

地震科技前沿快报

2022年第4期（月刊总第51期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震局科技与国际合作司

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、用于实验室地震预测和断层带应力自回归预测的深度学习

近年来，由于在实验室地震的成功预测、地震预警、诱发地震活动的危险评估等方面的进展，人们对地震预测的信心极大增强。实验室地震也是人工智能-机器学习的理想目标，因为实验室地震可以在受控条件下产生长序列的地震。本研究中的机器学习/深度学习模型优于现有最先进的技术，自回归模型代表了一个可以增强当前地震预报方法的新框架。

研究证明基于长短期记忆网络和卷积神经网络的深度学习模型可以预测震前蠕变、非周期性事件和慢/快交替事件等条件下的实验室地震，并可准确预测断层带应力，确认声能是断层带应力的一个特征。研究人员以深度学习方法预测实验室地震的破裂开始时间和破裂结束时间时发现，破裂结束时间在所有地震周期中都被成功预测，而破裂开始时间的预测随震前断层蠕变量而变化。

2、埋地管道在地震斜逆断层位移下的局部弯曲行为

地震断层位错是导致埋地管道（石油管道等）局部弯曲断裂的主要因素，特别是穿越斜逆断层的管道。在斜逆断层的三维位移作用下，埋地管道的局部弯曲行为较为复杂。该研究讨论了管道局部弯曲的机理，数值分

析结果表明，局部弯曲有两个潜在破坏位置和三个破坏阶段，在此基础上分析了不同内压、直径厚度比和埋深条件下的潜在局部弯曲位置和三个阶段的局部弯曲。研究证明，与单个断层位移相比，管道局部弯曲对斜逆断层位移更为敏感，这为穿越斜逆断层的管道的抗震设计和加固提供了参考。

3、利用基于数据驱动的降阶模型进行压缩感知重建地震波场

重建地震所引发地面运动是基础设施震害预测的关键之一，特别是空间连续波场的即时重建，其对于最初阶段的防灾决策具有重要价值。本文将流体力学领域发展的框架应用于地震波场重建，提出了一种基于数据驱动降阶模型（ROM）进行压缩感知，进而重建地震波场的框架，并通过数值实验对其特性进行了研究。研究人员利用稀疏、离散观测数据和数据驱动的 ROM 重建了空间连续地震波场。采用基于贪婪算法的线性逆问题的传感器优化方法，研究人员有效地选择了用于重建的观测点。将该框架应用于具有三层水平分层地下结构的、理论波形的模拟数据，通过基于无噪声观测的重建，验证了所建议方法的有效性。因此，即使观测点数量少，且观测具有噪声，但与传感器优化方法相结合，也可以实现比随机选择的观测点更好、更稳定的波场重建。

用于实验室地震预测和断层带应力自回归预报的深度学习

地震预报和地震预测有着悠久的历史，由于在地震早期预警、诱发地震活动的危险评估和实验室地震的成功预测方面的进展，最近人们重燃了地震预报和地震预测的兴趣。在实验室中，可通过摩擦粘滑事件来模拟地震和地震周期。同时，实验室地震也是机器学习的理想目标，因为实验室地震可以在受控条件下以长序列产生。研究人员通过以下方式扩展了相关工作：用于实验室地震预测的深度学习方法；引入自回归预测深度学习方法来预测断层带剪切应力；以及扩大实验室断层带研究的范围。其中，自回归方法允许通过先前测量的迭代预测来预报未来的应力。本研究中的深度学习方法优于现有的机器学习模型，并且可以根据有限的训练进行预测。同时，本研究还探索了非周期性破裂的单个地震周期之外的预报。研究者提出了对现有实验室地震预测方法的重大改进，并证明基于长短期记忆网络和卷积神经网络的深度学习模型可以预测震前蠕变、非周期性事件和慢/快交替事件等条件下的实验室地震，并可准确预测断层带应力，确认声能（**acoustic energy**）是断层带应力的一个特征。研究人员以深度学习方法预测实验室地震的破裂开始时间（**TTsF**）和破裂结束时间（**TTeF**）时发现，**TTeF** 在所有地震周期中都被成功预测，而 **TTsF** 的预测随震前断层蠕变量而变化。研究人员报告了使用三种序列建模框架预报断层应力演变的自回归方法：长短期记忆网络、时间卷积网络和变换网络。自回归预测不同于现有的预测模型，后者仅在特定时间预测目标变量。本研究中的机器学习/深度学习模型优于最先进的技术，而自回归模型代表了一个可以增强当前地震预报方法的新框架。相关成果发表在 2022 年 11 月的 *Earth and Planetary Science Letters*。

声发射可用于预测实验室地震破裂时间、断层带剪切应力和实验室地震应力降。现有工作表明，来自实验室断层的地震辐射与发生破裂的时间成比例，并且通过断层带的主动和被动地震方法对其历史进行监测，可预测当前断层带的应力状态。主动源信号记录破裂前的断层属性变化，因此提供了将基于物理的模型（即粗糙接触力学）纳入机器学习/深度学习算法的可能性。其他研究表明，机器学习可将实验室声发射事件与断层带微观结构联系起来，并且可以通过将物理学直接纳入预测模型来增强机器学习方法。此外，最近的研究还确定了与实验室地震预测有关的可靠破裂先兆，这些研究提供了一个框架来理解破裂成核，以及机器学习如何使用来自实验室断层的连续声发射信号的数据来预测实验室地震。

目前，大多数实验室地震的机器学习研究都使用基于决策树的算法和梯度提升框架。这些研究表明，可以合理准确地成功预测实验室地震。原始方法的成功基于实验室断层声发射事件的连续记录，这些声发射事件则代表了一种形式的实验室微地震。

尽管最近在实验室地震预测方面取得了显著进展，但这些方法如何以及为何起作用仍未充分理解。例如，声发射信号随实验室地震的时间和震级如何变化，以及声发射信号特征与断层带剪切应力之间存在什么样的关系。深度学习模型很难确定剪切应力降的确切时间，这似乎是破裂开始时间（TTsF）总比破裂结束时间（TTeF）更具挑战性的部分原因。

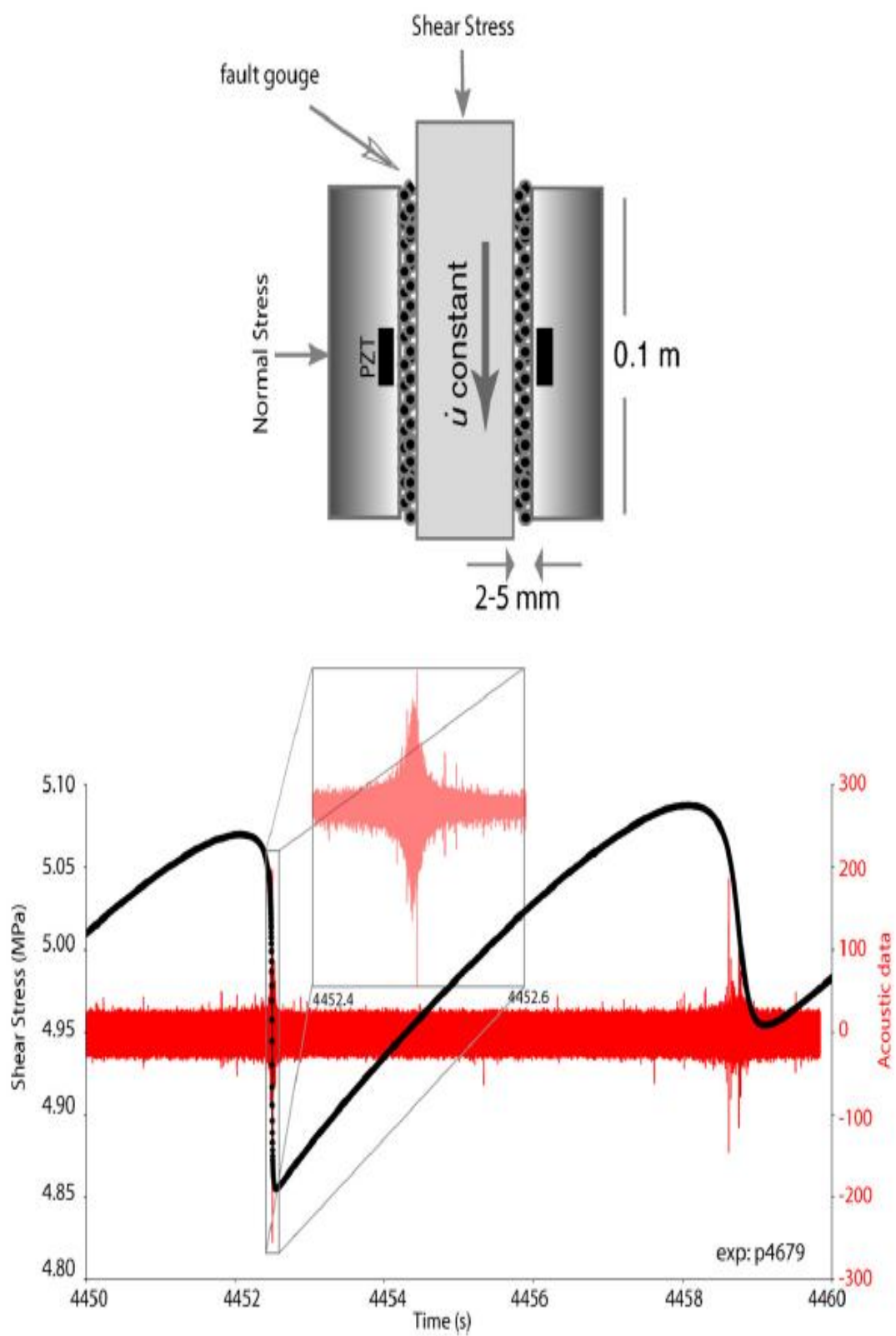


图 1 双直剪配置示意（左），来自断层带的典型剪切应力和声发射数据（右）

研究人员使用深度神经网络来预测和预报实验室地震，并根据一系列实验室断层发出的地震信号对断层带剪应力进行测量。实验室地震的数据来自双轴变形机在双直剪（DDS）配置下的试验，颗粒层模拟地震断层并在粗糙表面之间被剪切，声学信号由嵌入加载块中的压电换能器（PZT）记录。断层加载通过伺服控制保持恒定的法向应力，中心块以恒定的位移速率向下驱动以产生摩擦剪切，声发射数据被以 4 MHz 的采样频率连续记录。分析时采用了三个最著名的深度神经网络，分别是长短期记忆网络（LSTM）、时间卷积网络（TCN）和变换网络（TF）。

研究人员系统地测试了一系列包含各种实验室断层的深度学习模型。研究证明，可以根据以前的应力值记录来预测断层带未来的剪切应力。这一结果具有巨大价值，因为剪切应力代表了断层的状态，及时预测它意味着将能够预测未来破裂状态的发生时间。

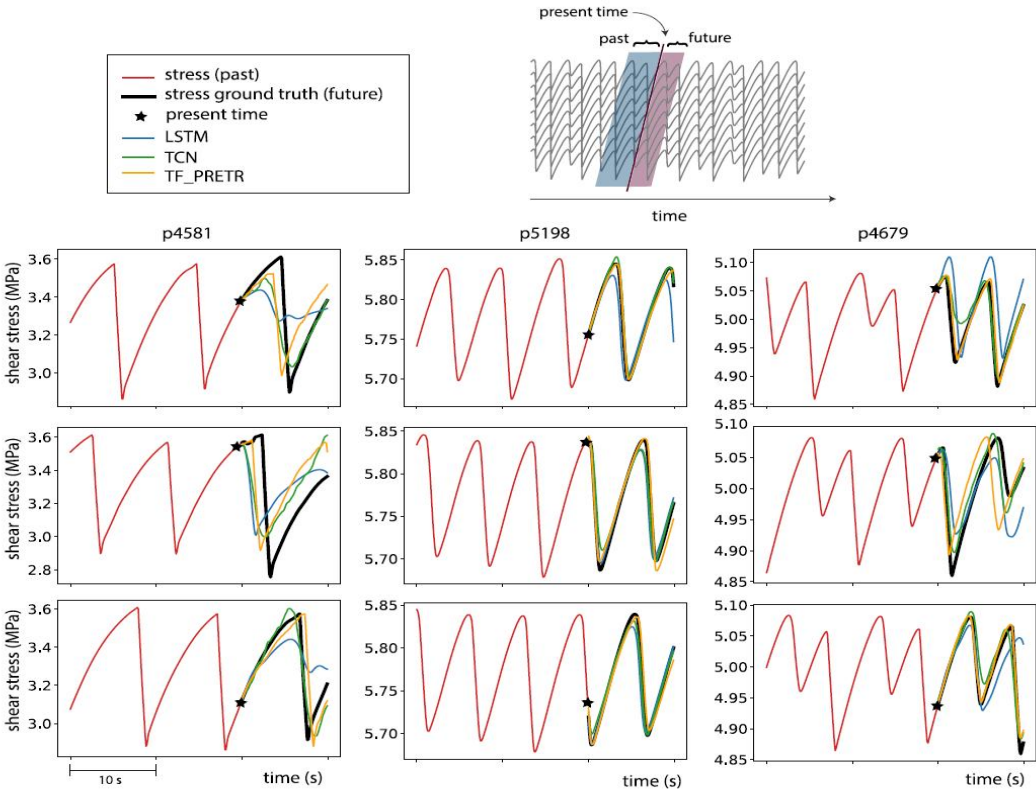


图 2 三个实验的自回归预测结果

研究人员首先认真评估了基于 LSTM 和卷积神经网络 (CNN) 组合的深度学习模型。与现有工作中使用的方法相比，深度学习模型表现良好。在先前工作的启示下，研究人员使用了源自实验室断层的连续声发射的方差。研究发现，对于所有实验，深度学习模型都表现得相当好，当蠕变发生在主震之前时，结果更好。

自回归预测程序允许人们预测实验室地震周期中剪切应力的未来值，这是第一次将这种自回归方法用于实验室地震数据。在该研究中，其创新在于人们可以无限期地预测未来，而不需要标记。研究人员在实验中测试了几个用于自回归预报的深度学习网络，发现所有模型都在某种程度上起作用。其中，LSTM 产生的结果最差，并且由于序列的长度相当长，存在记忆问题 (memory problem)。TCN 在参数数量和结构方面是最简单的模型，并且表现更好，这可能是因为实验室地震周期中的目标 (剪应力) 具有一定的周期性。TF 也很灵活，但它最复杂，需要大量的数据来启动一个合理的模型，该问题可通过使用正弦波对 TF 模型进行预训练来解决。

在本次评估中，不同的模型适合不同的测试，但总体上 TCN 和 TF 模型能进行很好的预报。但是，也存在预测具有挑战性的测试，这可能是由于缺乏明显的断层蠕变和/或因为数据中存在噪声，需要进一步的工作来解决这些问题。

总的来说，深度学习能够理解信号的行为，这为使用自回归方法进行地震学研究开辟了新的视角。首先，这证实了在大多数情况下，模型能够识别的信号中存在一些模式。而且，经过训练的模型，只需要对特定窗口的历史具备有限的了解，就可以合理地预测未来，这提供了对物理过程及其确定性的洞察力。

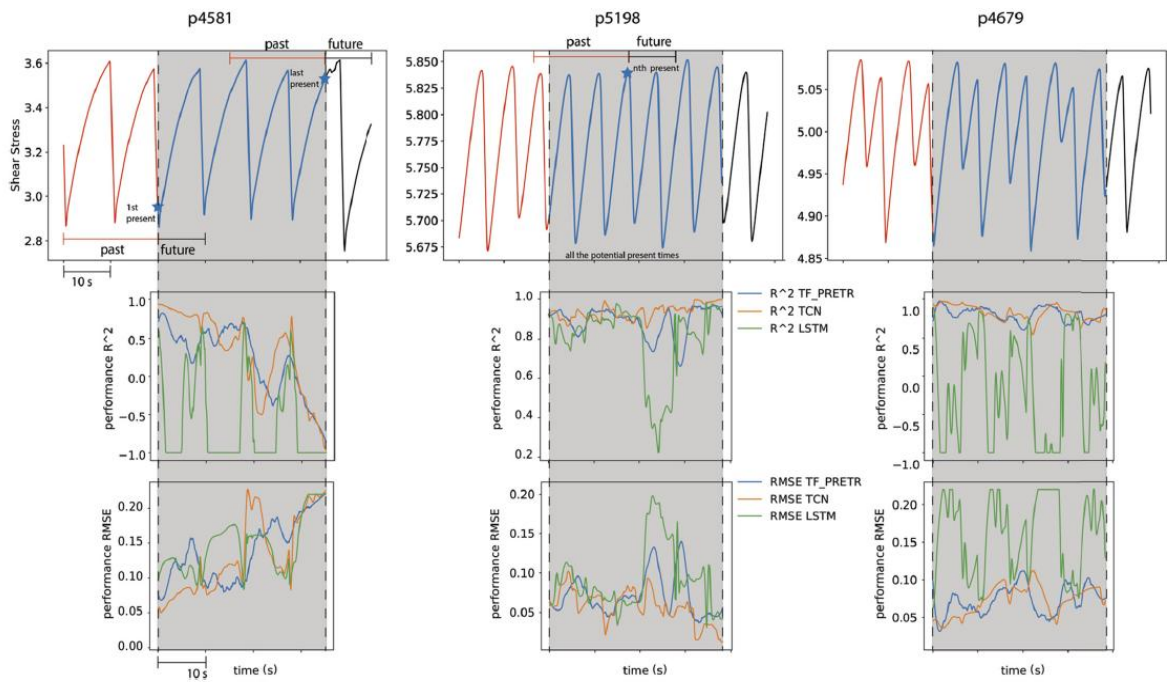


图3 相对于当前时间的自回归预测结果

未来，推进该工作的一种方法是将其应用于实际断层数据。这需要测量剪切应力，但目前还不可行。尝试该想法可能需要在地震之前或期间直接使用震动图，并使用预测方法推断剪切应力，整体类似于在实验室中使用声发射所做的工作。这将允许使用预测方法来预测未来时间步长的剪切应力，其局限性在于，与地震相比，实验室地震过于简单。另一种方法是，根据信号的初始部分简单地预测震动图的时间演变。这里的一个关键问题是，实验室的声发射信号是否与断层剪切带应力唯一相关，如果是，是否会转移到构造断层？此外，还有一种方法，即将实验室地震的学习迁移到真实的断层数据。

来源： Laurenti L, Tinti E, Galasso F, *et al.* Deep learning for laboratory earthquake prediction and autoregressive forecasting of fault zone stress. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 598, 117825.

埋地管道在地震斜逆断层位移下的局部弯曲行为

地震断层位移是导致埋地管道局部弯曲断裂的主要因素，特别是穿越斜逆断层的管道。在斜逆断层的三维位移作用下，埋地管道的局部弯曲行为较为复杂。来自中国石油大学的几位学者讨论了管道局部弯曲的机理，并基于 ABAQUS 程序建立了管道穿越斜逆断层时壳体和固体元素非线性接触的耦合模型。之后，系统分析了斜逆断层位移条件下管道的局部弯曲行为（潜在的局部弯曲位置、发展过程），并与单断层位移条件下管道的局部弯曲行为进行了比较。此后，讨论了内压、直径厚度比和埋深对管道局部弯曲行为的影响。数值分析结果表明，局部弯曲有两个潜在位置和三个阶段，在此基础上分析了不同内压、直径厚度比和埋深条件下的潜在局部弯曲位置和三个阶段的局部弯曲。研究证明，与单个断层位移相比，管道局部弯曲对斜逆断层位移更为敏感，为穿越斜逆断层的管道的抗震设计和加固提供了参考。相关研究成果发表在 2022 年 11 月的 *Scientific Reports*。

随着全球经济的发展，埋地管道被广泛用来长距离输送油气资源。这些埋地管道的安全性遭受到各种地质灾害的威胁，包括由于地震导致的断层位移。例如，中亚天然气管道线路（D 线）就穿越了斜逆断层。尽管前人已经对单一断层位移下的管道局部弯曲行为开展了一些研究，但对于复合断层（本文中的斜逆断层）位移导致的管道弯曲行为了解较少。相比于单一断层位移，管道在复合断层位移的作用下，局部弯曲的位置更加不确定。因此，研究埋地管道在复合断层位移下的弯曲行为（主要是弯曲位置和演化过程）对于管道的抗震设计，以及管道弯曲预测等方面具有重要的意义。

为了探究埋地管道在斜逆断层位移作用下的局部弯曲行为，研究者首先利用中亚天然气管道线路（D 线）的参数建立了穿越斜逆断层管道的非

线性数值模型。然后，对比了管道在斜逆断层和单一断层作用下局部弯曲行为的不同。在此基础上，给出潜在局部弯曲位置，并根据局部弯曲机制和数值模拟结果定义了局部弯曲的三阶段模式。最后，研究者定量分析了内压（P），直径厚度比（D/t）以及埋地深度（h）对局部弯曲行为的影响。

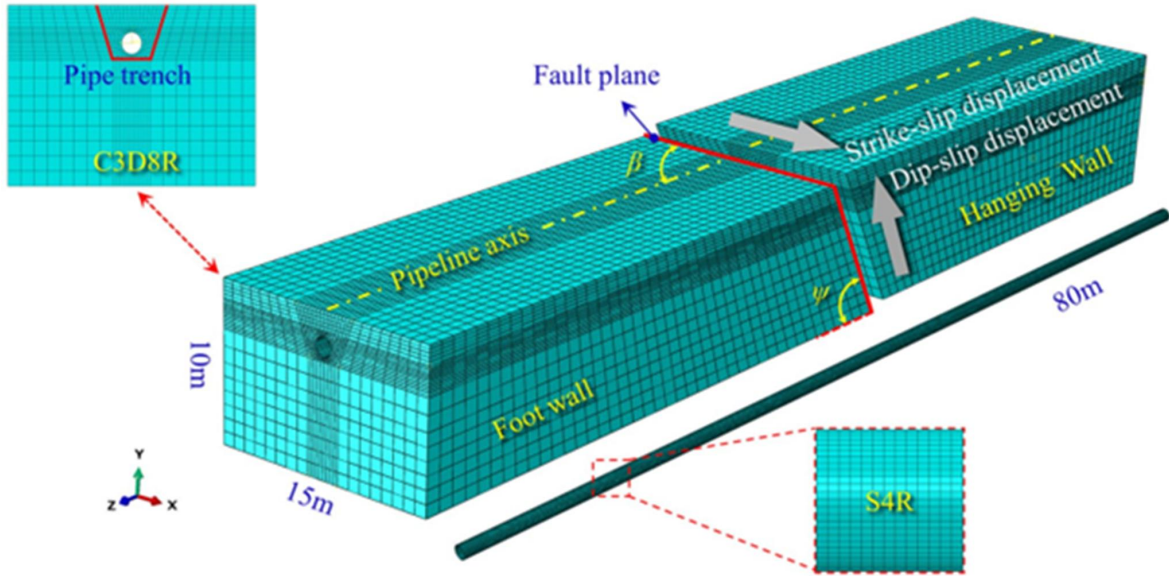


图 1 有限元模型和网格细节

(1) 局部弯曲的潜在位置。根据模型结果，管道和断层交叉时的几何形态，包括管道-断层的交叉角度 β 和断层的倾角 ψ ，是控制管道力学行为的主要参数。当 $\beta=90^\circ$ ，管道在断层位移作用下的轴应变最大。因此，模型采用 $\beta=90^\circ$ ，另一个参数 ψ 被设置为 60° 。分析管道的潜在弯曲位置需要确定其在长度和圆周（circumferential）上的局部弯曲位置。长度上，管道中出现两个应变集中的位置，分别在上盘（A-B 剖面）和下盘（C-D 剖面）。A-B 剖面距离断层面的距离 L_2 为 10.6 m，而 C-D 剖面距离断层的距离 L_1 为 2.79 m。此外，C-D 剖面更先达到临界应变 ϵ_c^{crit} 。在圆周上，随着斜逆断层位移 δ 的增加，管道 A-B 和 C-D 剖面上的压缩应变和拉伸应变逐渐增加。在 A-B 剖面，最大压缩和拉伸位置分别在 30° 和 210° 。在 C-D 剖面，

最大压缩和拉伸位置稳定在 210° 和 30° 。因此， 30° — 210° 的迹线是在三维斜逆断层位移作用下，圆周上发生局部弯曲的潜在位置。

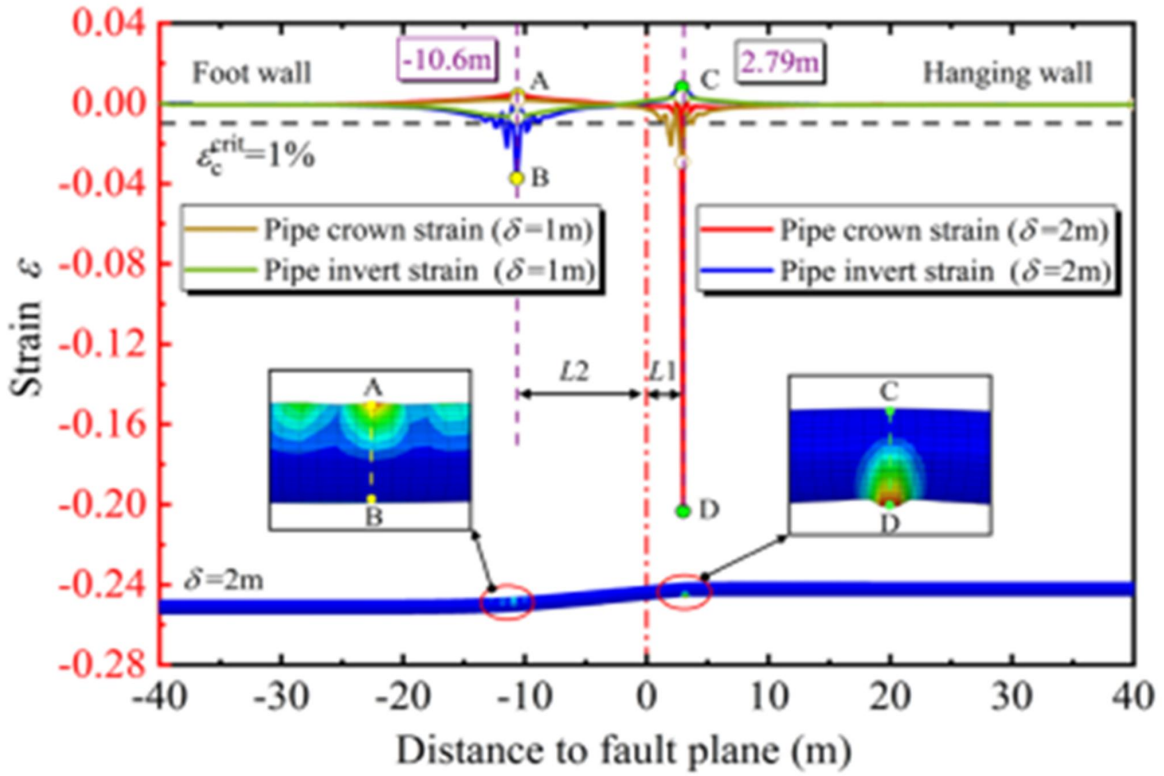


图2 管道在斜逆断层位移作用下的应变分布

(2) 局部弯曲演化。为了探究管道局部弯曲演化过程，研究者分析了管道上最大应变位置处的压缩应变与断层位移之间的关系。结果显示，相比于单一断层，管道压缩应变对斜逆断层位移更加敏感。此外，在相同位移下，斜逆断层位移产生的管道应变更大，并且管道局部弯曲更严重。由于 C-D 剖面 210° 方向的应变对断层位移最敏感且最先达到临界应变，因此研究者对该处开展分析。

根据压缩应变的变化速率，管道局部弯曲过程可以划分为三个阶段：①弯曲前——初始阶段；②弯曲中——褶皱发展阶段；③弯曲后——失稳阶段。在斜逆断层条件下，使管道弯曲从阶段 1 发展到阶段 2 的临界断层

位移 δ_1^{crit} 为 0.83 m，从阶段 2 发展到阶段 3 的临界断层位移 δ_2^{crit} 为 1.10 m。相比于单一断层条件，斜逆断层的临界断层位移更小。

当 $\delta < \delta_1^{\text{crit}} = 0.83 \text{ m}$ ，管道局部弯曲处于初始阶段，发生线性弹性变形。这时候管道可以正常工作，而无需人为干预。当 $0.83 \text{ m} = \delta_1^{\text{crit}} < \delta < \delta_2^{\text{crit}} = 1.10 \text{ m}$ ，局部弯曲进入褶皱变形阶段，褶皱通常形成在潜在局部变形的位位置。这时候有必要对局部弯曲位置开展实时监控，并采取保护措施防止局部弯曲进入非稳定阶段。当 $\delta > \delta_2^{\text{crit}} = 1.10 \text{ m}$ ，随着 δ 的增加，管道局部弯曲位置发生失稳。即使增加很小的断层位移，管道也会发生很大压缩应变。这时候应该更换管道，或者采取必要措施防止管道泄漏。

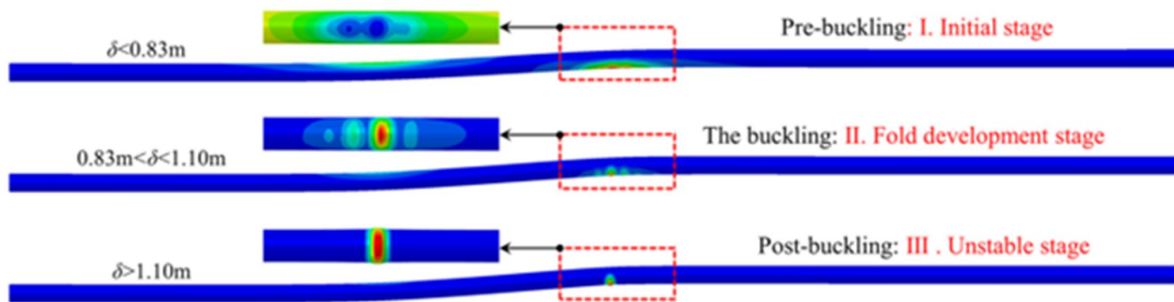


图 3 不同弯曲阶段的管道形态

(3) 管道局部弯曲的参数分析。内压 P 、管道直径厚度比 D/t 以及管道埋地深度 h 对局部弯曲的潜在长度位置和发育过程具有一定影响。同时，局部弯曲的潜在圆周位置主要取决于土壤阻力（soil resistance）和断层位移。

内压 P 的影响：研究者将 P 分别设置为 0、3、6、9 和 12 MPa。结果显示，随着 P 的增大，管道变形刚度（deformation stiffness）增加。下盘的潜在弯曲位置向断层面移动，但是上盘的潜在弯曲位置几乎不变。这是因为上盘承受的土壤阻力在侧方和下方，主导管道变形的是土壤阻力，管道刚度对变形影响很小，而下盘承受的土壤阻力在侧方和上方，管道刚

度主导变形。因此，潜在局部弯曲位置会随着刚度的变化而变化。当 $P > 6$ MPa 时，管道压缩应变 ϵ_c 随着断层位移 δ 的增大而增大。当 $P < 6$ MPa 时， ϵ_c 先随着 δ 的增大而增大，而当 δ 达到 1.5 m， ϵ_c 发生快速的降低。 ϵ_c 的快速降低说明了局部弯曲向管道内部塌陷的现象。此外，随着 P 从 0 MPa 增大到 12 MPa，使管道发生弯曲的 δ_1^{crit} 和 δ_2^{crit} 分别降低 25% 和 28%。

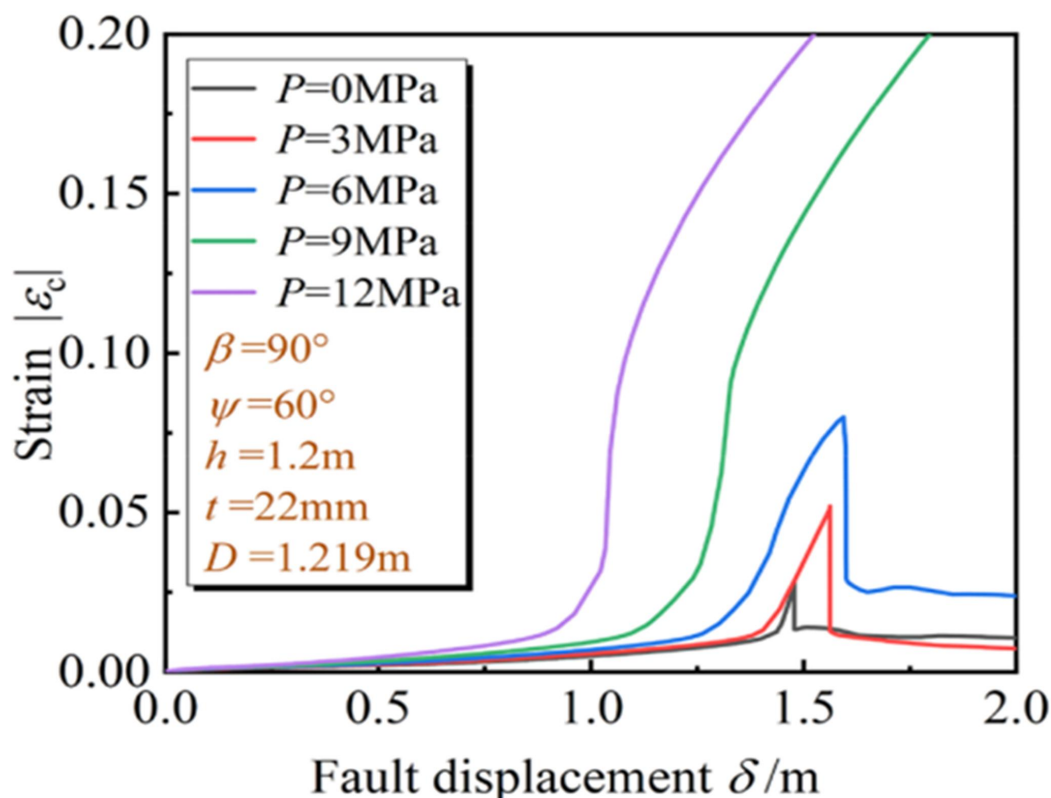


图 4 不同内压下管道压缩应变随断层位移的变化

直径厚度比 D/t 的影响： D/t 对局部弯曲潜在长度位置的影响表现为：随着 D/t 的增加，变形刚度会逐渐降低。这会导致上盘和下盘的潜在弯曲位置向着断层面的位置移动，这是因为相比于土壤阻力， D/t 主导了管道变形。对于局部弯曲的演化过程，随着 D/t 的增加， ϵ_c 对 δ 更加敏感。因此，具有更小 D/t 的管道可以承受更大的斜逆断层位移，而不发生局部弯曲失

稳。此外，随着 D/t 从 28 增大到 68，管道发生局部弯曲的 δ_1^{crit} 和 δ_2^{crit} 分别减小 75% 和 71%。

埋地深度 h 的影响： h 对管道局部弯曲的潜在长度位置影响表现为：随着 h 的增加，下盘的潜在弯曲位置向断层面移动，但是上盘的潜在弯曲位置几乎不变。这是因为随着 h 的增加，管道上方的土壤阻力增加，下盘潜在弯曲位置也随之改变。管道下方的土壤阻力很难发生变化，因此上盘潜在弯曲位置几乎不发生变化。 h 对于局部弯曲演化过程的影响在于随着 h 的增大， ϵ_c 对 δ 更加敏感。此外，随着 h 从 0.9 m 增大到 2.1 m， δ_1^{crit} 和 δ_2^{crit} 分别降低 50% 和 46%。因此，将管道埋到更浅的位置可以降低由于断层位移导致管道发生局部弯曲的风险。

来源：Xu L, Cheng X, Huang R, *et al.* Local buckling behavior of buried pipeline under seismic oblique-reverse fault displacement. *Scientific Reports*, 2022, 12, 20128.

利用基于数据驱动的降阶模型进行压缩感知重建地震波场

重建地震所引发地面运动分布的技术是基础设施震害预测的关键技术之一。特别是空间连续波场的即时重建，其对于初始阶段的防灾决策具有重要价值。为了进行快速和准确的重建，利用先验信息是必不可少的。在流体力学中，常使用全状态恢复（**full-state recovery**），即利用数据驱动降阶后的模型从稀疏观测中恢复全部状态。本文将流体力学领域发展的框架应用于地震波场重建，提出了一种基于数据驱动降阶模型（**ROM**）进行压缩感知，进而重建地震波场的框架，并通过数值实验对其特性进行了研究。数据驱动的 **ROM** 产生于利用奇异值分解的波场数据集，研究人员利用稀疏、离散观测数据和数据驱动的 **ROM** 重建了空间连续地震波场。采用基于贪婪算法的线性逆问题的传感器优化方法，研究人员有效地选择了用于重建的观测点。将该框架应用于具有三层水平分层地下结构的、理论波形的模拟数据，通过基于无噪声观测的重建，验证了所建议方法的有效性。由于使用波场的 **ROM** 作为先验信息，即使用于重建的传感器的数量是有限的和随机选择的，重建误差也被降低到本框架的一个较低的误差范围。此外，该框架得到的重建误差远小于高斯过程回归。噪声污染观测的数值实验发现，由于观测噪声，重建波场发生退化，但是，即使使用高斯过程回归重建的波场完全崩溃，由现有框架从所有可用观测点获得的重建误差仍接近较低的误差范围。虽然重建误差大于利用所有观测点获得的误差，但通过与传感器优化方法相结合，可以减少用于重建的观测点数量，同时减少重建数据的劣化和分散。因此，即使观测点数量少，且观测具有噪声，但与传感器优化方法相结合，也可以实现比随机选择的观测点更好、更稳定的波场重建。相关研究成果于 2022 年 11 月在线发表于 *Geophysical Journal International*。

地震对基础设施的破坏预测是地震灾害对策制定的关键之一。重建地震引起的地震动分布是进行震害预测的有效途径。人们可以通过分析地面运动引起的结构的地震响应来评估基础设施损坏情况，这种类型的分析需要目标结构底部的地震波形作为边界条件，其难点在于地震波场重建，即利用比结构分布更稀疏的地震仪阵列重建地震波场。目前，已经针对地震波场成像提出了各种基于物理学的方法，这些方法使用震源信息和地下结构模型对波动方程进行数值求解。当基于物理的方法由于计算资源的限制而难以执行时，数据驱动的方法则是另一种选择。此外，还开发了物理和数据驱动相结合的方法。

为了进一步快速估计（即实时估计）地震波场，低成本的离散观测和精度适中的连续地震波场重建方法很有价值。在流体动力学领域中，基于数据驱动的降阶模型（ROM）的全状态重建框架，在用较少的观测点进行精确重建方面起着重要作用。

传感器优化技术是另一个重要主题。目前，已经提出了基于贪婪算法、凸松弛算法和近端优化算法等的方法。近年来，从安装在建筑物和公用设施（例如电力、燃气和水利设施）中的振动计以及内置在智能手机中的加速度计获得的数据，开始被认为是下一代地震研究的潜在资源。在地震超大数据时代到来之前，设计一种根据目的选择数据观测点的算法是必不可少的。同时，在地震学背景下，传感器选择/放置的重要性开始得到认可。

研究人员以日本东京都市区为对象，试图建立快速准确的地震波场重建框架，从离散观测中估计空间连续波场。此外，还进行了稀疏观测的波场重建，即观测数据来自有效选择的观测站。所提出的框架受到空气声学领域的启发，将基于数据驱动 ROM 的稀疏观测全状态恢复框架扩展到地震波场重建。研究使用 ROM 从稀疏观测直接重建空间连续和时间序列的

地震波场，采用基于贪婪算法的传感器优化方法确定可用观测点的合适子集进行波场重建。

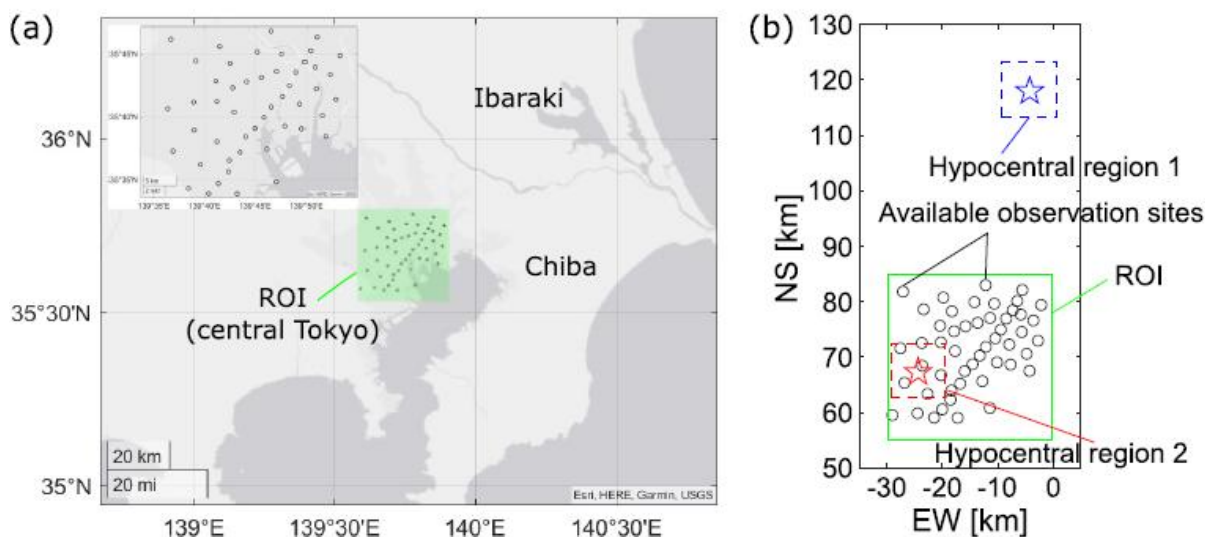


图 1 (a)日本关东地区 MeSO-net 站点的位置 (圆圈), (b)震源区和观测点的位置

研究人员将所提出的框架应用于模拟数据，并使用无噪声观测和噪声污染观测数据进行波场重建。对于基于无噪声观测的重建，重建误差被降低到了模型误差，即使用于重建的观测点的数量是有限的，并且是随机选择的。重建数据再现了参考数据的频谱和时间序列波形，此外，所提出的框架获得的重建误差远小于使用基于高斯过程回归 (GPR) 的方法所获得的重建误差。

对于基于噪声污染观测的重建，由于观测噪声，重建波场的精度有所下降，但所有可用观测点获得的重建误差接近模型误差。另一方面，即使使用了所有可用的观测点，通过基于 GPR 的方法获得的重建波场仍然完全崩溃。虽然重建误差大于观测点数量为 50 时的误差，但通过与基于 D-最优性的、测量矢量的贪婪方法 (DG-vec) 相结合，可以减少用于重建的观测点数量，同时最大限度地减少重建数据的劣化 (deterioration) 和分散。重建数据的频谱的全局特性，例如峰值频率和峰值数量，与参考数据相似。

当减少观测点的数量时，时间序列波形中的差异变得明显。特别是，在观测点数量减少的重建数据中，振幅较大的人为波动出现在 S 波之前及早期部分。通过使用 DG-vec 方法选择观测点集，有效地减少了 S 波之前和早期部分的人为波动。

即使估计是用较少数量的观测点和较大的观测噪声进行的，通过 DG-vec 方法优化的观测点集仍可提供更好、更稳定的波场估计。通过使用观测点优化方法，如 DG-vec 方法，可以最小化观测点集的性能差异，并且与使用随机选择的观测点集相比，可以更恰当地进行重建波场的验证。

整体而言，本研究提出的框架提供了快速、高精度的地震波场重建。虽然目前的框架需要为每个震中区域构建 ROM，并选择观测点集，但是这些预处理可以提前离线执行，从而可以根据临时震源信息即时确定用于重建的 ROM 和观测点集。由于计算资源有限，研究中地震波场的 ROM 是使用具有一维速度结构的模型构建的。因此，对于地下结构，实际波场与使用一维速度结构的合成波场之间存在差异。这一点是将本框架应用于实际数据集的主要问题之一，但可以通过使用具有三维速度结构的高保真模拟，来减少速度结构差异的影响。

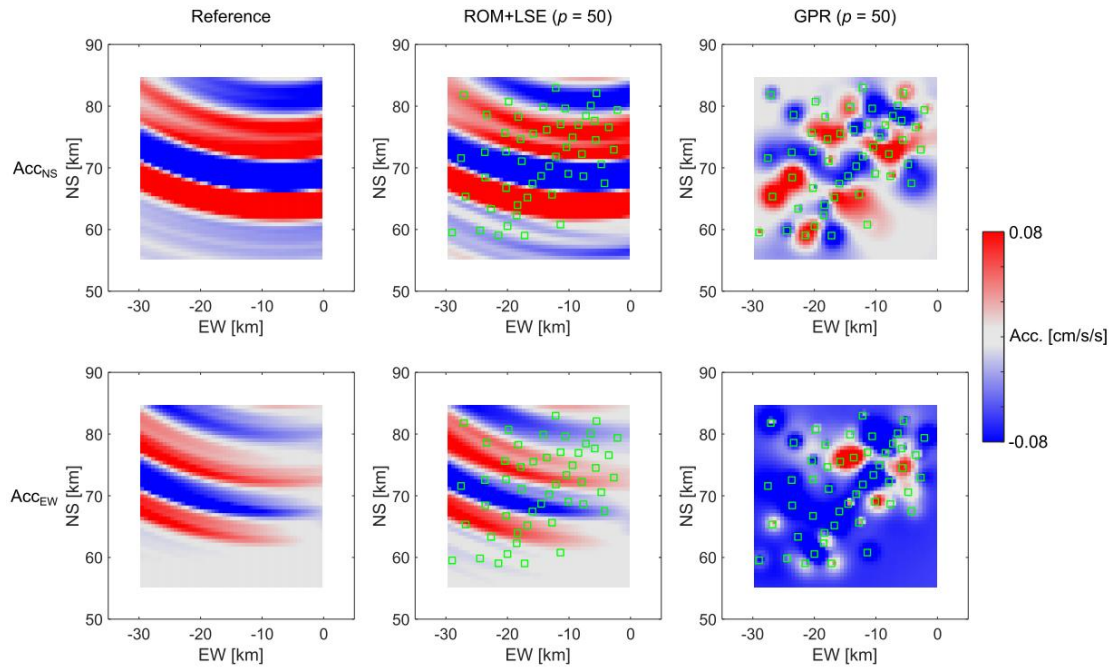


图 2 在 $t=24.24$ s 时，通过本研究方法和基于 GPR 的方法获得的震源区域 1
（无观测噪声）的重建波场

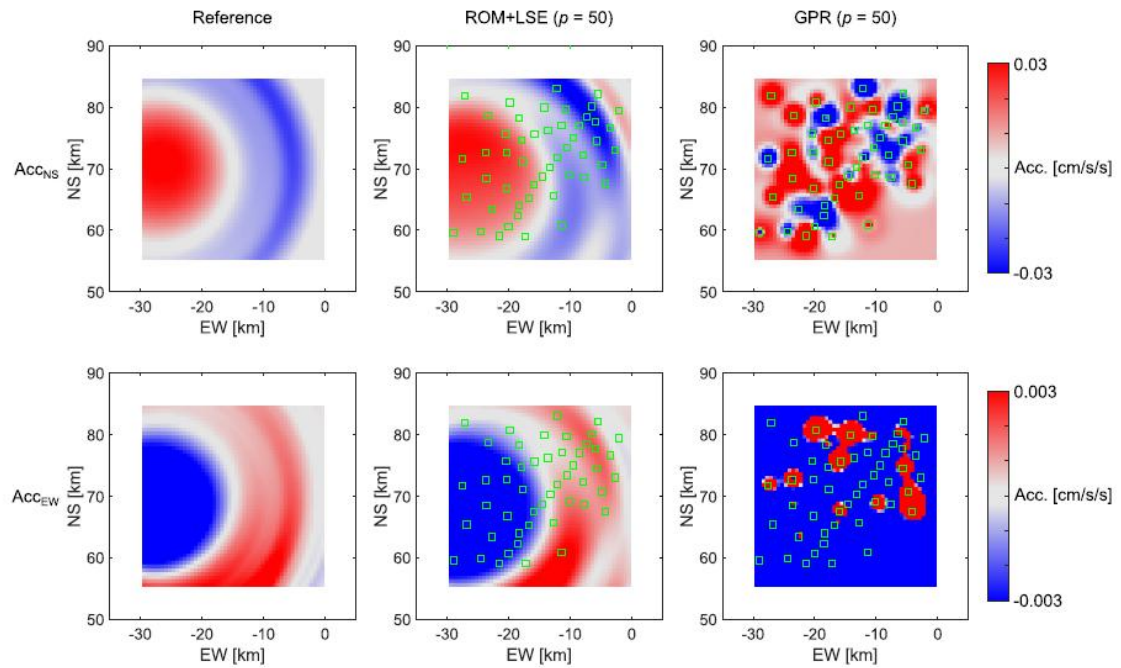


图 3 在 $t=24.88$ s 时，通过本研究方法和基于 GPR 的方法获得的震源区域 2
（有观测噪声）的重建波场

此外，速度结构本身也可以作为构建 ROM 时的参数。但是，高保真模拟需要大量的计算成本，而本研究的目的是提出一种基于数据驱动的 ROM 进行压缩感知、重建地震波场的框架。因此，本研究采用一维地下结构模型进行数值模拟。应该注意的是，在低频段（大约低于 0.2 Hz）使用一维速度结构计算的波形与使用三维速度结构计算的波形显示出良好的一致性。因此，即使模拟使用一维地下结构，也可以重建低频波，例如周期超过 10 s 的震中直达波——这些波可能会损坏大都市区的大型结构。其次，还有一种策略，即构建噪声模型，以校正由于模型中的误差而引起的噪声的影响。由模型误差引起的噪声可能是从观测点位置处观测到的波形和重建波形之间的差异引起的。

来源：Nagata T, Nakai K, Yamada K, *et al.* Seismic wavefield reconstruction based on compressed sensing using data-driven reduced-order model. *Geophysical Journal International*, 2023, 233(1): 33-50.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所