量学也为理解大型逆冲区的动力学提供了有用的信息，通过测量上冲板块和下冲板块速度之间的比率，大地测量师可以识别大型逆冲区的耦合（锁定）部分，其中应力在相交性地建立，并且这种应力可能通过未来的地震释放。最近在地震和大地测量地震前兆现象识别方面取得了进展，与之伴随的是机器学习（machine learning）在相关问题上研究的增加。但由于种种原因，在确定用数据的哪些特征来表示后期地震的相位是一个挑战。

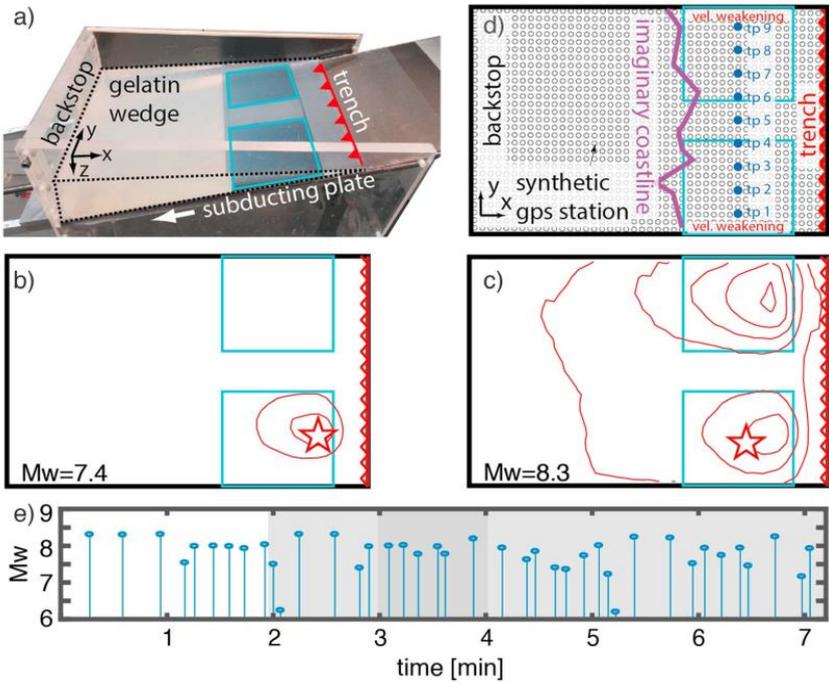


图 1 大型逆冲区地震模型

研究者从模拟地震构造模型的最新发展中获益，该模型允许在方便的实验时间和规模下模拟多个地震周期，从而克服真实俯冲带中长时间序列的缺失。研究人员用震间耦合来推断未来地震的类型，分析其优缺点后引出可以弥补其不足的办法：模拟地震构造的建模（**analog seismotectonic modeling**）。建立了该模型的具体尺寸和模拟方式后，将向海面的运动称为滑动（**slip**），将陆地表面运动称为滑差（**slip - deficit**），评估滑移和滑差之间的空间相关性并得出结论，然后从实验数据中获取连续的“合成”大地信号并构建一个机器学习问题，采用梯度增强回归树（**GBRT**）算法确定这些数据的哪些特征（如果有的话）可以预测到失稳之前的时间，找出哪些特征对成功预测最为重要，并解释相关现象的原因。

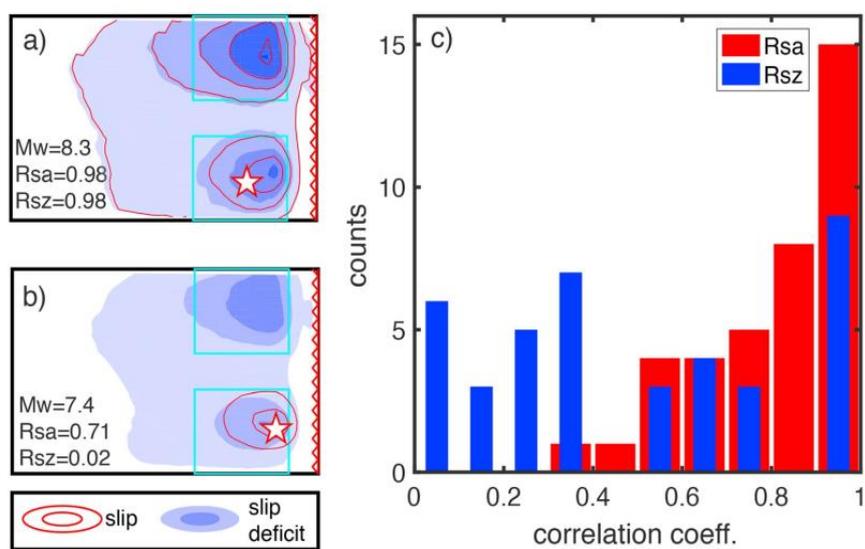


图2 表面滑移和滑差的空间相关性

研究者使用了一个模拟模型来再现多个俯冲巨型地震周期，用来克服由以下三点造成的限制①相对于自然地震周期的持续时间，大地测量数据的短时间跨度；②大地控制网的覆盖不足；③内陆数据向海上发震带反演的不确定性。研究者观察到，最后一个震间相位累积的滑差是对最高滑动

位置的指示，但是在用于限制未来破裂的横向程度时却是个较差的指标。延伸空间相关性的分析（超过最近的间震期）可以使这种相关性发生改善，尽管与最新的同震滑动相关的先前间震周期的最优值很可能与凹凸体的特定结构，如尺寸、凹凸体间距离和摩擦等相关联。从长远来看，如果满足相互作用的条件，凹凸体倾向于同步，导致系统产生大地震。不幸的是，对于给定的大型逆冲区的具体同步阶段是未知的，最重要的是，随后地震周期的凹凸体的演变类型仍存在争议，滑差分析的另一个限制因素是它没有关于未来地震时间的任何信息。

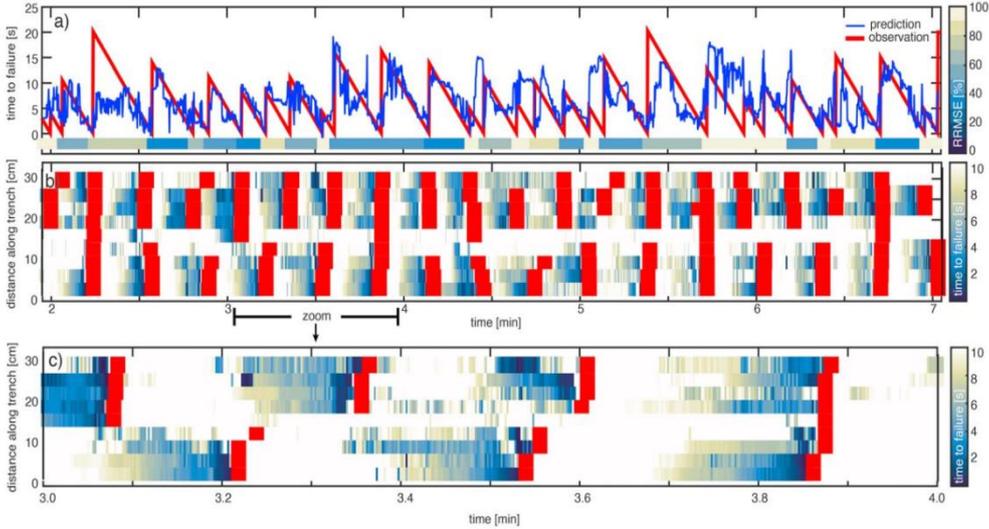


图3 机器学习结果

分析表明，模拟地震预测需要由机器学习使用训练数据隐含地完成在时空上复杂的加载历史的重建。因此研究者认为，需要 10 个密集网络观测的地震周期来训练算法以最大化其预测精度，并且在预测特定区域的 TTF (time to failure, 失稳时间) 时可以减少训练长度。这些结果可能依赖模拟模型，并且需要更多数据去模拟更复杂的情况。然而，即使像研究者这种低复杂度模型，也会在幅值和重现期上产生变化，使得结果“实际上不

可预测”。使用机器学习，研究者能够通过训练算法识别难以通过人工检测发现的类型来抵消这种不可预测性。

目前，由于可用的大地记录远比研究者在模拟模型上的方法所需的周期数短，这导致未来发展的两条直接途径：①开发模拟数据（模拟或数字）的机器学习方法，可以在各种模型上进行训练，以预测一系列时空尺度上的失稳时间；②在自然俯冲带台站定制机器学习方法，目的是预测小震级事件或整个俯冲地震活动谱，包括板间、板内和上覆板块地震。另外，还有相当大的空间来研究除了使用在这项研究中的地震的其他特征，因为单一特征或几个特征对自然情况下的地震来说可能不够完整。

来源：Corbi F, Sandri L, Bedford J, Funicello F, Brizzi S, Rosenau M, Lallemand S. Machine learning can predict the timing and size of analog earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46, 1303–1311.

## 用于固体地球科学中数据驱动发现的机器学习

通过固体地球科学的不同领域了解地球的行为是一项日益重要的任务。由于了解地球行为需要复杂的、相互作用的和多尺度的过程，而且几乎地球所有的地下部分都无法直接观测到，这就使得这项任务具有很大挑战性。数据可用性的大幅提高和计算机模拟越来越逼真的特性为加速研究进展带来了希望，但基于这些能力获得更深入的理解本身就是一个挑战。机器学习将在这方面发挥关键作用。研究者回顾了该领域的状况，并就如何扩大和加快研究进展提出了建议。相关研究成果于 2019 年 3 月发表于 *Science*。

固体地球科学（sEg）既是数据驱动的又是模型驱动领域。地球科学家面临的巨大挑战之一是如何尽可能多地提取有用的信息，以及如何从数据和模拟以及两者之间的相互作用中获得新的见解。机器学习（ML）将在这项工作中发挥关键作用。ML 提供了一套工具来提取知识并从数据中得出推论，ML 算法旨在从经验中学习并识别数据中的复杂模式和关系。

ML 算法的两个主要类别是有监督学习和无监督学习。在有监督学习中，ML 算法“学习”识别模式使用已知示例进行一般预测，无监督学习方法学习数据集中的模式或结构，而不依赖于标签特征。无监督学习通常用于数据集中的探索性数据分析或可视化，其中没有或很少有标签可用，涉及降维和聚类两种途径。用于监督和无监督学习的许多不同算法各自具有相对的优缺点。算法选择取决于许多因素。虽然在高度精确的图像识别系统中可能不需要可解释性，但是当目标是获得对系统的物理洞察时，这是至关重要的。

### 1、固体地球科学中的机器学习

几十年来，科学家们一直在将技术应用于固体地球科学中的问题。在

研究中,研究人员已经利用了 ML 处理各种各样的任务,数据驱动的发现,即从数据中提取新信息的能力,是 ML 用于科学应用的最令人兴奋的能力之一。ML 为科学家们提供了一套工具,用于发现科学数据集中不易发现的新模式、结构和关系。建模和反演也可以提供自动预测的能力,而 ML 用于自动化,建模或反演可能会产生新的见解和基本发现。

## 2、监督学习的方法和趋势

监督学习是一组功能强大的工具,已经成功地应用于自动化、建模、反演和发现等主题的应用中。研究者用 ML 算法组织了最近在固体地球科学中的监督学习应用,大致按照模型复杂度排序。

### 2.1 逻辑回归

目前固体地球科学在逻辑回归的相关研究有:

- (1) 区分地震信号和爆炸信号。
- (2) 地震注入井和抗震井区分。
- (3) 诱发地震风险较高的相关地质因素识别。

### 2.2 图形模型

地球科学中的许多数据集具有时间分量,例如地震仪记录的地面运动时间序列数据。尽管大多数 ML 算法可以适用于时态数据,但某些方法(如图形模型)可以直接模拟时间依赖性,例如隐马尔可夫模型(HMM)和动态贝叶斯网络(DBN)。隐马尔可夫模型(HMM)已应用于高山滑坡、火山信号、区域地震和诱发地震的探测和分类。动态贝叶斯网络(DBN)是另一种推广 HMM 的图形模型,也被用于地震检测。

### 2.3 支持向量机

支持向量机(SVM)是一种二元分类算法,用于识别来自两个类的训练数据之间的最佳边界。运用支持向量机的案例有:

- (1) 求解温度场，研究地幔对流过程。
- (2) 预测地幔流动停滞的程度。
- (3) 地震事件中地震强度的快速估计。
- (4) 区分地震和爆炸以及连续地震数据中的地震检测。

## 2.4 集成学习

决策树是一种学习分段常量函数的分类和回归的监督方法，相当于一系列可以由二叉树结构可视化的 **if-then** 规则。随机森林 (RF) 是一种集成学习算法，可以通过在随机决策树的集合 (“森林”) 中以投票来学习复杂的关系。在这方面的案例有：

- (1) 地质测绘。
- (2) 改进使用遥感地球物理数据反演的三维地质模型。
- (3) 识别应力降和峰值地面加速度之间的预测关系。
- (4) 学习非线性、非参数地面运动预测方程 (GMPES)。
- (5) 描述地下裂缝模式的拓扑结构。

## 2.5 神经网络

人工神经网络 (ANNS) 是一种松散地模拟大脑中生物神经元相互连接网络的算法。人工神经网络模型表示为一组由权重连接的节点 (神经元)。每个节点从上一层获取加权线性组合的值，并应用非线性函数生成传递到下一层的单个值。“浅”网络包含一个输入层 (数据)、一个隐藏层和一个输出层 (预测响应)。ANNS 可以用于回归和分类。相关案例包括：

- (1) 纵波传播时间数据中估计一维纵波速度结构和模型不确定性
- (2) 根据强运动数据估计震源参数
- (3) 用来估计短周期反应谱
- (4) 模拟地面运动预测方程
- (5) 评估震源机制和震源位置的数据质量

(6) 执行噪声层析成像

(7) 区分地震运动和用户活动引起的运动。

## 2.6 深度学习网络

深度神经网络（DNN）或深度学习是经典人工神经网络的扩展，它包含多个隐藏层。深度学习并不代表单一算法，而是具有多种网络架构的广泛方法，包括有监督和无监督方法。深层架构包括多个处理层和非线性转换，每层的输出作为输入传递给下一层。受监督的 DNN 同时学习特征表示和从特征到目标的映射，从而实现良好的模型性能，而无需精心选择的特征作为输入。然而，训练深度网络还需要拟合大量参数，这需要大的训练数据集和技术来防止过度拟合模型。除了 DNN，常用的还有卷积神经网络（CNN），递归神经网络（RNN）。

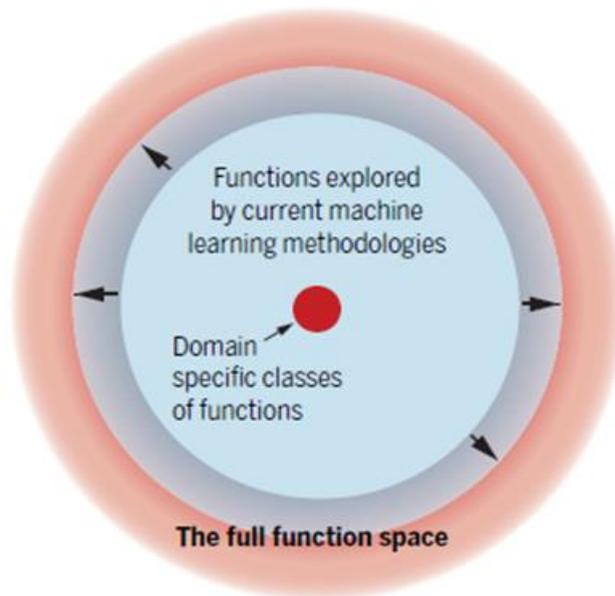


图 1 领域专家和机器学习使用的函数空间

## 3、无监督学习的方法和趋势

### 3.1 聚类 and 自组织映射

目前有许多不同的聚类算法，包括 **k**-均值、层次聚类和自组织映射 (SOMs)。SOM 是一种无监督神经网络，可用于降维或聚类。相关案例有：

(1) 运用 SOM 识别关键的地球物理特征。

(2) 对地震属性进行降维后采用 SOM 进行聚类，从地震属性中识别地质特征。

(3) 地震波形数据的特征选择。

(4) 识别岩性。

(5) 在半监督方法中，运用 SOM 检测岩崩和火山构造事件。

(6) 地震事件分类。

### 3.2 特征学习

无监督特征学习可用于学习数据集的低维或稀疏特征。相关研究案例有：

(1) 用自动编码网络学习地震波形的紧凑特征。

(2) 学习可用于相填图的聚类算法的特征。

(3) 将非负矩阵分解和 HMMS 结合起来学习地震波形的特征。

### 3.3 字典学习

稀疏字典学习是一种表示学习方法，它以基本元素或原子以及这些基本元素本身的线性组合的形式构造一个稀疏表示。

### 3.4 深度生成模型

生成模型是一类 ML 方法，用于学习数据集上的联合概率分布。生成模型可以应用于无监督和监督学习任务。最近的工作探索了深层生成模型的应用，特别是生成性对抗网络 (GAN)。深度生成模型，如深度渲染模型、变分自动编码器 (VAE) 和 GAN 是分层概率模型，具有抽象能力，能加快学习进度。深度生成模型的无监督学习能力对地球物理学中的许多反演问题特别有吸引力。

## 4、其他技术

其他常见的还有强化学习、快速近邻搜索技术、网络分析技术、图形聚类技术、PageRank（一种流行的链路分析算法）等。

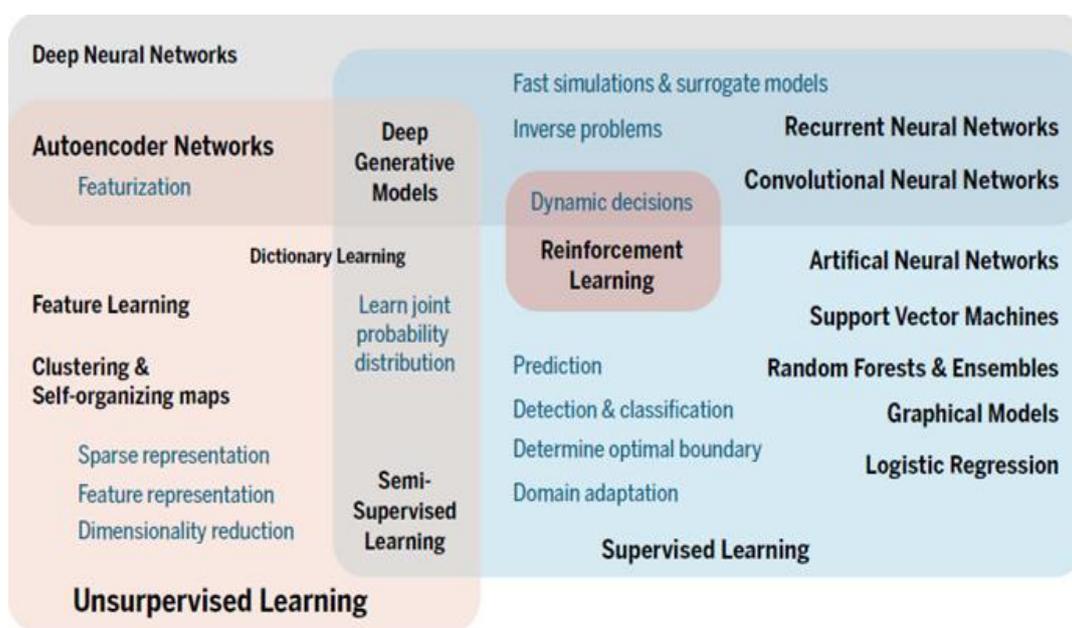


图2 机器学习方法及其应用

## 5、建议和机会

(1) 创建基准数据集。理想情况下，在给定的问题域内，研究团体可以使用几种不同的基准数据集，以避免过于狭隘地关注算法开发。

(2) 开放科学。采用开放科学原则将更好地定位固体地球科学社区，以利用人工智能的快速发展。

(3) 机器学习解决方案，新模型和架构。最近，可解释的 DNN 架构基于对地球科学中反问题的分析构建，有可能减轻不适定性，加速重建（训练后），并适应稀疏（约束）数据采集。

(4) 地球科学课程设置。可以招聘受过数据科学培训的学生从事地球科学研究，通过确定共同利益和互补能力，可以利用跨学科研究会议来促

进合作。

来源: Bergen K J, Johnson P A, Maarten V, et al. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. Science, 2019, 363(6433): eaau0323.

---

主 送: 中国地震局领导

联 系: 中国地震科学实验场管理部 Email:sycglb@ief.ac.cn