

地震科技前沿快报

2024 年第 5 期（月刊总第 64 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、诱发地震的物理机制

地下流体注入和开采会激活复杂的物理过程，破坏预先存在的断层稳定性，进而导致大规模的破坏性地震。本研究探讨了诱发地震活动的物理机制及其在模拟、预测、监测和减轻诱发地震方面的基本应用，并阐明了基于物理的模型的重要性。

2、 CaC_2O_5 的结构和弹性揭示了碳酸盐对地震波速异常的贡献

地球内部的物质组成和地震波速结构特征是探索 and 了解地球内部构造活动和地震活动等各动力学过程的重要基础。研究人员利用第一性原理模拟计算了高压下不同对称系 CaC_2O_5 矿物的结构和弹性，并结合 CaC_2O_5 之间的相变条件和发生反应，揭示了 CaC_2O_5 在地球内部的赋存及其对地球内部波速结构的影响。

3、富甲烷-氢流体的运移可能引发弧前深度的俯冲带发生地震破裂

含水流体的存在影响着岩石的稳定性和流变性。研究人员对意大利西部阿尔卑斯山 Lanzo 地块中出露的绿辉石岩开展研究，结果表明在弧前深度富含 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 流体的迁移、富集会产生超静岩孔隙流体压力，导致绿辉石岩脆性破裂和角砾岩化，并可能引发弧前深度俯冲带的地震活动。

诱发地震的物理机制

尽管在运营和监管方面做出了许多努力，但涉及地下流体开采或注入的人为操作可能会导致意想不到的、大规模的破坏性地震。本研究主要探讨了诱发地震活动的物理机制及其在模拟、预测、监测和减轻诱发地震方面的基本应用。结果表明，注入诱发地震的主要机制对应力扰动的产生很重要，这些机制包括孔隙压力扩散、孔隙弹性耦合、热弹性应力、地震相互作用和无震滑移。开采诱发地震（**extraction-induced earthquakes**）是由差异压实引发的，这与孔隙弹性效应和储层蠕变（**reservoir creep**）相关。次要机制是应力腐蚀、动态弱化、粘着力损失（**cohesion loss**）导致的岩体强度降低。然而，基于物理过程的理解来限制潜在地震的最大震级 M_{\max} 仍然具有挑战性。常见的 M_{\max} 理论以注入体积作为单一应变源，这在地震活跃地区可能效率不高。替代的基于时间的 M_{\max} 模型有潜力解释为什么一些诱发地震会引起构造应变，并导致失控破裂（其中的破裂前缘延伸到受扰动岩石体积之外）。基于物理预报的发展和未来减轻诱发地震风险的成功可能有助于提高新兴能源技术的接受度，例如可持续转型期间增强型地热系统和地下气体储存。相关研究成果发表在 2023 年 12 月的 *Nature Reviews Earth & Environment*。

中大型地震（4 级以上）的发生给社会、环境和经济造成了负面影响，其潜在原因包括许多人为活动。许多诱发地震被解释为地下储层对注入或开采的孕震响应，其最大震级 M_{\max} 与自然地震的最大震级相当。因此，了解控制这些地震的物理过程，并制定预测、控制和减轻地震风险的策略非常重要。近年来，在小规模实验、大规模操作和风险告知交通灯协议（TLPs）等方面取得了一定进展，这提高了目前对诱发地震活动的认识。但是，仍然需要对诱发地震进行更普遍的基于过程和机制的综合了解。

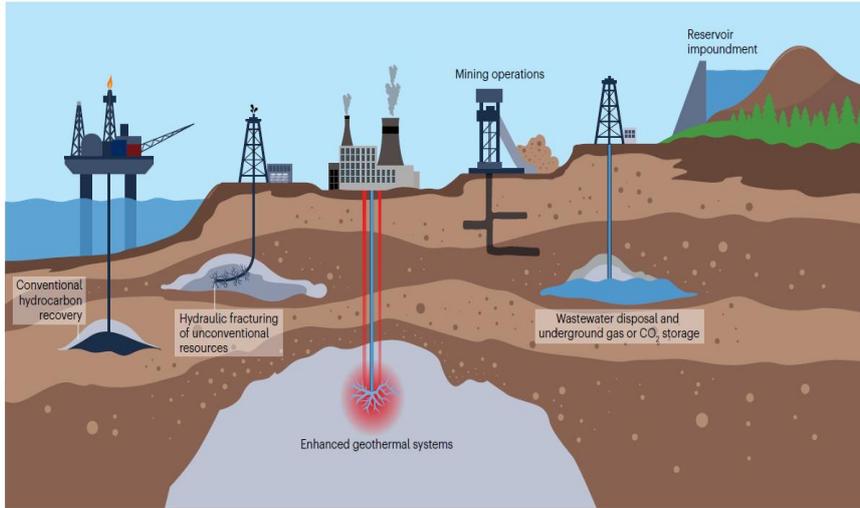


图 1 可能诱发地震的工业活动。常规烃类开采、非常规资源水力压裂、增强型地热系统、采矿作业、废水处理、地下天然气或二氧化碳储存作业以及水库蓄水可能诱发地震

在这篇综述中，研究人员对控制流体诱发（通过注入或开采）地震的物理过程进行了全面概述。触发机制被特别关注，并讨论了与物理过程相关的 M_{\max} 模型。然后，概述了基于物理的方法对监测、辨别、地震风险和危险性评估以及减轻策略的影响。最后，研究强调了一些新兴的研究方向。

1. 与诱发地震相关的活动

全球范围内，超过 50% 的与人为地震相关的工业项目与地下流体注入或开采直接相关，主要包括增强型地热系统（EGS）、水力压裂、废水处理（WWD）、地下气体储存以及烃类开采。对于 EGS，其过程中的水力刺激（hydraulic stimulation）通常与诱发地震活动相关。对于水利压裂，流体力学过程会影响水力裂缝的扩展和破坏的演化，进而控制水力裂缝的尺寸和随之而来的地震活动。对于 WWD，一些大震级（ $M \geq 5$ ）地震可能与 WWD 注入有关。对于地下气体储存，多种相互作用改变了主体地层的渗透率、孔隙度和孔隙弹性。对于烃类开采，在流体开采过程中，储层压力下降，并且弹性应力被激活。

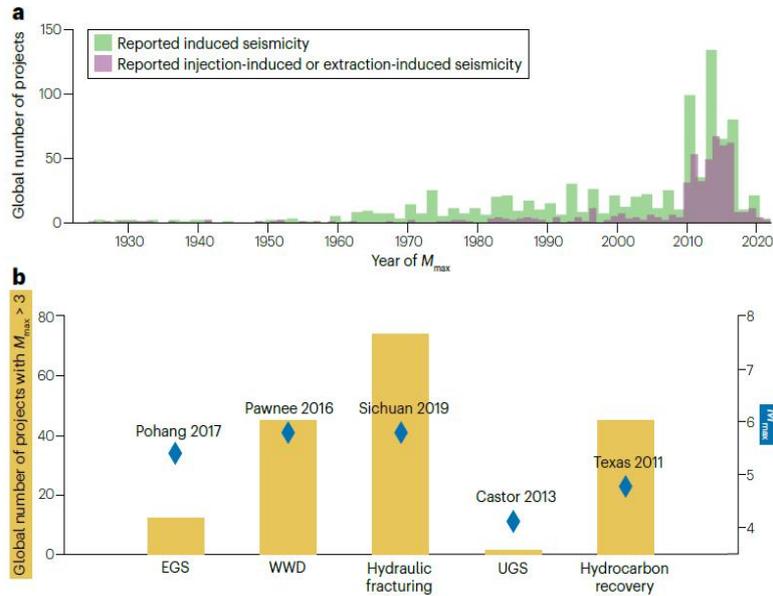


图 2 与工业操作相关的诱发地震活动。(a)全球与人为地震和与流体注入或开采诱发地震相关的工业项目数量；(b)流体注入或开采诱发 $M_{max} \geq 3$ 地震的工业项目数量

2. 地震触发机制

诱发地震的主要触发机制对应力扰动的产生很重要，包括孔隙压力扩散、孔隙弹性耦合、热弹性应力、地震相互作用和无震滑移。通过化学和物理过程发生的断层弱化也可以加速流体-岩石相互作用和/或进一步提升不稳定性。然而，阐明单一机制的影响比较困难，因为单一地震可能由多种机制导致。这些机制可以划为应力扰动和断层弱化两方面，前者主要包括孔隙压力变化、孔隙弹性耦合、热应力、地震相互作用和储层蠕变，后者主要包括应力腐蚀、地球化学相互作用、动态弱化以及粘着力损失。

一般来说，前面讨论的所有机制都可能有助于诱发地震活动。孔隙压力变化被认为是注入诱发地震活动的主要机制，而孔隙弹性耦合是开采诱发地震活动的主要机制。

3. 诱发地震的最大震级

工业活动引起的地震响应的变化与各种自然因素有关。预测项目生命周期内可能引发地震的次数和震级对于评估地震危险性和地震风险至关

重要。与诱发地震活动相关的地震风险取决于是否触发大地震，然而，理解和预测工业活动引起的最大震级存在挑战，因为单次地震 M_{max} 的模型本质上与不确定性相关。许多情况下，观测到的诱发地震最大震级与古登堡-里克特关系式中预期的 M_{max} 模态值一致，但该关系式是基于观测结果的，不能直接用于预测操作前或操作期间的预期最大震级。为了预测 M_{max} ，应将其与基于物理的地震活动模型结合起来，这主要包括基于体积的理论和基于时间的理论。但是，迄今为止，对于如何应用诱发地震最大可能震级的方法还没有一个标准或最佳实践。在评估最大震级时必须考虑不确定性，且应该实时应用前瞻性概率方法来更新诱发地震最大震级、地震危险性和地震风险的评估。

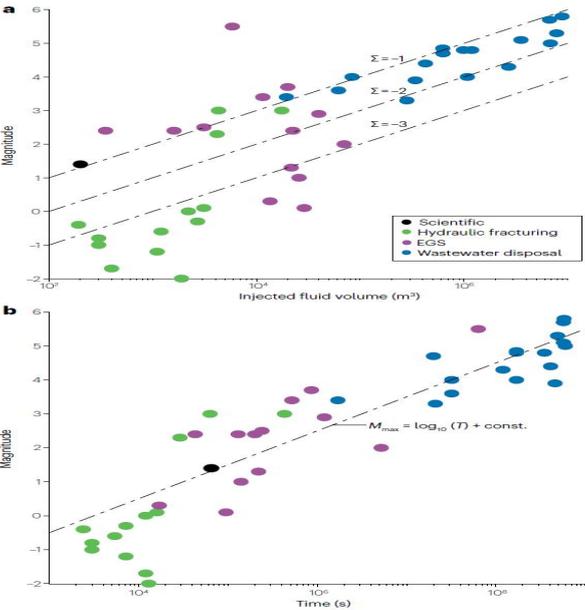


图3 计算诱发地震的最大震级

4. 监测、辨别、风险、危险性和减轻

监测、辨别、风险、危险性和减轻的概念对于管理诱发地震活动非常重要，因为它们提供了量化可能损失，并确定应对措施（降低这些损失的严重性和频率）的方法。在这里，研究人员侧重根据底层物理机制来讨论

这些概念。

监测和辨别：对于地下工业作业而言，微震监测至关重要。诱发地震活动的物理建模可以提供检测到的最小震级，以及监测设施应达到的定位精度的信息，从而对不同地震网络的设计参数给出客观约束。基于物理的模型在辨别自然地震活动和诱发地震活动方面也极其重要，如果没有进行地震活动、孔隙压力扩散、孔隙弹性应力建模和区域地质环境的详细研究，自然地震活动和诱发地震活动的辨别是不确定的，甚至是不可能的。

地震危险性和风险评估：诱发地震活动的性质给传统概率地震危险性分析的震源建模假设带来了额外问题，因为诱发地震活动率在人类或施工时间范围内不是固定的。目前使用的 M_{max} 理论在表征震源时进行了假设的简化，基于物理的模型在建模和预测预期地震活动方面具有潜在优势，可以预测未来的危险性和风险，并针对操作调整或减轻策略反馈信息。

减轻策略：在这里，减轻策略被广泛定义为旨在减少诱发地震活动危险性的方法。然而，评估减轻策略的有效性在很大程度上受到数据可用性的限制。鉴于减轻策略对减少地震危险性和地震风险至关重要，需要高分辨率数据集和实验来验证其有效性，并在现场建立最佳实践。

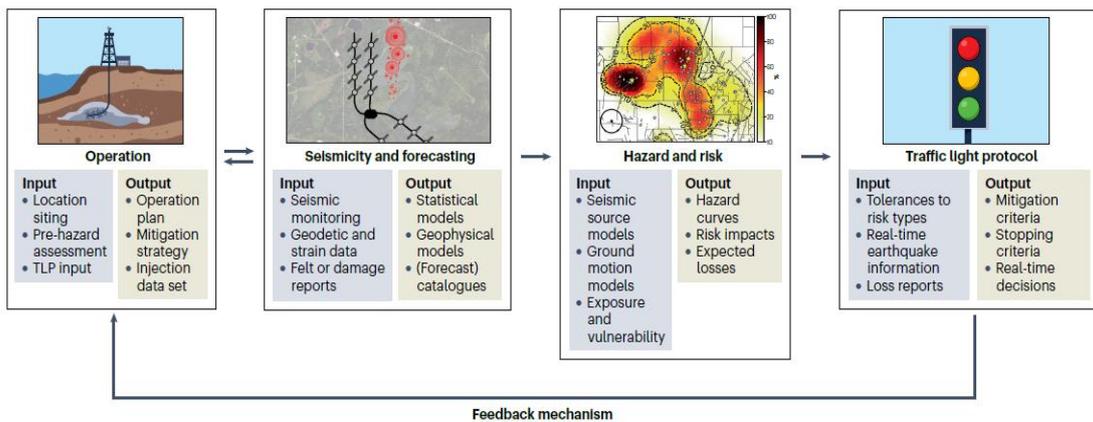


图4 人为操作和诱发地震活动的反馈回路

5. 小结

地下流体注入和开采会激活复杂的物理过程，从而破坏预先存在的断层稳定性。注入和开采诱发地震活动的主要触发机制分别是孔隙压力扩散和孔隙弹性耦合，这些机制通常可以解释注入或开采地点周围的大多数地震群，而无震变形和地震相互作用等其他机制可以解释应力向远处的转移。

在特征明确的地点进行的多物理场建模研究表明，不同触发机制的相对重要性可能因地点而异。一个重要的问题是确定主导机制和主要活动（产生地震活动簇）。显然，不同活动引起的应力扰动量可能是高度非线性的，并且取决于多个物理因素。

此外，关于诱发地震的触发机制或震源深度的争论通常与监测设施薄弱有关。因此，每个站点微震监测网络的设计（基于物理）可能有助于推断诱发地震活动的控制机制。分布式声学传感技术利用光纤电缆作为传感元件，可以足够灵敏地记录微震事件，并提供可靠的深度估计。

小规模实验的主要优点是可以精确表征岩体和原位条件，并完全控制操作变量。大量仪器提供了高分辨率数据集，可以确定控制地震活动的物理过程。然而，耦合过程的数值建模需要大量的计算工作。因此，高性能、高效计算工具（如基于物理的机器学习）的发展为解决 3D 多物理场问题和量化模型参数的不确定性打开了一扇新的大门。

在现阶段，诱发地震的危险性必须进行统计性估计，同时，目前只有少数物理因素被集成到基于物理的模型中。由此来看，本综述阐明了基于物理的模型的重要性，这些模型捕获了控制跨多个区域和尺度的破裂成核、传播和停止的多个物理过程。

来源：Moein M J A, Langenbruch C, Schultz R, *et al.* The physical mechanisms of induced earthquakes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(12): 847-863.

CaC₂O₅ 的结构和弹性揭示了碳酸盐对地震波速异常的贡献

对地球内部高压条件下所形成碳酸盐化合物的了解是理解地球内部结构、深部碳循环和重大地质事件的关键。研究人员利用第一性原理模拟计算了高压下不同对称系 CaC₂O₅ 矿物的结构和弹性。计算表明，CaC₂O₅ 矿物代表了一组低密度、低地震波速的地幔矿物。CaC₂O₅-Cc 到 CaC₂O₅-Cc-I $\bar{4}$ 2d (CaC₂O₅-Cc-C2-I) 相变引起的地震波速变化与地幔过渡带 660 km 深处的波速不连续一致。当 CaC₂O₅-Fdd2 在 70 GPa 下转变为 CaC₂O₅-C2 时，其剪切波速下降 7.4%，密度增加 5.8%，符合大型低剪切波速省 (LLSVP) 的特征。此外，CaC₂O₅-Cc-I $\bar{4}$ 2d 的剪切波速与立方钙钛矿非常相似，后者被认为是 LLSVP 的主要成分之一。因此，研究者认为 CaC₂O₅ 及其高压多晶型物可能是 LLSVP 的主要组成部分。相关研究成果发表在 2024 年 1 月的 *Nature Communications*。

了解高压下矿物的物理和化学特征对理解地球的组成、结构和动态过程至关重要。研究含碳物质（如碳酸盐）在高压和高温下的物理性质对于深入了解地球深层碳循环具有重要意义。CaC₂O₅ 是通过第一性原理模拟首次发现的一组多晶型碳酸盐矿物，发现之后便建立了具有 Fdd2、Pc、C2 对称性的 CaC₂O₅ 的稳定结构。虽然这些 CaC₂O₅ 多晶型物的晶体结构、部分电子性质和可能的相变已经被广泛研究，但目前没有统一的结果描述 CaC₂O₅ 多晶型物对地幔或其结构稳定性和弹性性能的可能影响。

为了了解 CaC₂O₅ 多晶型物相变的可能模式及其对地幔结构、组成和深部碳循环的影响，研究人员采用第一性原理模拟方法计算了 CaC₂O₅-Cc、CaC₂O₅-Fdd2、CaC₂O₅-C2-I、CaC₂O₅-C2、CaC₂O₅-I $\bar{4}$ 2d 和 CaC₂O₅-Pc 6 种 CaC₂O₅ 多晶型物（以下简称 CaC₂O₅s）在各自稳定压力范围内的晶格参数、电子性质和弹性，研究结果揭示了地幔中不同结构相 CaC₂O₅ 的存在及其

对深部地幔的影响。

1. 高压下 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2\text{d}$ 的结构稳定性

在 34 GPa 和 45 GPa 两种压力下， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2\text{d}$ 在实验室内被首次合成。然而，前人从第一性原理模拟指出，这种矿物可以稳定在 25~50 GPa，因此其稳定范围尚不清楚。矿物的热力学性质一般通过分析它们在布里渊区（Brillouin zone）的声子频率来评估。研究人员计算发现，在 0~34 GPa 的压力范围内，晶格振动在布里渊区产生负值，这表明 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2\text{d}$ 在该压力范围内是不稳定的。随着压力的增加，该结构在 34~100 GPa 范围内表现出热力学稳定性。马利肯布居数（Mulliken population）计算结果同样证实了这一结论。

2. 晶格参数和密度

研究人员计算了高压下 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{s}$ 的晶格参数（a、b、c）。随着压力的增加， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{s}$ 的晶格常数线性降低（ $R_2 > 0.978$ ）。值得注意的是，在相同压力下， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2\text{d}$ 和 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C}2\text{-}1$ 的晶格参数 a 和 b 的值非常接近，两种多晶型物的晶格参数 c 的比值恒定在 0.8（ ± 0.05 ）。随着压力的增加， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{s}$ 的密度逐渐增大，但均低于初始参考地球模型（PREM）。一般来说，低密度矿物很难进入深部地幔，但在下地幔中还发现了 $\delta\text{-AlOOH}$ 、 CaO_3 等低密度矿物。因此，由于地幔中广泛存在密度高于 PREM 的 FeOOH 和硅酸盐矿物， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{s}$ 可能在下地幔中对地幔密度的调节和中和起着至关重要的作用。

随着压力的增加， CaC_2O_5 的不同多晶型物之间出现了一些明显的密度转变。首先， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Cc}$ 在大约 660 km 处转变为 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C}2\text{-}1$ 。当压力从 20 GPa 增加到 30 GPa 时，密度增加了 7.37%~8.81%，这与 PREM 模型在 660 km 处密度的增加非常一致，表明这种结构相变可能是此处密度变化的

原因之一。其次，当 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2d$ 或 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Fdd2}$ 转变为 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Pc}$ 和 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C2}$ 时，密度增加 4.02%~5.88%。 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C2-1}$ 和 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2d$ 的密度在数值以及与压力的关系上具有相似性。

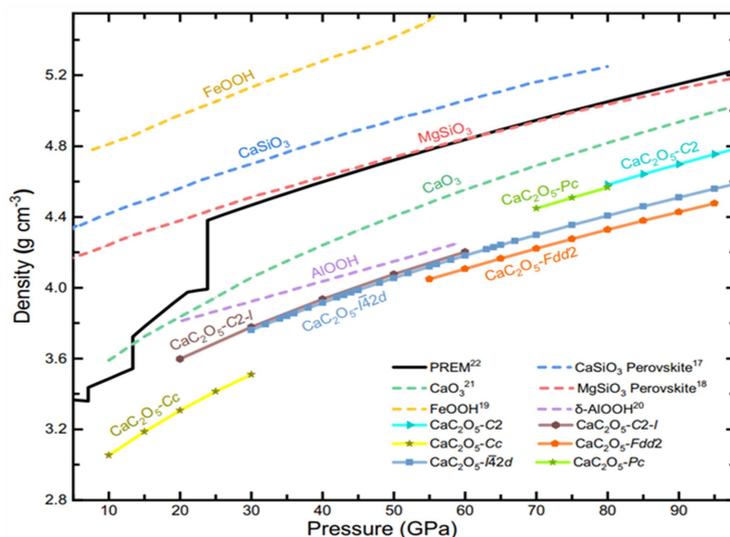


图 1 高压下 CaC_2O_5 s 与几种下地幔矿物的密度

3. 弹性

根据确定矿物弹性稳定性的定理，研究人员分析了 CaC_2O_5 s 的弹性稳定性。结果表明，6 种多晶型物在其计算的的压力范围内可保持弹性稳定性。虽然 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C2-1}$ 和 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2d$ 的空间群不同，但它们的弹性常数具有很好的一致性。此外，研究人员计算了 CaC_2O_5 s 的体积模量 (K) 和剪切模量 (G)，如图 2a、2b 所示。 CaC_2O_5 s 的 K 和 G 随压力线性增加。在 6 个多晶型物中， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Fdd2}$ 的 K 和 G 最大， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Cc}$ 最小。

为了进一步探讨压力对 K 和 G 的影响，根据 K 和 G 对压力的线性拟合结果，分别计算了压力导数。 K 和 G 在高压下相似的数值表明， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C2-1}$ 和 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2d$ 具有相同的弹性性质。此外，研究人员计算了 CaC_2O_5 的剪切波 (V_s) 和压缩波 (V_p) 速度 (图 2c、2d)。6 种多晶型物中， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Cc}$ 的波速最慢， $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Fdd2}$ 的波速最快。随着压力的增大，

CaC₂O_{5s} 的波速增大。对于 6 个 CaC₂O₅ 多晶型物，V_s 值排序为 Fdd2>Pc>C2>I4̄2d≈C2-l>Cc，V_p 值排序为 Fdd2>Pc>I4̄2d≈C2-l>C2>Cc。可用发现，CaC₂O₅-I4̄2d 的波速与 CaC₂O₅-C2-l 非常接近。

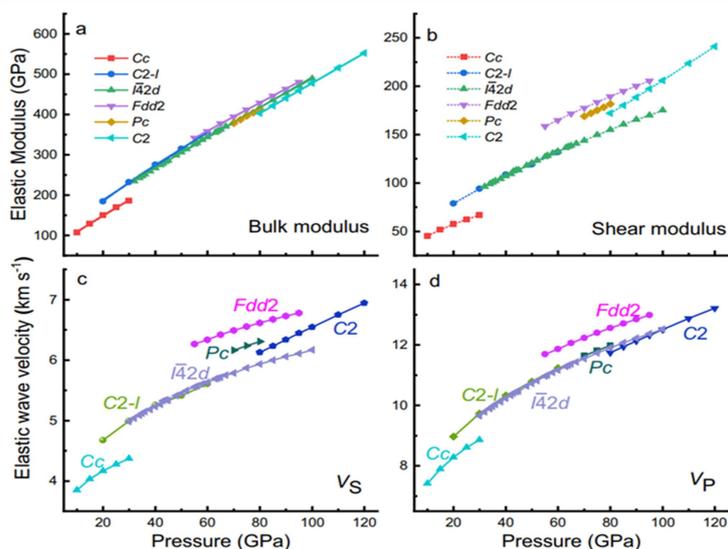


图 2 CaC₂O₅ 的弹性模量和弹性波速

4. CaC₂O₅-C2-l 和 CaC₂O₅-I4̄2d 的关系

CaC₂O₅-C2-l 和 CaC₂O₅-I4̄2d 在晶格参数、密度以及地震波速上具有非常相似的特征。同时，研究人员计算了 CaC₂O_{5s} 在高压下的能带结构和电子态密度。结果表明，在相同的压力范围内，CaC₂O₅-C2-l 和 CaC₂O₅-I4̄2d 的电子态密度 (DOS) 和能带结构几乎相同。因此，这两种相为同一种物质。

5. CaC₂O_{5s} 对地幔结构的影响

高压下 CaC₂O_{5s} 的波速低于 PREM 模型的波速，同时，CaC₂O_{5s} 的波速也低于地幔中的常见矿物（如瓦兹利石、尖晶橄榄石、MgSiO₃ 钙钛矿、CaSiO₃ 钙钛矿）的波速。因此，CaC₂O_{5s} 是一组低速矿物，可能有助于了解地幔低速层的成因。

从 300 km 到 1662 km，波速随压力增大而增大。在 CaC₂O₅ 多晶型物

为可以解释 LLSVP 的起源。研究人员所计算的 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2\text{d}$ 的 V_s 与立方 CaSiO_3 钙钛矿的 V_s 几乎相同，当 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Fdd2}$ 随着压力的增加转变为 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C2}$ 时，其 V_s 降低了 7.4%（图 3）。LLSVP 不仅表现出比周围地幔慢低几个百分点的低速特征，而且表现出比周围成分更高的密度。当 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Fdd2}$ 转变为 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C2}$ 时，其密度增加了 5.8%。这一趋势使得 CaC_2O_5 的转变更符合 LLSVP 的特性。

根据计算的 CaC_2O_5 密度、波速、可能的相变以及 CaC_2O_5 在地幔中的反应，研究人员提出了深部碳循环模型（图 4）。碳酸钙（ CaCO_3 ）和二氧化碳可以通过俯冲板块到达地球深处，因此， $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaC}_2\text{O}_5$ 在地幔不同深度的反应可以产生 CaC_2O_5 及其高压多晶型物。浅层地幔中的 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Cc}$ 在 660 km 深度转化为 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-I}\bar{4}2\text{d}$ ，导致地幔过渡带波速异常增大。同时，深部地幔中的 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-Fdd2}$ 可能随着压力的增加而部分转化为 $\text{CaC}_2\text{O}_5\text{-C2}$ ，导致地幔密度增大而横波速度减小，这可能是 LLSVP 形成的原因之一。

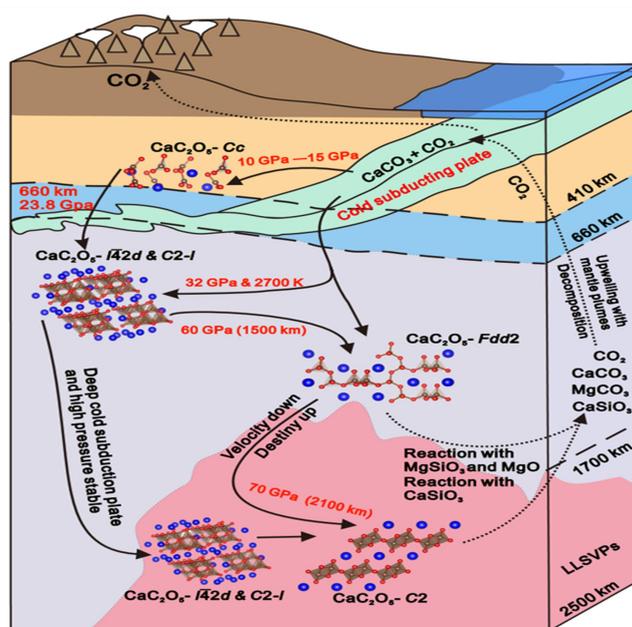


图 4 地幔中 CaC_2O_5 s 的示意图

在这些反应中， CaC_2O_5 与下地幔中的 $(\text{Mg, Ca})\text{SiO}_3$ 钙钛矿和铁方镁石 (MgO) 等矿物发生反应，生成碳酸镁、碳酸钙、硅酸钙和 CO_2 。较稳定的碳酸镁作为主要碳酸盐矿物留在下地幔，较稳定的硅酸钙留在 LLSVP。反应生成的碳酸钙可能与 CO_2 重复反应生成 CaC_2O_5 或分解为 CO_2 。通过地球内部动力学过程， CO_2 和含碳矿物也可以被运输到地球浅部。因此，在地球深部碳循环过程中， CaC_2O_5 可能会发挥如下重要作用： CaC_2O_5 将碳输送到地球深部，同时，随着压力的增加， CaC_2O_5 会发生连续的结构相变，之后， CaC_2O_5 与将碳输送到地球浅部的矿物发生反应，产生 CO_2 和含碳矿物。

来源：Wang H, Liu L, Gao Z, *et al.* Structure and elasticity of CaC_2O_5 suggests carbonate contribution to the seismic anomalies of Earth's mantle. *Nature Communications*, 2024, 15: 755.

富甲烷-氢流体的运移可能引发弧前深度的俯冲带发生地震破裂

变质流体、断层和剪切带是碳从地球深部运移到浅部储层的载体。其中一些流体被还原，并运输能源，如氢和轻烃。但是，深层能源输送到浅部储层的机制和途径仍不确定。来自意大利的研究人员提供了地质证据，表明在弧前深度富含 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 流体的积聚导致了力学强度较高岩石的破裂，最终达到了超静岩（supralithostatic）孔隙流体压力。这些流体来源于榴辉岩-蓝片岩相条件下蛇纹岩化过程中富 H_2 流体对邻近碳酸盐的还原。热力学模型发现，富 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 含水流体的生成和富集比贫 C 和富 CO_2 含水流体更容易产生流体超压。这项研究为地球深部能源沿构造不连续面的迁移提供了证据，并阐述了这种迁移与可能引发弧前深度地震活动的硬岩脆性破裂的因果关系。相关研究成果发表在 2024 年 1 月的 *Nature Communications*。

俯冲带是生命必需元素（H、O、C 等）在流体中迁移的主要地质场所。人们普遍认为，含水流体的存在使岩石变弱，这是因为在粘性变形或水力压裂过程中，晶界处存在自由的含水流体有利于水解和反应弱化。同样，含 C 含水流体的渗透也可能影响岩石的流变学性质。目前，针对氧化性富 CO_2 含水流体的作用已开展了大量研究，相比之下，还原性富 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 含水流体的渗透对岩石稳定性和流变性的影响研究较少，尽管还原条件可能在俯冲带的局部占主导地位。

1. 地质背景

研究人员对位于意大利西部阿尔卑斯山 Lanzo 地块中出露的绿辉石岩开展了详细的显微构造研究和热力学模拟，以探究富 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 含水流体对岩石破裂的影响。Lanzo 地块由新鲜橄榄岩核和外围蛇纹岩组成，经历了复杂的演化过程，从侏罗纪的海底剥露和交代，到始新世的俯冲和高压

变质作用（550~600 °C，2~2.5 GPa）。蛇纹岩化的 Lanzo 地块与相邻的大陆 Sesia Zone 被绿辉石岩分隔（图 1）。由于构造作用，蛇纹岩中也分布有绿辉石岩透镜体。所研究的绿辉石岩位于距还原碳酸盐化蛇纹岩（reduced carbonated serpentinite）小于 20 m 的地方，而在还原碳酸盐化蛇纹岩中，曾发现榴辉岩相变质 CH₄ 的形成。绿辉石岩具有强烈角砾结构，由绿辉石岩碎屑和被黑色物质充填的裂隙组成。不连续的滑石片岩层既出现在绿辉石岩与蛇纹岩的接触处，也出现在绿辉石岩内部。

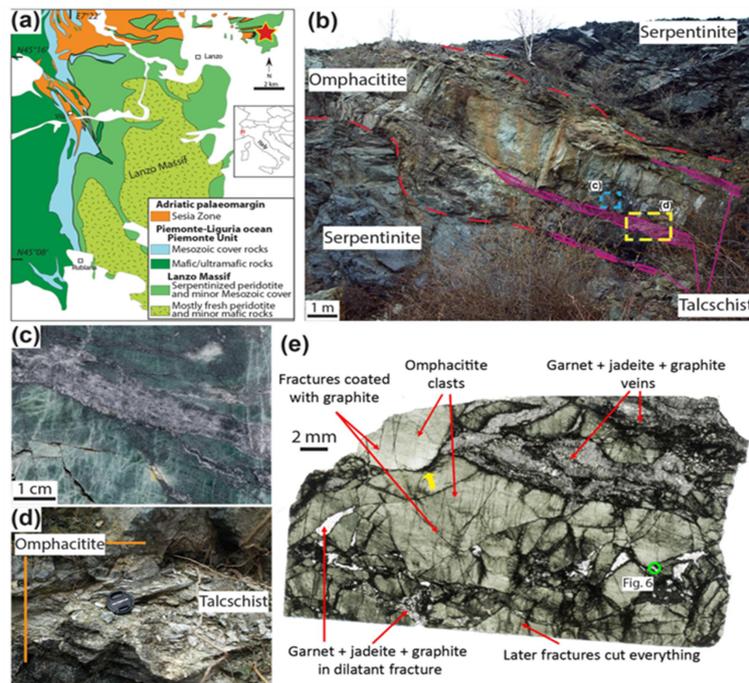


图 1 绿辉石岩地质图、野外照片和显微构造

2. 膨胀角砾岩形成的显微结构和化学特征约束

X 射线显微镜和岩相学分析发现了膨胀角砾结构，内部有几微米到几厘米大小的弱面理化绿辉石岩碎块。这些碎屑被透入性且相互连接的基质所包围，基质由不同比例的硬玉、绿辉石、钙铝榴石、橢石和石墨组成。角砾化后的韧性变形表现为在局部对碎屑和基质的榴辉岩相面理化改造。通过拉曼光谱识别的石墨既存在于碎屑边部，也存在于基质中。基质中存

在硬玉和绿辉石，缺少钠长石，表明流体调节的角砾岩化作用的温压至少为 1 GPa 和 400 °C。值得注意的是，地块中甲烷的形成被限制在 2 GPa, 550 °C和 1 GPa, 400 °C之间。

扫描电镜和电子背散射衍射（EBSD）结果显示，较大的绿辉石颗粒边界不规则，具有丰富的低角度颗粒边界。晶粒参考取向偏差（grain reference orientation deviation）图显示出普遍较低的（ $<5^\circ$ ）内部晶格变形，大多数颗粒小于 2° 。错向角分布（misorientation angle distribution）显示，在低角度（ $2^\circ\sim 10^\circ$ ）错向角具有峰值，被解释为发生明显旋转的破裂所致。这些数据表明，在角砾岩化作用之前和过程中，绿辉石发生了扩散微破裂，晶体塑性变形作用较小。透射电镜发现，绿辉石颗粒发生强烈双晶作用。双晶壁包含的位错表明，双晶是受力导致的，通常高于 100 MPa。同时，一些富含碳的非晶态物质包裹体沿双晶分布。

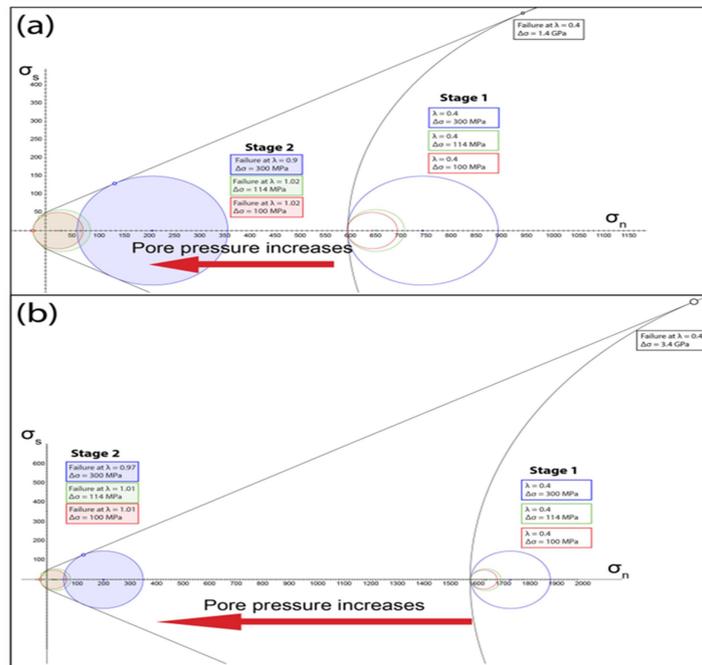


图 2 绿辉石岩摩尔-库仑图解（正应力 σ_n ，剪切应力 σ_s ）

背散射电子（BSE）成像突出显示了石榴石、硬玉和绿辉石的树枝状

结构。变质岩中的这些生长结构表明，在不平衡条件下发生了快速沉淀。基质中自形硬玉和石榴石的阴极发光（CL）成像显示出振荡带，表明可能是从多次流体脉冲或与周围岩石不平衡的演化流体中沉淀的。拉曼光谱显示，自形硬玉中有 CH_4 、 H_2 和 H_2O 的流体包裹体。通过 $X_{\text{CH}_4} = \text{CH}_4 / (\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2)$ 计算得到的 X_{CH_4} 为 0.65，表明了与相邻碳酸盐化蛇纹岩相似的强还原条件。这一特征表明，绿辉石岩角砾岩化过程中存在的流体是一种富含 CH_4 的含水流体，且与在榴辉岩相条件下相邻碳酸岩化蛇纹岩中的 CH_4 和富 H_2 流体之间存在联系。

3. 讨论

单斜辉石的双晶至少需要 140~150 MPa 的差应力，而在绿辉石岩中，摩尔-库仑图显示，当低孔隙流体因子接近静力值 ($\lambda=0.4$)，垂直应力 (σ_v) 为 1 GPa 和 2 GPa 时，逆冲作用下发生脆性破裂需要的差应力 $\Delta\sigma$ 分别为 1.4 GPa 和 3.4 GPa。超过 1 GPa 的差应力不太可能实现，因此绿辉石双晶可能形成于几百 MPa 的差应力条件下。机械双晶被解释为代表一次破裂前加载事件，是瞬时应力变化的应变响应。如果达到超静岩 λ 值，那么与静水 λ 值下的破裂相比，绿辉石岩的连续膨胀角砾岩化所需的 $\Delta\sigma$ 值要低得多。研究人员基于绿辉石岩显微构造特征提出，绿辉石岩的角砾岩化很可能代表了弧前地区深部发生的地震活动。

为了评估俯冲带条件下含 CH_4 含水流体发生超静岩水力压裂的潜力，研究人员在 Lanzo 地块 CH_4 形成的温压范围内进行了热力学模拟。在图 3a 中，x 轴代表石墨饱和的 COH 流体的氧化还原状态 [$X_{\text{O}} = n\text{O} / (n\text{O} + n\text{H} + n\text{C})$]。对于沿温压梯度的每一点，计算了石墨饱和 COH 流体与纯 H_2O 之间的摩尔体积变化。对于 $X_{\text{O}}=0.333$ ，与石墨平衡的流体包含大量的水和最少量的碳，因此相对于纯 H_2O 的差异最小。沿着 x 轴向 X_{O} 值高于或低于 0.333

方向移动，流体中的碳含量增加， H_2O 减少。可以观察到，石墨饱和 COH 流体 ($X_o \neq 0.333$) 中碳的增加导致流体的摩尔体积相对于水最大值 ($X_o = 0.333$) 时大幅增加。这意味着，为了达到水力压裂的条件，相对于纯水，需要更少量的含碳流体。

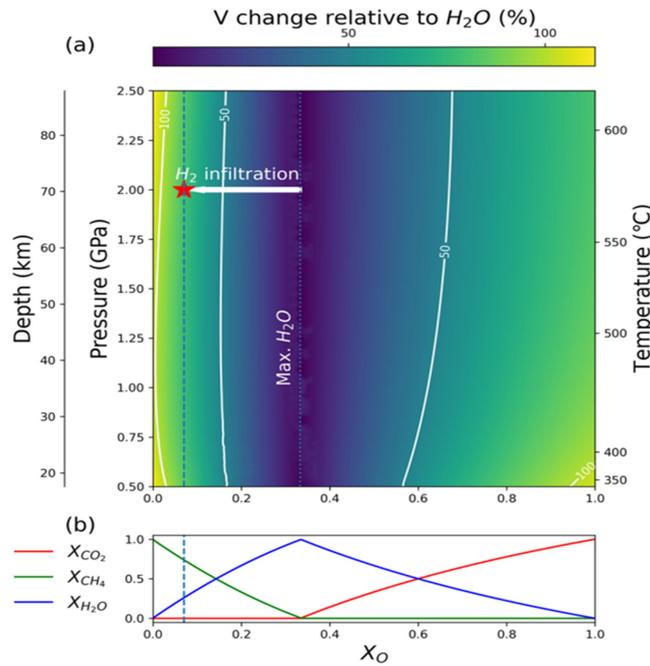


图 3 热力学模拟结果

由于 CH_4 的摩尔体积高于 H_2O ，因此，相对于纯 H_2O ，甚至水最大值下的石墨饱和流体，在岩石中观察到的富 CH_4 流体 ($X_{CH_4} = 0.65$) 达到适合水力压裂的流体超压条件需要的流体量要小得多。例如，图 3a 显示，富 CH_4 流体相对于 H_2O 流体的体积变化约为 70%，但其与天然流体包裹体估算的 X_o 值相当。图 3 还显示，相对于富 CO_2 氧化流体，富 CH_4 还原流体的石墨饱和 COH 流体的水力压裂可能性更高。此外，当围压降低时， CH_4 和 CO_2 比 H_2O 更容易膨胀。因此， CH_4 一旦进入有更多空隙的介质或围压下降时，就会膨胀并发生水力压裂。图 3 还表明，如果在减压过程中富 CH_4 的流体仍然被困在滑石片岩下方，即使流体的数量更少，流体体积的膨胀也将促进水力压裂的发生。

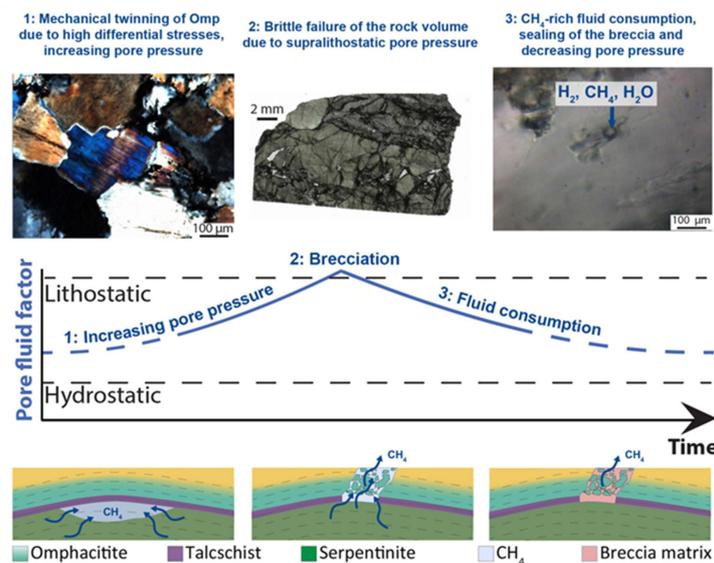


图 4 结构与孔隙压力波动的关系

综上所述，研究人员提出了 Lanzo 地块蛇纹岩内部绿辉石岩层变形的几个阶段（图 4），这些变形发生在 50 Ma 左右的阿尔卑斯俯冲期，处于榴辉岩相条件下：

（1）在低孔隙压力条件下（静水），大约几百 MPa 差应力下，在绿辉石中产生了机械双晶，反映了破裂前的载荷。

（2）富 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 流体在低渗透滑石片岩下运移富集，使孔隙压力升高至超静岩值，导致绿辉石岩脆性破裂和角化。与纯水流体相比， CH_4 的高摩尔体积更容易导致流体超压。

（3）在不平衡条件下，裂隙网络被硬玉、绿辉石、石榴子石和石墨迅速封闭。此外，角砾岩化可能与地震破裂有关。

（4）在榴辉岩相和退变质的绿片岩相条件下，角砾岩仍发生局部韧性变形，记录下了无震蠕变。

来源：Giuntoli F, Menegon L, Siron G, *et al.* Methane-hydrogen-rich fluid migration may trigger seismic failure in subduction zones at forearc depths. *Nature Communications*, 2024, 15: 480.