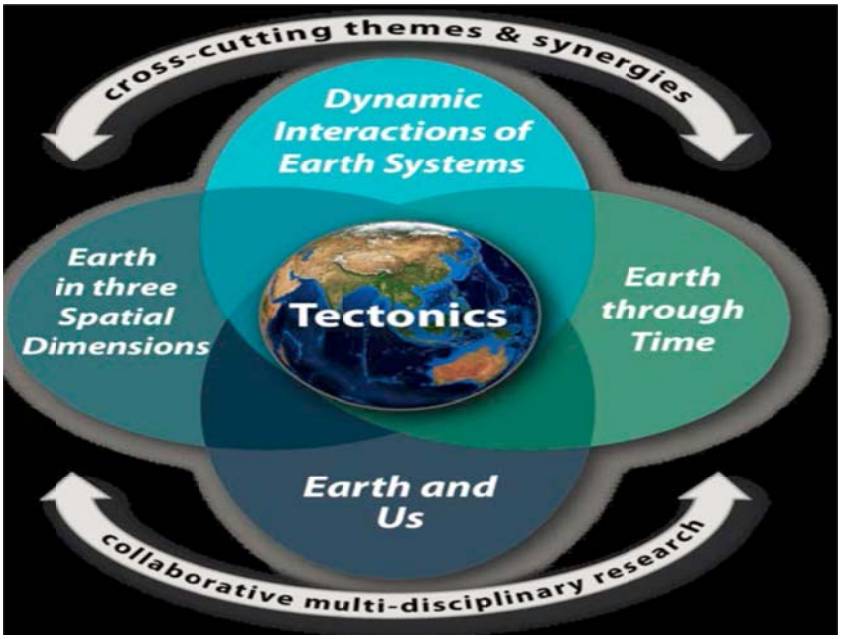
# 大地构造学研究的挑战与机遇

## ——从地质时间到人类时间尺度地球系统与变形及其过程的关系

**（呈报美国国家基金会构造学界愿景报告）**

郭安林 张进江等 译　张国伟 校




西　北　大　学　地　质　学　系
西北大学大陆动力学国家重点实验室
西北大学大陆构造协同创新中心

**2018 年 3 月**

## 译者的话

从 2016 底美国构造学界的 “CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR RESEARCH IN TECTONICS” 英文报告初稿到后来的征求意见稿直到今年的正式报告问世，我们这份 “大地构造学研究的机遇与挑战”的译稿至今已是三易其稿了。随着他们报告的完善，我们也尽力译得更加妥帖。尽管如此，由于时间的关系，现稿依然显得粗糙，有待提高的余地不小。

这一大地构造学研究的愿景报告，包含了在近年构造地质学和大地构造学研究的众多新成果的基础上，作者们精心提炼出的未来研究的崭新视角、新思维和新观念，这些内容基本归纳于五个重大挑战之中，对我们中国构造学界在已经取得的创新成果的今天继往开来具有现实意义。同时，在进一步延拓大地构造学研究时空尺度的前提下，以 4D 视角、包括流变学和数字模拟在内的新理论新方法以及新仪器的应用研究地球系统各个圈层的相互作用协同演化以及为社会大众服务方面极具启示。

此稿的第一、第四和第五重大挑战由西北大学郭安林翻译，第二、第三挑战北京大学张进江等译出，西北大学姚安平负责加工编辑，张国伟做最后通校。

译者

2018 年 3 月

# 目 录

执行总结.....1
导论.....2
1. 重大挑战#1：以四维视角认识行星演化.....3
1.1 综述.....3
1.2 地球深部岩石圈和地幔有待探索的前沿.....4
1.3 大洋岩石圈有待探索的前沿.....5
1.4 探索板块构造和宜居行星的演化.....7
1.5 探索其他星球的构造.....8
1.6 探索第四维——时间.....10
1.7 关键科学问题和推动进展的前提条件.....12
2. 重大挑战#2：认识整个岩石圈的流变学变化.....14
2.1 综述.....14
2.2 超越稳态：岩石圈的瞬时变形与流变学.....16
2.3 韧性地壳的应变速率测量：岩石圈流变学定量化研究的关键.....18
2.4 深部地壳：流变学研究的“关键”区段.....20
2.5 构造系统从浅部到深部的流变学链接.....21
2.6 关键科学问题和推动进展的前提条件.....23
3. 重大挑战#3：认识从地表到岩石圈底部的断层行为.....24
3.1 综述.....24
3.2 从破裂到造山的断层带演化的地表记录.....25
3.3 地震与慢滑的岩石记录.....27
3.4 流体-断层带相互作用的构造、地球化学和地质年代学记录.....28
3.5 模拟断层系统随时间的演化.....30
3.6 整合全岩石圈的断层带行为.....31
3.7 关键科学问题和推动进展的前提条件.....33
4. 重大挑战#4：认识地表过程与构造地质学的相互作用.....35

4.1 综述……35
4.2 链接全球地幔动力学与地表构造及地形……36
4.3 利用地表隆升与沉降的地质积累验证构造模型……38
4.4 评价气候、剥蚀与构造间预测的互馈关系……39
4.5 岩石强度对地形和剥蚀速率的控制……41
4.6 地壳应力、断层作用、化学风化和物理剥蚀的动态耦合……42
4.7 关键科学问题和推动进展的前提条件……44
5. 重大挑战#5：推进构造地质学和大地构造研究与满足社会需求……45
5.1 综述……45
5.2 向人工地震学习：俄克拉荷马流体注入实验……46
5.3 通过快速科学响应认识自然灾害：日本海沟深钻的实例……48
5.4 断层带的渗透性：理解构造-流体演化与自然资源……49
5.5 自然裂隙的年龄和形成机制：了解新发现和技术进步……51
5.6 俯冲带科学与可恢复社会……54
5.7 从科学研究到降低灾害风险……56
5.8 保障进取的要求……58

# 大地构造学研究的挑战与机遇

## ——从地质时间到人类时间尺度地球系统与变形及其过程的关系

Writing Committee Co-Chairs: Katharine W. Huntington, Keith A. Klepeis
Organizing Committee: Basil Tikoff, Yvette Kuiper, Laurel Goodwin
Workshop Committee: Richard Allmendinger, Marin Clark, Eric Cowgill, Becky Dorsey, Kevin Mahan and James Spotila

## 执行（项目）总结

地球科学中大地构造学是最具交叉学科性质的领域。包含实验、观察和理论诸方面，大地构造学聚焦于多时空维度中演化的地球和行星系统各个部分的之间的相互作用。这些相互作用的结果，如从地震、火山爆发、海啸和滑坡到水、矿产资源能源，均有一个重大的人类社会效应。因此，除过更深刻的理解行星动力学外，大地构造学的研究日复一日地解决着对人类社会至关重要的问题。大地构造学的“纯科学”和“应用驱动”之间界线正在迅速变得模糊，重新考虑作为地质科学一个领域的传统大地构造学定义和在 21 世纪重构其定义的时机已经成熟。在重新规划过程中，我们有幸可以去确定新涌现的机遇，确定突破性研究所需的关键技术和基础设施。

为期一年半、在学界召开的关于未来研究机遇的讨论，确定了指导构造地质学未来十年或更久时间内研究方向的五个“重大挑战”：

- 从四维视角认识行星演化
- 认识整个岩石圈的流变学变化
- 认识从地表到岩石圈底部的断层行为
- 认识地表过程与构造地质的相互作用
- 推进构造地质学和大地构造研究与满足社会需求

本学界愿景报告，将超越我们现今对从地表观测到的过程的认识，将从四维角度对行星系统演化进行探索：从纳米到全球的空间三维尺度，从秒到数十亿年的四维时间尺度。

在地球上，我们的全球构造研究将地核、地幔、软流圈、岩石圈、水圈、冰

冻圈、大气圈和生物圈视为一个整合系统的组成部分，并对各组分之间的相互作用进行研究。地表连接着固体地球、大气圈和生物圈，因而构造与地表过程间相互作用的研究使我们有能力探讨 21 世纪新构造地质学中广泛的交叉问题。固体地球的变形是这些相互作用的驱动器，所以关键是定量表示岩石力学性质（如岩石流变学）如何通过影响变形过程而影响地球的物理和化学演化。大尺度变形样式大多取决于断层带，断层带以震源著称，它们呈现出了广谱的滑动行为并制约着地下流体的流动。对于整个岩石圈，新的研究手段使我们能够对流体、断层滑动行为、断层结构的形成和地壳强度间的相互作用与互馈关系进行定量化，并将其广泛应用于人类社会的资源利用和构造灾害的修复。对构造与人类社会相互作用研究的强烈需求已远远超越了地震与石油。我们对基础知识的需求为灾害评价、关键能源、水和环境资源的可持续管理提供了基础。同时，有关灾害和资源的挑战所驱动的应用研究也对基础构造地质学研究具有巨大的潜在驱动力。

为了能够在这些挑战上取得实质进展，我们认为基金委地学部应该探索构造地质学新的资助方式并重新评价现有的资助优先权。特别是，构造地质学未来十年几个最为振奋人心的研究焦点需要以联盟方式，通过多学科科学家的广泛合作。这些科学家不仅来自于由传统构造地质学项目资助的科学家，也不仅仅来自于个体研究人员。挑战的成功需要在新的分析、观测方法技术上的投资，需要先进的数字数据共享和获取的战略，以及支持由个体短期研究项目向持续资助多元研究联盟的构造地质学研究转换的新的基础设施。

## 导 言

构造地质学领域研究的是，地球系统在过去数十亿年地球历史中与变形和生命发生链接的过程。作为一门整合的地质科学，构造地质学提供了一个链接运行于固体地球和水圈、大气圈和生物圈内各个过程的知识网络。构造过程通过对地球地貌、大气和气候的塑造、通过产生自然资源和自然灾害而影响到我们星球上的每一个人。作为一门学科，构造地质学极具多样性：它将地质学、生物学、物理学、化学、工程、计算机模拟和材料科学等领域的、使用不同研究方法与手段的科学家召集在一起。在这样广阔的前景下，构造地质学研究将使我们能够通过理解行星的深时空演化，从而提高我们对自然世界的认识，并为人类社会提供关键福祉。（略）

# 1. 重大挑战#1 以四维视角理解行星演化

## 1.1 综述

地球上大的令人难以置信的部分依然是尚未研究的处女地。尽管每天行走在地球上，我们的经验却仅仅局限于地表和当下。然而，随着诸多新方法的问世，我们进入了一个跨学科探索地球的新纪元，将地核、地幔、软流圈、岩石圈、水圈、冰冻圈、大气圈和生物圈视作一个集成系统的组成，于是时空的深度延伸正在成为研究的焦点。探索的目标是以4维视角去理解行星系统演化：在以纳米—全球规模的三维空间尺度之上与第四维—从秒到数十亿年的时间尺度交叉。

我们提供以下5个有待探索的前沿例子，都是反映构造学界在学界数据组、分析技术和知识途径新近发展的条件下以新的姿态准备朝着上述目标进军的相关方面。我们的星球深部探索获得了地震层析技术进步的帮助，其极有利我们将近地表变形与地幔和地壳的内部动力学联系起来(1.2)。洋底和大洋岩石圈及洋壳的构造和大地构造学探索超越了板块相互作用和洋底火山作用的经典研究，而致力解决矿产资源、自然灾害以及生物化学循环(1.3)。对早期地球动力学的探索已经将我们注意力带至前板块时代，当时大陆生长过程和行星分异是重头戏，这使得我们可能加深对板块构造如何在石质星球上诞生、大气圈、冰冻圈和水圈的起源以及宜居环境如何浮现和保持它的宜居性的理解(1.4)。这些转化之间的研究兴许可以从探索其它星球（例如火星和金星）的构造演化得到启示，因为那些星球很可能经历了与地球相似的发展阶段只是它们后来分道扬镳（ 1.5)。在所有这些努力中，时间作为第四维提供了一个理解演化过程的基本格架，提示我们需要探索如何能够精准地通过同位素地质年代学和热年代学重建行星演化的节律（1.6）。

这些例子强调了现代大地构造学研究的跨学科性质。它们显示了许多使得大地构造学各个领域的研究成为可能的新技术和先进理念源自大地构造和构造地质传统学科框架之外。诸如此类的构造研究领域得到共识是未来的科学进步一定通过对特殊问题具有相同兴趣而走到一起的科学家来推动，而不是依靠他们各自受到的训练和专长（1.7）。依靠此类团队的发展和对此种合作和跨学科工作更加有效的资助政策，大地构造学正在蓄势待发变成真正的全球性的地质科学。

## 1.2 地球岩石圈深部以及地幔有待探索的前沿

地球深部岩石圈和地幔代表着我们星球上一个广大无比的有待探索的区域。新的层析成像模型预示了通过地质、地球物理和地球动力学数据的融合直接地将地表地质与地球深部构造联系起来的令人激动的机遇。

地球深部岩石圈和地幔代表着地球上尚未探索的区域。了解这一区域组成的渠道一直局限于深部折返而暴露地表的地体或者深部地壳宽频地震影像所反映的区块；因此，不管板块构造发展的伟大成就，地球表面的构造重建缺少来自地球大部分体量的信息贡献。最近影像技术的进步为我们打开了这些先前隐蔽的区域，新的地震技术显示了众多存在于核-幔边界之上俯冲板片的构造细节—正如新的地震层析模型创造了构造地质和大地构造学界与地球物理学家在直接将造山系统地表构造记录与深部岩石圈和地幔的构造地震学相联系的努力中联手的良机。板块构造、洋盆和大陆区域构造以及地球动力学的重大发现无疑是此类合作的结果。完全开发这些丰富的影像学资源需要改善和提高填图、分析和处理 3D 层析图像中地质构造影像以及综合其它地质、地球物理资料和概念的能力。

具有这类数据的大洋和大陆地区已经取得了惊人的发现。最近一个地幔俯冲板块的地震层析图像编录包含了大约 100 个主要的板片，它们一起代表了接近 200-250Ma 间(这些板片沉入核-幔边界的所需时间段)的俯冲历史。其中许多板片能够在三维系统中被勾画出来并通过变形恢复（retrodeformation）进行板块重建（Wu et al., 2016）。例如，一个向北美之下俯冲的古板块--法拉隆（Falallon）板块的重建说明了岩石圈中究竟多深的构造过程可以驱使大陆的地表像阿巴拉契亚山脉在造山作用停止后 200 多百万年发生隆升和形成起伏的地形 (例如，Gallen et al., 2013)。最近地球动力学模拟的一系列突破揭示了有潜力的“发现空间”的广大区域 (Crameri et al., 2012)，那里俯冲板片（图 1-1，浅蓝色）被逐渐增强的分辨率勾画出来。其地球动力学模型表明，与地表数据组密切相关的板片运动学提供了重建地球表面板块构造历史的新机遇。这一工作需要对我们先前自认为理解很好的过程诸如海底扩张、大陆漂移、被动边缘沉陷/热史、单-双向俯冲、俯冲起始、海底磁条带解释以及弧前-弧后构造进行仔细甄别。

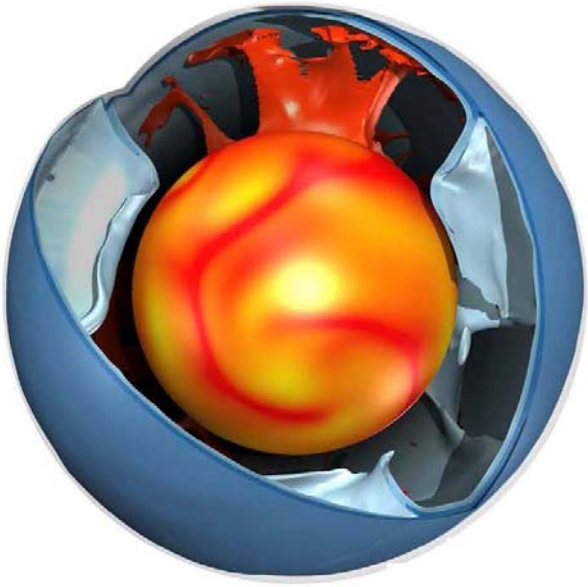


图 1-1 大洋板块向地核沉降的数字模型

大洋和大陆环境中，有许多东西需要通过地质学-地球物理-地球动力学结合的方式以及全球构造的视野来了解。在浅部地壳，地震方法正在给出惊人的、带有直接构造启示的新观察。一个利用宽频地震获得新发现的例子是位于中安第斯岩浆弧之下厚约 11km 低速带的 Altiplano-Puna 岩浆体 (APMB，Ward et al., 2014)。它被解释为大约 500,000 立方千米的糊状岩浆体（图 1-2），空间上与地表的破火山口、体积巨大的晚中新统-更新统熔结凝灰岩中心以及继续膨胀地表地区（图 1-2 中的轮廓线，Pritchard and Simons, 2004）相关，指示该地区依然代表了岩浆弧的活动部分。高分辨率刻画像法拉隆板块以及 APMB 特征的能力向外界宣示，将世界上地质、地球物理和地球动力学数据组融合起来、以前所未有的细度直接地联系地表地质与深部构造的机会正在呈现。

## 1.3 大洋岩石圈有待探索的前沿

利用最新的海洋地质和地球物理手段进行的大洋洋盆的新近探索赢得了一系列表现为以岩石圈尺度运行的构造过程的发现。这些结果迫使我们拷问过去的信条并且暗示了加深对我们星球构造和动力学行为理解的“超越大陆”探索的巨大潜力。

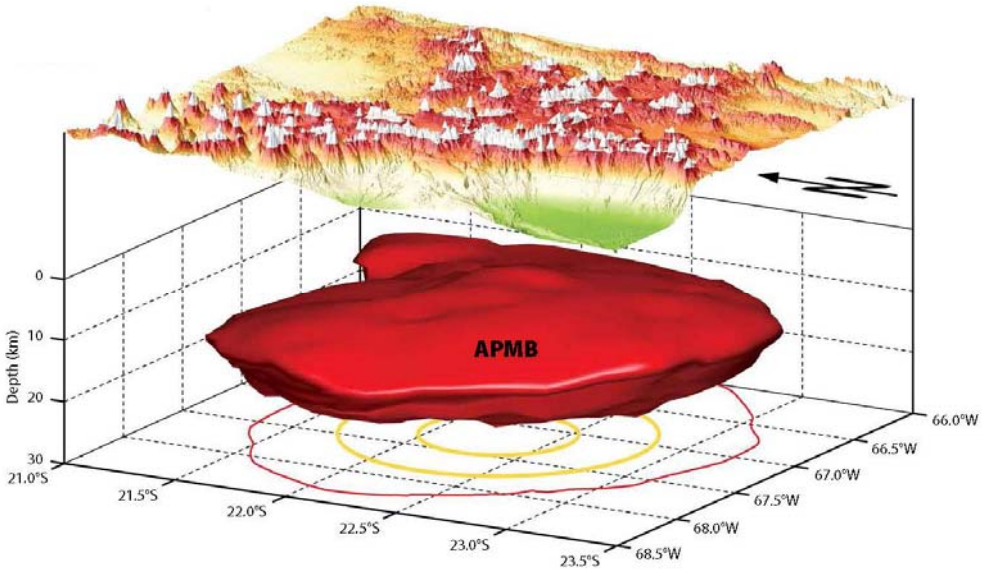



图 1-2　中央安第斯山脉地形之下的 Altiplano-Puna 岩浆体（APMB）宽频地震影像。2.9km/s 速度等值线的 3D 面推定出该岩浆体的体积

地球的洋盆大约占我们星球表面的2/3，然而对这些区域的大部分依然缺乏认知。在过去的10年期间，海洋地质和地球物理手段的进步发现了揭示以岩石圈尺度运作的构造过程，这些发现引起我们重新审视以往的信条。例如，一个从洋中脊到海沟的完整大洋板块的地震特征给出了新的有关大洋岩石圈断层作用和水合作用的信息(Horning et al., 2016)。从传统以陆地为基础的和新的海底地震和大地测量手段所获取的数据调整了我们对断层滑动行为 (Schurr et al., 2014)以及横跨震生带板块解锁（unlocking）过程的理解。这些数据以及其它数据组提供了相对于地壳运动的地幔流、深部岩石圈流变学以及水合作用怎样影响岩石圈强度和行为的见解。

由于海底采样和观察技术的改善，其它创新和发现的前沿已经出现。海底仪器网络和光纤电缆促成了海底火山喷发的实时观测(Wilcock et al., 2016)，包括岩浆的充注和喷发过程的地球物理、地球化学和地质观察。采样和地球化学分析显示，在古代的剥露环境以及现今的大洋环境下(Reston, 2009)，地幔岩石可以被暴露于海底。这些环境包括从大洋核杂岩(Whitney et al., 2012) 到印度尼西亚外海海面之下7千米，那里地幔岩石圈受到地球上最大断层之一的班达滑脱断层（the Banda detachment，图1-3，Pownall et al., 2016）之上的超伸地壳（hyperextending crust）的掘起。

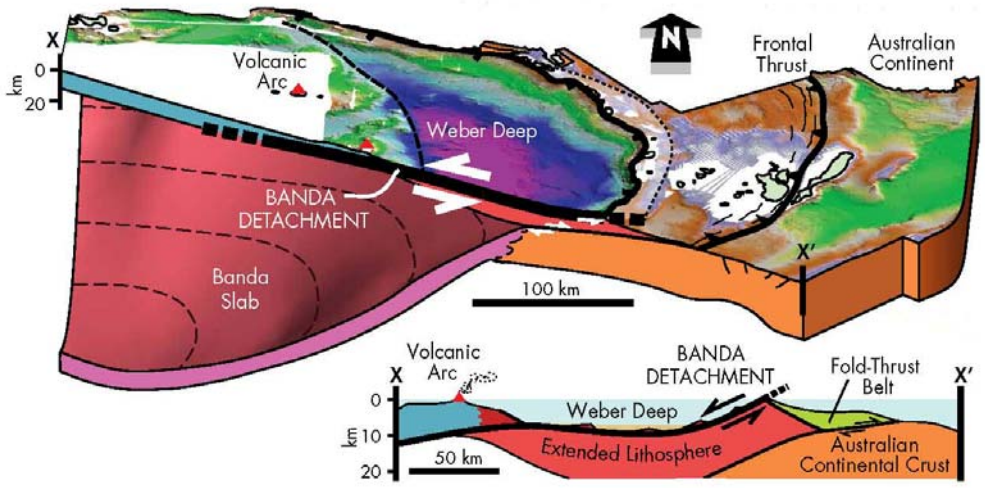



图1-3　班达拆离断层在印度尼西亚公海海平面之下7公里处暴露出地幔岩
上图：东班达弧的块体图，X-X'为一平行断层面擦痕的剖面并且代表板片回滚的推断方向。
下图：班达拆离断层（垂向上2倍夸大）以及大陆异地体（深红色）的放大图

现在我们理解了有地幔暴露的海水和热液蚀变影响着全球地球化学循环和行星宜居性。这一构造活动形成矿的聚集，支持了初始的微生物群，或许代表了早期地球和其它太阳系星球盛极一时的过程的类似情况，并暗示了加深对我们星球构造和动力学行为和演化以及生命的理解的“超越大陆”探索潜力。

## 1.4 探索板块构造和宜居行星的演化

地球早期阶段完全不同于它的今天。探索地球遥远的过去以及向今天我们居住的地球的过渡是理解板块构造如何出现于石质行星，大气圈、冰冻圈和水圈以及宜居星球如何出现和持续的关键。

我们许多有关地球演化的理解被我们对今天板块构造如何运作的理念所规范。这一思维的框架包括了如下的观察即岩石圈破裂为许多刚性的板块和微板块、由于强硬致密的大洋板块在俯冲带的沉陷和地幔对流驱动引起这些块体相互作用和运动。然而，越来越清楚的是在我们的太阳系，只有地球有板块构造。众所周知早期地球构造和岩浆活动非常活跃，但不清楚何时板块构造起始、如何起始以及前板块时代地球的构造型式是什么。先于至少40亿年前和多半接近现今之时，地球上的构造仅为垂直热传递所驱动，没有大洋岩石圈的俯冲带循环(Moore and Webb, 2013; Johnson et al., 2017)。老于30亿年的太古代地壳残留提供了被排除在现代板块构造领域之外的构造过程的证据，用以撩逗人们。这些证据包括惟一的穹脊地壳构造的形成以及克拉通之下坚硬具有浮力的地幔根。多半由于熔体的化学亏损和从原始地幔的析出，这些特征表现了不同的成分和物理性质。为了

理解对我们行星至关重要的这些及许多其它演化特征，我们必须确定向板块构造的转化如何、为何和何时出现 (Korenaga, 2013; 外推的时间由黑色的箭头表示，时间尺度见图1-4)。

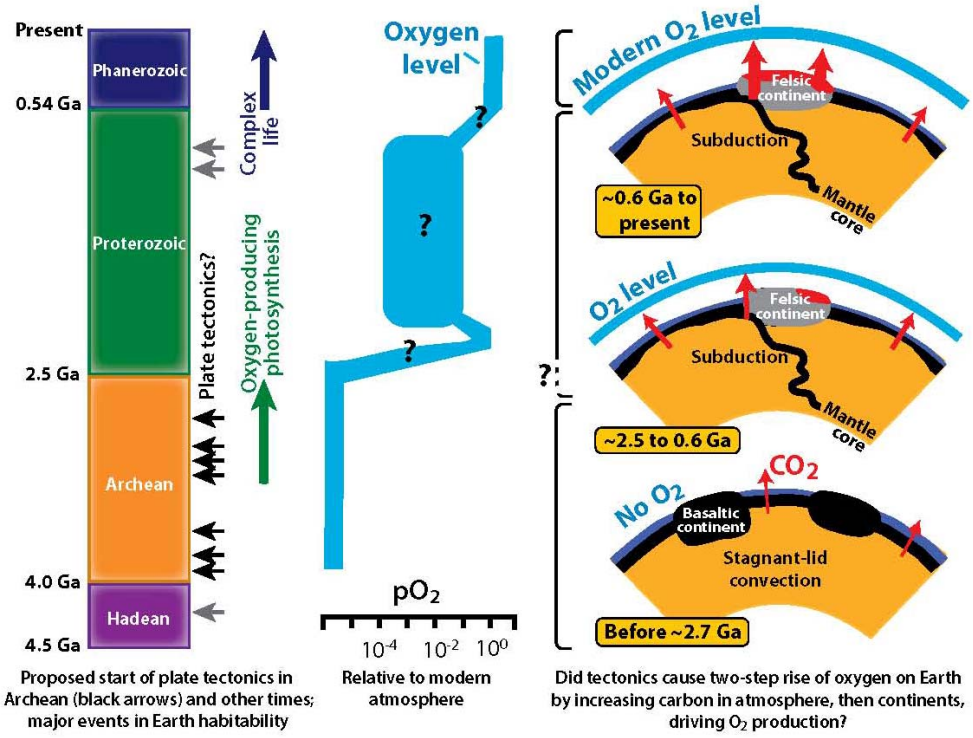



图1-4　地球上板块构造与大气圈氧增加的可能联系

尽管冥古宙地球的残留物极其有限，但这些残留物的研究不仅对于我们理解板块构造的演化而且对于地球大气圈的形成和生命的起源极为关键(Harris and Bédard,2014)。有趣的地球化学结果和模型建议太古代板块构造的起始和俯冲先于25亿年之前，其可能引起了地球上大气圈氧气的首次增加--随着演进的构造过程和速率造成$CO_2$的积累以及氧气10亿年后的二次增加，这些与显生宙随时间复杂化的生命演化相吻合(例如 Lee et al., 2016; 图1-4)。类似的结果凸显了融合地质和地球化学证据并结合模型通过深时研究大气圈-构造联系以及更好地理解行星地球宜居性的演化的机遇。

## 1.5 探索其它星球的构造

当岩石圈通过板块构造的循环限制了可资利用的早期地球的记录，太阳系其它星球保存了可以作为我们行星早期历史的参照物的特征。开发利用这些共性去加深对早期地球和其它星球的理解需要精细的地球动力学模拟、遥感和最终地外

星球的野外地质的融合。

我们太阳系多姿多彩的行星和卫星园地表现了部分与地球的惊人相似，但没有完全一样的构造样式。岩石圈板块构造的循环限制了早期地球可用的岩石记录，而太阳系内其它的星球保存的特征可以作为我们行星早期历史的借鉴。例如，月球可以作为小行星和流星撞击影响表面过程以及太阳系包括地球局部构造的见证。金星上可见的构造特征也与地球太古代的那些构造出奇相似。比如，图-5金星上的Tellus Tessera 区域与西澳的皮尔巴拉省（Pilbara Province）都由变形的但被剪切带（图1-5中的点线）分割的粘滞一起的块体组成。晚期的单元无论是金星的火山高原还是地球上的沉积盖层，并未显示相似的组构特征，证明了两者后来经历了不同构造体制的变化。

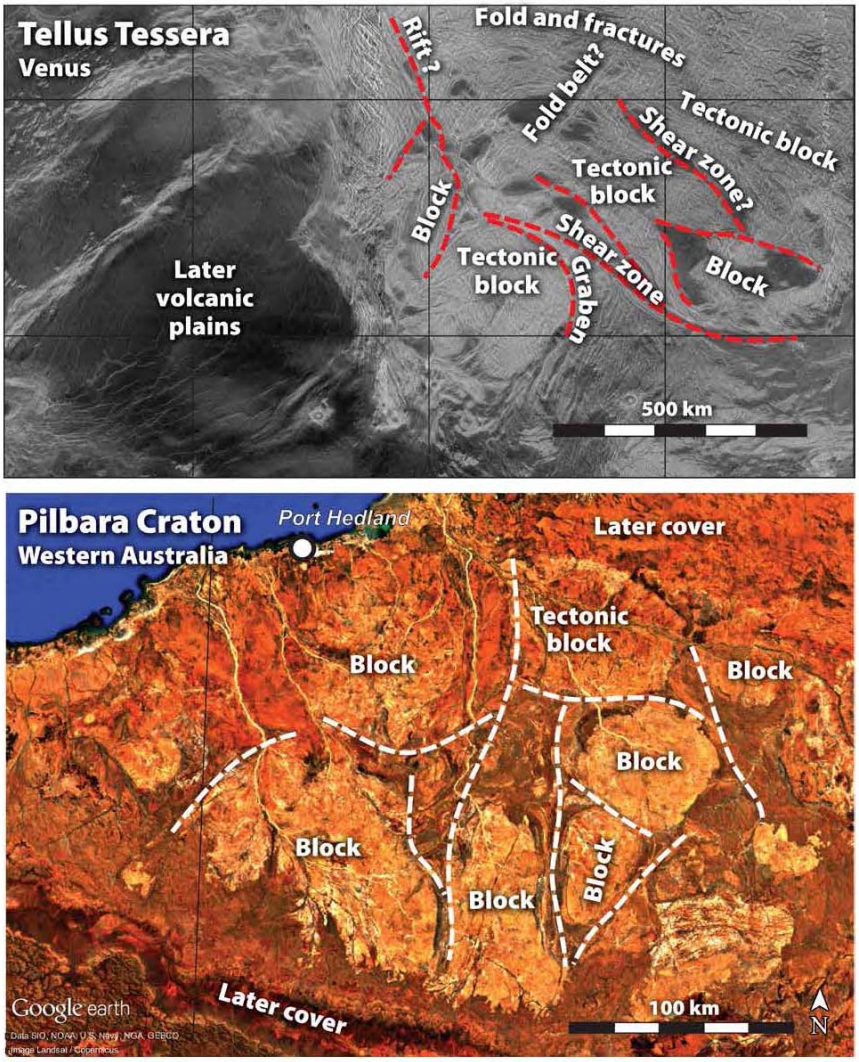



图1-5　金星可见的构造特征（上图）与地球上太古代形成的构造（下图）惊人相似

冰冻星球的构造过程，诸如木卫三Europa以及外侧太阳系的星球，可能享有地球上板块构造的动力学和运动学的一些特征，尽管它们的“板块”是一些碎裂的冰壳并且它们之间的相互作用的驱动力可能是冰下温暖的对流 (Kattenhorn and Prockter, 2014)。对于地球和其它的类地行星，最为关键的挑战是如何理解它们第一个10亿年历史的构造方式，这一时间段内构造活跃增加程度是可盼的，但其间地球上由于板块构造其它星球因为频繁的流星轰击几乎没有记录留存。地球动力学模拟、遥感和最终由机器人或者航天员执行的野外工作地质必须融合在一起去探索太阳系诸星球普遍的特征和过程，以此加深我们对早期地球和其它星球的构造理解。

### 1.6 探索第四维——时间

我们对所有构造规律和过程的理解实际上依赖于在数十亿年到若干分之一秒尺度构造事件的时间和节律准确把握的能力。已经成熟的和正在出现的地质定时钟技术的改善使得构造学界以新的姿态去赢得更大的进步，其允许研究者直接测定更宽范围的变形特征并且将不同时间和时间尺度出现的过程以新的方式联系起来。

时间是地质科学中至关重要的结构法则之一，对于大地构造更是如此。其中我们对于地球动力学过程、大气圈和生物圈之间相互作用理解的质量依赖于我们对于这些过程的时间和节律把控的质量。很幸运，我们正处在一个仪器测量和定年技术飞速发展的时代从事地球科学研究。基金会资助的地球时间计划（Earthtime initiative），例如，被设计用以提高整个地质历史时期$^{40}Ar/^{39}Ar$和U/Pb实验室测定重现率水平至0.1%或更低，这一目标，从深时(例如 Praveen et al., 2016)到人类时间(例如，Hutchison et al., 2016)尺度上，足以给我们对有关过程和构造范围的相互作用的时间理解充实更多的信息。

从未有的改善了的定年和（变形）速率测定的精度和准确度以及对新的和越发趋小的对象的测定手段正在打开未知的领域并且给本报告中罗列的科学问题提供见解。变形速率的地质年代学约束对于基于野外的流变学估计是最根本的，而流变学是在所有尺度上控制变形过程的地球物质的性质之一(重大挑战 #2)。由于地质年代学和热年代学的一套测年方法(重大挑战 #2, #3, #4) 的应用使得从露头到板块尺度联系地表过程与深部地球过程变为可能，这些方法中的许多是最近15年内发展起来的（图1-6）和/或者被显微分析技术及矿物非均质性填图

（mapping，例如图7，锆石环带的阴极发光图谱(顶)和辐射损伤变化的拉曼光谱（底））强化的。例如，分析和理论的进步能够使我们推测前陆盆地、活动冲积扇和冰川沉积物的源区—以及那些源区的剥蚀历史，以便给我们创造将造山作用和造山过程中分散的沉积物联系起来的机会（Wang et al., 2014）。在区域规模上，来自多个时间-依存的热和运动学模型定年方法的热年代学数据已经赋予我们以4维的视角重建造山楔构造演化(例如，McQuarrie和Ehlers, 2015; 图1-6、图1-7) 以及理解山区地貌景观的演化(Fox et al., 2015)。目前，诸如断层泥的K/Ar法测年(Haines 和 van der Pluijm, 2008) 和矿化断层带中方解石的U/Pb测年(Roberts and Walker, 2016) 允许脆性变形特征的直接定年，类似于利用先进的显微分析技术在岩相学研究中的定年来确定韧性变形构造的时间(Mottram et al., 2015)。这一进步是研究断层带行为（重大挑战#3）及其对人类社会影响（重大挑战#5）的革命性变革。这些仅仅是已有的和正在出现的地质定年方法的改善如何使得构造学界取得的从显微镜到全球的物理尺度和地质到人类的时间尺度的构造过程理解的重大进步的例子。

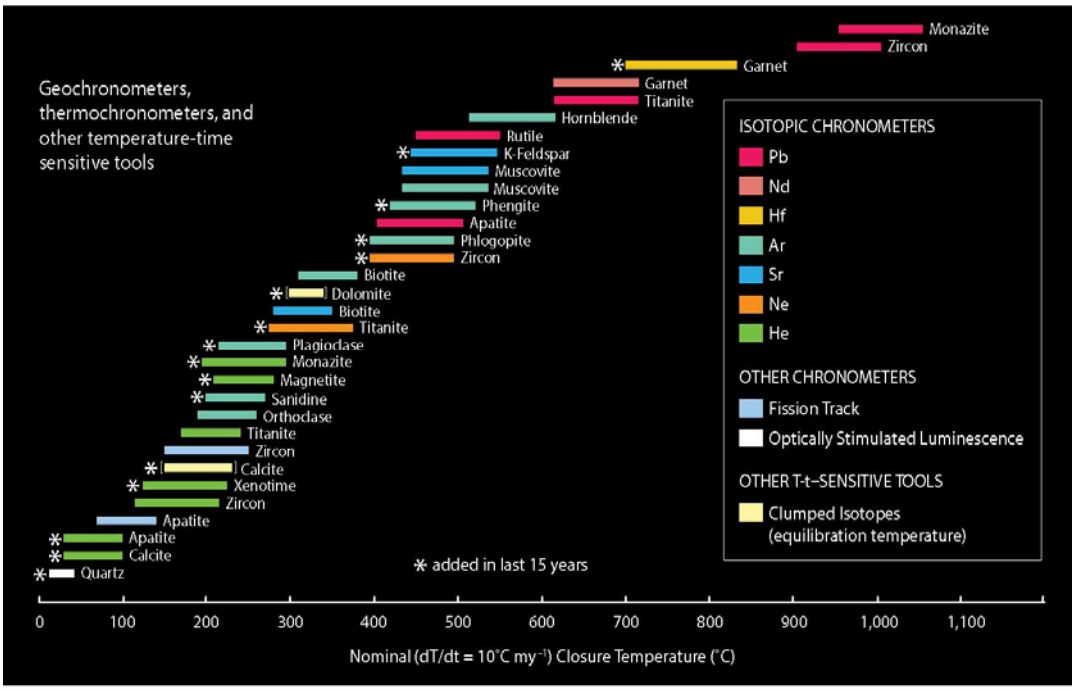



图1-6　大尺度范围的地质年代测年、热测年以及其他温度-时间相关的敏感仪器的出现突现了过去15年的进步

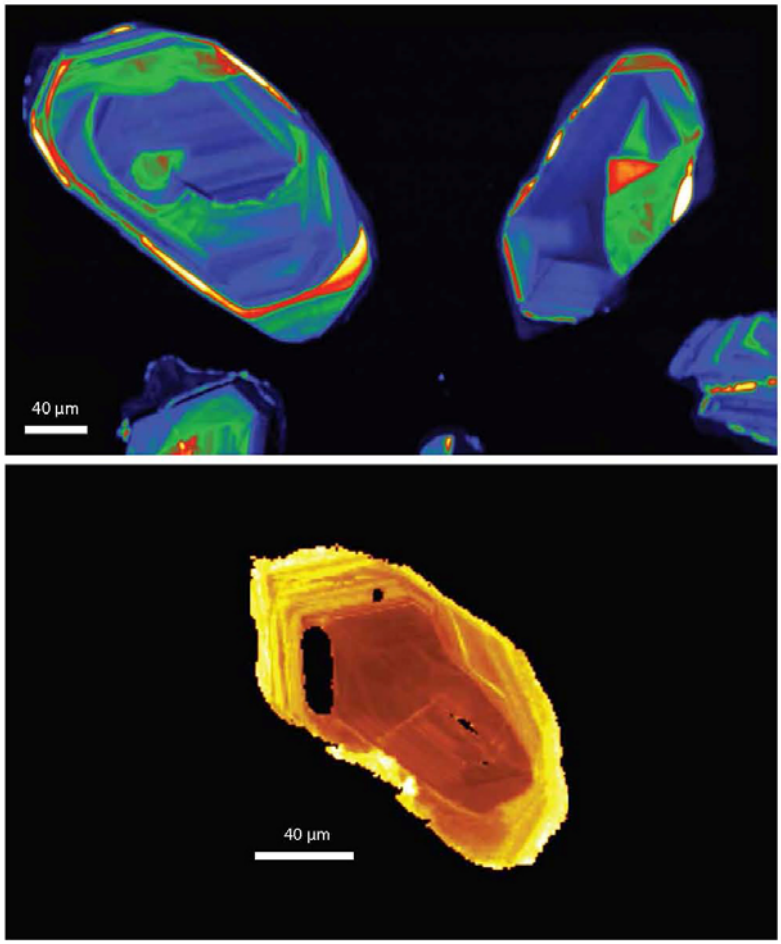



图1-7　阴极发光的电子缩微图像（上图）和锆石内部的放射性损伤（下图）

## 1.7 推动进步的关键问题和需求

**关键问题包括：**

- 大陆是怎样形成的，它如何能够数十亿年以来一直保持构造过程和相互作用的记录？
- 板块构造何时和怎样在地球上出现，在地球的大气圈、冰冻圈、水圈和生物圈的起源和发展中构造过程的作用是什么？
- 类似洋中脊扩张作用、造山作用和俯冲作用的构造过程在改变地表系统与地球内部之间挥发分、碳和有机物长期流量上的角色是什么？
- 什么过程和机制管控岩石圈的板块行为和向软流圈和地球深部的过渡？
- 大陆和大洋岩石圈板块内部为什么和怎样变形，这种行为如何与板缘变形相关？

- 大陆与大洋构造如何联系？
- 什么过程和机制控制着其他类地行星和冰盖（icy）卫星的构造？
- 构造过程的速率如何随时间变化以及随时间尺度变化？

**保障进步的需求：**

- 促进地学不同分支领域的合作和数据整合以求解决全球构造问题。
- 利用一整套的地质、地球物理和地球化学的手段推进地球遥远过去、地表系统、地球深部、大洋和大陆岩石圈的研究。
- 加强利用数字地质动力学模型去模拟极大地不同于现今地球的构造条件。例如早期地球和太阳系的其它星体的构造条件。
- 促进支持空间研究与传统上支持构造地质学和大地构造学研究的拨款部门的互动，去发展非地（球）星体的地质研究。
- 继续推动高精度地质年代学的更广泛使用，包括：

  1） 对于断层/剪切带在岩石圈各种不同水平的运动速率约束的方法设计；

  2） 定量化变形中的变质作用反应速率（或者反之）以及准确的P-T-t轨迹；

  3） 定量化地表折返、隆升和暴露的速率；

  4） 确定与生物变化研究、社会关注的构造地质和大地构造问题包括构造灾害和资源的新近/短期时间尺度的日期和速率。

## 2. 重大挑战#2 认识整个岩石圈的流变学变化

### 2.1 综述：

构造地质学最重要的长期目标之一，就是建立一个用于定量描述固体地球变形的概念性框架。对变形的更深入了解至关重要，这不仅是因为变形决定了我们星球从微秒到数十亿年不同时间尺度的演进，还因为它可以通过无数的途径而直接冲击我们的社会，其中包括地震、火山爆发、地貌变迁以及自然资源的形成等。我们面临的挑战是：对岩石力学性质（即岩石流变学）的定量化；认识流变学如何通过变形过程控制固体地球的物理与化学演化。变形的各个方面——不论是由缓慢板块运动导致的造山作用、还是冰盖融化引发的地表回弹、抑或是补充火山的岩浆上涌和地震断层的准瞬时运动——都取决于变形岩石的流变学。

尽管已经数十年的研究，我们对变形岩石圈不同圈层间相互作用的认识仍处在初始阶段。究其原因就是影响岩石流变学的变量太多，包括岩石的内在性质（矿物组成、粒度、流体化学与含量）和外部因素（温度、深度、应力及应变速率）。图 2-1 是物理实验结果所确定的变形机制，其中矿物（此为橄榄石）通过变形机制而成为了这些变量的方程（e.g., Warren and Hirth, 2006）。这些数据可以被用于建立既可被自然世界检验，又可通过实验进一步改善的流动定律（本构方程）。而该图的复杂性也凸显了在将实验结果应用于岩石圈时所面临的挑战，因为岩石圈内的应力、应变速率、岩石组成、地壳结构、温度及其他因素一般都没有很好地被确定，并在单一个变形过程中发生变化。构造地质学界的首要任务之一就是降低这些不确定性，从而更准确与精确地预测构造过程。

近年来的研究已为突破做好了准备，部分原因在于近年来在仪器设备及计算能力上的进步，另一重要原因是原来各自独立的研究团队（e.g., Talbot, 1999）已经开始以新的途径进行合作与数据共享。在最近 15 年，许多用于研究岩石流变学的新工具和新方法被研制出来，其中包括地震滑动速率下断层面的剪切模拟（图 2-2）、及其他在下文中将要展示的事例中所获得的进展。这些进展，结合增强的实验数据与野外观测及数值模拟结果的融合能力，已使我们处在了进一步认识、解释和预测固体地球内部运动的分水岭。

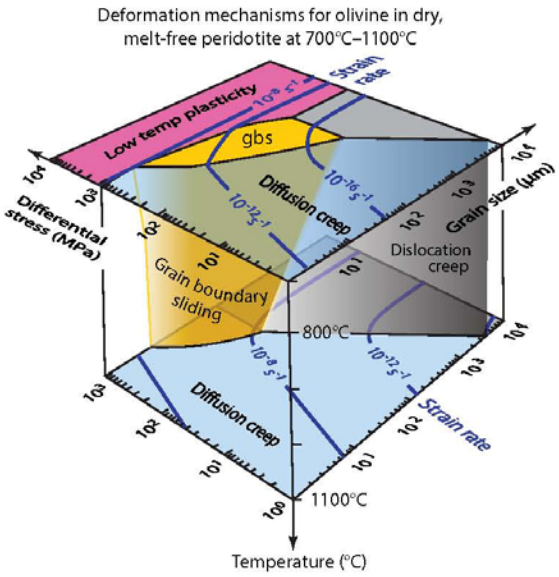



图 2-1　物理实验约束常见矿物（此处是橄榄石）的变形机理

图 2-2　罗马国家地球物理和火山学研究所利用 SHIVA 从事高应变率的摩擦熔融实验

在这里，我们介绍四个研究实例，它们取得了指向目标的显著进展。数十年来，尽管我们已概念性地意识到了岩石的变形和物理性质都具有高度的瞬变性，但我们仍然依赖于简单的、稳态的应力-应变关系描述。但是现在，我们已经具备了融合岩石记录、实验和模拟数据，超越稳态的简单化假设，实现对瞬时变形、短期变形中固体地球的行为进行定量化的能力（见 2.2），　这样的进展将有助于我们理解慢地震、变形诱发的热液和岩浆流动等形形色色的现象。而测量应变速率的新方法正在帮助我们定量化表达岩石圈流变学对构造运动的控制，包括变形局部化的位置与方式（见 2.3）。2.4 介绍深部地壳为何将成为未来流变学研究的

关键目标，其原因是我们已在变形-变质相互作用方面取得了进展。最后一个例子（2.5）强调了探索岩石圈不同深度过程间的垂向链接的重要性，从而有助于更好地认识板块边界、造山带及其他构造系统的演化。在所有的实例中都可以看出，对来自岩石记录、地球物理观测、显微构造分析、变形实验及数值模拟等多元数据的整合能力，这为研究大陆与大洋岩石圈流变学变化提供了良好的前景（见第 6 节）。

## 2.2 超越稳态：岩石圈的瞬时变形与流变

在长期变形事件中发生短期变形是诸多地球过程的特征，如地壳与地幔中的震后应力松弛、变形引发的岩浆与热液流动、地震触发事件等。认识 “瞬时”变形及其与岩石流变学的关系依赖于对变形实验、数值模拟和岩石记录信息的整合（融合）。

地球岩石圈的流变学对变形速率和时间高度敏感，更多的地球过程是瞬时的或是相对短命的，它们是对较长期构造与气候作用的响应。瞬时过程包括震后应力松弛、变形引发的岩浆与热液流动、地震触发，以及地震超级旋回的驱动因素等。冰川退化引发上地幔千年尺度的粘弹性回跳早已为人所知，但近年来也报道了大地震对下地壳和上地幔所产生的数十到千年尺度的影响（e.g., Freed et al., 2012）。在更短的时间尺度上，对俯冲带和走滑断层每年的观测则揭示了慢地震的存在，它们以每天数公里的破裂速度扩展，通常伴有低频地震以及非火山震颤造成的微弱震动。特别是在一次地震的微秒尺度内，瞬时变形甚至是起着主导作用，此时的摩擦系数是动态的并对滑动速度高度敏感。这些观测展示了一个令人振奋的非稳态变形谱系，这些非稳态变形都会在岩石圈演化中产生长期效果（图 2-3；Thatcher and Pollitz, 2008）。

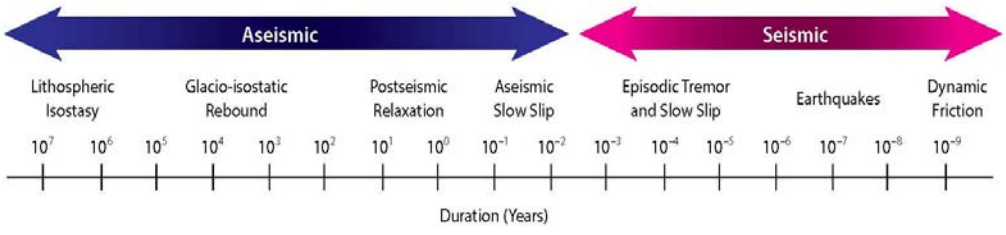



图 2-3　与瞬间变形相伴的事件及其过程

在这一非稳态变形谱系中，大地测量、地震及地质观测正在揭示出更多新的偏离稳态概念的变形行为。1999 年加利福尼亚 Hector Mine 地震后连续 7 年的

GPS 观测发现，震后早期的快速位移很难与稳态地幔流动率匹配（e.g., Freed et al., 2010）；而恰恰在经典定义的孕震带以外，人民在从近地表环境到地球深部的岩石记录韧性剪切带中记录的摩擦产生的熔体中都发现了瞬时变形的证据，例如在韧性流动主导的地壳深部（如 20-40 km），发现了由高速滑动产生的熔体（假熔岩；White, 2012; Regan et al., 2014; 图 2-4）。这些新发现促使构造地质学界通过“解密”地球岩石圈的流变学而“超越”稳态。关键的未解决的科学问题包括：什么样的构造环境和条件使瞬时流变学偏离稳态公式？我们怎样对这些行为进行定量化？我们怎样在岩石记录中识别瞬时过程的特征？

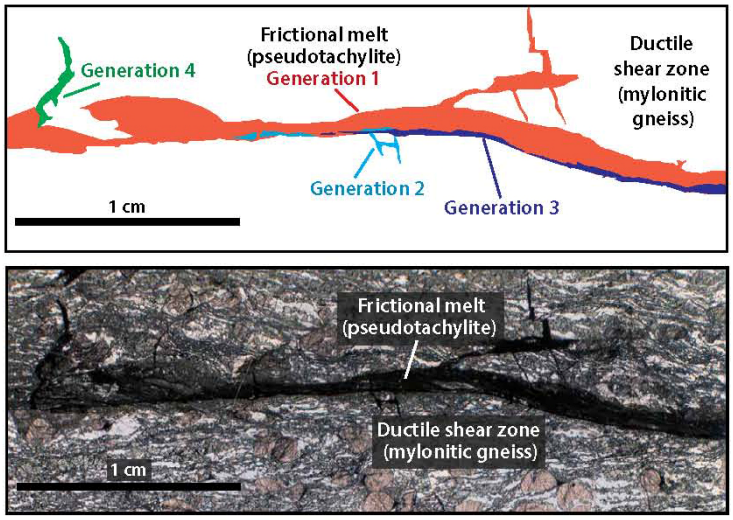



图 2-4　韧性剪切带的摩擦熔融记录了数次地震的发生

其他最新的研究表明，理解瞬时变形及其与岩石流变学关系依赖于对来自于变形实验、数值模拟和岩石记录等不同源数据的整合（融合）。变形实验提供了地球物质力学性质的定量信息，以及特有的对微观物理机制的深入观察。然而，为了能全面了解天然变形的复杂性，我们还必须充分利用岩石记录，因为它是确定构造演化中岩石圈长时间尺度流变学的唯一直接方法。最近，在对上地幔条件下天然与实验变形橄榄岩的显微构造比较中，证实了实验与野外的相互依赖性（Druiventak et al., 2012）。这一比较发现，橄榄岩中通常被解释为指示天然变形岩石中稳态位错蠕变的显微构造（如沿粒内微破裂的动态重结晶颗粒，图 2-5），可以形成于类似于同震变形和震后蠕变等一系列瞬时高应力变形。数值模拟为解释实验与天然变形岩石提供了线索，例如，通过对变形-变质过程中化学反应和粒度变化的观测，导致了依赖于时间的流变行为（e.g., Gardner et al., 2017）。

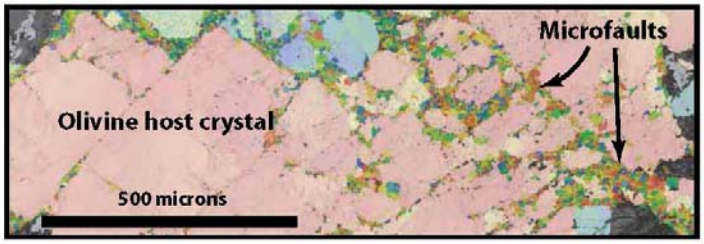



图 2-5　橄榄石晶体变形实验的 EBSD 图像显示沿着晶体内部在 1000°C 形成的显微断层发育的重结晶颗粒

这些开创性的观测显示，传统上被分离使用的方法正在被联合起来。通过这一整合（融合）、通过对技术研发上的投资、以及我们在识别和解释中小尺度-显微构造能力的提升，构造地质学界正在向着认识瞬时和非稳态流变学方向前进。

## 2.3 韧性地壳的应变速率测量：岩石圈流变学定量研究的关键

应变速率的测量及对其与所受应力和应变关系的确定，是理解天然变形岩石流变学的关键。新的分析工具和实验方法，增强了我们对韧性地壳天然变形速率定量化的能力，也使我们可以对流变学在岩石圈的变化进行确定。

构造系统中一个最难以确定的参数，就是岩石圈较深部位的变形速率。尽管如此，获得这些应变速率并确定其与所受应力和应变的关系，依然是认识地壳与上地幔应变局部化程度的关键。韧性岩石圈的应变速率有时可以根据地球物理数据获得，但最值得期盼的直接方法则植根于结合了复杂解析与定年技术的实地观测。在中国哀牢山-红河剪切带的一个研究实例中，Sassier et al. (2009)采用高精度离子探针定年技术，并根据变形岩墙测得剪应变，从而在一个露头上获得了糜棱岩化地壳的韧性应变速率（图 2-6 左上）；然后 Boutonnet et al. (2013)利用重结晶石英颗粒粒度（D）获得了差应力（$\sigma$），利用石英中 Ti 含量计算出了变形温度(T)，从获得了一个更好的流变率，而且其获得的应变速率与 Sassier et al. (2009)的测量结果一致（图 2-6 左下）。将该方法应用于剪切带其他部位（图 2-6 右），可以验证应变速率穿越构造带时的变化，以及相关的弥散变形和局部化变形的相对面积。这样的研究凸显了将野外测量、高精度年代学、单矿物温度计和实验室流变率相结合，研究变形系统深部应变速率的时空变化的重要性。

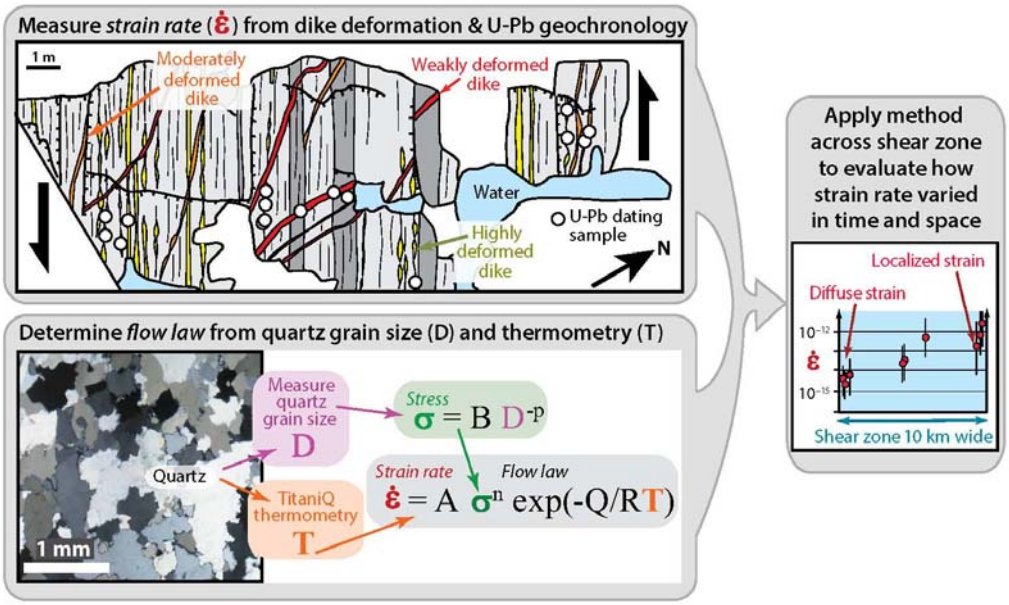



图 2-6　野外测量、高精度的地质年代学、单矿物温度计以及基于实验的流动机理多学科联合方式调研应变率的时空变化

另一个从剥露地表的韧性地壳中确定天然应变速率的关键挑战是，岩石在几乎所有尺度上都具有自身的不均一性和各向异性，这一般会导致多尺度的应变（和应变速率）的分解（partitioning）。这正是虽然人们长期关注对多相材料的流变估计，但却被证明是难以捉摸的原因之一。为解决这一问题，需要更多的研究致力于成分不均一地区应力、应变和应变速率的变化。统计学与数值模拟等技术，使我们能够刻画天然变形、并以流变学关系方式表达其运动学变量。例如，我们早就知道一般剪切中的简单剪切分量可以被多相系统中的最弱相吸收，所以科研通过创新的统计和数字方法的结合，探讨剪切带内运动学分解所需的流变学对比差值等这样关键的科学问题。

技术和设备的创新性应用也正在使我们能够处理新的和长期存在的问题，例如电子背散射衍射（EBSD）技术已为显微构造分析带来了革命，它不仅使全薄片矿物晶体优选方位（CPO）测量变得快捷而简易，而且使研究人员可以探索颗粒边界的特征与力学性质，并量化重结晶颗粒粒度等参数。通过整合这些信息及其他从常用设备（“workhorse”，如电子探针、SEM/EBSD/CL 系统、LA-ICP-MS 及离子探针等）和非常用设备和技术（如中子衍射（晶体结构分析）、原子力显微镜（表面结构分析）和 X-射线计算层析技术）所获取数据，我们就能更好地探索岩石圈深部韧性层内运行的物理-化学过程等更高层次的科学问题。

## 2.4 深部地壳：流变学研究的“关键”区段

深部地壳之所以成为流变学研究的“关键”部位，是因为该区段是运行于地幔、中地壳和地表间不同地质过程间的物理和化学链接。我们在下地壳变质与变形相互作用方面的进展，以及我们在天然材料显-微观尺度成像与探测能力的提升，正在建立起我们对这一重要区段的知识体系。

作为岩石圈内关键部位的深部地壳，链接着运行于地幔和发生于中地壳、上地壳和地表间的不同过程，该区段的变质、岩浆和变形事件最终驱动着大陆与大洋岩石圈的物质与热的交换。了解深部地壳的挑战是：所有这些过程之间以及这些过程与岩石流变学间是如何相互作用的？而这些相互作用又是如何影响变形岩石圈的力学与结构的？近来，实验、野外和模拟研究都取得新的进展，这些进展表明深部地壳内成分和力学上差异的影响着应力和应变速率场，从而影响变质岩石内不同规模的熔体流动与熔融反应是否发生和是否完成反应。熔体可以以任意尺度规模在岩石中流动，并对地壳强度和变形的时空分解产生深远影响；例如，图 2-7 展示了地壳熔融产物如何在石榴子石等难熔矿物内部形成包体、或通过布丁化机械过程被隔离在低压区（Flowers et al., 2006; Miranda and Klepeis, 2016）。目前研究的一个关键焦点是研发新的技术方法，以获取深部地壳与流变学相关的化学反应、热条件、流\溶体的存在与否、以及矿物状态等的定量信息。

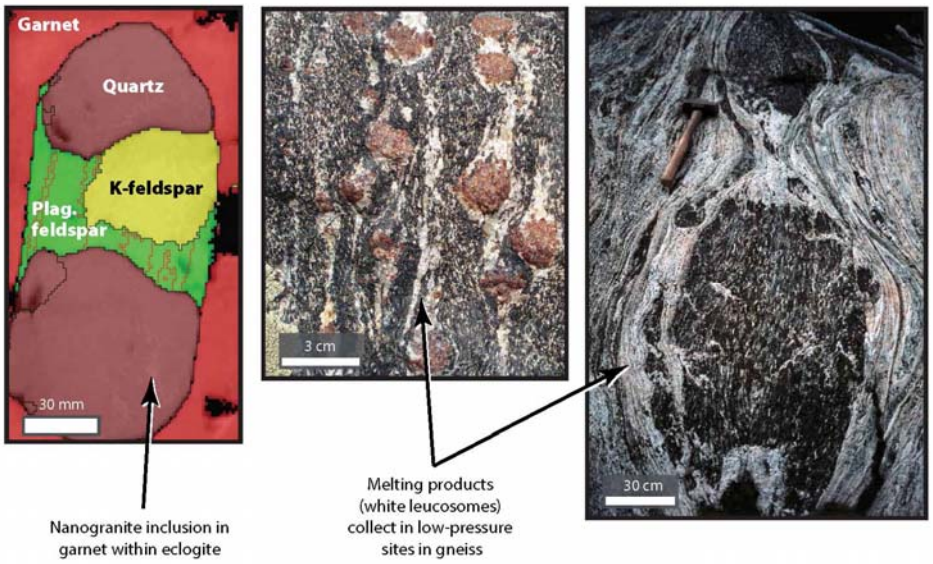



图2-7　熔体在所有尺度上通过岩石运移，极大地影响地壳强度和变形分配

从古老与现今板块边缘剥露出的地壳和地幔，为我们提供了发生于岩石圈深

部的有关成分变化、化学反应和变形机制的重要记录。近期，下地壳记录汇编揭示了下地壳的成分高度不均一性（Hacker et al., 2015），强调了研究不同类型不均一性对变形、变质作用和流变学影响的必要性。但是，我们所知的变形和变质相互作用，大多来自于对数量有限的矿物组合和岩性系列的观测，如果要表达所有环境下深部地壳的总体流变性质，这些知识未免过于狭窄。另一个需要解决的问题是，与深部地壳，特别是与发生熔融下地壳相关的实验研究极具挑战性且仍处于初期阶段。这一问题长期存在，因为为了实现韧性变形并在可达时间尺度上观察反应，绝大多数变形实验必须在夸大的温度下进行。

为了解决这些问题，构造地质学界正在开发新技术发展和创新实验设计，并对化学和物理过程间的连接进行更为坚实的理解。我们现在可以在广泛的天然和实验变形岩石测量中获得更高的精准度；一系列新的方法正在帮助我们规避实验中温度与时间/应变速率的互换，从而提高我们对变质变形速率的定量化能力；同时我们可以将年龄与深度联系（压力计时法 barochronometry），并对深部地壳物质建立更精确的压力-温度-时间-变形（P-T-t-d）路径（见 2.3，2.5），其中后者已在过去数十年里成为了岩石学和构造研究的支柱，并将仍是未来研究的基石。结合改进的实验，在中-微尺度上对剥露地表的物质进行研究，探索其变形与变质的相互作用，将深化我们对深部地壳流变学的认识。

## 2.5 构造系统从浅部到深部的流变学链接

构造系统深、浅部流变学要素的链接需要从微米到造山带这一广泛尺度的研究，变质变形过程、岩石矿物的组成与显微构造等方面的研究进展，正在帮助我们对这些过程间的动态链接进行深入探索，而正是这些动态链接影响着岩石圈不同深度层次间的结合。

变形岩石圈不同层间的垂向链接影响着地球上几乎所有构造系统的演化，包括俯冲带、造山带、裂谷及大陆断层带等。探索这些链接的发生及随时间的变化，需要进一步了解从上地壳到地幔的变形岩石的流变学。在过去数年间，通过复杂的数值模拟技术，构造学界已经提升了对来自变形实验、地球物理观测和野外研究等不同源数据的整合能力；同时模拟也使我们能够对运行于不同深度的物理与化学过程间的相互作用进行定量研究。大多数模拟依赖于从物理实验得来的流变公式，并在地热、物性及其他参数假设前提下对岩石圈中热和物质的运移量、运移轨迹和时间尺度进行表述；因此，未来致力于优化这些框架变量的研究将有助于深化我们对构造系统深、浅部链接的认识。

对经历过部分熔融深部地壳（见 2.2）的研究表明，岩石圈不同圈层的流变学及其垂向链接是随时间变化的。在这样的环境下，相邻板块或地壳块体运动产生的构造应力和由重力势能横向变化产生的应力间的叠加，会导致强烈的垂向应变分解。图 2-8 是正在经受伸展和部分熔融的地壳剖面实例，剖面上部地壳的脆性减薄驱动深部（下）地壳的韧性流动，从而导致混合岩化（部分熔融）片麻岩穹窿的剥露。图 2-8 左图为计算机模拟结果（Rey et al., 2017），它展示了深部部分熔融层的流动方式是如何受控于能干的地幔和上地壳间的力学耦合程度，但又对后者产生影响。右图是美国西北部的一个混合岩化片麻岩穹窿在伸展的脆性上地壳下剥露的野外实例（Kruckenberg et al., 2008）。野外研究和数值模拟的结合，将在研究岩石圈不同深度过程间的垂向链接方面发挥极其强大的功能。

为全面了解这些动态链接，我们必须对在广谱温-压条件下发生变形与化学反应的材料的物理和化学性质进行整合。在一个长时空尺度内，物质与热在整个岩石圈内发生运移，并产生和改变矿物、流体和熔体，最终驱动固体地球、地表、大气圈、水圈和生物圈间的相互作用。尽管某些特定地质环境的概念模型已经存在，但要对构造系统深、浅部力学链接进行定量化，还需要我们在地壳中寻找更好的同时的应力、应变、应变速率及粘度剖面记录。为达到这一目的，未来的研究将得益于剥露剖面（如图 2-7）的发现和应用、其他形式的深部采样（如包裹体或捕虏体、岩浆记录和地球物理观测），而野外和实验室设备的整合将被应用于大陆与大洋岩石圈不同层间的关系研究。

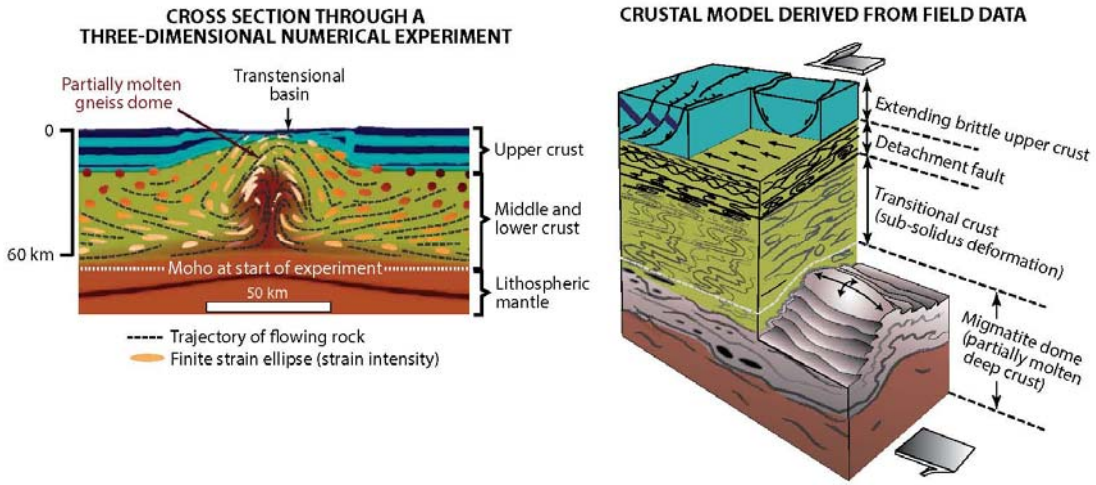



图 2-8 计算机模拟的地壳柱状图（左图）和野外实例（右图），后者经历的上地壳脆性减薄作用和部分熔融挤压下地壳的韧性流

## 2.6 关键科学问题和推动进展的前提条件

关键科学问题：

- 变形过程和力学流变率如何随下列变量变化：挥发分含量、变质反应、部分熔融和显微构造发育过程？
- 在多大程度和时间尺度上，岩石流变学是瞬时的？
- 什么样的物理实验才能最大程度地揭示矿物性质和分布对稳态和瞬时岩石流变学的影响。
- 物理实验观察到的显微构造和结构能在多大程度上代表自然界观察到的同样的形成过程？
- 深部地壳中链接地幔和上地壳域中的运动学和动力学作用是什么？

**获得进展的前提条件：**

- 促进模拟、岩石变形实验、遥感、天然变形观测等等领域内科学家间的全尺度合作与数据融合。
- 研发新的变形实验设备，扩展摩擦滑动、破裂和流动实验的速率与条件范围。
- 促进典型的成分不均一场的多视角研究，并从天然观测中获取流变性质。
- 提高高精度定年技术的应用，对应变速率场进行定量化。
- 激励基于计算机 3D/4D 技术，从微-宏观尺度获取变形系统中不均一物质的物理与化学性质。

# 3. 重大挑战#3 认识从地表到岩石圈底部的断层带行为

## 3.1 综述

断层和剪切带是地球岩石圈内容纳大位移的基本构造，它们反过来又控制地球的宏观变形样式、构造板块边界的形成以及随后的板块构造演化。断层和剪切带还像岩石圈的管道系统一样，对通过地壳的热-物质运移与交换产生实质性影响。尽管断层以其地震时的快速滑动著称，但它们也具有重要的慢滑和非地震蠕变阶段，在这些阶段中断层会经历数小时乃至数年的释放能量。现在我们认识的断层活动是一个从碎裂作用到位错蠕变的广谱行为。

传统意义上，“断层”被定义为局部化变形的近地表表现，而“剪切带”则是局部化应变的更深部、更高温度的表现。这种惯例用法在将岩石圈划分为地震（脆性）和非地震（韧性）域时很有效。然而，我们现在已确认“脆性”和“韧性”特征同时遍布于整个岩石圈内断层/剪切带系统的全域。这一概念上的重大进步促使我们在新的断层带演化综合模式下重新整合对断层和剪切带的研究，在这个模式中，断层的演化链接着地表过程和地震周期（图 3-1），并对人类社会的资源利用和对构造灾害的修复产生深远影响（参见重大挑战 5）。

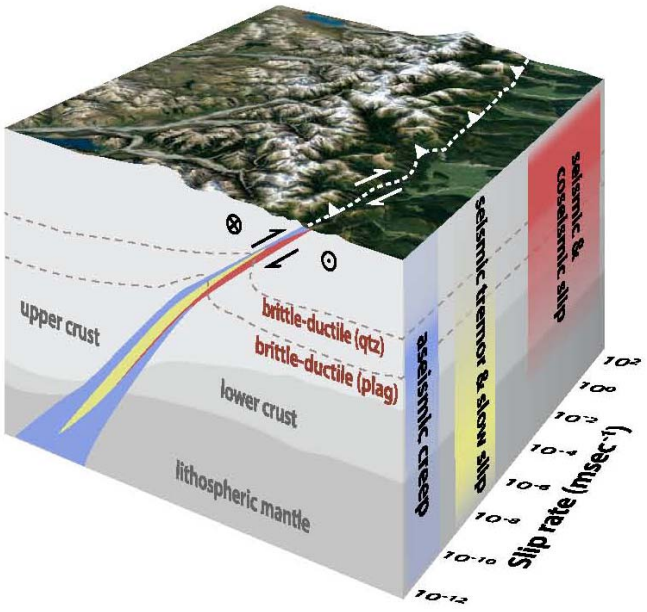



图 3-1　联系贯穿岩石圈到地表作用过程和地震旋回断层机理的岩石记录的概念模型

揭示整个岩石圈内断层滑动行为、热与物质交换和变形构造发育之间的联系，需要一个研究方法与手段的兵工厂，包括了野外和岩相学观测、岩石变形实

验、地球化学和地质年代学、物理与数值模拟等，这些均有助于对断层带过程进行定量约束。利用这样方法与手段，我们可以将地球物理观测的和断层岩内地质构造记录的不同的断层滑动行为联系起来。这些领域的新发现正在促使我们就地表到岩石圈底部断层作用的速率和条件，对固有的假设模型进行重新审视。

上述研究需要多学科交叉，以下几个实例展示了构造地质学届如何为学科间建立桥梁，提高断层带的认识水平。层析成像、地质年代学和地表过程模拟等方面的进步，正在深化我们对断层带演化地表记录的认识，这些记录包括从地震周期变形到百万年尺度断层作用的地貌效应（见 3.2）。对断层行为和断层岩研究的进展表明，岩石所记录的地震破裂及其他滑动行为远比原来认为的丰富，从而开创了一个利用地震科学研究断层带复杂性的新领域（见 3.3）。目前我们正在对整个岩石圈内流体、滑动行为、以及断层构造发育与地壳强度间的相互作用和互馈关系进行定量化，这一工作通过构造地质学、地球化学和地质年代学的结合而得以发展，而这种结合则跨越了传统的“脆-韧性”分野（见 3.4）。模拟/物理与数值模型研究为理论与野外天然岩石及实验室观测间搭起了桥梁，并有助于我们对断层带随时间变化的认识（见 3.5）。我们的最终目标是对断层带随时间及在空间三维的演化进行综合认识，为达此目标，我们必须理解变形如何在整个岩石圈内发生垂向链接。新的进展将源于岩石记录、实验数据和数值模拟的精心整合，这种整合将自然断层带内的成分、显微构造、流体成分以及过程的速率结合于一体（见 3.6）。在所有领域，新的扩展的合作研究平台、数据库以及基础设施和仪器设备都将加速研究的进展（见 3.7）。

### 3.2 从破裂到造山的断层带演化的地表记录

断层带演化的地表记录使我们能够从单个地震破裂到百万年尺度综合断层效应上对断层过程进行研究，新的扩展的合作研究平台、数据库和仪器设备都将驱动研究的进展。

优质时空比例的地形和大地测量信息，将在未来几十年里开创新一代的活动断层研究，而且这些数据将持续促进发现。不同于简单地报道地震破裂，InSAR 和 GPS 所记录的地表变化能够检测到震后数天到数月内的非地震“震后余滑”。2014 年加州南纳帕地震之后的这种“实时”构造研究揭示出了地表数十厘米的非地震滑动，而这样的滑动可向下延伸至数公里（Floyd et al., 2016）。GPS 观测到了 1989 年加州 Loma Prieta 地震后 1/4 世纪的震后运动，从而可对下地壳的粘弹

性松弛（即流变学）和更深部断层带行为进行估计和预测（Huang et al., 2016; 也见重大挑战 2）。利用机载 LiDAR，人们得以持续发现与地震相关的第四纪活动断层（重大挑战 5）并对其进行填图，其中包括加拿大 British Columbia 的全新世地震陡坎，这里的年轻断层沿主要地壳断层面活动但并不对其进行完全激活（Morell et al., 2017）。除断层带填图外，高分辨率地形分析使我们能够对包括错断在内的地表变形进行重建，还可利用重复测量差分法对断层上和断层外的同震变形进行测量（如 Milliner et al., 2015），并可对活动变形的地貌响应进行研究。空-地及摄影测量所得地形数据，还是通过地貌特征研究揭示断层系统长期演化的重要工具（如 Zielke et al., 2015）。

与地表变化速率约束和时间约束相结合的数值模拟，正在提高着我们通过阐明构造与地貌过程相互作用而解释地形数据的能力，这些进步已经被低温热年代学研究所证实，其中一研究揭示了 Denali 断层系统及断层两侧岩性差别在形成北美最高峰中的作用（Benowitz et al., 2013; Fitzgerald et al., 2014）。与地貌演化模型相结合，在新西兰进行的类似的热年代学研究则揭示了上新世走滑断层作用的惊人效应，该走滑作用重塑了 Inland Kaikoura 山区崎岖的地形，并形成了原以为由垂向断层作用产生的地貌（图 3-2 中与右，Duvall and Tucker, 2015）。在同一断层系统里，2016 年 7.8 级的 Kaikoura 地震的地表记录（如图 3-2 左的陡坎），意外地揭示了破裂发生在至少 12 条不连续的断层段落上（Hamling et al. 2017），这就向有关断层段落相互作用的假设提出了挑战。这次地震也触发的滑坡、改变了河道，留下了远远超过断层陡坎本身的地貌记录。

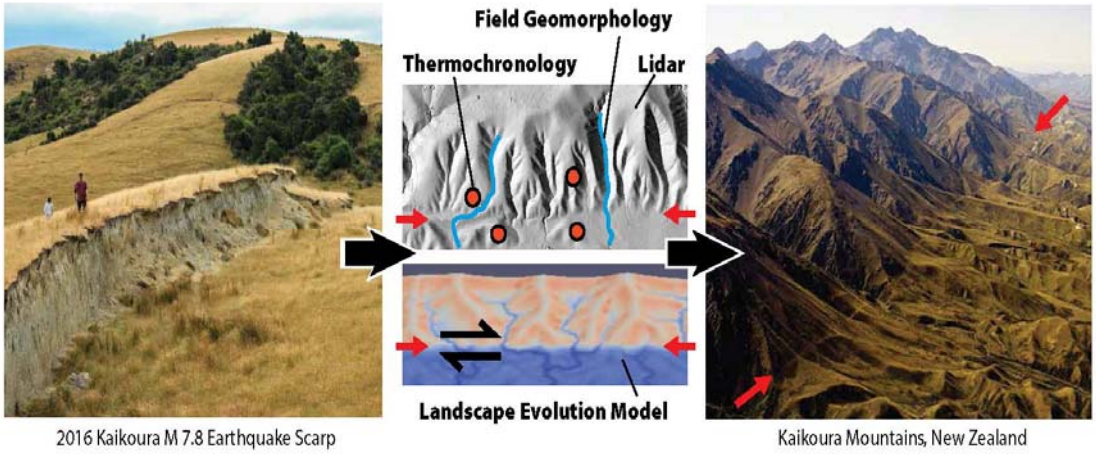



图 3-2　在新西兰 Kaikoura 山脉，构造地貌学手段包括野外工作、地形分析、热年代学以及地形地貌演化模拟整合起来在一个宽泛尺度范围内研究断裂作用

沿成熟的、高度演化的断层带形成的断层带演化地表记录，使我们能够从单个地震破裂到百万年尺度位移积累效应上对构造过程进行研究（如图 2）。为保持这些领域的发展势头并加速进展，我们需要对高分辨率地形和大地测量数据与影像更广泛的共享，扩展并支持地质年代学仪器设备的发展，并对构造与地表过程模拟平台进行投资。

### 3.3 地震与慢滑的岩石记录

认识全谱的活动断层行为，需要对地球物理观测和断层行为的地质记录进行整合。断层岩蕴含着远比我们原先想象丰富得多的断层行为记录，近期的发现为整合野外、实验室和理论研究、深刻理解断层带行为和复杂性提供了一个模板。

认识从地震到非地震蠕变的全谱活动断层行为，需要对地球物理观测和断层岩中的断层行为记录进行整合。岩石蕴含着远比我们原先想象丰富得多的地震滑动记录，一系列近来发展的野外与实验室方法已经扩展了地震特征研究的工具箱。许多地震特征（signatures）形成于地震中快速传播和快速滑动的断层驱动的动态破裂过程，以及相关的热产值（Rowe and Griffith (2015)的评述）。现在，我们可以利用地球化学或是光谱（spectral proxy）甄别出沉积岩中敏感的断层加热现象，并用于有机物热成熟度（Savage et al., 2014; Hirono et al., 2014）。我们还可以利用赤铁矿断层岩定年确定过去数百万年的地震活动（Ault et al., 2015）。这些创新性技术可以在岩石记录中找到地震滑动的直接证据，特别是在断层带内构造可以定年的情况下，开创了地震科学的新领域。

在岩石记录中鉴别新近发现的慢地震和非地震蠕变等滑动行为较为困难，因为我们缺少对形成于这些事件的构造的约束。确定这些滑动模式的特征，对全面描述断层行为、约束引发断层滑动和地震的力学条件至关重要。令人鼓舞的是，近期有关可能记录了慢滑、非震蠕变或瞬时剪切特征的断层岩的工作将这一研究推向了前沿（如 Angboust et al., 2015；参见重大挑战 2）。

不同断层行为和总位移的综合研究导致了复杂断层和复杂断层带概念形成。日本 Mugiz 混杂岩露头地质图（图 3-3，Kimura et al., 2012）所示的是，由低角俯冲带变形形成的、由多种构造组成一种断层带类型。断层带的断层岩由力学不均一的岩性组合组成，其内不同体积的不同岩性经历了不同的变形，或经历破裂，或经历弥散性物质迁移的粘性流动，从而形成相互交切的变形构造。野外和剥露地表断层岩显微观察的联合研究，再结合实验室可控实验（如 Leeman et al., 2016;

Pec et al., 2016）和模拟结果（如 Lyakhovsky et al., 2014）的详细分析，凸显了在一个断层的生命期内多种机制参与的递进变形的重要性。

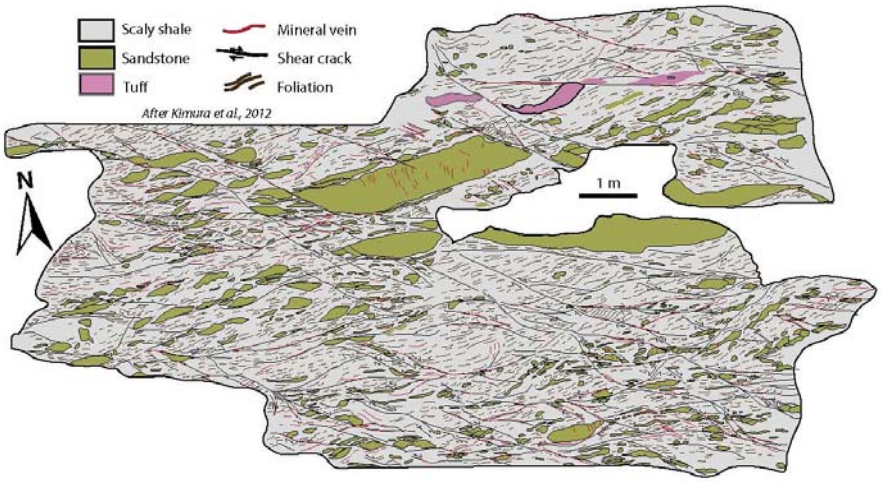



图 3-3　图中显示浅部俯冲带板块边界变形中的形成的多重构造（Muqi 混杂带，日本）

近期在岩石中发现的滑动特征为整合野外、实验室和理论研究、深化理解全谱断层带行为和断层复杂性提供了一个模板。未来的关键性进展将源于断层带内部 3D/4D 结构的定量测量，来自对有精确深度、温度和应变速率约束的剥露地表的断层构造和活动系统的对比研究。在岩石力学实验和相应的野外天然断层观测中，对特定应变速率、温度和有效应力下所形成构造的鉴别和研究，将会提供所需的这些约束。发展新方法，评价断层活动中参与合作与竞争的不同变形机制（如摩擦滑动定律、高应变下多矿物集合体的溶解蠕变和流动（见重大挑战 2）等）的重要性，将成为进展的核心。

### 3.4 流体-断层带相互作用的构造、地球化学和地质年代学记录

流体-断层带相互作用是决定岩石圈内物质与热交换、断层滑动行为和断层带演化的力学化学过程之一，将地球化学和地质年代学与构造分析相结合的创新性研究，有助于我们更好地利用岩石记录认识进出断层带及断层带内的流体通道，探索全谱断层行为及其时空变化。

流体-断层带相互作用是决定岩石圈内物质与热交换、断层滑动行为和断层带演化的力学化学过程之一。穿越岩石圈的断层带内各不同组分间的垂向联系记录于稳定同位素数据，这些数据表明大气降水可以到达剪切带的韧性地壳（如 Haines et al., 2016），而地幔、变质和岩浆流体可以沿地表断层泄露（如 Boles et al., 2015）。然而，不同地壳层次的转换、断层结构和滑动行为对流体的影响、以及

流体对全谱断层滑动行为的影响等都没有被很好地全面理解。这些迷失的链接对于水、能源和经济资源利用，对于地下污染或 CO2 注入途径预测至关重要（见重大挑战 5）。流体-断层带相互作用的潜在重要性还表现在最近的一个假说里，该假说认为，在石英的脆-韧性转换域，流体超压驱动的小断层事件可能会产生慢滑地震的低频震颤（Fagereng et al., 2011）。

将地球化学和地质年代学与构造分析相结合的创新性研究，有助于我们录更好地利用岩石记认识进出断层带及断层带内的流体通道，从而对它们的力学效应进行评价。对记录了古流体通道的脉充填胶结物进行测温，可以查明浅部地壳断层构造发育时的流体来源和通道情况（如 Hodson et al., 2016）。在地壳和地幔剪切带中，温压和显微构造分析可被用于约束特定地区的岩石圈强度剖面（Behr and Platt, 2011）。Selverstone et al. (2013)的研究整合了构造、地球化学和矿物学分析以及视剖面计算和流体包裹体分析等，以探讨活性流体对中地壳剪切带断层局部化的影响，揭示了脆-韧性转换带和地壳最大强度的时空变化。这些研究显示断层带内流体和反应驱动的矿物变化改变了断层本身的力学性质和渗透性。

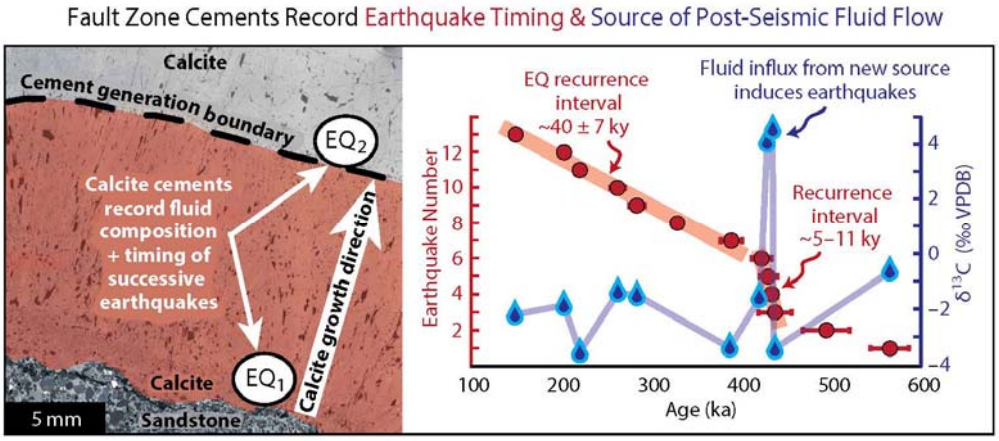



图 3-4　新墨西哥的 Loma Blanca 断层地震同生方解石脉显示自然地震干扰下的 40 万年的地震记录

图 3-4 展示了另一研究实例（Williams et al., 2017），该研究将构造地质学、地球化学和同震方解石脉 U-Th 定年相结合，对脉体记录的断层阀模式假说（参见 Sibson, 1992）进行评价。数据表明，绝大多数地震记录的周期性破裂显示一应力恢复过程（如 Cox and Munroe, 2016），并伴有破裂后裂隙泄露深部盆地卤水现象。但一小部分脉体记录的地震复发间隔急剧降低现象，这与更深源岩浆流体注入一致，说明流体注入增大了流体压力从而改变了地震周期。这个自然诱发地

震的实例提醒我们断层系统不是封闭系统，并且必须对其整体进行全面认识。因此，整合构造、地球化学、地质年代学和其他方法，更好地理解进入与穿越岩石圈断层带的流体通道，是探索全谱断层滑动行为及其时空变化的关键。

### 3.5 模拟断层系统随时间的演化

数值模拟和物理实验相结合探索断层系统的时空演化，搭起了活动断层观测、历史断层记录和变形物理学间的桥梁。高速运算和图像处理以及原位测试技术正在革新着模拟和实验方案，使其能够触及断层网络演化的复杂性以及地壳深浅部间的相互作用等科学问题。

数值模拟和物理实验相结合探索断层系统的时空演化，搭起了活动断层观测、历史断层记录和变形物理学间的桥梁。断层演化模拟可以追索地壳内变形的空间分解，提供空间上连续的变形时间序列，这些信息是我们认识断层扩展、连接、复活和废弃的关键。断层扩展、连接、复活和废弃过程决定着所有地壳层次断层系统的演化，但因这些过程与岩石物理实验的时空尺度极不一致，而地质记录的有限变形又具不连续性，所以这些过程难于在野外被观测到。

图像处理和原位测试技术正在革新着物理实验方案，使其能够利用相似材料将地壳过程按比例缩小到实验室可以直接观测的时空尺度。例如，数字图像相关法（DIC）和新的应变与流变学测量（如, Souloumiac et al., 2012; Reber et al., 2015; Dotare, 2016）正在以可变换方式开拓着经典物理实验的前景。在图 3-5 所示的走滑断层湿高岭土实验中，利用 DIC 所形成的角剪应变图揭示了断层系统的发展过程：弥散的剪切演化为雁列断层，并伴有断层外变形，随着断层系统运动效率的升高，最终形成沿贯通断层面的局部化的滑动（Hatem et al., in review）。这样的结果有助于我们解释断层外变形和地壳走滑断层的成熟度。

数值模拟通过扩展材料流变学和边界条件范围而使物理实验更加完善，而且在数值模拟中，断层系统演化过程中的应力和应变可被查询，从而获得有关在所有地壳层次上驱动断层演化的地质过程的线索（如 Brune, 2014; van Wijk et al. 2017）。计算技术的发展使我们能够触及那些 10 年前还是成本与时间都不允许的复杂问题，如地壳深浅部过程的 3D 演化和相互作用问题。一旦经过野外直接观测和物理实验数据验证，数值模拟就将有助于我们认识断层网络的演化过程，这个演化过程包括断层的扩展、断层段落的连接、老断层段落的复活以及那些不再对断层系统变形做有效贡献的断层段落的废弃等。通过这种方式，数值模拟将帮助我们整合分散的观测数据、更好地理解断层网络随时间的演化、并预测活动

断层系统的未来演化。

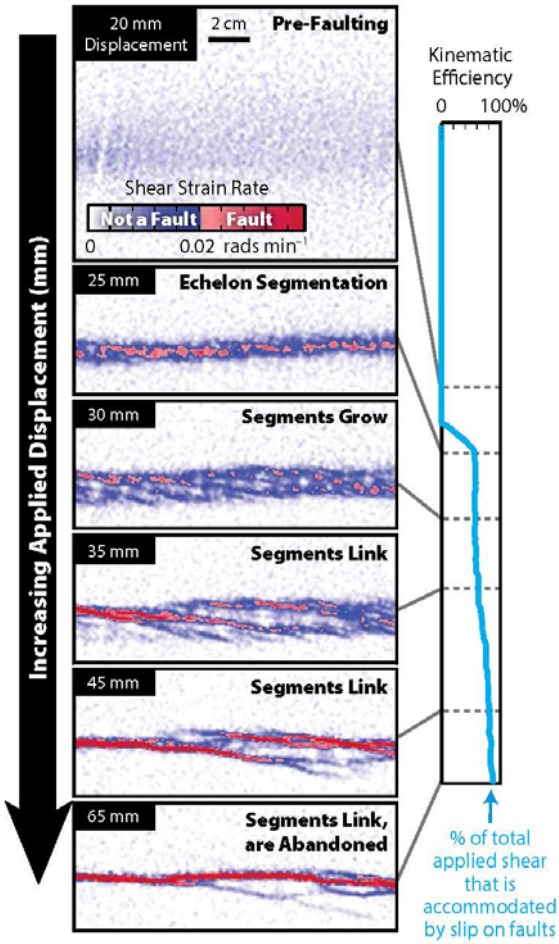



图 3-5　利用湿的高岭土实验相关数字影像产生的剪切应变率图显示走滑断裂系统的发育

## 3.6 整合全岩石圈的断层带行为

如果我们要全认识解断层系统的演化，全面了解断层在地震等构造变形中的作用，我们就必须将断层带在垂向上视为一体。有关岩石圈深部流动和孕震带摩擦过程如何相互影响的研究新进展，将源于通过天然断层带观测、实验数据和数值模拟相结合对材料性质和变形条件的约束。

如果我们要全面认识断层系统的演化，全面了解断层在地震等构造变形中的作用，我们就必须将断层带在垂向上视为整合一体的岩石圈尺度系统。然而，近地表断层带如何与深部地壳和上地幔相联系，是一个主要挑战。我们必须解决每个深度的位移和应变局部化机制问题，必须要解决断层带演化过程中局部化的变

化问题。在孕震的浅部地壳（~15km 以上），许多断层带行为，包括慢滑和低频地震，可归因于特定的材料性质和变形条件（Ikari, 2012; Reber et al., 2015; Leeman, 2016），但是我们缺少对主导该变形域变形机制（如碎裂、摩擦滑动和溶解-沉淀蠕变等）的全面定量化理解(Rowe and Griffith, 2015)。迄今为止，我们对在岩石圈深部变形过程、变形速率和流变学间相互作用的定量化认识不够。

近来，科学家发展了新的手段，将大型断层带作为一个全岩石圈垂向整合系统进行研究，其中的新发现正在缩小这认识上的差距。这项工作的一个焦点是探索下地壳和上地幔变形在地震周期中的作用，例如，圣·安德列斯断层系统的地壳变形可以延伸至岩石圈地幔（Titus et al., 2007），并可能到达软流圈（Ford et al., 2014），这些新观测结果对有关地震周期中岩石圈不同圈层变形相互独立的观点发起了挑战；下地壳快速滑动的证据、比典型孕震带更深更热位置上摩擦熔融（假熔岩；见 3.2 和重大挑战 2）等，也对深部黏性剪切带恒定应变速率的假设提出了挑战。

要认识深部岩石圈流动和孕震带摩擦过程如何相互影响，需要获取大断层孕震带及其下的材料性质和变形条件的定量信息。主要大陆断层的地质与地球物理研究能够提供这样的约束信息，包括成分、温度、压力、流体成分、显微构造、粘度以及过程的速率等。在新西兰，过去 4 百万年的缩短将沿孕震的 Alpine 断层倾向深度 35km 处由韧性蠕变形成的糜棱岩化剪切带剥露于地表（Toy et al., 2012），展示了大型挤压性走滑断层的深部根带（图 6，地质图引于 Norris and Toy, 2014）。在断层出露位置之下增厚的和构造复杂的下地壳根带中，发育一高电导率、富流体活动的地震活动带，该带跨越一 200km 宽的地震各向异性和高速带，可能代表地幔岩石圈中的弥散剪切（Savage et al., 2007; Houlié and Stern, 2012; 图 3-6）。在加州的一个实例中，地幔包体研究定量限定了剪切作用下圣·安德列斯断层系统之下上地幔的强度、水化与应力状态（Chatzaras et al., 2015）。结合实验所揭示出的，上地幔瞬时高应力变形也会产生典型的同震变形和震后蠕变构造（3.2，重大挑战 2），所有这些新数据将为深部岩石圈流动和孕震带摩擦过程的相互作用研究带来新的前景。

上述研究显示，在上地幔到地表的变形过程与材料性质的链接中，深部岩石圈地质、地球物理观测存在着机遇，主要进展将源于天然断层带的地质地球物理观测与实验数据及数值模拟的整合。

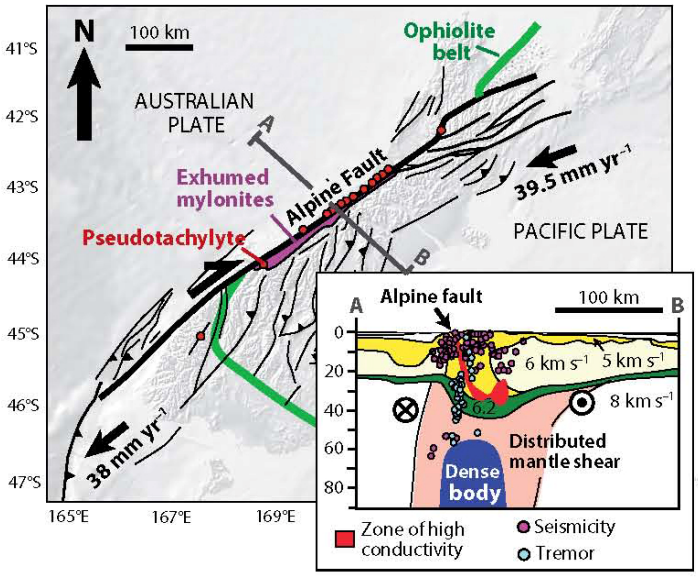



图 3-6　新西兰南岛的阴影地形图显示邻近这一压扭性系统中的阿尔卑斯断层假玄武玻璃脉（红点表示）以及折返的靡棱岩剪切带（紫色）侧向延伸的位置。内图（横剖面视角）反映板块边界之下的高电导带、强化流体流和地震活动

## 3.7 关键科学问题和推动进展的前提条件

关键科学问题

- 在全地壳层次上、在一定的时空尺度内，断层网络如何通过段落的扩展、废弃和复活而发生演化的？
- 一个地震周期内断层带不同深度上，一个断层寿命期内脆性与韧性域内，物质的强度和力学性质是如何演化的？
- 地表特定地貌和剥露断层带内的构造，是如何形成于活动断层系统内所观测到的过程的？又是如何记录这些过程的？
- 全岩石圈尺度内的断层和剪切带的演化及其间的垂向链接是如何影响流体流动的？流体和化学反应如何影响断层带的演化和断层的滑动行为？
- 从地表到上地幔，弥散变形和局部化变形是如何相互作用和交替发生的？他们又是如何发生时空变化的？
- 深部岩石圈流动和孕震带摩擦过程时如何相互影响的？
- 什么过程引起并调节断层的快速和慢速应变行为的交替发生？
- 什么样的地质过程和力学行为决定着地震频率、位置和能量释放？怎样将其利用于灾害？

推动进展的前提条件

- 推进地壳和岩石圈地幔各个不同层次的断层行为的多学科研究，其中包括大型断层孕震带及孕震带之下层次的断层行为研究。
- 拓展显微到填图尺度的成像、监测和数据分析新技术的应用，包括高分辨率地形与大地测量数据与成像、瞬时变形的实时监测、断层和流体性质的直接测量、显微分析技术。
- 发展有关断层和剪切带几何学、变形要素分布和局部化具统计学稳健性的定量测量技术。
- 支持地表剥露断层系统的交叉学科研究，重点支持对记录了不同深度不同演化阶段断层和剪切带要素的深度、温定、时间、应变速率的典型断层带的研究。
- 研发实验设备促进实验条件下同时进行的原位结构和力学测量研究。
- 扩展适合于研究包括大位移在内的所有尺度断层带过程的模拟材料和数值模拟的适应范围。
- 开拓计算工具与设施，促进活动断层观测、岩石记录与变形实验数据的整合。

# 4. 重大挑战#4：理解地表过程与构造地质学的动态相互作用

## 4.1 综述

大气圈、地表及深部地球过程可能通过复杂的反馈关系发生耦合的理念是当代地球科学最令人激动进展之一。这一反馈对于下列问题的理解具有广泛的启示：流变学、变形和剥蚀度之间的联系；地形地貌与沉积盆地的演化；风化作用、碳循环和地球的宜居性的构造控制。尽管历时20年的研究已经给出了很多地表过程与大地构造的相互作用的有意思的例证并且改变了人们对于构造活动板块边界如何演化的理解。但是许多挑战依然存在。最近从地球动力学到地质年代学多学科的进步正在帮助将这些相互作用性质带入我们关注焦点，同时显示固体地球与地球系统的各个部分之间强有力的耦合互动比先前的认知更为多样化和意义深远。此类的相互作用出现在从单个露头到整个大陆的尺度范围，这些多重尺度的多样化现象涉及到诸如地壳流变和热传递、裂隙机制、地貌景观演变、大气圈循环模式和生态的多样性。

通常地形在固体地球和大气圈之间扮演着纽带的角色，在很多时空尺度上地形地貌可以提供关键的和垂手可及的对深部地球状态和其中的活动过程的约束。地貌学界日益增长的研究积累正在使得对构造和其它外部过程如何通过今天的地貌和地质记录反映在地形、剥蚀和沉积中的认识更加细致入微。沉积系统的内部“自生”过程和自我组织以及地貌系统的动态非稳定性（例如分水岭）能够独立于构造力之外或者与构造力影响地形、剥蚀和地层的因素无关。因此，当我们从地表过程记录解释深部地球动力学时对于这些系统的内部复杂性的考虑不可或缺。

这些理论的进步以及模拟技术和分析工具的发展和精细化已经为理解地球—地表演化关系及其与大气圈、生物圈和固体地球的联系的新突破搭起舞台。在极其宽泛的尺度范围内，地幔动力学的地球物理观察和模拟显示，大陆上的动态地形能够给出在广阔的时空尺度上发生的各种相互作用的丰富的信息(4.2)。古高度重建和地质年代学数据质量和分辨率的快速改善使得地球动力学模型有关地形和生命协同演化的构想得到验证(4.3)。在许多山脉提出的热—运动学和动力学模型正在利用不同领域包括岩石学、热年代学、地球物理和地貌学的观察进行验证，尤其在那些假定反馈格外明显的强烈地形起伏和剥蚀地区(4.4)。在更精细的空间尺度上，对于岩石强度在地形演化中效应的兴趣重新兴起，传统上这

一问题是从地形定量解释构造的主要障碍。新的影像工具包括LiDAR和“动态构造（Structure-from-Motion）”摄影测绘法，这些方法会使得我们在高分辨率和大的空间区域内发展和验证地表过程模型的定量化能力发生革命(4.5)。最后，在山坡的尺度上，控制近地表岩石强度过程新约束已经在激励地形和区域构造应力造成近地表破坏模式的想法，并且对气候、剥蚀、岩石强度和构造之间潜在的反馈有所启示(4.6)。近地表裂隙化、流体通道和化学风化作用的耦合关系多半也会影响地形地貌和生物地球化学循环，因此这些效应又与运行在区域和全球规模的过程产生联系(例如，重大挑战 #1)。

这些例子说明了构造学界目前正致力探讨从露头到全球尺度的构造-地表过程的联系，并且提醒大家，一系列根本性进展的重大机会蕴含在模拟和观察实验的深度融合之中，而支撑推动模拟、观察和理论方面进步的、包括专家和开发者的多学科合作的基础设施的建立可以为关乎构造-地表过程相互作用研究遇到的广泛的、交叉性的问题扫清道路（4.7）。

### 4.2 建立全球地幔动力学与地表构造和地形的联系

出现在对流地幔的动力过程能够使地表偏斜数百米并影响沉积和剥蚀的模式以及汇水系统和海岸线几何学。岩石流变学和古地形的构造观察和定量约束结合地幔动力学和地形地貌的高分辨率计算机模型提供了大好良机去调研时间坐标上的地球内部和地表间的反馈。

出现在对流地幔的动力过程能够在相对于数百到数千公里波长的范围内使地表偏斜数百米，造成的动态地形不同于重力均衡地形（例如地壳厚度的改变）和负荷挠曲—出现在刚性构造板块与更为活动的下伏地幔之间的粘性耦合。不管其低振幅，动态地形能够影响海平面和海岸线的几何形态（Flament, 2014）。此外，动态地形可能解释远离活动板块边缘的大陆板块内部异常的海拔高度变化。例如现今非洲南部的高海拔和澳大利亚的低海拔似乎分别与大规模的区域性地幔上升流和下降流有关（e.g., Braun, 2010）。异常的海拔高度的变化也可能出现于更多的局部区域，像最近研究表明的地中海围绕俯冲带出现的复杂的地幔流（Faccenna and Becker, 2010）以及中安第斯之下的大陆岩石圈拆沉（Krystopowicz and Currie, 2013)。

诸如此类的关系展示了令人鼓舞的利用古高度约束和数字模拟恢复过去的地幔动力学的可能性。一个北美的例子，地幔对流模型推测俯冲的法拉隆板块之上的动力沉降，这与记录了随时间向东扩展的沉降西部内陆海道（the Western

Interior Seaway）的发展是一致的 (e.g., Heller and Liu, 2016) 特别这些模型显示随时间俯冲轨迹变浅引起了30 Ma间深达1000米向东迁移的地表沉降 (图4-1顶部)。此外，俯冲的变浅也与地表构造事件有关，诸如火山弧的向东迁移以及陆内的拉拉米变形的发端。

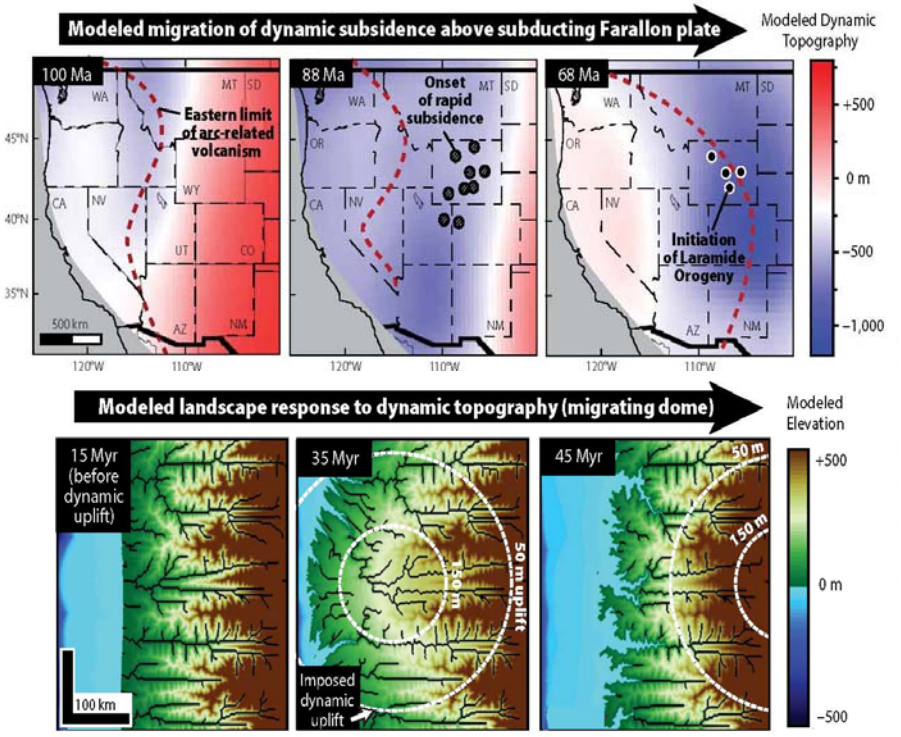



图4-1　地幔对流模型预测晚白垩世向北美之下俯冲的Farallong板块上方的动力沉陷（上图）。模拟地貌对动力地形的响应（下图）

在地表地质观察中鉴别动态地形是困难的事情，不仅因为低的振幅和长的波长，而且由于地貌和沉积体系内部动力学独立运行于外部动力作用 (e.g., Willett et al., 2014; Romans et al., 2016; Hajek and Straub, 2017)。对于动态地形如何保存于岩石记录的理解有赖于剥蚀和沉积模式如何被影响的细节。图4-1（底部）给出了一个模拟响应简单情况的地形例子，其中200米高的穹隆以2 cm/yr 的速率由海岸线底下穿过(Ruetenik et al., 2016)。结果最初平直的海岸线经历了隆起、大幅度的退缩、河道的重构、强化的海岸侵蚀以及增加的离岸沉积物流量等，这些现象出现并持续到地形变化停止之后很久。这一研究也强调了在调节对区域动态地形变化短暂的响应中局部地形和近地表岩石的性质（即易侵蚀性）的因素。

新的计算技术的进步已经为地幔动力学更复杂的模拟铺平了道路，包括对地幔对流回溯的反演和伴随（伴随矩阵？-译者）方法，模拟从地震层析图像推断的现今地幔构造开始。然而，由于模型的不同的时空尺度，将大尺度的地幔模型

与精细的地形模型耦合起来依然充满挑战。克服的办法是整合地貌和沉积系统动力学与来自岩石性质（例如，流变学，重大挑战#2，易侵蚀性）、现今地幔构造（例如，地震层析成像（重大挑战#1）、重力/大地测量观察）的约束以及利用先进的计算资源去开发可用古地形重建验证的模型(4.3)。这些关键领域的创新将强化古地形数据和全球海平面变化记录的解释并且加深我们对地球内部与地表动态反馈的理解。

### 4.3 使用地表抬升和沉降的地质记录验证构造模型

古地表地形的约束可以启发我们对造山和地球动力学过程以及地形地貌与生命的长期协同演化的理解。潜在的突破孕育在如下诸方面的融合：古高度代理和气候模拟的进步与高精度地质和热年代学以及分辨构造、气候与地层记录中的自生成因沉积源-汇效应的重建。

地球表面地形的演化反映了地球深部和地表过程的竞争并且影响着大气圈的循环、剥蚀以及生物的生存。古地形变化的约束因此能够提供有关历史时期运营的造山和地球动力学过程独有的视角。然而，重建古高程充满挑战并且很难精确，这些限制了人们验证构造模型和地形地貌与生命协同演化模型的能力(e.g. Mulch, 2016)。新近的工作克服了这些障碍，随着新的古降水和古温度代理的发展，对于气候和大气对于这些代理的控制有了进一步的理解，它们与独立的地层和地质年代学约束的融合极大地改善了关键地区的古高程的研究水平。

图4-2 给出了美国西部一个例子，特定地点历史上的降水-高程关系（例如，Cassel et al., 2014; Mix et al.,2015）、高精度的同位素地层学（Smith et al., 2014; Fan et al., 2014) 和独立的来自相关同位素的古温度 (Huntington et al. 2010; Snell et al., 2014) 的热动力学模拟能够促成广泛的时间相关和跨时代的数据组的对比。综合结果显示内华达山脉形成了一个始新世-中新世造山带陡峭的西翼，其先于中新世的伸展达到了海拔3.5千米的高程（图4-2）。另一个中安第斯山脉的例子，基于稳定同位素记录和古气候模拟的地表抬升重建综合了多样化的地球物理、地球化学和地质观察去理解区域的构造演化，得到地球高海拔高原生长的启示(Garzione et al., 2017)。

诸如此类的研究回答了利用众多的代理和模拟手段如何在重建古高程—一个地球科学长期悬而未决的问题方面引领成功的问题。还有，古地形重建精度的改善正促使生物和地质学界去探索正在出现的生物圈-地貌景观相互作用的前沿以及生态学及其演化方面地形复杂性的角色。未来的突破潜藏于代理数据与3D

同位素使能（isotope- enabled）区域性气候模型的融合之中，这些以具体造山带（例如, Feng et al., 2013, 2016; Sewall and Fricke, 2013)、高精度地质和热年代学、地貌约束(例如,河流下切和剥蚀率)以及沉积源-汇重建校准的模型用来分辨构造控制、气候控制还是基于地层学记录的自生控制。这一手段必须与同步的模型精细化相结合—增加模拟地形、模型输入的古气候约束以及模型和使用现代数据代理的校准细度和保真度（例如, Cassel and Breecker, 2017)。上述领域的持续发展将有助于我们更好地理解地表和深部地球过程的联系以及它们对气候模式和动植物演化的影响。

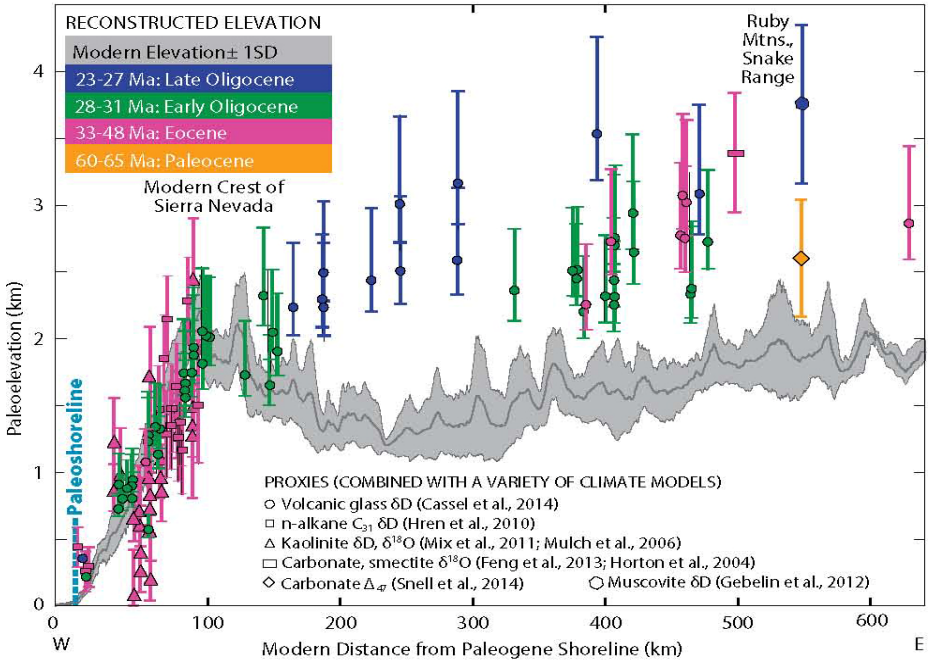



图4-2　内华达山脉过去60Ma年间古地形的多重（元）近似重建

## 4.4 评估预测的气候、剥蚀和构造之间的反馈

气候调节的剥蚀是否能够驱动构造变形的位置、速率以及样式的问题继续是热烈争议的焦点，同时对流变学、变形和易侵蚀性的联系、物理化学风化和碳循环的构造控制以及山脉演化和沉积记录的理解有着诸多广泛的启示。进取的机会存在于精细的野外研究和沉积记录的解释与单颗粒碎屑地质和热年代学、动力学模拟和地壳流变学高质量约束的结合。

数理模型预测气候、剥蚀和构造之间的反馈，对理解流变学、变形和易侵蚀性之间的联系，物理化学风化和碳循环的构造控制以及山脉和盆地的演化有广泛的启示。然而，15年的研究发现寻找反馈的结论性证据存在挑战并且发现气候

和剥蚀的关系比原先预想复杂得多的(例如，Godard et al., 2014; Scherler et al., 2014)。今天，是否气候调节的剥蚀能够决定自然界构造变形的位置、速率和样式仍然是争议的焦点(例如, Wang et al., 2014; Whipple, 2014; Zeitler et al., 2015; King et al., 2016)。

假如构造驱动力、变形和剥蚀之间存在强烈的反馈，那它们在地球表面快速隆升和剥蚀区应当是最清楚的。这些地区的野外研究仅仅从岩石的快速抬升和侵蚀、起伏的地形和剧烈的降水不大可能解决因果关系，由于风化和剥蚀的物理原因，这些因素被认为是独立于可能的反馈之外产生的协变。一个更有效的方式是记录构造、气候和地表过程变化的相对时间。然而，在极端动力学地区局部变化的时间很难利用当地岩石样品的地质和热年代学准确认定，这也许是不可及或者过快的折返而来不及记录比过去几百万年的历史更多的东西。在这类情况出现的地区，新的碎屑定年方法能够使我们去探测高地的地貌景观，加上必要的时空分辨率去验证先进的热-力模型。

地球上最为活动的地貌景观往往发育在岩石圈板块转角的山脉转弯处或者连接处 (例如，图4-**3**) (Zeitler, et al. 2014; Gulick, 2015) ，它们是受到聚焦的剥露岩石的“热点”。现今单颗粒碎屑的地质和热年代学技术的提高已经允许我们重建这些地区的详尽的剥露史。例如，碎屑(U-Th)/Pb 地质年代学、$^{40}Ar/^{39}Ar$ 和裂变径迹热年代学均显示了5-7Ma 前出现在东喜马拉雅衔接处（东构造结？--译者）折返率的极大增加(图3; Lang et al. 2016) 。与此相似，来自冰川剥蚀粗砾的多种地质和热年代学测定解决了西南阿拉斯加的圣艾利亚斯山脉（St. Elias）原本冰雪覆盖无法企及的部分的折返历史(Falkowski et al., 2016)。这样的古剥露史的重建与模型的预测以及气候、构造或者流域汇水盆地模式的变化可以对比 (图4-**3**)。

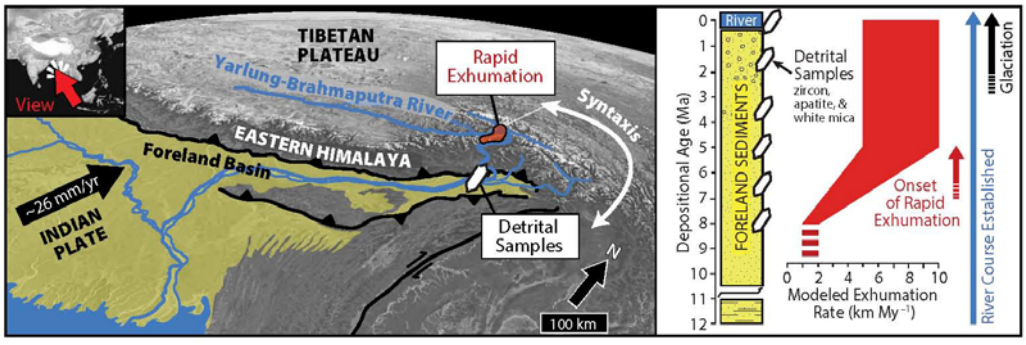



图4-3　东喜马拉雅折返速率的急剧增加并未与汇水流域的重构或者第四纪气候变化相吻合，指示一个构造驱动的折返

进取的机会存在于精细的野外研究和沉积记录的解释与地球动力学模拟(e.g. Koons et al., 2013; Bendick and Ehlers, 2014)和地壳流变学高质量的约束（重大挑战 #2）的结合上。这一研究快速变形景观的融合方式具有明显优势去阐明构造-剥蚀-气候的关联—也可以说明从地壳岩石流变下的部分熔融到有河流侵蚀存在的岩石强度和应变模式的耦合，再到化学物理风化以及全球循环中构造角色相关过程宽广的阵列。

## 4.5 岩石强度对地形和侵蚀速率的控制

侵蚀速率的全球分布显示了给定侵蚀速率条件下造成地形起伏的从未解释的高度分散状态，因此这一情形限制了从地形定量解释构造的能力。尽管长久以来岩石强度被认为是此类分散的因素，但仅仅是最近的新工具及其应用诸如遥控飞机、动态构造摄影测量以及浅部地球物理将我们的能力升级为高分辨率的大空间范围内岩石材料性质的定量化。其结果，使得我们为在气候、构造、地形和岩石材料之间联系取得更大进步做好了准备。

随着山脉的演化，它们的地形向着地表剥蚀量和山体构造增生之间的平衡调整。地形和剥蚀率的关系因此决定着山脉的高度和控制着气候、构造和侵蚀之间潜在反馈的敏感度 (Whipple and Meade, 2004)。然而，侵蚀速率的全球分布在地形起伏要求给定的侵蚀速率条件下显现了一个尚未解释的极大的分散，因此，限制了我们定量地从地形解释构造的能力。这一知识的空挡的存在主要由于我们欠缺有关气候和岩石强度对于侵蚀率效应的完全理解。

图4-4展示了具有相同侵蚀率(E ~ 500 m/My)的3个分水岭，但在地形起伏

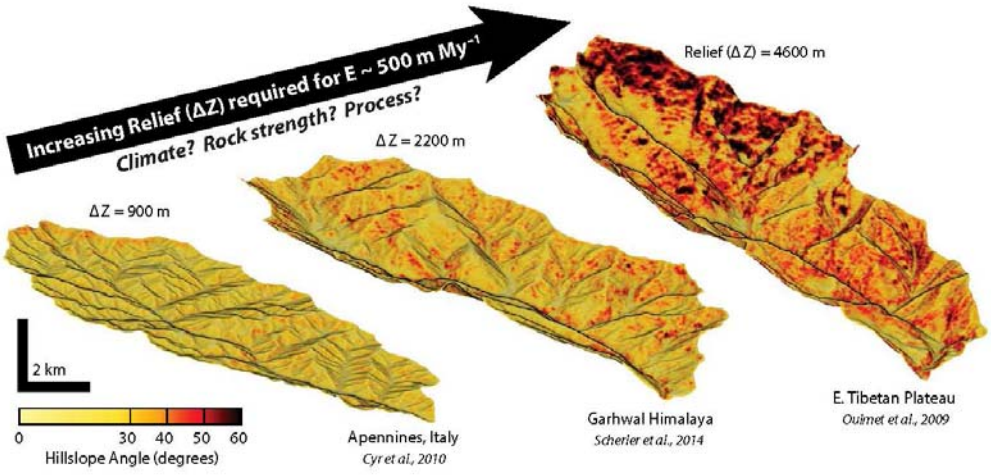



图4-4　尽管地形起伏有五倍之大，但三个分水岭表现出相似的侵蚀速率，其原因可能是岩性不同所致

上却表现了5倍范围的变化，类似于阿巴拉契亚和安第斯的地形高差。尽管三个景观区有不同的气候，但并无系统的模式出现，图4-4表现的变化可能部分地取决于不同的岩石材料性质和它们盆地规模易侵蚀性的效应。不管可观的和持续的注意力，定义和定量化近地表岩石强度的度量（例如，张性强度、破裂作用、沉积物粒度）依然充满挑战。同样，关联气候、构造和岩石强度的理论需要发展。岩石也许本身就是当地气候的（Murphy et al., 2016）或者构造的(Roy et al., 2015)函数，衍生出地表和深部地球过程饶有兴趣的反馈的可能性。

上述方式直截了当地用于定量化岩石材料性质(例如, Schmidt 铁锤测量，实验室测试，裂隙填图，粒度测量)，但是针对一定范围尺度的不均匀性进行野外原地测量极其耗时并且难于外延至更广大的景观区。目前，两种方式正在振兴上述领域。首先，快速增加的LiDAR数据组，遥控飞机，动态构造摄影测量 (James and Robson, 2012) 正在精细的野外观察和景观尺度的分析之间搭建桥梁以求发展。第二，浅层地球物理调查和伴随近地表破坏的关键度量的参数化的应用能在未有基岩暴露的地区进行岩石强度填图(4.6) 。结果是现今可以高分辨率和在广大空间范围进行地表样式、浅地表的破裂作用和景观面貌的填图。结合定量化的剥蚀和风化作用时空模式的不断努力，我们已经做好了准备在气候、构造、地形和岩石材料之间联系方面争取有意义的推进。

## 4.6 地壳应力，破裂作用，化学风化和物理剥蚀间的动态耦合

令人信服的新成果建议地球的大气圈与深部地壳是通过曾不引人注意的地表基岩裂隙、风化和侵蚀作用的联系耦合的。理论和浅表风化作用的地球物理观察的明显差异说明大地构造与地表作用过程学界已经蓄势待发准备通过地球化学、构造地貌学和近地表地球物理间的整合去极大地扩展对构造、裂隙和侵蚀之间动态耦合的理解。

令人信服的新的研究建议通过景观地表基岩的破裂作用、风化作用和侵蚀作用间的联系（先前并未受到充分认知），地球的大气圈和浅部地壳是耦合的。地球化学家和地貌学家很早以来就理解次地表的破裂作用促进大气降水快速流动，因此加强了化学风化作用并且最终使得地表的岩石碎块发生剥蚀(e.g., Riebe et al., 2017)。最近，正在兴盛的近地表地球物理领域印证基岩裂隙的分布经常与次地表的应力场有着密不可分的联系(St. Clair et al., 2015)，横穿景观的应力场是变化的，因为来自区域板块构造力与局部的重力相互作用。这提升了至今尚未探索的气候、构造和景观剥蚀之间的反馈的潜力：控制重力应力分布的地形是由剥

蚀塑造的，而剥蚀作用又强烈地与构造折返和岩石强度相耦合，暗示破裂作用和剥蚀作用的链接提供了地表与地壳过程关键的联系。

调查上述两种联系的激动人心的契机正在浮出地平线，这多亏次地表风化作用的浅层地球物理研究的兴起(Parsekian et al., 2015)。图4-5给出了这一前景看好的研究领域的巨大潜力的例子(据St. Clair et al., 2015修改)。次地表应力计算预测开放的裂隙应当紧密地仿效地形的样式，在景观区与山坡同步出现于远离河道的地方，那里的构造应力相对小于重力应力（图4-5a）。

然而，随着挤压应力相对于重应力的增加，强破碎带的基底应当增加对地表地形的反映，离开河道深潜于次地表并在剖面上形成“蝴蝶结”形状(图4- 5b, c)。具有不同构造应力体制的基岩破坏的地震折射探测结果与应力计算一致 (图4-5d-f )，证实次地表应力梯度强烈地影响破裂作用和风化作用的假说 (St. Clair et al., 2015)。理论与实际观察的惊人的对比说明利用新数据验证这一假说和其它不同想法的潜力(例如., Maher and Chamberlain, 2014; Riebe et al., 2017)，同时可以服务于大地构造和地表过程两个学界通过地球化学、构造地貌学和近地表地球物理的融合去大力扩展对于构造、破裂作用、风化和侵蚀作用之间动态耦合的理解。

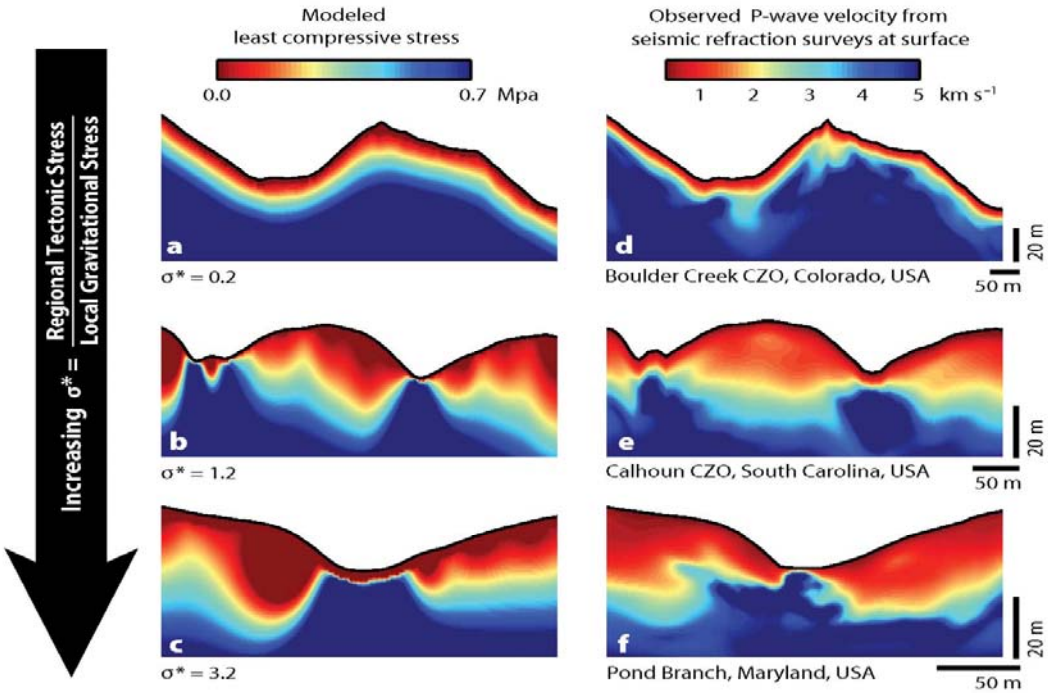



图4-5　横穿具有不同构造应力体系的三个位置基岩破坏的地震折射剖面的观察（右图）与应力计算预测（左图）的开放裂隙样式一致

### 4.7 推动进步的关键问题和需求

**关键问题包括：**

- 动态地形怎样影响大陆和地表作用过程？
- 地幔驱动的地表地形变化如何被刻画在地质记录中，包括沉积、地貌、地质年代学、地球化学和大地测量学记录。
- 构造和气候的外动力作用如何被编码和扩展在沉积物及其地层中？
- 我们怎样在各种时间尺度上对比侵蚀速率、岩石隆升速率和气候表征记录
- 流变学、变形作用、造山作用怎样影响地表侵蚀，反之如何？
- 造山带演化期间，联系植被、坡度稳定性和风化作用的生物-地貌反馈如何运作？
- 生物的、构造的、地表和气候过程的相互作用如何影响全球碳循环？
- 地形、构造应力，化学流通量和风化作用如何影响岩石裂缝形成和降低近地表强度？
- 我们如何定量化与地形地貌演化模型有关的侵蚀力和岩石-块体强度？

**保障进步的需求：**

- 通过合作项目，促进数学模型和野外数据包括地形、气候学、年代学和地球化学数据的整合
- 细化和发展高精度大地测量学、几何学、地层学和地球化学技术，在一个宽泛的时空尺度上重建古地形。
- 拓宽新技术通道，在所有尺度上从事影像摄录和分析工作。
- 发展遥感（例如卫星和航空）技术，增加野外为基础的观察量和精度。
- 促进地质年代学持和热年代学定年技术、数据的解释技术的持续细化和发展以及推动其在关键领域的应用。开发测量与地表过程模拟有关岩石力学性质的测量工具。
- 提供连续的典型野外区域的监测去记录由于构造与地表过程引起的地表变化，更好地理解重建古高度、古气候、侵蚀和风化作用的指标。
- 扩展网络基础设施，支持开放通道连接、快速处理和分析从经纬度填图和监测努力以及从随意数据源诸如无人机数据和个人图片收藏的点云（point cloud）数据
- 加速构造学界为基础的联系地壳和地幔动力学、陆地地表演化、水文学和化学风化通量的模拟设施。

## 5. 重大挑战＃5 满足社会需求与推进构造研究的协同

### 5.1 综述

面对人口增加、技术进步和环境构建之间既定的一系列相互依存关系，我们的社会必须意识和解决它们对地球资源和自然系统施加的压力以及自然和人为力量造成的对这些系统的附加风险。利用构造地质学及其应用学科的研究成果诸如构造地质解决人类关切的诸多重要问题的能力，地球科学在处理上述问题方面起到了关键作用。然而，反过来同样重要，即应用驱动研究本身其实就代表了一个巨大的机会去促进基础研究的进步。在促进科学基本性认知与解决社会问题的研究之间的深度融合是我们学界面临的重若泰山般的挑战。

21世纪哪些是可能产生数据和技术的重大社会相关并且与基础地质科学的进步紧密相伴的领域？以最宽泛的解释，这些领域将包括自然和人为灾害、从饮用水到固体矿产的资源需求、增长的能源需求和气候变化，其中的每一个方面都代表了对人类现今和未来的深远挑战。一些不同学界可以携手应对来自这些领域的挑战，它们包括岩石圈流体循环、岩石破裂作用、地壳应力状态、低温地球化学和地质年代学、地表过程和高分辨率的地表－次地表影像技术。

一些与社会重大关切有关的大地构造和构造地质学研究取得了极具意义的进步。归属于满足社会需求的研究可以在有利于我们加深对地球系统认知的理论与应用科学间细分。此外，因为费用、尺度和感应风险而不实用于基础研究的观察技术在直接应用于人类的研究问题时会得到重新的估价，因而提供了新发现的机会。这里我们举出以服务社会和科学研究为目标协同的6个例子，它们反映了蕴含突破的机遇。由于地下废水注入引发人为地震造成人类灾害和政策挑战，但它另一方面又提供了先前学术研究排除的不同尺度的断层和构造的研究机遇（5.2）。自然灾害诸如大地震、滑坡、火山爆发和海啸引起受其影响的社会各界和科学界的关注，他们普遍希望更多认知毁灭性灾害的过程及其成因以及减缓灾害的诉求。对于自然灾害的科学响应可以满足上述的共有目标并且引起新的发现，正如2011年福岛地震和海啸所观察到的那样（5.3）。预测流体在断层和裂隙中的流动态势对于满足社会对能源、经济的地下水资源、安全过滤地下污染物和潜在的温室气体至关重要；同时也是理解断层行为的关键（重大挑战3）。

对于定量化断层的化学与物理过程相互作用新视角和新工具正在改变我们研究数百万年期间通过地震循环过程中断层带渗透性的方式（5.4），使得人人

尽知的分析和预测次地表裂隙作用的难点问题得以突破（5.5）。我们努力的关键目标是提供灾害风险模型的有关数据－例如通过跨越大陆和大洋盆地的俯冲带的研究（5.6）－在基本的发现和观察的同时提供新一代改善了的灾害模型（5.7）。构造学界将以野外、实验室以及实验的、数字的和理论方式的有效结合去处理这些问题。如果我们企图全面地发掘潜在的机会的话，未来的进步将需要与来自其它科学领域的科学家和工程师的更紧密的合作（5.8）。

这些例子说明了存在于构造过程和人类需求交叉点的机会和研究需求。在每一个例子中我们所寻求的认知为灾害评估和关键能源、水和环境资源的可持续的管控打下基础。同时，有关灾害和资源挑战所驱动的应用研究具有巨大的潜力去推动科学前沿的发展。构造研究学界正在以新的方式和视角去拥抱双极目标：满足社会需求和深化对于我们行星的理解。

**关键问题包括：**

- 在建立构造灾害定量模型中，什么样的社会关注的时空尺度的过程和物理关系是最重要的？
- 我们如何能够预报极端构造事件和相关的自然及人为地质灾害？
- 我们如何能够与利益相关者合作去开发预警、复原以及减灾战略，同时沟通相伴的不确定性？
- 人类活动在与地质灾害相关的时间尺度上（如次地表流体注入或者汲取引发的地震）如何影响自然系统？
- 流体－构造－大地构造相互作用如何影响饮用水源、有害物质污染、CO2封存、建筑物和其它基础设施的稳定性以及地热资源的潜力？

## 5.2 了解人为地震：俄克拉荷马流体注入实验

人类活动引发的地震导致了受影响地区防灾减灾的挑战，但也提供了一个过去学术研究不曾考虑的断层和构造的探索机遇。这一大型的自然实验包括地震成核、前兆地震和破裂过程、地震统计、断层渗透性和地震成因的断层复原或者弥合的研究使得研究通道成为可能。

近年来美国的诱发地震比例有很大的上升（Ellsworth et al., 2013; 图5-1），引起了公众的关注和政策制定难题。但是，人为地震也为先前学术研究不曾涉及的尺度的断层和构造过程的研究提供了机会。例如，非有意的俄荷拉荷马大型流体注入实验使得观察成为可能，其为断层作用和地震过程提供新的见解。尽管某些断层很容易被微小的压力变化所诱发，其支持一些断层存在于近破裂状态的概

念框架 (Keranen et al., 2014)。但另一些地区在同样量的流体注入情况下却毫无反应。后者的一个可能性是因为在无定向的现今应力场中几乎不会引发地震（Walsh and Zoback, 2016）。另一个可能性是我们并非完全理解次地表断层带中或者沿着注入流体通道复杂的渗透性。使地震预报变为现实的有意义的观察是在那些远离当下由于流体注入引发地震活动地区的地震似乎在大规模的流体注入引发地震发生之前通常似乎具有更为频繁的颤动（van der Elst et al., 2013）。其中的启示是远距离地震的颤动水平可以用来测试本地断层的应力状态并判定它们发生破裂的可能性。而进一步的震后详细研究以高的分辨率给出次地表断层网络图像，并显示出多条次平行活动断层以数十米到数百米的间隔分布。然而不清楚的是这些相邻的断层是在主震期间同时破裂还是于震后即刻变得活跃。来自俄克拉荷马的一个地震震序观察发现起码有一个断层随着微弱的断层活动（M<0)在中度地震前数小时变得活跃，这些先期的地震向最终地震成核地点移动（Savage et al., 2017）。我们需要更多的观察来评价这些先期活动是否具有普遍性。

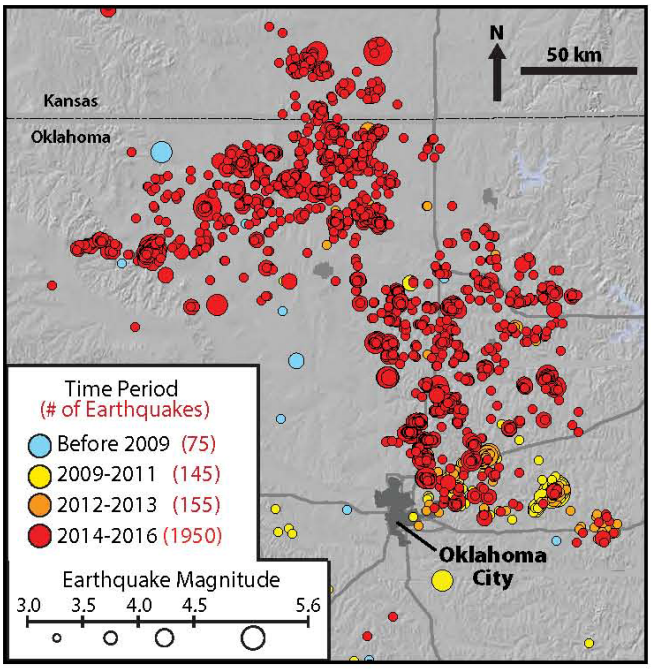



图5-1　USGS1973-2016年6月俄克拉荷马地震活动的地震灾害项目图

有关自然和人为地震活动一些主要问题依然有待回答，它们包括：1）地震如何成核，有无可以观察的先期信号？2）什么断层过程、构造或者应力和流体压力条件控制裂隙的传播和止裂？包含诸如应力、孔隙流体压力和滑动等要害参

数基本过程的直接观察在缺少沿断层的原地测量情况下是不可能的，例如那些圣安德里斯断层深部观察项目（SAFOD）获取的资料所表明的那样（例如，Zoback et al., 2011）。一个类似于Rangely1970年代实验（Raleigh et al., 1976）的已知断层的流体注入引发地震在具有仪器测量网络情况下可以允许我们得到近乎野外的信息。先于实验的钻孔和仪器资料可以使得我们搜集到近于源地的裂隙发育到终止的实时数据。此类实验绝对可以加深我们对于应力状态和地震成因中流体作用以及更为广泛的地震的认知。

### 5.3 通过快速科学响应了解自然灾害：日本海沟钻探案例

在大规模地震、海啸、滑坡和火山爆发的余波之中，潜藏着从有可能成为毁灭性灾难中获取科学信息的巨大机遇。时刻准备对这些事件实施快速的科学响应，并结合长期的补充性的观察努力，使得多数的机会能够为推进基础研究并为减轻灾害影响奠定基础。

在大规模地震、海啸、滑坡和火山爆发的余波之中，潜藏着从有可能成为毁灭性灾难中获取科学信息的巨大机遇。时刻准备对这些事件实施快速的科学响应，并结合长期的补充性的观察努力，使得多数的机会能够为推进基础研究并为减轻灾害影响奠定基础。例如，许多有关断层强度和变形机制的主要问题均可以在地震后期得到最好的解决。断层有何等强度？瞬间滑动有无特殊的地质印记？残余应力状态如何？ 包含在地质记录中这些问题答案可以在一个大地震的余波中通过详尽的观察得以验证和提升。

日本海沟快速钻探项目（JFAST）是一个成功的震后快速反应项目，其涉及了大规模的和复杂技术的国际合作。JAFAST 科学团队在2011年3月9级福岛地震冲击日本海岸不到一年的时间内在深海钻探船Chiyu扬帆起航开始了IODP的探险工作（图5-2）。他们的目标是：在水深7km的海底之下820米处横穿断层，钻穿一个已经滑动50 m板块边界断层带。他们（1）成功地进行了确定断层带和约束震后的应力状态的地球物理测井（Lin et al., 2013）；（2）采取了断层和围岩的岩芯，其为大型滑动的地质控制因素和毁灭性的海啸提供了信息（Chester et al., 2013；Ujiie et al., 2013）；（3）安装了一个钻孔温度观测仪并从断层获取了相应的摩擦热－测量断层的共震摩擦强度的关键数据（Fulton et al., 2013）。观测数据同时记录了瞬间破坏、流体流动以及与震后相伴随的愈合行为的证据（Fulton和Brodsky，2016）。长期观测数据的搜集继续清楚显示出慢滑地震对认知大地震和海啸的启示（Araki et al., 2017）。

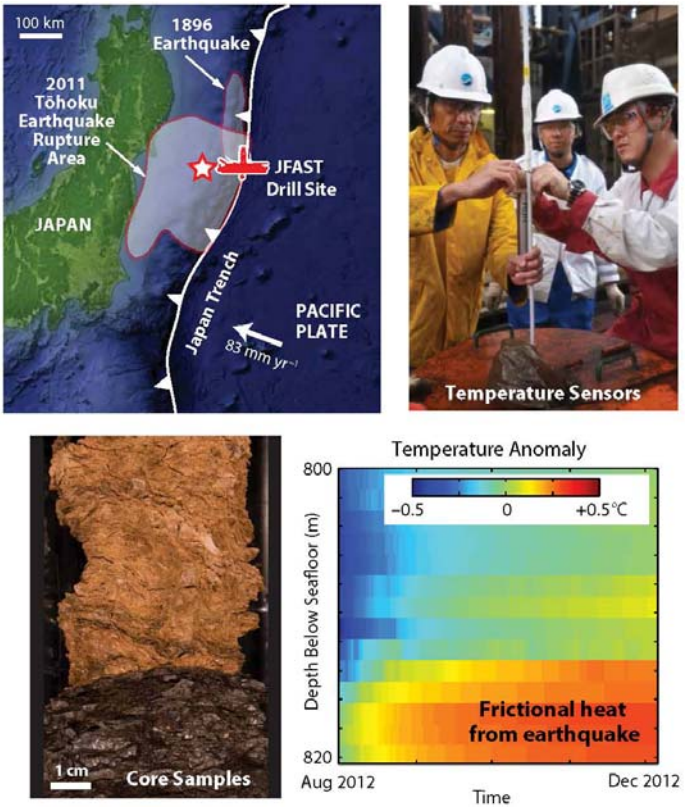



图5-2 日本海沟快速钻探项目的位置图以及样品和数据搜集展示

这一项目的结果已经在促使我们更好地理解地震机制、流体流动和断层构造，显示出在自然灾害出现之前由关键科学问题导向的有计划的大项目的价值。一系列有关如何在大地震发生之后更有效地钻探断层的超前想法已经具备。这些努力为关键的科学问题所引导特别是事先已经做了一系列的实验以及必要的保障成功的技术和环境考虑。一些想法事先直接在主要国家的科研机构间沟通使得方略制定者能够先于大地震的余波的杂乱状况中及时理解科学的目标。事先的计划也能够使得JFAST项目更好地利用国际合作、已有的基础设施和项目管理结构以及由先前的成功断层长期监测项目（SAFOD）的经验。除了推动有利于风险管控的基础研究外 （5.6和5.7），我们构造学界面对灾难的侵袭应当树立雄心壮志和尽力去最大化知识的挖潜——包括基础研究和服务社会两方面。

## 5.4 断层带的渗透性：理解构造－流体演化和自然资源

断层作用可以对流体流动造成障碍、回路或者障碍－回路系统，这些对于社会相关过程具有重要启示。断层带发育中的化学和机械过程的新观念结合新的地球化学手段正在改变我们研究断层带过程以及在地震循环和数百万年期间渗透

性构造演变的方式。

断层带的渗透构造对社会相关的问题颇有意义，包括发现流体（例如烃源和清洁水源）或者次地表的流体保存（如对大气圈或核废料的CO2的封存）。根据断层带内地质构造的性质，断层带可以构成流体流动的障碍、回路或者障碍－回路系统（例如，Caine et al., 1996）；既存的断层带渗透构造影响断层带形成流体的圈闭或者泄漏、在哪里和什么时候形成。长期封闭的断层带可以产生过度压力的圈闭类似导致Deepwater Horizon悲剧和石油泄漏的例子（图 5-3）。

甚至短期的封闭也可以减低废水注入次地表通道的速度，造成孔隙流体压力大到足够引起断层滑动和地震（5.2）。在地壳深部，断层滑动和破裂作用要能够为矿产的聚集提供高度渗透性地带。因此，理解在一定时间内断层带渗透性的发展对于满足社会对资源和宜居环境的需求至关重要。

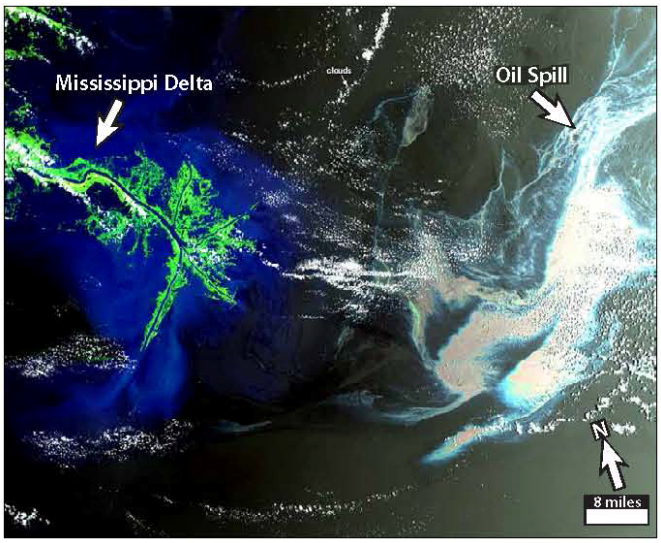



图5.3 墨西哥湾 Deepwater Horizon 石油泄漏的假彩色陆地卫星7影像

断层带矿物生长的时空定量化的创新性发展正在从根本上改变构造地质学家研究单个地震循环到数百万年期间的断层渗透性的方式。对于渗透性变化的时间尺度的精确的考虑是构造／力学与地球化学过程之间关键反馈的进一步理解的一个方面（例如，Laubach et al., 2010）。犹他州Moab断层的例子中，40Ar/39Ar测年结合矿物学分析报告了断层核部大于50%的同构造粘土矿物（伊利石）的富集，其纪录了大约60-62百万年前流体－岩石的相互作用（Solum et al., 2005）。随着时间变化，断层核部伊利石的生长出现在不同的脉动期，可能反映了断层滑动作用，两者同时出现于驱动吸热的粘土产生的反应的流体移动（Boles et al., 2015）和摩擦加热过程（Jacobs et al., 2006）。这些结果挑战通常的假设即低渗

透性断层泥构成流体流动的顽固的障碍，可能解释了难以理解的局部烃沿断层的地表印迹泄漏现象（引自 Boles et al., 2004；图5-4 左）。 断层机制中，粘土不仅可以降低地震活期间的渗透性，而且可以改变断层核部摩擦和强度的性质－凸显了这些成果对于基础和应用研究的意义。

断层带的渗透构造也可以在短期内变化。地震期间形成于破碎带的裂隙造成渗透性的瞬间增加，它们的生存期取决于开放和封闭过程两者。例如，一个断层颠簸的地震滑动模拟说明含有世界上30%金矿的石英脉（图5-4 右）可能不仅纪录地震期间裂隙的开放，而且反映了地震引发的、几乎瞬间的促使裂隙充填矿物的快速沉淀的流体释压和闪现的蒸发现象（Weatherley and Henley, 2013）。断层系统的4D 演化表现了长期的低渗透性被瞬间的高渗透性幕穿插的特征。对高渗透幕寿命的约束来自新近的同构造脉定年技术的进步(e.g., Roberts and Walker, 2016) 。这些例子说明可以进一步发掘流体－断层相互作用的矿物学历史的某些方式，用以研究流体通道的寿命和追踪断层带的演化，为提升我们对这些动态过程的理解铺平道路。

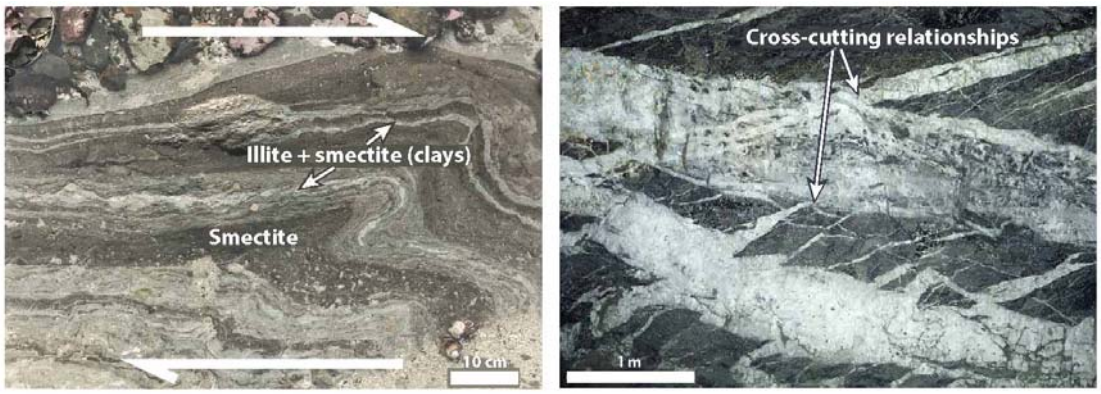



图 5-4. 左-加州塞尔考夫San Gregorio断层核部--富于黏土的断层核部是烃类通道；显示断层带渗透性短期变化的岩石纪录。 一套厚的粘土层记录了烃沿断层地表的印迹的泄漏 （包括San Gregorio 断层）。右-澳大利亚St Ives Defiance矿脉系统--连续地震建立起含金石英脉网络，多幕次的同震生裂隙和脉体纪录了澳大利亚Defiance矿脉系统渗透性的瞬间增加。

## 5.5 自然裂隙的年龄和成因：了解新发现和新技术

次地表裂隙影响工程和岩石的地震性质并且控制着有重要经济意义的流体的运动，然而理解和预测深部裂隙系统的问题长期以来困扰着构造地质／大地构造学界。由于最近以来显微分析技术的进步以及理论实验方法与通常用于次地表深部的变质矿物组合和矿床学研究的岩石学、地质力学和地球化学工具的融合，新的突破已经显露曙光。

次地表开放模式（伸展的）的裂隙和断层控制着具有经济意义的流体和污

染物的运动。同时它们影响着岩石的强度和地震性质以及工程活动的界面，包括水压裂隙（例如，5.2）。

裂隙的发育代表了非常规页岩油气藏的重要元素而且愈来愈成为世界能源开发的核心关注（Evans et al., 2014；Gale et al., 2014）。其结果，对裂隙的认知在诸多工业界和研究领域显现出重要性，包括从水文地质到废物处理再到地震学、建筑、采矿和油气生产（图5-5）。

然而，掌握和预测深部裂隙系统成为构造和大地构造学界长期以来的难啃的骨头。其中一个挑战是区域性的具开放模式裂隙群可以具有多元的成因并且对于构造或者地层、区域断裂和褶皱作用或者造山事件表现了模糊的关系。况且，传统的地表露头的观察可能导致误解，而来自次地表的昂贵的样品分析从未完整过。裂隙群的真实年龄和开裂的速率的缺乏妨碍了我们创立准确的和可验证的地质力学模型，同时限制了我们对于沉积盆地的力学和水文学的演化的理解（例如，Engedler 和 Whitaker，2006；Backer et al., 2010； English，2012）。诸如此类的问题导致了许多实际应用中难以接受的不确定性，例如地震风险评估、污染物处理、地下水的恢复以及矿产和能源工业。

图5-5 美国怀俄明Pinedale野外钻机，背景：Wind River山

新的发现和技术正在改变研究者迎接此类挑战的方式。最近重大进展是对许多裂隙的认知，其中包括一些多数情况下开放的、含有丰富的矿产的、结构复杂和流体包体证据的裂隙群 （例如，Hanks et al., 2006；Fall et al., 2016）。

图5-6（上图）显微裂隙中石英桥（quartz bridge）影像展示了由高分辨率

CL填图（cathodoluminescence mapping）揭示的多代的裂隙封闭的胶结作用。这些错综复杂的显微镜特征反映了次地表裂隙中热的和化学上活泼的流体的存在。它们的发现意味着过去用于研究次地表深部成岩作用和变质岩矿物组合以及矿床学的岩石学和地球化学作用手段都可以承担先前只能用力学方法解决的问题。现在我们可以利用裂隙系统的成岩作用和地球化学方面的知识解释野外观察、确定裂隙年龄以及建立更好的地球化学模型和进行数字模拟（Ankit et al., 2015；Lander和 Laubach，2015）一例如石英桥的建立(参看动画：http://www. geosociety. org/ datarepository/ 2014, item 2014339)需要裂隙开放历史和矿物沉淀速率的模拟（图5-6下图）。 显微镜技术的创新（SEM－CL，TEM，EBSD）也在助推裂隙中流体使用热台和地球化学数据从事的包裹体－填充胶结物的研究和解释(例如，Anders et al., 2014)。目前，通过上述新技术与理论和实验的融合，在理解裂隙系统的成因、定时和生长速率方面的突破已指日可待，其将有利于工程、污染物的处理和能源生产上的应用，同时也将进一步推动区域应力场演化、褶皱和断裂带的发育、流变学和地震循环的根本性理解（例如，重大挑战2，3，4）。

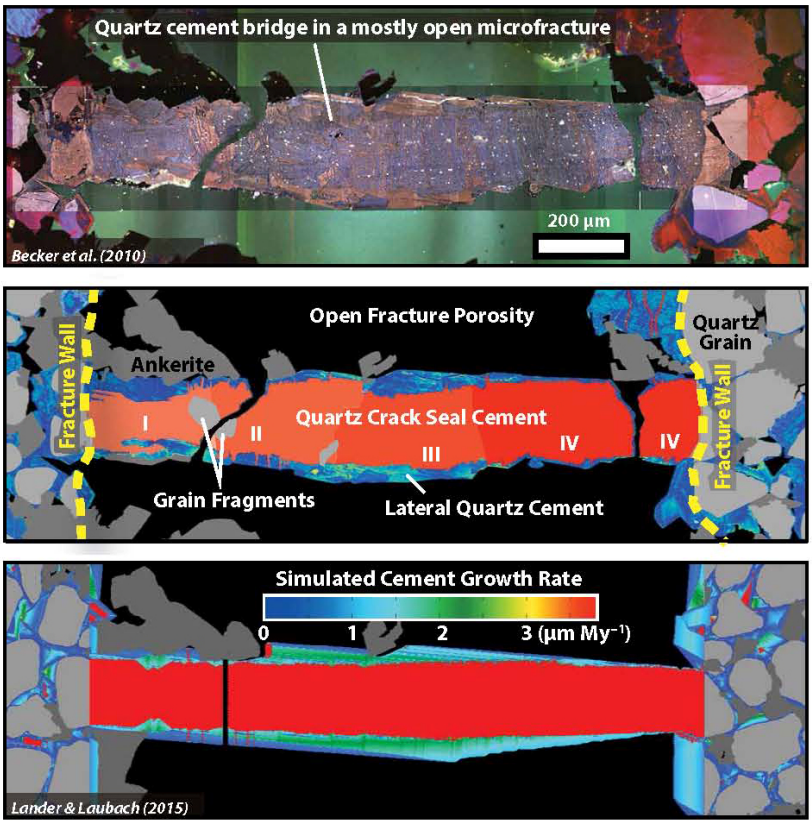



图5-6 高分辨率的石英胶结作用CL图（上），解释（中）和计算机模拟（下）：纪录次地表裂隙系统的定时和生长速率。

## 5.6 针对社会复原能力的俯冲带科学

推动俯冲带地区构造研究传递自然灾害评估和降低风险的信息是非常重要的，这样的地区地震、海啸、火山爆发和滑坡频发、规模大、不可抗拒，并且组合在一起。 创建应对这些构造灾害的复原力，我们需要提升对俯冲带构造过程的理解，利用横穿海岸线的资料搜集和监测发展新的观察上的甄别能力和基于野外和实验室研究的综合模型。

发展构造研究对于为自然灾害评价和降低灾害的提供信息的重要性在俯冲带地区得到很好的诠释，因为俯冲带地区的地震、海啸、火山喷发和滑坡频发、规模大、不可避免，并且组合在一起。

随着人口密度在沿海地区的增加－其中许多居住在俯冲带，降低俯冲相关灾害风险的需要与日剧增 (e.g., McGuire, Plank et al., 2017)。聚焦于海上和海岸过程的构造研究是有效降低灾害战略的基础。例如，新近要求的高分辨率、着色起伏测深和地形影像（图5-7）显示1964年发生的9.2级阿拉斯加地震引发了海底滑坡，其产生的破坏性海啸导致23人死亡（Brothers at al., 2016）。许多其它紧随此次地震出现的破坏性海啸很可能由类似的滑坡引发。对于类似组合的、横穿海岸线构造过程的理解加上先进的地形数据和填图，将有助于识别局部的海啸缘由并可能降低未来构造事件的冲击。这一例子突显了其它局部化灾害现象的类似研究可以用来支持过去无法想象的时间尺度和定位的填图、过程分析和预报的潜力，特别在海岸地区。在人口稠密或者重要的基础设施所在地，工程师、设计者、应急管理者和政策制定者目前均需要获得居民区范围在地震、地面开裂、海啸、滑坡、火山爆发及其影响中各种变化的信息。当地的构造特征会对上述的灾害现象施加较强的效应比如地震中的地面撼动，对此必须为设计具有新结构的工程和对旧有的进行改造而详细模拟。在西雅图、华盛顿脆弱的、无加固的砖石结构建筑已按照新的USGS城市灾害图进行改造，显示了预计可能受到地震撼动的一个个城市街区的空间变化（图5-8；Gomberg et al., 2017）。更广泛的意义上，断层带演化的研究（重大挑战 3）和以高分辨率刻划构造事件的能力可以直接转化为拯救生命、降低费用以及城市设计和应急准备行动。

构建地质灾害复原能力要求对构造过程如何导致灾害事件的时空演以及事件之间的关联性的深刻认知。以4D的视角理解这些关系能够对于强震、火山爆发和滑坡给出早期预警并及时发布以实施生命和财产的救援措施。多专业角度的监测（例如，地球物理监测网的利用或者卫星影像的构造地貌研究）是提高上述能

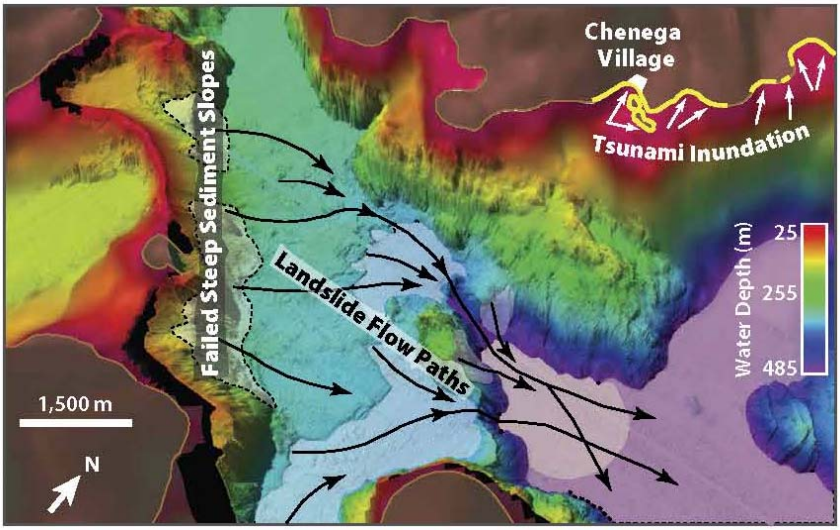



图5-7 高分辨率的测深和地形显示1964年阿拉斯加的9.2级地震可能引发了海底的滑坡，此事件引起了23人死亡的海啸。

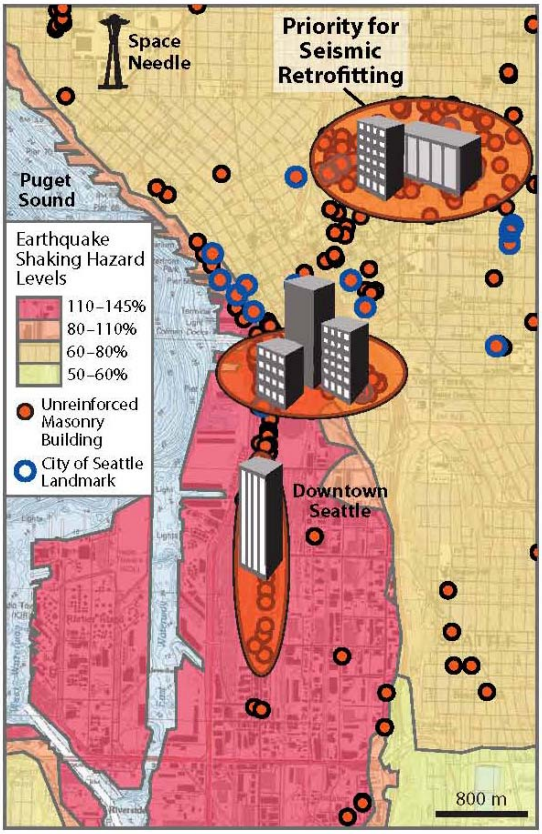



图5-8 显示地震中一个个街区受到撼动空间变化的USGS灾害图引导建筑物和基础设施的防震改造

力的关键，同时理解灾害性的俯冲带事件的构造格架——诸如对阿拉斯加与太平洋－北美板块边缘活动流行模式相左的缓慢地震的监测和勾画在大地震中发生滑动地区的界限（Wech，2016）。

要取得进步，我们需要对板块边界构造过程的理解。通过新观察识别、地质的野外和实验室研究的综合 、新生海底测量（例如，核部和次地表的影像）、多学科监测和横穿海岸线的精细地形数据可以实现这一目的。

## 5.7 从构造研究到降低灾害风险

大地构造和相关领域的研究为地震、滑坡、海啸和火山灾害模型和如何降低风险实践提供了基础数据，一个重要目标是利用基础研究和观察去判定灾害模型对错之处，并且预测用以提高未来灾害模型所需的数据。

构造学界主要的目标之一是推进适应社会需求和应对挑战的研究。通过引导规范建立、保障生命主线的风险降低实践以及关键设施的安全定位，这一方面的研究将造福社会；同时，上述研究为保障新鲜饮用水的安全、矿产和能源的安全以及认知像海啸和滑坡一类的构造灾害如何加剧随着气候改变出现的海平面和降水模式的变化提供基础。然而，以假设为出发点的科研路径到支持政策的决定之间并非一成不变的清楚。

对灾害和风险模型本质的认知－超越现实的思维是关键。灾害模型试图抓住自然现象的位置、频率和强度。风险模型建立在计算得出的灾害损失包括死亡、受伤人数、基础设施破坏和经济影响。两者的核心问题构成了对构造学界的下述挑战：与社会相关的数年到数百年的时间尺度上何种构造过程事关重大？

构造地质学和大地构造学研究为地震、滑坡、海啸和火山灾害模型提供了基础数据。例如，在其它参数中，地震模型需要断层几何学和滑动状况（断层方位、产状、围岩性质、断层怎样滑动？）、出现周期（多久出现一次断层破裂？）以及地震震级分布的估计，未来的地震灾害模型将进一步吸收地震历史和现实物理性破裂的断层网络的信息并结合地面颤动的3D和宽谱纪录。将这些元素进行参数化和综合长期构造问题与短期社会关注需要广泛的基础科学的支持，以此实现建立一个现实的、全球的地震引擎（earthquake engine）目标（图5-9）

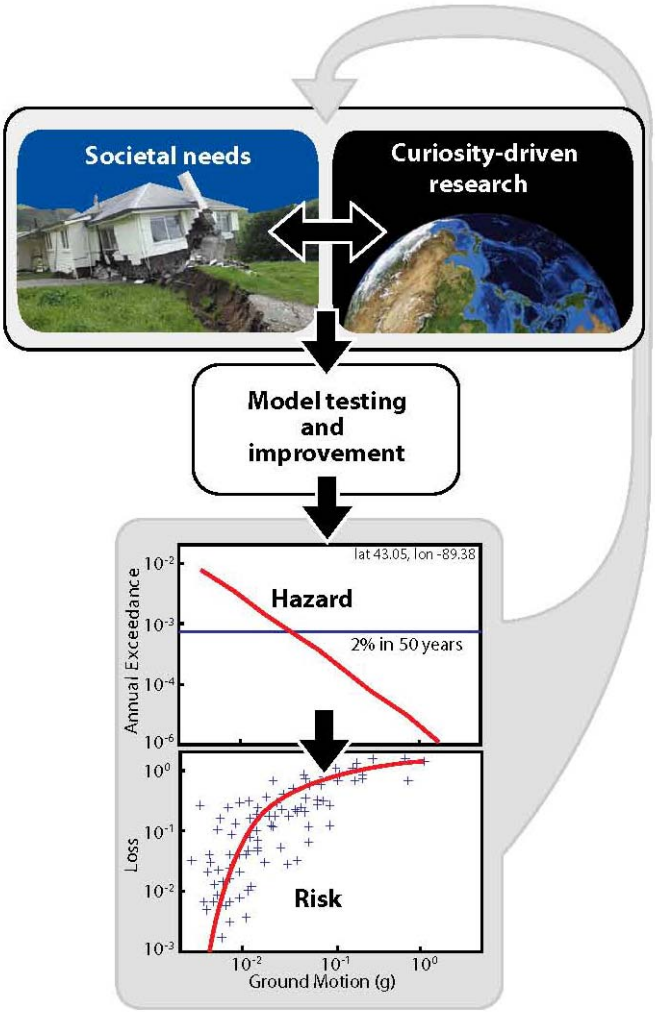



图5-9　灾害评价中三个研究的结合：好奇心驱动和实用驱动的研究加上提供地震、滑坡、海啸和火山灾害模型的构造研究

灾害评估中好奇心驱动的研究与实用鞭策研究的结合。几十年前，俯冲带和隐伏断层的发现以极其有益的方式拓展了地震灾害模型，并且衍生了数据搜集和解释的新途径。相对而言，宏观看待开发和观察研究的重要性比较容易。但是，无法预知地点的毁灭性地震和滑坡的发生很清楚地告诉我们，人类在低层次上尚未有足够的眼光自信地去模拟地球的变形。对断层系统的关键行为通常认为已经很好地把握了，像圣安德列斯断层、瓦萨奇（Wasatch，犹他州－译者）断层和卡斯卡迪亚断层（北加州—译者），事实上，它们仍然处在被发现之中。新近的将好奇心驱动研究与灾害评估联系起来的方式展示了可喜的前景，例如折返历史与地震历史相联系的低温热年代学和断层滑动速率的结合（例如，Enkelmann et al., 2015）；由断层岩石的显微构造和地球化学结合的完整的地震循环重建（例如 3.3和3.4）；利用雷达探测的地表起伏建立的区域滑坡时序的新方法（例如

LaHusen et al., 2016）以及控制地面颤动的流变作用的研究（例如，Roten et al., 2014；重大挑战 2）。未来对于构造研究挑战的核心将是在为规范下一代灾害风险评估进行新的发现的同时，给既存的灾害风险模型提供相关数据。

进步将要求从事构造过程研究的地球科学家和灾害模型的创建者之间的合作去解决如下的问题：构造研究如何能够更好地在对社会重大关切的时空尺度上解决问题？哪些地方灾害模型遭遇失败并且需要根本性的革新手段？一个构造学界的应有做派是在从事灾害相关研究推动科学发展的同时承担拯救生命和降低经济损失的重任。

**5.8 保障进取的要求包括：**

- 增强基础构造过程的科学家和那些从事应用性问题、风险管控和工业的地质科学家的参与、合作和数据共享。
- 发展以学界为基础的资源网络，帮助将专业领域研究转化为减灾救灾以及帮助协调实验设计、灾害风险评估和政策制定活动。
- 支持和扩大以学界为基地的监测研究地点的使用，有效利用活动过程以及交叉问题。
- 增强模拟与观察两方面之间的反馈。
- 提高地质事件全谱时间尺度的测年精度以及提供灾害模型预报能力的分辨率。
- 时刻准备紧随重大自然灾害事件快速调配科学家和观测台站，以求推动基础研究的进步和为提高减灾能力奠定基础。