

超重力构造物理模拟技术进展及应用

邹耀遥^{1,2,3,4}, 万晓帆^{1,2}, 王亮⁵, 葛翔^{1,2}, 高彦杰^{1,2}, 沈传波^{1,2*}

1. 中国地质大学深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 湖北 武汉 430074
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074
3. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;
4. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205;
5. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002

摘要: 超重力物理模拟技术是重现具有多层流变结构的地壳-岩石圈尺度构造变形过程的有效方法, 在研究深部流变结构及其对上地壳脆性变形的影响中发挥了重要作用, 广泛应用于底辟构造、褶皱冲断带、大陆伸展构造、岩浆-裂谷相互作用和走滑拉分盆地研究中。本文回顾了超重力构造物理模拟技术发展历史, 论述了超重力构造物理模拟实验原理、仪器设备、实验材料以及监测与分析技术的最新进展, 对比了超重力与常规构造物理模拟实验的差异, 分析了超重力构造物理模拟技术在伸展、挤压、走滑、盐/岩浆构造等不同构造背景研究的实例, 并展望了超重力构造物理模拟技术在油气勘探与深地研究中的应用前景, 探讨了未来发展方向。

关键词: 构造物理模拟, 离心机, 流变结构, 油气勘探, 深地

中图分类号: P613.8

收稿日期: 2026-1-29

Progress and Application of Centrifuge Analogue Tectonic Modelling Technology

Zou Yaoyao^{1,2,3,4}, Wan Xiaofan^{1,2}, Wang Liang⁵, Ge Xiang^{1,2}, Gao Yanjie^{1,2}, Shen Chuanbo^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074,

3. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, China;

4. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China;

5. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Centrifuge analogue modelling technology is an effective method to reproduce the tectonic deformation process of the crust-lithosphere scale with a multi-layer rheological structure. It plays an important role in investigating deep rheological architectures and their influence on brittle deformation in the upper crust, and has been widely applied to studies of diapirism, fold-and-thrust belts, continental extension, magma-rift interactions, and strike-slip pull-apart basins. The development history of centrifuge analogue tectonic modeling is summarized, and the modelling principles, apparatus, materials, and recent advances in monitoring and analysis techniques are discussed in detail. Differences between centrifuge analogue and normal gravity tectonic analogue modelling experiments are systematically compared.

基金项目: 国家油气科技重大专项(2024ZD1400100); 深地国家科技重大专项(2024ZD1001703, 2025ZD1007404); 中国地质调查局地质调查项目(DD20240062); 中国地质调查局武汉地质调查中心“潜龙计划”青年优秀项目(QL202506)

作者简介: 邹耀遥(1995-), 男, 博士, 工程师, 从事构造-成藏-成矿研究和矿产地质调查工作, E-mail: zouyaoyaogeo@163.com; ORCID: 0000-0002-0280-8172.

通讯作者: 沈传波(1979-), 博士, 教授, 从事盆地构造分析及构造-成藏年代学研究工作, E-mail: cbshen@cug.edu.cn; ORCID: 0000-0001-5641-9714.

Representative applications of centrifuge analogue tectonic analogue modelling under different tectonic settings are analyzed, including extensional, compressional, strike-slip, and salt/magmatic tectonic regimes. Finally, we look forward to the application prospects of centrifuge analogue tectonic analogue modelling in hydrocarbon exploration and deep-earth system research and discuss the future development direction of this technology.

Keywords: Tectonic Analogue Modelling, Centrifuge, Rheological Structure, Petroleum Exploration, Deep Earth

0 引言

如何合理地重建地质体时空演化的运动学过程，是构造地质学中具有挑战性的科学难题，而构造物理模拟技术是关键性的实验方法之一。超重力物理模拟是地质构造实验技术的重点发展方向，是重现具有多层流变结构的地壳-岩石圈尺度构造变形过程的有效方法，特别是当重力对构造演化过程具有重要驱动作用时（Koyi, 1991, 1997; Corti, 2012; 陈云敏等, 2020; 杨树锋等, 2022; 贾东等, 2023）。超重力物理模拟实验技术可以追溯到20世纪30年代，Bucky(1931)率先将离心机技术应用于地质学研究，探讨了重力作用对矿井稳定性的影响。20世纪60-70年代，乌普萨拉大学的汉斯·朗伯格（Hans Ramberg）开展了一系列常规重力和超重力物理模拟实验研究，奠定了现代构造物理模拟实验的理论基础，并将超重力物理模拟实验的应用范围扩展到对穹隆、底辟、褶皱、重力滑动和岩浆活动的研究中(Ramberg, 1967, 1971; Ghosh & Ramberg, 1968)。汉斯·朗伯格的工作对后续的超重力物理模拟实验发展产生了深远影响，自此开始，超重力构造物理模拟技术开始被广泛应用于由塑性流变结构驱动的构造变形研究中（Koyi, 1997），并在底辟构造（Jackson & Talbot, 1986, 1989; Koyi & Petersen, 1993; Dietl & Koyi, 2011）、褶皱冲断带（Dixon & Summers, 1983, 1985; Mulugeta, 1988a,b; Koyi, 1988; Dixon & Tirrul, 1991; Yakymchuk et al., 2012; Milazzo et al., 2021; Santolaria et al., 2022）、大陆伸展构造（Koyi, 1991; Koyi & Skelton, 2001; Harris & Koyi, 2003; Corti, 2004, 2008, 2012; Agostini et al., 2011; Corti et al., 2011, 2013a, b, c; Philippon et al., 2015; Zwaan et al., 2020; Zou et al., 2024）、岩浆-裂谷相互作用（Bonini et al., 2001; Corti et al., 2001, 2004）、走滑拉分盆地（Corti & Dooley, 2015）以及深浅部耦合关系（Corti & Manetti; 2006; Corti et al., 2011, 2013a, b, c; Godin et al., 2011, Harris et al., 2012a,b）的研究中发挥了重要作用。

相比于常规重力场中的构造物理模拟实验，超重力物理模拟技术具有更大尺度的“缩时”和“缩尺”效应（陈云敏等, 2020），可以更好地开展岩石圈尺度的构造变形研究（Corti et al., 2012; 杨树锋等, 2022; 贾东等, 2023），这对于探索地球科学领域的诸多重大基础科学问题具有重要意义，如微板块旋转、深部地质过程与浅部构造变形的耦合关系等。因此，超重力构造物理模拟实验技术被越来越多的构造模拟实验室所重视，并得到了快速发展。基于此，本文将综述超重力构造物理模拟实验技术的最新进展，探讨在不同领域的应用案例及前景，展望未来发展方向，以期推动该技术更广泛的应用。

1 超重力构造物理模拟实验原理与流程

1.1 基本原理

构造物理模拟实验需要遵循相似性原则，无论是在常规还是超重力场中，模型设计都需要保证与自然原型在几何学、运动学和动力学上的相似性。超重力模拟通过离心机对小尺度模型施加离心力，增强重力在驱动变形中的作用，诱发模型发生构造变形及演化。

几何学相似要求实验模型的三维尺寸（长度、高度、面积、体积等）应与地质实例具有相同的比例。运动学相似要求模型在变形过程中的运动状态应与地质实例保持相同的比例，包括速度、加速度、运动轨迹等。动力学相似则要求模型材料的流变性能和不同力（如惯性、粘性、弹性、引力和摩擦力）的比例应与地质实例相

同，即任何两个不同的力之间的比率在模型和地质实例中必须是相同的。这三种相似性之间的关系可以用以下系列方程来表示（Hubbert 1937; Ramberg 1981; Corti et al., 2003）。通常会定义物理模型与地质实例相关物理参数的比值，并用*来进行标记。例如长度比值 L^* ：

$$L^* = L_{model} / L_{nature} \quad (1)$$

同样的，我们为所有具有应力单位的参数定义了应力比 σ^* ，地质实例中的所有的应力（如压应力 P ）必须在模型中按相同的应力比 σ^* 缩小：

$$\sigma^* = P^* = \rho^* \cdot g^* \cdot h^* \quad (2)$$

其中， ρ 为密度， g 为重力加速度， h 为模型或地质体的厚度。

在构建物理模拟模型时常使用塑性材料来模拟岩石圈中的塑性圈层，因此需要考虑应变率 ε 、粘度 η 与应力 σ 之间的相似性关系：

$$\varepsilon^* = \sigma^* / \eta^* \quad (3)$$

用于模拟上地壳的脆性层，可通过重力应力（ pg ）与内聚力（ C_0 ）的比值 R_s 来评估其相似性关系， R_s 越接近 1，动力学相似性越高（Ramberg, 1981; Mulugeta, 1988a; Bonini et al., 2001）：

$$R_s^* = (\rho^* \cdot g^* \cdot h^*) / C_0^* \quad (4)$$

常规重力场的物理模拟中 g^* 值为 1，而在超重力构造物理模拟实验中， g^* 值可以高达 1000。根据公式（2）（3）， g^* 值越大，应变率比值 ε^* 越大，即模型的变形速度越快，因此，相对于常规物理模拟实验，超重力物理模拟实验的时间更短，能够更好的“缩时”。对于塑性层，如果保持应变率比值 ε^* 不变（即模型的变形速度不变）， g^* 越大，粘度比值 η^* 越大，因此在超重力环境中可以选择粘度更大的塑性材料进行模型构建。对于脆性层，根据公式（4），为了使 R_s 尽可能接近 1， g^* 越大，内聚力比值 C_0^* 也应更大，因此需要选择内聚力更高的材料（如更细的、内摩擦角更大的长石砂）进行超重力实验。

1.2 实验设备

全球范围内有代表性的超重力构造物理模拟实验室主要包括瑞典乌普萨拉大学的汉斯·朗伯格构造实验室（Hans Ramberg Tectonic Laboratory, Uppsala University）、意大利国家研究委员会与佛罗伦萨大学共建的构造模拟实验室（Tectonic Modeling Laboratory, The National Research Council of Italy and University of Florence）以及加拿大魁北克大学国立科学研究所的物理模拟实验室（Physical Simulation Laboratory, Institut national de la recherche scientifique）。国内浙江大学依托国家重大科技基础设施建设了超重力离心模拟与实验装置（陈云敏等，2020；杨树锋等，2022；Chen et al., 2026）。这些代表性实验室在设备类型、运行参数、技术侧重点方面存在一定差异，这些差异也影响了其适用的研究对象与模拟能力（表 1）。

离心机是创造超重力场的主要设备，通过高速旋转产生的离心力，可以模拟出数万倍重力的“人造重力场”。超重力场能够驱动模型中的韧性流变层加速流动、脆性层加速垮塌，进而实现模型在短时间内的加速变形（如 Koyi, 1997; Corti et al., 2003; Agostini et al., 2009; Corti, 2012; Philippon et al., 2015; 陈云敏等，2020）。超重力构造物理模拟实验采用的离心机规模普遍较小，可以放置在实验室当中进行操作（图 1a-f），亦有少量实验使用岩土工程实验的大型离心机（例如 Noble & Dixon, 2011，图 1g-h）。随着我国大型离心机装置的建成，大型离心机将会得到更广泛深入的使用（Chen et al., 2026）。

实验室用的小型离心机分为两种类型，第一类离心机为悬挂式吊篮离心机（如佛罗伦萨实验室），即模型可以水平放入吊篮中，离心机开始运行后，随着离心力的增强，承载着模型的吊篮会上升至与旋转轴平行的位置（Corti, 2012; Zou et al., 2024，图 1a-b）。第二类离心机未配置悬挂式吊篮，需要将模型盒翻转 90 度后放置入离心机，瑞典乌普萨拉大学汉斯·朗伯格构造实验室（例如 Harris & Koyi, 2003，图 1c-e）、以及加拿大魁北克大学国立科学研究所（Godin et al., 2011，图 1f）均使用了这类离心机。由于离心机装置的差异，在建模材料

选取、模型观测分析中也会存在不同。

表 1 主要超重力构造物理模拟实验室设备及应用对比

Table 1. Comparison of major centrifuge facilities and their applications in tectonic analogue modelling

实验室	设备类型与参数	技术特点	主要研究对象	参考文献
瑞典乌普萨拉大学 HRTL	大功率离心机 (约 3000~5000 rpm)	最早的构造离心机应用, 高转速强重力场; 支持多层流变结构	裂谷、岩浆-构造耦合、拆离断层、俯冲启动	Harris and Koyi, (2003)
意大利佛罗伦萨 TOOLab	悬挂吊篮式离心机 (PM980R)	可使用离散砂状材料; 高分辨率表面监测	裂谷、逆冲楔、拉分盆地	Corti (2012); Zou et al. (2024)
加拿大 INRS 实验室	高加速度离心机 (~1000g) + CT 扫描	内部结构三维/四维成像; 可视化演化过程	褶皱-逆冲带、滑脱层控制构造	Godin et al., (2011)
中国浙江大学	大型超重力离心平台 (ZJU-400)	机载相机、三维扫描和 PIV 分析; 多期复杂动力加载	青藏高原通道流等	Chen et al. (2026)

1.3 实验材料

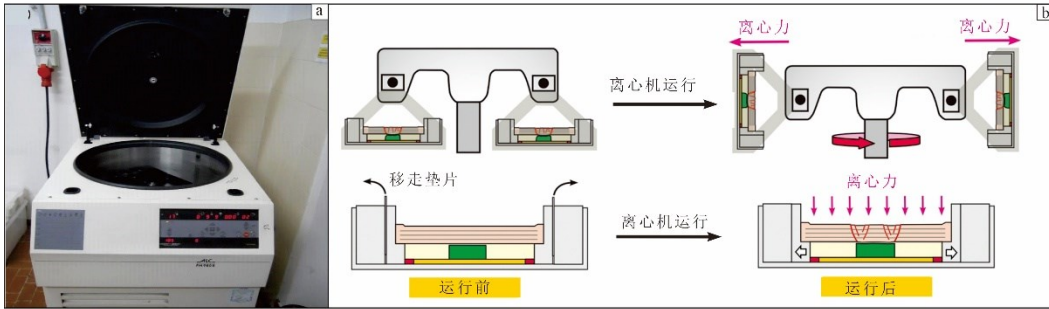
选择合适的模拟材料是决定物理模拟实验可靠与否的关键 (Koyi, 1997; Corti, 2012; Zwaan et al., 2020)。根据大陆岩石圈的流变特性, 通常把大陆岩石圈的流变结构划分为脆性上地壳、韧性下地壳、脆性岩石圈地幔和韧性下地幔, 模拟岩石圈不同部分的材料整体上可以分为韧性材料和脆性材料两大类 (Brun et al., 1985; Ballard et al., 1987; Koyi, 1997)。

在超重力物理模拟实验中, 模拟脆性部分 (如上地壳) 的材料主要为离散颗粒状材料, 如钾长石砂等 (Corti, 2012)。这些材料的内摩擦角与脆性上地壳或岩石圈地幔相似 (Ritter et al., 2016), 因此这些材料能够形成与自然界中类似的地质构造, 能够有效模拟断层发育形态。此外, 还可以混合不同的颗粒材料以调整密度、内摩擦角等物理参数 (Abdelmalak et al., 2016; Montanari et al., 2017; Del Ventisette et al., 2019)。还有一些颗粒状材料 (例如微玻璃珠) 具有较低的内摩擦角, 并且可以用来模拟强度较低的地层, 如滑脱层 (Milazzo et al., 2021)。由于这些脆性材料的形变与变形速率无关, 在实验中可以任意设定变形速率。需要注意, 离散颗粒状材料仅适用于悬挂式吊篮离心机。

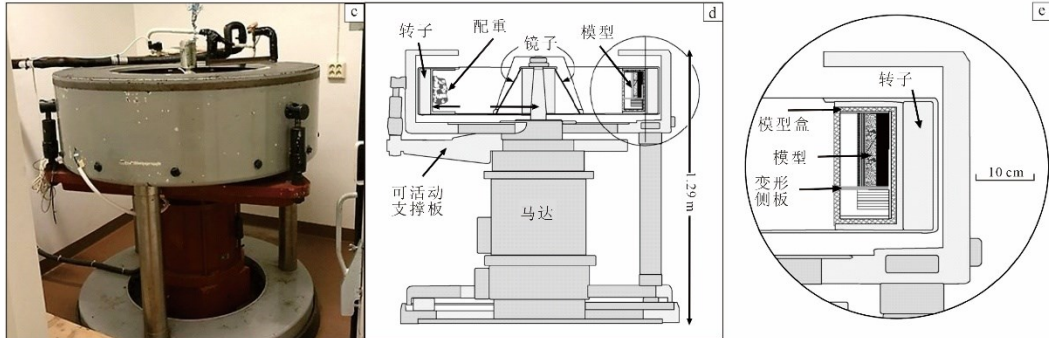
对于未配置悬挂吊篮的离心机, 模型需要侧转 90° 放入离心机, 因此多使用黏弹-脆性特征兼具的材料来模拟脆性层, 如纤维素-甘油-凡士林混合物 (Harris & Koyi, 2003)、塑化剂-重晶石混合物 (Koyi & Skelton, 2001)、石蜡油浸泡的石英砂 (Corti et al., 2003)、月砂 (Moon Sand™, Santolaria et al., 2022) 等。亦有直接使用橡皮泥等强度较大的韧性材料进行建模的 (例如 Harris et al., 2012a, b), 这类材料在模拟褶皱变形方面效果较好, 但难以展现清晰的断层面与断层位移量。

模拟岩石圈的韧性部分, 如下地壳、软流圈地幔或者页岩层、膏盐层或者岩浆, 可以使用各种各样的粘性材料。目前构造物理模拟实验中最常见的韧性材料是聚二甲硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS), 将其与其他材料 (如硅胶、石英砂、油酸等) 混合后, 可以得到具有合适的密度和流变性能的韧性材料 (Corti, 2012)。在超重力构造物理模拟实验中, 通常还会使用一些强度更大的韧性材料, 如橡皮泥、硅胶腻子等。不同于脆性材料, 韧性材料的变形规律与应变率相关, 通常随着应变率的增加而增强 (Brun, 2002)。因此, 在应用粘性材料时应注意缩放原则并避免较大的形变, 同时需要适当调整模型的变形速率。

意大利国家研究委员会-佛罗伦萨大学构造模拟实验室



瑞典乌普萨拉大学 汉斯·朗伯格构造实验室



加拿大国立研究所物理模拟实验室

加拿大冷海洋资源工程中心 (C-CORE)

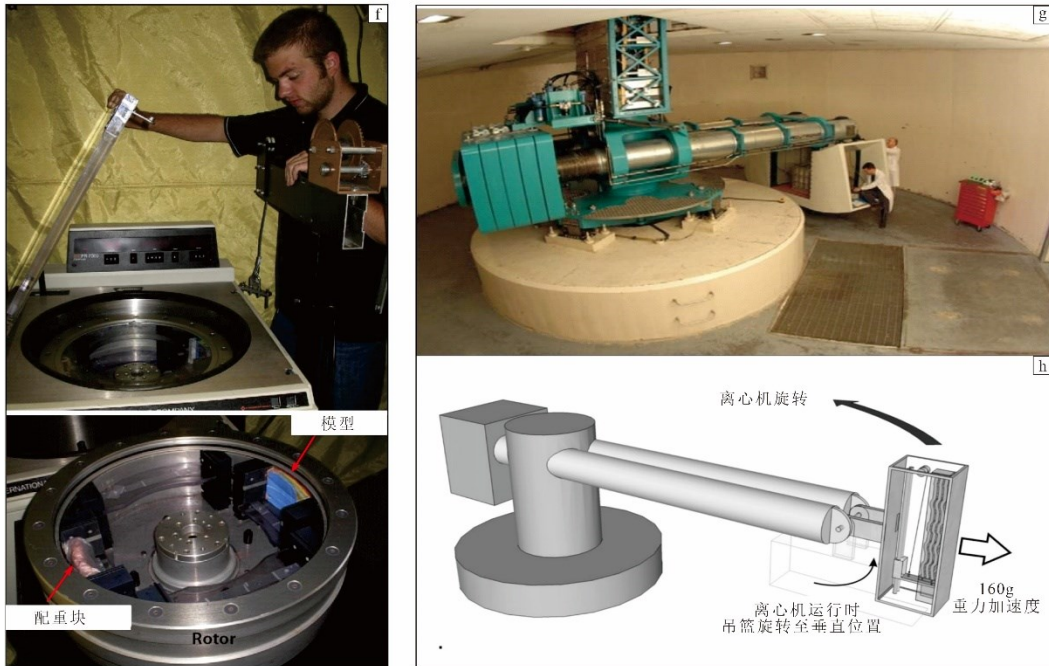


图 1 全球不同实验室开展超重物理模拟实验使用的离心机设备。(a)意大利国家研究委员会-佛罗伦萨大学构造模拟实验配置的离心机及(b)运行示意图 (Milazzo et al., 2021; Zou et al., 2024) ; (c-e)瑞典乌普萨拉大学汉斯·朗伯格构造实验室的离心机及模型设置(Harris and Koyi, 2003); (f) 加拿大魁北克大学国立科学研究所使用的离心机及内部结构 (Godin et al., 2011) ; (g-h)加拿大冷海洋资源研究中心 (C-CORE) 的大型土工离心机 (Noble and Dixon, 2011)

Figure 1. Centrifuge facilities used for tectonic analogue modelling in different laboratories worldwide. (a) Centrifuge used in TOOLab at the Italian National Research Council and University of Florence and (b) its operational schematic (Milazzo et al., 2021; Zou et al., 2024);(c-e) centrifuge and model set-up at the Hans Ramberg Tectonic Laboratory, Uppsala University, Sweden (Harris and Koyi, 2003);(f) centrifuge at INRS, Quebec, Canada (Godin et al., 2011);(g-h) large geotechnical centrifuge at the Centre for Cold Ocean Resources Engineering (C-CORE), Canada (Noble and Dixon, 2011).

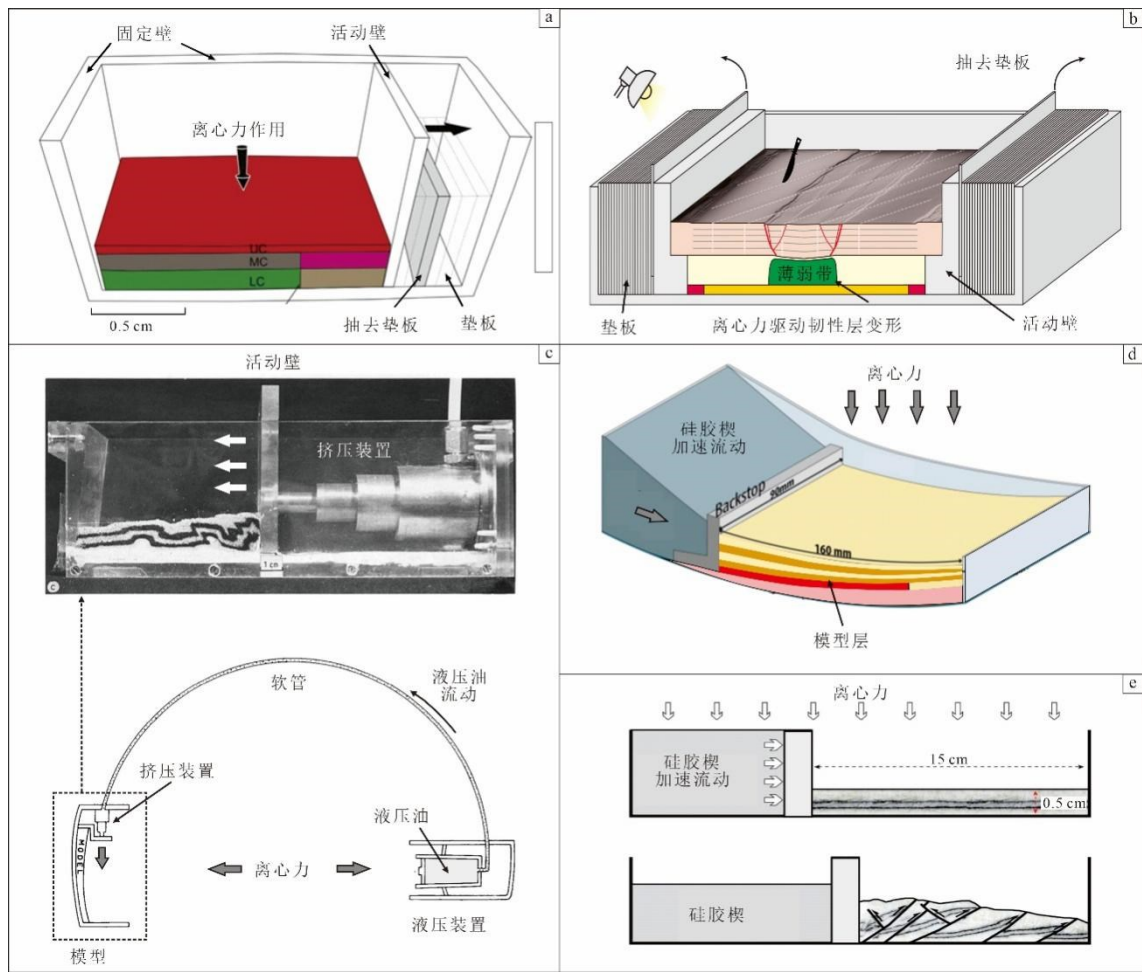


图2 超重力模型的驱动方式。(a)抽去单侧垫板 (Nikkilä et al., 2015) 或(b)抽去双侧垫板 (Zou et al., 2024), 通过离心力驱动韧性层流动变形来实现伸展应力的施加; (c)通过离心机内置液压装置施加挤压应力 (Mulugeta, 1988b); (d-e)通过离心力加速侧边硅胶楔流动来施加挤压应力 (Santolaria et al., 2022; Milazzo et al., 2021)

Figure 2. Driving mechanisms of centrifuge models. (a) Removal of plates from one side (Nikkilä et al., 2015) or (b) plates from both sides (Zou et al., 2024) to induce extensional stress through centrifuge-driven viscous flow; (c) application of compressional stress using a built-in hydraulic system (Mulugeta, 1988b); (d-e) compressional stress induced by centrifuge-accelerated lateral flow of a silicone wedge (Santolaria et al., 2022; Milazzo et al., 2021).

1.4 实验运行、观测与分析

超重力物理模拟实验因建模方式和设备类型的不同, 其运行方式也存在差异。在伸展构造实验中, 通常是抽去模型单侧或双侧的垫板, 并施加超重力场加速下部韧性层流动, 进而实现上部脆性地壳的伸展 (Corti, 2012, 图 2a, b)。在挤压构造实验中, 施加外部应力的方法则较多, 早期研究者曾设计了专门用于离心机的液压挤压盒装置 (Mulugeta, 1988b, 图 2c), 离心力能够驱动液压装置工作, 以实现超重力与侧向推力的同步施加; 在大型离心机中则可以配置位移控制系统, 可精准控制水平缩短过程 (Noble & Dixon, 2011); 目前更常用的方式则是在模型的活动侧边添加硅胶楔, 通过硅胶在超重力下的加速侧向流动来驱动侧向挤压 (Dixon et al., 1991; Yakymchuk et al., 2012; Harris et al., 2012a, b; Milazzo et al., 2021; Santolaria et al., 2022, 图 2d-e)。

超重力物理模拟实验运行过程的观测记录方法一直在不断进步, 经历了从二维到三维再到四维的发展历程。对模型的传统二维观测主要通过俯视摄影、剖面摄影记录模型表面及剖面的变形过程, 这是构造物理模拟实验

最原始和基础的记录。在建模过程中，通常会在模型的表面添加标记（例如网格）或在垂向上设置不同颜色的砂层/流变层，以便对变形过程进行定量-半定量分析（Dixon & Summers, 1985; Koyi, 1988, 图 3a, b）。在实验结束后，通常会采用湿润、冷冻以及胶结等方式来固结模型，随后对模型进行物理切割，这种方法可以获取模型内部的精细剖面。例如在伸展构造的物理模拟实验中，就采用了湿润模型-冷冻切片的方式，这一方式有助于完整保存模型上部脆性层的变形特征，同时使模型下部韧性层不易在切片过程中发生变形（Corti, 2012; Zwaan et al., 2021; Zou et al., 2024; 邹耀遥, 2024; 图 3c, d）。这一系列的切片剖面可以重建模型最终的三维构造特征，但无法记录模型运行演化过程中的变形状态。

随着三维扫描建模技术的发展，研究者们开始应用激光扫描或者三维摄影技术（如 Agisoft Metashape）来建立模型表面的数字高程模型（DEM, Digital Elevation Model）进而重建模型的变形过程（例如 Donnadieu et al., 2003; Michon & Sokoutis, 2005; Schlagenhauf et al., 2008; Nestola et al., 2015; Zou et al., 2024, 图 3e）。但这一技术只能建立模型表面的三维形态，无法观测记录模型内部的构造变形特征。

CT 扫描技术的应用则为构造物理模拟实验的观测带来了新的发展方向，这项技术能够在不破坏模型的情况下监测模型内部的三维构造特征，记录随时间变化的模型动态三维构造演化过程，因此又被称为四维监测（Yakymchuk et al., 2012; Zwaan & Schreurs, 2023）。CT 扫描所建立的三维数据体可以在任何方向上进行切片，因此可对模型内部的构造几何学进行详细分析，且允许将数据体导入构造解释软件进行四维演化分析（Fedorik et al., 2019; Zwaan et al., 2023）。这项技术已经被应用于超重力物理模拟实验中并取得了较好的效果（Yakymchuk et al., 2012; Harris et al., 2012a, b, 图 3g-i）。

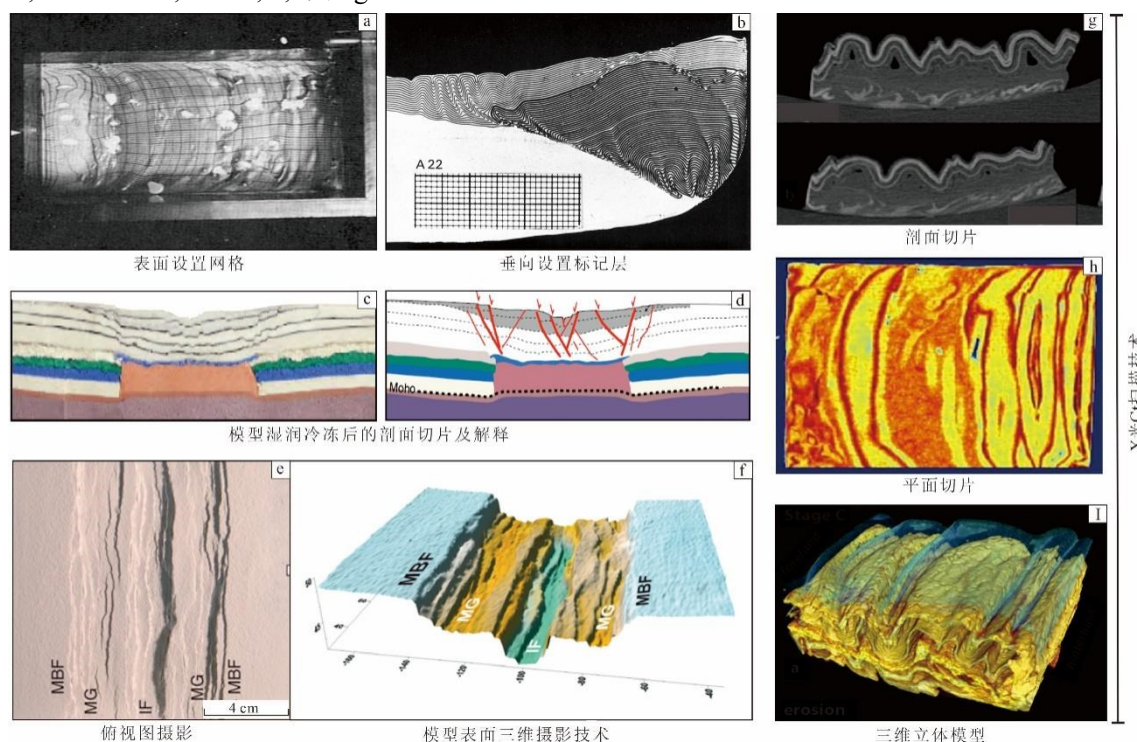


图 3 超重力模型的监测技术的发展。(a)在模型表面设置网格分析应变（Koyi, 1988）；(b)垂向设置标记层分析几何变形（Dixon and Summers, 1985）；(c)湿润冷冻模型后的剖面切片及(d)剖面解释（Corti et al., 2013a）；(e)模型的俯视图摄影及(f)表面三维摄影（Agostini et al., 2009）；基于 CT 扫描技术的模型(g)剖面切片、(h)平面切片、(i)三维立体建模（Harris et al., 2012b）

Figure 3. Development of monitoring techniques in centrifuge modelling. (a) Surface grid for strain analysis (Koyi, 1988); (b) vertical marker layers for geometric deformation analysis (Dixon and Summers, 1985); (c) cross-sectional slicing of wetted and frozen models and (d) their interpretation (Corti et al., 2013a); (e) top-view photography and (f) surface 3D photogrammetry (Agostini et al., 2009); (g) cross sections, (h) horizontal slices, and (i) 3D reconstructions based on CT scanning (Harris et al., 2012b).

2 与常规重力场物理模拟实验的对比

超重力与常规重力场构造物理模拟实验在原理、模型设置、实验材料选取、实验时间、实验效果等方面都存在一定的差异，两者的对比见表 2 所示。

表 2 常规重力构造物理模拟与超重力构造物理模拟实验对比表

Table 2. Comparison of centrifuge tectonic analogue and normal gravity tectonic analogue modelling experiments		
对比方面	常规重力场构造物理模拟	超重力场构造物理模拟
实验原理	正常重力场, g 值为 1	超重力场, g 值可达 1000
实验装置	砂箱装置	离心机装置
模型尺寸	模型尺寸更大, 构造变形现象更丰富	模型尺寸较小, 受限于离心机尺寸
模型材料	使用较弱韧性材料, 难以构建复杂流变结构	可以使用强度更大的韧性材料, 易于塑造特定的流变结构, 岩石圈流变结构建模更容易
边界条件	定量的边界条件控制	更真实的应力-流变耦合, 边界干扰敏感
变形驱动力施加	通过电机等进行驱动, 能够实现对速度、方向的精准控制, 可以考虑多因素、多期的影响	通过材料加速流动来实现, 难以精准控制变形速度等参数, 较难实现多期变形模拟
实验时间	实验的准备和持续时间较长 (数天-一周)	实验的准备和持续时间较短 (分钟-天)
实验效果	实验结果与实际地质环境可能存在较大偏差	离心力均匀作用于模型, 与地质原型更接近
实验监测	可以详细监测, 实现全过程延时摄影, 应用粒子图像测速 (PIV) 或数字图像相关 (DIC) 技术	可应用的监测方式有限, 难以进行延时摄影, 在应用 DIC、PIV 等技术上存在挑战

从表 2 的综合对比来看, 常规重力模型具有更大的尺寸, 能实现多因素、定量化的边界条件控制, 可以使用更全面的观测分析方式, 更适用于上地壳尺度中重力影响不显著的、具有多期变形的构造研究。超重力模型则能够使用更多样化的模拟材料, 构建更复杂、准确的岩石圈流变结构, 同时具有更高实验效率, 更适用于韧性变形强烈、重力影响显著的构造过程模拟, 在岩石圈尺度构造变形模拟、盐构造与岩浆活动的模拟方面具有独特优势。

3 超重力构造物理模拟技术的应用

超重力构造物理模拟技术已被应用于多种构造背景的研究, 包括伸展、挤压、走滑以及岩浆/盐构造等。不同构造类型的研究程度存在一定差异, 这种差异主要受制于实验设备特性及方法适用范围。现有离心机装置更适用于模拟以重力驱动为主、涉及脆-韧性耦合及垂向流动显著的构造过程, 因此在伸展构造及相关问题中的应用最为广泛, 研究体系也相对成熟。相比之下, 挤压构造由于需要在超重力场中叠加侧向加载条件, 开展实验过程中需要同时考虑模型外部推力与模型内部材料流动对重力场的响应, 应用相对较少。走滑构造受限于剪切边界条件难以在离心机中精确控制, 相关研究更少。针对盐构造的模拟多集中于早期探索阶段, 岩浆与裂谷的耦合作用通常会在伸展构造系列研究中有所体现。此外, 部分研究还将该技术拓展应用于板块构造相关问题的模拟, 但总体仍处于探索性阶段。

3.1 伸展构造

伸展过程中的脆-韧性耦合作用是解释诸多野外构造及地球物理构造现象的关键。Koyi & Skelton (2001) 通过构建一个半脆性层-韧性层超重力模型研究了铲式拆离断层的演化机制, 重现了拉张环境中铲式拆离断层的形成 (图 4a)、核杂岩折返及地幔物质出露 (图 4b) 的演化过程。Harris & Koyi (2003) 的超重力实验则构建了软流圈到脆性上地壳的四层简化岩石圈模型, 指示了伸展作用下的韧性上地壳流动可产生复杂褶皱, 并挑战了高

变质岩区复杂褶皱仅形成于挤压环境的传统认知。

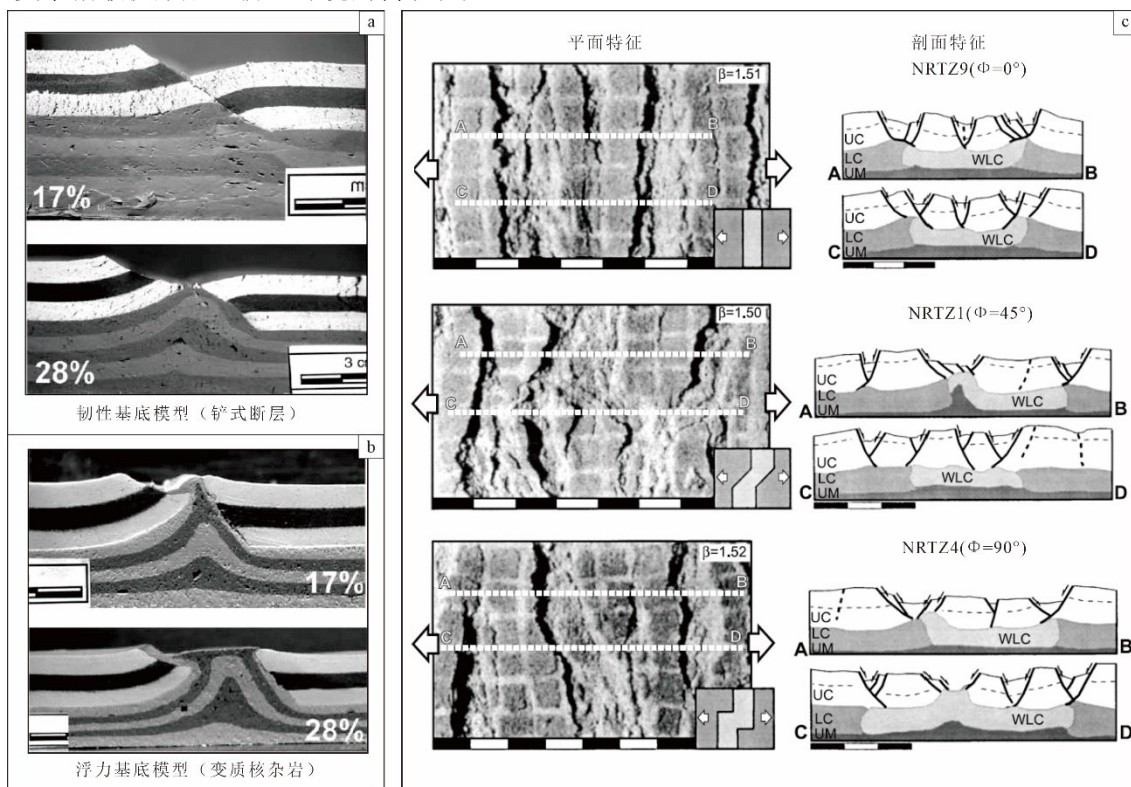


图 4 早期较典型的伸展构造超重力模拟实验。(a)铲式断层与(b)变质核杂岩形成演化过程 (Koyi and Skelton, 2001); (c)不同类型转换带的裂谷盆地模拟实验结果, 在平面断裂特征、岩石圈剖面结构上均有明显差异 (Corti, 2004), 其中 UC 为上地壳, LC 为下地壳, LM 为岩石圈地幔, WLC 为薄弱下地壳, Φ 为转换带处薄弱下地壳的走向。

Figure 4. Representative early centrifuge modelling of continental extension. (a) Evolution of listric faults and (b) metamorphic core complexes (Koyi and Skelton, 2001); (c) rift basin models with different types of transfer zones, showing significant differences in fault patterns and lithospheric structure (Corti, 2004). UC: Upper Crust; LC: Lower Crust; LM: Lithospheric Mantle; WLC: Weak Lower Crust; Φ : strike of the WLC within the transfer zone.

在探讨裂谷盆地的演化模式与机制方面, 超重力模拟实验具有独特的优势。在裂谷盆地的分段与构造转换带的形成机制方面, Tentler & Temperley (2003)通过构建岩石圈-软流圈简化模型, 模拟了软流圈底辟驱动的主动裂陷过程, 讨论了主动裂陷的宽裂谷与窄裂谷在分段性、连接机制及演化趋势上的差异。Corti (2004)则构建了上地壳-下地壳-上地幔的三层模型, 探究了下地壳薄弱带对大陆裂谷盆地转换带发育的控制作用, 揭示了薄弱带偏移角度与转换带构造样式之间的定量关系, 认为大陆裂谷盆地的分段性、转换带位置及几何形态, 主要由下地壳薄弱带的展布特点与方向决定 (图 4c)。在裂谷盆地断层活动方面, Corti et al. (2010, 2013a)通过超重力模拟实验与自然裂谷实例, 总结了陆内裂谷中断裂活动向内迁移的演化模式, 认为较厚的上-下地壳与同裂谷期沉积、较低的伸展速率、较宽的岩石圈薄弱带、较低的裂谷走向斜度会减缓断裂活动向裂谷内部迁移的速度。

岩石圈的流变学差异与先存构造对裂陷盆地的继承性影响同样可以通过超重力模型进行验证, 这对探究岩石圈流变结构、先存薄弱带对裂陷盆地的影响, 解释斜向裂谷盆地、克拉通边缘裂谷的形成演化机制起到了重要作用。早期的研究主要聚焦单一因素开展实验, Bonini et al. (2007)通过超重力模型探讨了克拉通块体边界的流变结构对伸展变形的影响裂陷应变集中与隆升-沉降。Sokoutis et al. (2007)则探究了岩石圈薄弱带的深度与斜度对上地壳伸展变形的影响, 认为位于韧性下地壳中的薄弱带会导致上地壳中的断裂活动更为集中, 而岩石圈地幔中的薄弱带则会导致断裂活动更为分散, 这与韧性下地壳的解耦作用有关。Corti (2008)探讨了埃塞俄比亚主裂谷内沉积中心的分段与斜向发育机制, 先前研究多认为岩浆作用和板块运动学变化控制了裂谷分段和多个斜向沉积中心的出现, 超重力模型则验证了这一现象受控于岩石圈薄弱带相对于伸展方向的斜度, 不需要岩浆

作用和板块运动学变化的参与。Agostini et al. (2009, 2011)在这一基础上研究了岩石圈尺度的斜向裂谷作用，认为先存薄弱带的活化和裂谷走向斜度是控制斜裂谷演化过程、构造格局与应变分布的主控因素，并在超重力模拟的基础上重建了埃塞俄比亚主裂谷的时空演化过程，指出裂谷斜度是不同裂谷段差异演化的主因。

后续的模拟实验则开始验证流变结构和先存薄弱带对裂谷演化的共同影响。Corti et al. (2011)通过岩石圈尺度的超重力模型，探究了岩石圈的流变特性和伸展应力方向对贝加尔湖裂谷形成的影响，认为裂谷两侧岩石圈流变结构差异控制了裂谷的不对称，克拉通与活动带之间的缝合带控制了贝加尔湖裂谷狭窄、深邃的结构特征，140° 方向的单期伸展作用导致了雁列状的断层组合和沉积中心分段。Corti et al.(2013b) 在贝加尔湖超重力模型的基础上进一步探讨了克拉通边缘的大陆裂谷作用过程，认为岩石圈尺度的薄弱带是变形集中并形成深狭窄裂谷的关键，克拉通与活动带的强度差异对裂谷的构造特征和不对称性具有显著影响。

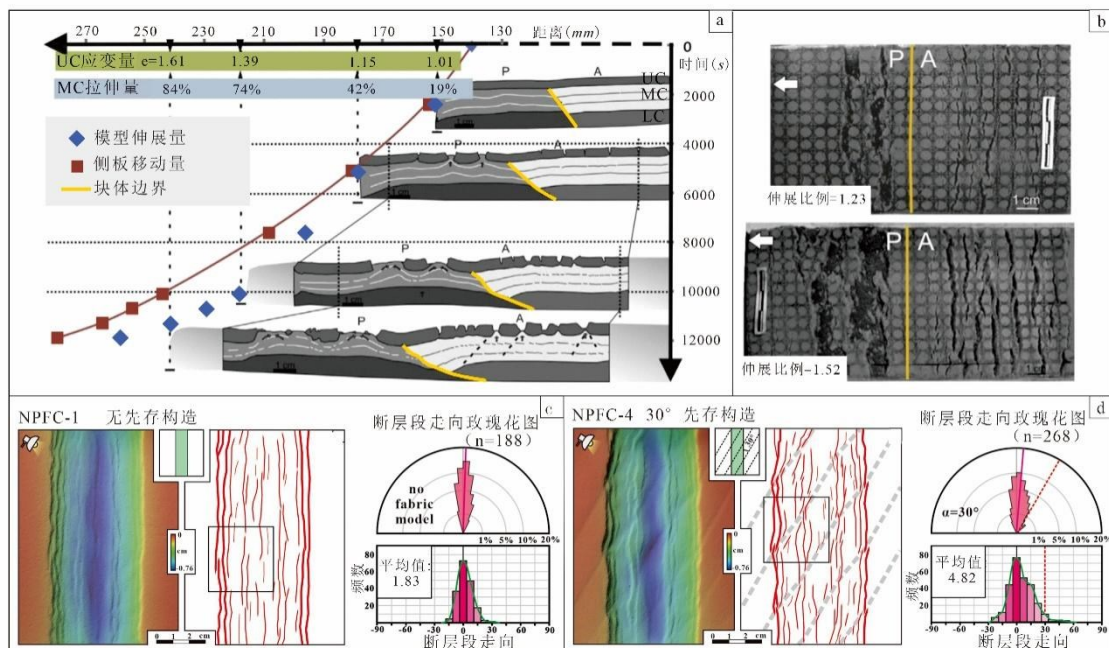


图 5 伸展构造超重力模拟实验及量化分析。(a-b)碰撞后造山带伸展过程的超重力实验 (Nikkilä et al., 2015)；(a)展示了活动壁、模型伸展量与模型剖面的演化过程，上地壳 (UC) 的拉伸量以应变变量表示，塑性中地壳 (MC) 的对应拉伸量以百分比表示，随时间推移，块体边界发生伸展、旋转并形成铲状形态，中地壳 (MC) 内发育穹窿构造和构造剥露；(b)俯视图照片显示上地壳 (浅灰色区域) 的破裂特征，以及折返剥露的中地壳 (深灰色区域) 的平面展布范围。(c-d) 上地壳先存构造影响裂谷断层的超重力物理模拟实验结果 (Zou et al., 2024)，两个模型的俯视图、断层解释、断层段走向的玫瑰花图与直方图具有显著差异。

Figure 5. Hypergravity tectonic analogue modelling and quantitative analysis of continental extension. (a-b) Centrifuge models on post-collisional orogenic extension (Nikkilä et al., 2015). (a) Cross-section evolution of the model; extension of the upper crust (UC) is expressed as strain, whereas that of the plastic middle crust (MC) is expressed as percentage. With time, block boundaries extend, rotate, and evolve into listric geometries, while domal structures and tectonic exhumation develop within the MC. (b) Top-view photos showing brittle faulting in the upper crust (light grey) and the exposed middle crust (dark grey). (c-d) Influence of pre-existing upper crustal structures on rift faulting (Zou et al., 2024), showing significant differences in plan-view images, fault interpretation, rose diagrams, and histograms of fault orientations.

此外，超重力模拟还被用于探索伸展断层演化过程中存在争议的科学问题，例如斜向伸展中的应力重定向。在传统认识中，与伸展方向正交的断层应该以倾滑运动为主，斜交的断层则兼具倾滑与走滑运动。但在野外观测中，无论断层走向与伸展方向呈何角度，断层都表现为纯倾滑特征。为了解决这一问题，Corti et al. (2013c)和Philippon et al.(2015) 结合高分辨率的断层滑动数据与地震震源机制数据，开展了一系列超重力实验，认为斜交于伸展方向的先存构造可能会引发裂谷边缘的伸展方向局部旋转，导致斜向伸展的断层活动大多沿倾向滑动，

而非原先认为的存在一定程度的走滑。

近年来的超重力实验开始被用于探讨更复杂环境下的伸展构造演化，同时开展更多定量化的分析。Nikkilä et al.(2015)应用地壳尺度的超重力模型，探究了碰撞后造山带重力伸展的控制机制，认为继承性构造边界与岩石圈流变差异是热造山带重力伸展不均一的主要控制因素，解释了古老造山带在重力伸展后的构造特征（图 5a-b）。Zwaan et al.(2020)的超重力模型则探讨了脆性上地壳厚度、伸展倾斜度等因素对大陆边缘构造演化的控制作用，认为脆性上地壳厚度决定了陆缘的整体构造模式，伸展斜度会导致局部构造样式出现差异。Zou et al.(2024)通过超重力模型定量探究了上地壳剪切带在伸展过程中的活化机制，认为当先存组构与裂谷轴的夹角 $<45^\circ$ 时，先存构造会显著改变裂谷盆地的构造样式（图 5c-d）。

在伸展构造研究中，超重力构造物理模拟突破了传统模型难以刻画深部流变结构与浅部断裂耦合的瓶颈，在裂谷分段机制、断层迁移及先存构造控制等方面提供了新的认识，体现出其在岩石圈尺度多层流变模拟方面的独特优势。

3.2 挤压构造

相较于伸展构造，超重力构造物理模拟在挤压构造研究中的应用相对较少但仍形成了一定规模的研究体系。早期具有代表性的研究可以追溯到上世纪 80 年代，Dixon & Summers (1985)通过改进加拿大皇后大学的离心机实验设备，同时采用橡皮泥（强硬层）和硅酮油灰（软弱层），较好地模拟了互层灰岩-页岩的褶皱变形特征。Dixon & Tirrul(1991) 通过在模型中部引入黏度较高的硅胶层，来模拟不同岩性地层在纵向上的力学差异，揭示了其对构造样式的控制作用（图 6a）。Liu & Dixon (1991)的实验更进一步，设计了强-弱交替的六分层超重力模型，揭示了断层-褶皱的空间关联及成因规律，并与阿巴拉契亚山脉进行了对比，验证了强-弱交替地层对褶皱-逆冲样式的控制具有普适性，为自然界中褶皱带的构造演化提供了动态实验证据。

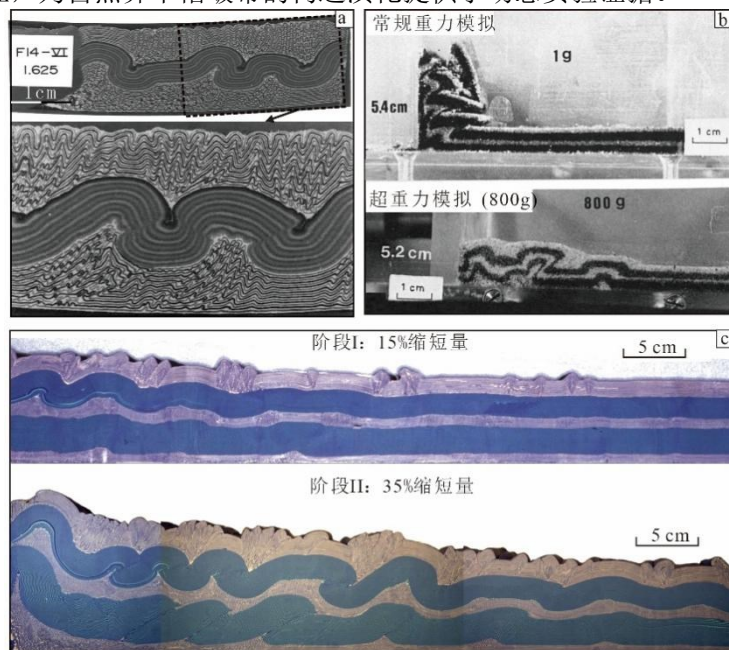


图 6 挤压构造超重力模拟的探索性实验。(a)弱-强-弱地层序列模型的剖面变形及放大图片，弱地层中具有更多且规模更小的褶皱 (Dixon and Tirrul, 1991); (b)常规重力模拟与超重力模拟的对比，超重力模拟更加强调重力的作用 (Mulugeta, 1988b); (c)应用大型土工离心机进行的大尺寸褶皱模拟结果 (Noble and Dixon, 2011)

Figure 6. Exploratory centrifuge modelling of compressional tectonics. (a) Deformation of a weak-strong-weak stratigraphic sequence in cross section, with more numerous and smaller-scale folds in weak layers (Dixon and Tirrul, 1991); (b) comparison between normal-gravity and centrifuge models, highlighting the enhanced role of gravity in the latter (Mulugeta, 1988b); (c) large-scale fold modelling using a geotechnical centrifuge (Noble and Dixon, 2011).

另一些研究则探讨了逆冲推覆构造理论的可靠性，例如库仑临界楔理论。Mulugeta (1988a, b) 对比了在施

加超重力和未施加超重力的情况下脆性逆冲褶皱带的变形特征（图 6b），首次实现了重力与侧向推力的同步施加，同时应用脆性砂质材料，测试动力来源及关键参数（基底摩擦系数、内聚强度、重力与侧向推力）对库仑逆冲楔几何形态的控制作用，验证了库仑临界楔理论的适用性。一些研究者还使用了大型的岩土工程离心机进行挤压构造的模拟，如 Noble & Dixon（2011）应用加拿大 C-CORE 的 5.5 米半径离心机（Accutronic 680-2），揭示了断展褶皱从初始形成到成熟演化的完整运动学过程（图 6c）并分析了应变分配机制，为将来开展大型超重力构造模拟积累了经验。

后续的研究主要通过超重力实验来认识逆冲断层-褶皱的演化过程，以及重要影响因素（如软弱层、滑脱层）对断褶皱几何样式的影响。Yakymchuk et al.(2012)的实验探讨了沉积盖层中褶皱的渐进演化过程，认为基底与沉积盖层间的软弱层会导致上下地层解耦（图 7a-b），沉积层厚度也是影响褶皱样式的重要因素。Milazzo et al.(2021)的超重力模型首次进行了纯脆性层模拟，探究基底滑脱层及其几何形态对上地壳中逆冲构造演化过程与构造样式的控制作用，认为基底滑脱层是控制逆冲系统发育范围和几何形态的重要参数（图 7c）。Santolaria et al.(2022)的超重力模拟实验采用了兼顾脆性与韧性变形的新材料，探究了锥形滑脱层-盖层结构影响逆冲楔动力学、构造样式、滑脱层迁移的规律（图 7c），为相关褶皱逆冲带的构造解析提供了理论支撑。

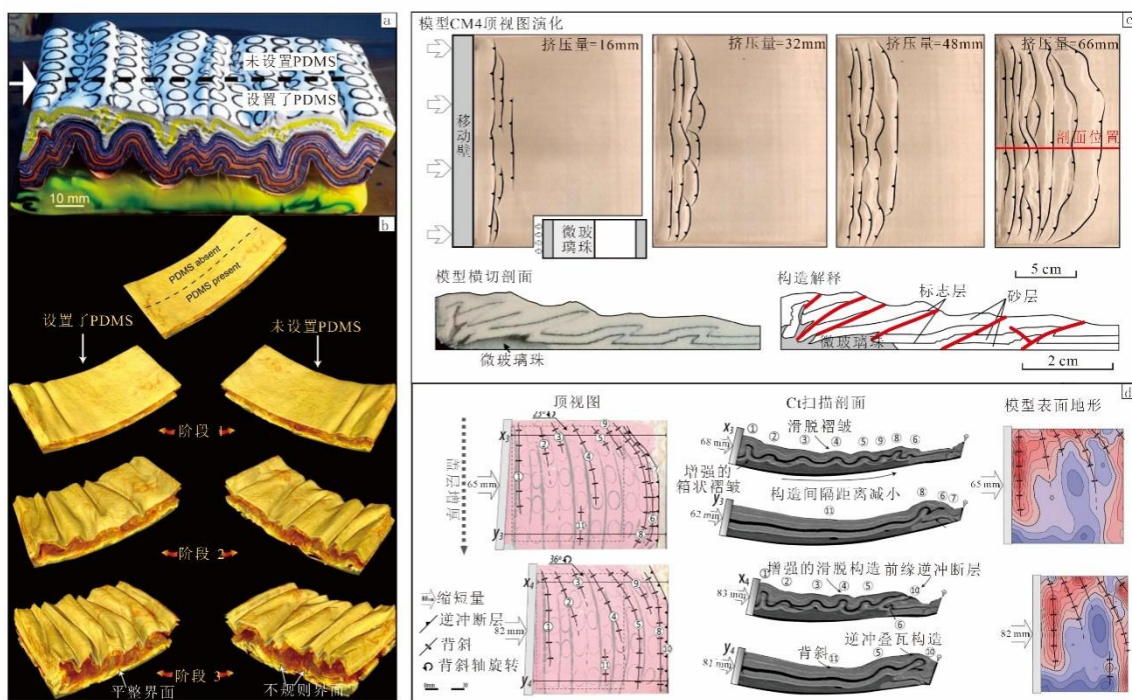


图 7 代表性的挤压构造超重力模拟实验。(a)基底-盖层界面软弱层存在与否对褶皱构造几何样式的影响的超重力模型及；(b)CT扫描三维建模结果（Yakymchuk et al., 2012）；(c)基底滑脱层-逆冲推覆构造的超重力模型，基底滑脱层之上更容易发育叠瓦状构造（Milazzo et al., 2021）；(d)楔状盖层逆冲推覆带超重力实验的顶视图、CT扫描剖面及模型表面地形，薄盖层区域易形成数量更多且更紧密的褶皱，而厚盖层区域主要在逆冲前缘形成叠瓦状构造（Santolaria et al., 2022）

Figure 7. Representative centrifuge tectonic analogue modelling of compressional tectonics. (a) Effect of the presence or absence of a weak layer at the basement-cover interface on fold geometry and (b) corresponding 3D CT reconstruction (Yakymchuk et al., 2012); (c) model of a basal detachment-thrust system, where imbricate structures preferentially develop above the detachment (Milazzo et al., 2021); (d) top view, CT cross section, and surface topography of a wedge-shaped thrust belt model, showing more numerous and tighter folds in thin cover sequences and imbricate structures at the thrust front in thick cover sequences (Santolaria et al., 2022).

另一些研究则更多地聚焦于褶皱的形成与后期改造。因为超重力在驱动重力滑脱、加强韧性层流动方面具有独特优势，因此非常适用于通道流影响、褶皱晚期舒展（unfolding）等研究。Godin et al. (2011)聚焦喜马拉雅造山带的上下构造层的变形耦合关系及通道流的改造作用，设计了超重力实验验证了“早期挤压-后期下构造层

流动改造”的褶皱演化模型，认为晚期侵蚀作用诱导了下构造层侧向流动（通道流），导致了上构造层的褶皱极性反转。Harris et al.(2012a) 基于超重力模拟结果认为通道流能够强化早期形成的平卧-倾斜褶皱，并促使形成宽缓背斜与紧闭向斜构造，解释了太古代花岗岩-蛇绿岩带典型的“穹窿-岩脊”几何形态。Harris et al.(2012b) 还探究了“通道流”对早期褶皱的改造，讨论了褶皱伸展-消亡的机制，认为通道流诱发的褶皱伸展-消亡是大型热造山带中重要的构造过程，圆弧形褶皱、浅角度侵蚀、滑脱层的存在是促进褶皱伸展的关键条件。

从上面这些研究实例可知，超重力构造物理模拟在挤压构造研究中突破了传统实验对重力作用刻画不足的局限，在褶皱-逆冲构造演化、滑脱层控制及通道流改造机制等方面取得了重要进展，突出其在重力驱动与多层流变耦合研究中的优势。

3.3 走滑构造

相较于伸展和挤压构造，超重力模拟在走滑构造研究中的应用相对有限，这主要与离心机条件下边界剪切加载方式较难实现、模型控制复杂等因素有关，但同样具有一些探索性的工作。例如 Corti & Dooley (2015)就尝试使用该技术进行岩石圈尺度的走滑拉分盆地研究（图 8）。实验设计了上地壳-下地壳-岩石圈地幔-软流圈的四层模型，重现了走滑拉分盆地的岩石圈结构特征和平面断层几何学特征。实验结果表明两条主要走滑断层之间的叠置角度控制了拉分盆地的结构和断层几何学形态；拉分盆地的伸展变形由边缘走滑断层和内部跨盆断层共同调节，深部韧性层减薄与表层脆性断层形成了耦合关系，验证了拉分盆地是岩石圈局部减薄的高效场所。可见超重力构造物理模拟在走滑构造研究中虽应用相对有限，但在岩石圈尺度拉分盆地结构及深浅耦合机制方面提供了新认识，显示出其在复杂三维构造系统模拟中的潜力。

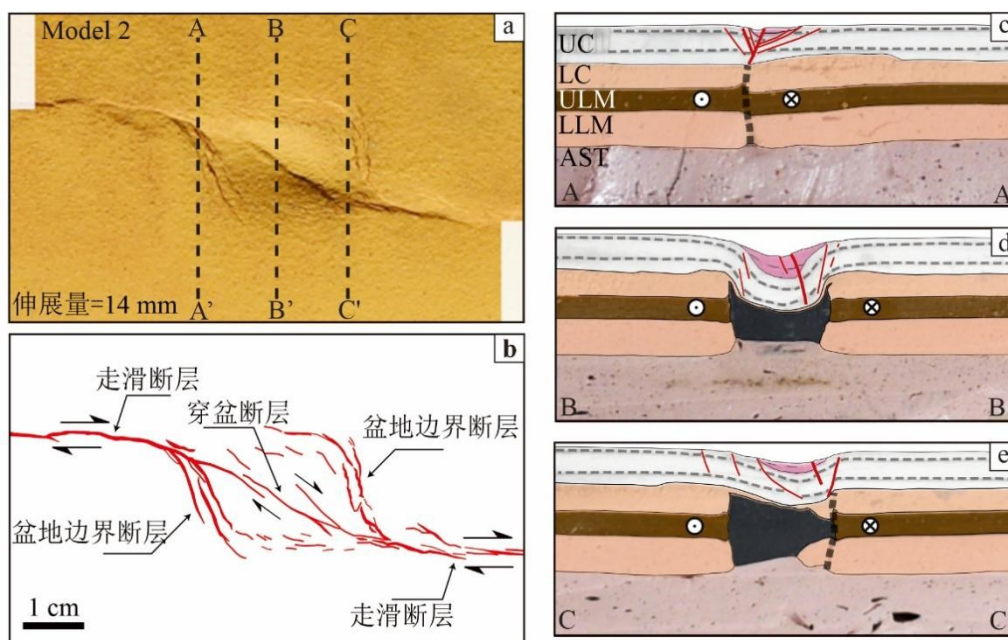


图 8 岩石圈尺度拉分盆地的超重力物理模拟实验 (Corti and Dooley, 2015)。(a)模型的顶视图；(b)模型的顶视图解释；(c, d, e)模型岩石圈不同剖面切片，其中 UC 为上地壳，LC 为下地壳，ULM 为岩石圈地幔上部，LLC 为岩石圈地幔下部，AST 为软流圈

Figure 8. Centrifuge tectonic analogue modelling of lithosphere-scale strike-slip pull-apart basins (Corti and Dooley, 2015). (a) Top view of the model; (b) interpreted top view; (c, d, e) different lithospheric cross sections. UC: upper crust; LC: lower crust; ULM: upper lithospheric mantle; LLC: lower lithospheric mantle; AST: asthenosphere.

3.4 岩浆/盐构造

岩浆/盐构造是超重力构造物理模拟较早开展探索的应用领域之一。超重力能够加速模拟材料的流动，重现构造演化伴随的岩浆/膏盐层的变形过程，进而揭示不同构造环境中的岩浆/盐构造的变形特点，这为研究岩浆相关的成矿过程、盐构造相关的油气成藏过程提供了重要的实验证据。但由于塑性材料变形的随机性极大，量化模拟实验较少，多聚焦于方法建立及定性模拟。

早期的研究主要应用超重力模型对盐构造的上涌进行了初步的研究，例如 Talbot et al. (1977) 的实验，应用超重力模型模拟了盐构造在重力作用下刺穿上覆地层的现象。Dixon and Simpson (1987) 的模型模拟了岩浆侵入沉积地层形成岩盖 (Laccolith) 的过程，并探讨了上覆地层强度、厚度的影响。

后续的研究则开始讨论构造过程与岩浆/盐构造变形之间的耦合关系。例如 Koyi et al. (1988) 的实验探讨了挤压构造与盐底辟的相互作用关系，揭示了扎格罗斯山脉褶皱带演化过程中存在的三种盐底辟，分别为先存底辟，同构造期底辟与后构造期底辟。挤压形成褶皱带的过程会活化部分先存底辟，并形成一套与挤压作用同步发育的新底辟；后构造期底辟则会沿着控制褶皱带的滑脱面上涌；挤压作用时序决定了褶皱-盐底辟的构造组合差异。

另一些模型研究了伸展构造与岩浆活动之间的相互作用。Bonini et al. (2001) 的实验揭示了大陆岩石圈伸展过程中韧性-脆性伸展与岩浆侵位的动力学关系，认为大陆伸展过程中的岩浆侵位受构造作用与地壳流变学特性共同控制，韧性下地壳的侧向流动是岩浆迁移的主要驱动力，裂谷的应变差异控制了岩浆的就位。Corti et al. (2001) 的实验探讨了在斜向伸展中岩浆与大陆裂谷演化的相互作用，实验结果证实了伸展构造与岩浆活动存在动态耦合，岩浆活动能控制伸展变形的局部化，而伸展变形能够引导岩浆向穹窿核部侵位。Corti et al. (2004) 的岩石圈模型进一步探讨了大陆裂谷的构造格架对岩浆迁移与侵位模式的控制机制，认为单一裂谷段会主导岩浆向裂谷两侧运移；连接处 (转换带) 则会主导岩浆向转换带集聚，其运移方向垂直于伸展方向。

超重力构造模拟弥补了常规重力模拟在重现高流动性物质迁移中的不足，为岩浆/盐构造变形提供了直观证据。随着建模方式的进步与实验材料的多样化，可以期待更加量化的岩浆/盐构造的超重力模拟。

3.5 板块构造理论中的关键问题

此外，超重力构造物理模拟还被拓展应用于板块构造理论等关键科学问题研究，但总体仍处于探索性阶段。这类研究通常不针对单一构造类型，而是聚焦岩石圈尺度动力学过程，包括海底扩张与洋中脊的形成机制、大陆边缘的不对称性、板块初始俯冲的动力机制等。

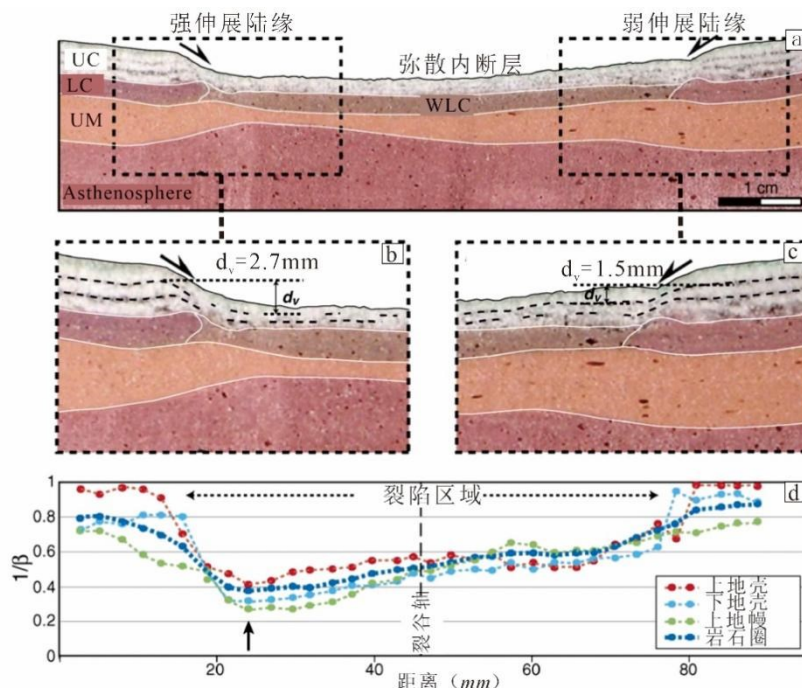


图9 不对称陆缘形成的超重力物理模拟实验 (Corti and Manetti, 2006)。(a)不对称陆缘模型的横切剖面，其中 UC 为上地壳，LC 为下地壳，UM 为岩石圈地幔；(b)强伸展陆缘区域的放大图， d_v 为陆架与洋底标志层的垂向距离；(c)弱伸展陆缘；(d)地壳、地幔及岩石圈的减薄系数 $1/\beta$ 与距离的投图， $1/\beta$ 即各圈层初始厚度与最终厚度的比值。 $1/\beta$ 数值越小，表明岩石圈减薄程度越高，反之则减薄程度越低

Figure 9. Hypergravity tectonic analogue modelling of asymmetric continental margins (Corti and Manetti, 2006). (a) Cross section of the

asymmetric margin model (UC: upper crust; LC: lower crust; UM: lithospheric mantle); (b) enlarged view of the strongly extended margin, where dv represents the vertical distance between marker layers of the continental shelf and ocean floor; (c) weakly extended margin; (d) plots of thinning factors ($1/\beta$) for the crust, mantle, and lithosphere versus distance. $1/\beta$ is the ratio of initial to final thickness; smaller values indicate greater lithospheric thinning.

Tentler(2003)构建了脆性洋壳-刚性岩石圈地幔-软流圈的三层模型,通过离心力驱动软流圈上隆诱发伸展,重现了洋中脊的形成过程,认为洋中脊断层段之间的偏移距离、重叠距离及倾角是控制洋中脊构造样式的关键因素。Corti et al. (2003b)通过离心机模拟实验探究了岩石圈继承性构造对大陆裂解及海底扩张的控制作用,认为岩石圈中的继承性构造(莫霍面起伏、下地壳薄弱带)是控制大陆裂解的核心因素,即使微小的初始构造差异,也会导致裂解过程及大陆边缘形态的显著不同。在这一认识基础上,Corti and Manetti (2006)开展了更进一步的实验,探讨了莫霍面(Moho)形态对大陆裂陷及被动陆缘形成的控制,认为不对称莫霍面是共轭被动大陆边缘不对称构造形成的关键诱因,莫霍面最深处(地壳最厚区)将优先成为伸展中心,主导断裂活动、岩石圈减薄与软流圈上隆,进而导致不对称共轭被动陆缘的形成(图9)。Mart et al. (2005)则设计了一系列无侧向应力的超重力实验研究了板块俯冲起始机制,验证了侧向密度差异足以启动俯冲,为解释年轻、低密度大洋岩石圈的俯冲模式提供了实验证据。Philippon and Corti (2016)综合超重力物理模拟实验与全球统计分析,探究了板块边界倾斜度对伸展与汇聚型构造变形的控制作用,认为高倾斜度板块边界更易促进岩石圈破裂与岩浆活动,是加速大陆裂解与洋盆扩张的重要因素。

超重力构造物理模拟在板块构造关键问题研究中,为大陆裂解、俯冲启动及陆缘不对称性等问题提供了新的技术与视角。尽管这些模型都经过高度简化,不能全面考虑板块构造演化的诸多影响因素及高度复杂的演化过程,但在探讨单一阶段的少量主控因素作用时,实验效果较好,体现了其在岩石圈尺度动力学过程重建中的重要价值。

综合不同构造环境的研究可以看出(表3),超重力构造物理模拟的核心优势在于能够在实验尺度上强化重力驱动效应,从而有效放大深部流变过程对浅部构造变形的控制作用。该方法突破了常规物理模拟在岩石圈尺度建模及多层流变结构耦合方面的限制,使得韧性流动、底辟上涌及深浅耦合等关键构造过程得以在实验中重现与定量解析。

表3 超重力构造物理模拟在不同构造类型中的应用

Table 3. Applications of centrifuge tectonic analogue modelling in different tectonic settings.

构造环境	常规物理模拟局限性	超重力模拟进展	方法优势
伸展构造	底板拖拽等边界效应影响实验效果	裂谷分段、断层迁移、先存构造控制机制明确	岩石圈尺度、多层流变结构
挤压构造	重力作用弱、流变耦合不足	滑脱层控制、褶皱-逆冲断层演化、通道流机制	强化重力驱动、结构演化真实
走滑构造	三维结构模拟困难	拉分盆地结构及深浅耦合初步刻画	岩石圈尺度三维模拟潜力
岩浆/盐构造	流动过程难以真实再现	岩浆侵位、盐底辟与构造耦合机制	高效模拟高流动性物质
板块构造问题	难以约束深部动力学	裂解、俯冲启动、陆缘不对称机制	深部动力过程可视化

4 展望及发展方向

尽管超重力构造物理模拟技术在多尺度构造研究中展现出独特优势,但其发展仍受若干关键技术瓶颈制约,亟需在多场耦合、定量对比及观测手段等方面实现突破。

4.1 在油气勘探中的应用前景

裂陷盆地和褶皱冲断带是油气成藏与富集的重要场所，合理建立构造演化-油气成藏模式，对于油气勘探决策和部署具有重要意义。当前，构造演化过程重建尚存在一系列挑战：（1）在勘探程度较高的含油气盆地中，如何合理解释含油气构造的演化过程与形成机制，特别是一些特殊的、不符合传统认识的构造现象；（2）在勘探程度较低的盆地，在缺乏钻井和高精度三维地震的情况下，如何快速建立起尽可能合理的构造解释方案及演化模式。构造物理模拟实验则可为这两大挑战提供重要依据，通过将已知的地质、地球物理资料与物理模拟实验相结合，可以更清晰准确地重建盆地演化过程、分析主控因素，为勘探程度较低、地球物理资料较差的区域提供更合理的盆地构造解释方案，有效降低构造解释中的不确定性。

超重力构造物理模拟的优势在于：（1）在盆地构造研究中的研究实例丰富，包括陆内正/斜向裂谷、克拉通边缘裂谷、被动陆缘、造山带前陆盆地；（2）能够快速建立并探讨岩石圈尺度的构造变形模式及对盆地构造的影响，为揭示含油气构造与岩石圈深部演化、区域重大构造体制变动之间的关联提供重要实验依据；（3）超重力构造物理模拟实验在模拟盐构造、重力驱动构造等油气相关构造方面具有独特优势，可较好重现相关构造的变形历史，辅助生储盖圈层运配置分析，并准确预测有利圈闭。需要指出，超重力模拟与常规重力模拟各具特色，应根据所聚焦的科学问题选择更合适的模拟方式。

4.2 在深地科学研究中的应用前景

深地科学是研究地球内部组成、结构及运行机制的学科，是认识地球系统“引擎”的关键（徐义刚和陈骏，2025）。超重力构造物理模拟的“缩时”“缩尺”特点，以及其在研究岩石圈多层流变结构方面的优势，决定了这项技术在深地科学的诸多方向上都有着极大的应用潜力。目前最有可能的应用领域包括板块构造的启动机制、地球流变圈层结构与动力学效应、浅表构造演化与深部地质过程的耦合关系等。

先前的实验案例已经充分说明，许多大陆岩石圈尺度的构造问题，例如典型的造山带、陆内变形带和裂谷系统的形成演化机制、陆内地块/微板块之间的相互作用关系，都可以通过超重力构造物理模拟实验得到科学回答。另外，超重力构造物理模拟实验能较好重现脆性上地壳的几何学变形过程，可以作为当前岩石圈数值模拟技术的重要补充。有理由相信，超重力物理模拟实验作为一个行之有效的技术方法，将在未来与野外观测、岩石实验、地球物理研究和数值模拟技术共同构成深地科学与固体地球科学研究的核心技术方法体系。

4.3 局限性及发展方向

需要指出，超重力物理模拟实验重点解决的是具有不同流变特性的圈层/地质体之间的相互作用，是对自然地质过程的简化模拟（Corti et al., 2003）。这种简化导致模型无法考虑岩石圈在变形过程中的温度-压力-相态变化，例如岩浆侵入与冷却、陆壳的热衰减、超压流体的影响、软流圈的等静力补偿等，这些因素同样会影响甚至主导地质体的构造变形过程。观测分析难度较大也是目前超重力物理模拟面临的一个重大挑战，由于实验室离心机中无法进行延时摄影，导致了粒子图像测速或数字图像相关分析技术等较难应用到超重力模型中，限制了对模型的应变进行更精准和量化的分析。

因此，超重力物理模拟实验未来的发展应该聚焦于以下方向：

（1）加强与岩石圈数值模拟技术的结合

超重力构造物理模拟技术的优势在于能够较好反应构造的机械变形，当前的关键技术瓶颈在于物理模拟难以引入温度-压力-相变等多场耦合过程，而这一领域则是数值模拟最具优势的地方。在未来的研究中，应积极尝试将超重力物理模拟实验技术与岩石圈尺度的地球动力学数值模拟技术进行联合反演与交叉验证，这极有可能是破解诸多岩石圈尺度地学问题的重要突破口。

（2）加强与地球物理等一手地质观测资料的对比

目前另一大限制在于物理模型结果与地球物理观测之间缺乏定量对标关系，地球物理资料、岩石力学实验、野外观测数据等是构造演化最直接、最重要的证据。地球物理资料是建立岩石圈结构的基础，岩石力学实验是揭示岩石圈流变特性的重要依据，野外观测数据最直接地揭示了断层的活动、岩层变形，未来可通过构建“模型-地震/重磁响应”正演转换体系，实现实验结果与实际地质体之间的定量对比与校正。

（3）在建模与监测方式上开展更多尝试

目前在离心机环境下难以实现实时、连续的高分辨率观测与多期构造过程模拟，可以在建模方式上进行更多的尝试，例如改造现有的模型盒等。此外，也可以尝试研发升级现有的离心机，通过在内加装高速摄像头与CT扫描系统等方式（例如 Chen et al., 2026），以弥补监测方式上的不足。

随着人类对地球的认识不断深入，如何定量地揭示地球深部结构特征、演化过程与浅部地质作用之间的耦合关系已经成为了一个亟待回答的科学问题。超重力构造物理模拟实验则为回应这一科学挑战提供了重要的技术支持。有理由相信，超重力构造物理模拟技术将在未来不断发展完善，在研究岩石圈-盆地构造、多圈层相互作用、指导深部油气矿产资源勘探中得到更多应用，亦将成为固体地球科学研究、深地科学研究技术方法体系中的关键一环，在“走向深地，挺进深海”的探索之路中发挥更为重要的科学作用。

References

- Abdelmalak, M. M., Bulois, C., Mourgues, R., et al., 2016. Description of New Dry Granular Materials of Variable Cohesion and Friction Coefficient: Implications for Laboratory Modeling of the Brittle Crust. *Tectonophysics*, 684: 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.003>
- Adam, J., Urai, J. L., Wieneke, B., et al., 2005. Shear Localisation and Strain Distribution during Tectonic Faulting—New Insights from Granular-Flow Experiments and High-Resolution Optical Image Correlation Techniques. *Journal of Structural Geology*, 27: 283-301. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.08.008>
- Agostini, A., Bonini, M., Corti, G., et al., 2011. Fault Architecture in the Main Ethiopian Rift and Comparison with Experimental Models: Implications for Rift Evolution and Nubia–Somalia Kinematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(3-4): 479-492. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.024>
- Ballard, S., Pollack, H. N., 1987. Diversion of Heat by Archean Cratons: A Model for Southern Africa. *Earth and Planetary Science Letters*, 85(1-3): 253-264. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90036-7)
- Bonini, L., Fracassi, U., Bertone, N., et al., 2023. How Do Inherited Dip-Slip Faults Affect the Development of New Extensional Faults? Insights from Wet Clay Analog Models. *Journal of Structural Geology*, 169: 104836. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90036-7)
- Bonini, M., Sokoutis, D., Mulugeta, G., et al., 2001. Dynamics of Magma Emplacement in Centrifuge Models of Continental Extension with Implications for Flank Volcanism. *Tectonics*, 20(6): 1053-1065. <https://doi.org/10.1029/2001TC900017>
- Boutelier, D., Schrank, C., Regenauer-Lieb, K., 2019. 2-D Finite Displacements and Strain from Particle Imaging Velocimetry (PIV) Analysis of Tectonic Analogue Models with TecPIV. *Solid Earth*, 10(4): 1123-1139. <https://doi.org/10.5194/se-10-1123-2019>
- Brun, J. P., Merle, O., 1985. Strain Patterns in Models of Spreading-Gliding Nappes. *Tectonics*, 4(7): 705-719. <https://doi.org/10.1029/TC004i007p00705>
- Brun, J. P., 2002. Deformation of the Continental Lithosphere: Insights from Brittle-Ductile Models. Geological Society, London, Special Publications, 200(1): 355-370. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.200.01.20>
- Chen X., Zhao C., Liu Y., et al., 2026. Study on the Role of Weak Lower Crust in Cenozoic Tectonic Deformation of QinghaiTibet Plateau by an Integrated Centrifugal Analog Modeling and Numerical Simulation Approach. *Journal of Earth Science*, 37(1): 137–154. doi: 10.1007/s12583-025-0284-4
- Chen Y. M., 2020. Centrifugal Hypergravity Experiment: Revolutionary Approach to Explore Multiphase Media Evolution. *Journal of ZheJiang University (Engineering Science)*, 54(4): 631-632 (in Chinese with English abstract).
- Corti, G., 2004. Centrifuge Modelling of the Influence of Crustal Fabrics on the Development of Transfer Zones: Insights into the Mechanics of Continental Rifting Architecture. *Tectonophysics*, 384(1-4): 191-208. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.03.014>

- Corti, G., 2008. Control of Rift Obliquity on the Evolution and Segmentation of the Main Ethiopian Rift. *Nature Geoscience*, 1(4): 258-262. <https://doi.org/10.1038/ngeo160>
- Corti, G., 2012. Evolution and Characteristics of Continental Rifting: Analog Modeling-Inspired View and Comparison with Examples from the East African Rift System. *Tectonophysics*, 522: 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.06.010>
- Corti, G., Bonini, M., Conticelli, S., et al., 2003a. Analogue Modelling of Continental Extension: A Review Focused on the Relations between the Patterns of Deformation and the Presence of Magma. *Earth-Science Reviews*, 63(3-4): 169-247. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00035-7)
- Corti, G., Bonini, M., Innocenti, F., et al., 2001. Centrifuge Models Simulating Magma Emplacement during Oblique Rifting. *Journal of Geodynamics*, 31(5): 557-576. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(01\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(01)00032-1)
- Corti, G., Calignano, E., Petit, C., et al., 2011. Controls of Lithospheric Structure and Plate Kinematics on Rift Architecture and Evolution: an Experimental Modeling of the Baikal Rift. *Tectonics*, 30(3). <https://doi.org/10.1029/2011TC002871>
- Corti, G., Dooley, T. P., 2015. Lithospheric-Scale centrifuge Models of Pull-Apart Basins. *Tectonophysics*, 664: 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.09.004>
- Corti, G., Iandelli, I., Cerca, M., 2013b. Experimental Modeling of Rifting at Craton Margins. *Geosphere*, 9(1): 138-154. <https://doi.org/10.1130/GES00863.1>
- Corti, G., Manetti, P., 2006. Asymmetric Rifts due to Asymmetric Mohos: An Experimental Approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(1-2): 315-329. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.02.004>
- Corti, G., Van Wijk, J., Bonini, M., et al., 2003b. Transition from Continental Break-up to Punctiform Seafloor Spreading: How Fast, Symmetric and Magmatic. *Geophysical Research Letters*, 30(12). <https://doi.org/10.1029/2003GL017374>
- Corti G., Philippon M, Sani F, et al., 2013c. Re-Orientation of the Extension Direction and Pure Extensional Faulting at Oblique Rift Margins: Comparison between the Main Ethiopian Rift and Laboratory Experiments. *Terra nova*, 25(5): 396-404. <https://doi.org/10.1111/ter.12049>
- Corti G, Ranalli G, Agostini A, et al., 2013a. Inward Migration of Faulting during Continental Rifting: Effects of Pre-Existing Lithospheric Structure and Extension Rate. *Tectonophysics*, 594: 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.028>
- Del Ventisette, C., Bonini, M., Agostini, A., et al., 2019. Using Different Grain-Size Granular Mixtures (Quartz and K-Feldspar Sand) in Analogue Extensional Models. *Journal of Structural Geology*, 129: 103888. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.103888>
- Dietl, C., Koyi, H., 2011. Sheets within Diapirs—Results of a Centrifuge Experiment. *Journal of Structural Geology*, 33(1): 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.10.010>
- Dixon, J. M., 1975. Finite Strain and Progressive Deformation in Models of Diapiric Structures. *Tectonophysics*, 28(1-2): 89-124. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(75\)90060-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90060-8)
- Dixon, J. M., Simpson, D. G., 1987. Centrifuge Modelling of Laccolith Intrusion. *Journal of Structural Geology*, 9(1): 87-103. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90046-0](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90046-0)
- Dixon, J. M., Summers, J. M., 1983. Patterns of Total and Incremental Strain in Subsiding Troughs: Experimental Centrifuged Models of Inter-Diapir Synclines. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(12): 1843-1861. <https://doi.org/10.1139/e83-175>
- Dixon, J. M., Summers, J. M., 1985. Recent Developments in Centrifuge Modelling of Tectonic Processes: Equipment, Model Construction Techniques and Rheology of Model Materials. *Journal of Structural Geology*, 7(1): 83-102. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90117-8](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90117-8)

- Dixon, J. M., Tirrul, R., 1991. Centrifuge Modelling of Fold—Thrust Structures in A Tripartite Stratigraphic Succession. *Journal of Structural Geology*, 13(1): 3-20. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90097-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90097-3)
- Donnadieu, F., Kelfoun, K., de Vries, B. V. W., et al., 2003. Digital Photogrammetry as A Tool in Analogue Modelling: Applications to Volcano Instability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2): 161-180. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00034-9)
- Ghosh, S. K., Ramberg, H., 1968. Buckling Experiments on Intersecting Fold Patterns. *Tectonophysics*, 5(2): 89-105. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(68\)90083-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(68)90083-8)
- Godin, L., Yakymchuk, C., Harris, L. B., 2011. Himalayan Hinterland-Verging Superstructure Folds Related to Foreland-Directed Infrastructure Ductile Flow: Insights from Centrifuge Analogue Modelling. *Journal of Structural Geology*, 33(3): 329-342. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.09.005>
- Harris, L. B., Koyi, H. A., 2003. Centrifuge Modelling of Folding in High-Grade Rocks during Rifting. *Journal of structural geology*, 25(2): 291-305. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00018-4)
- Harris, L. B., Godin, L., Yakymchuk, C., 2012a. Regional Shortening Followed by Channel Flow Induced Collapse: A New Mechanism for “Dome and Keel” Geometries in Neoproterozoic Granite-Greenstone Terrains. *Precambrian Research*, 212: 139-154. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.022>
- Harris, L. B., Yakymchuk, C., Godin, L., 2012b. Implications of Centrifuge Simulations of Channel Flow for Opening Out or Destruction of Folds. *Tectonophysics*, 526: 67-87. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.05.002>
- He, W. G., Shen, C. B., Wu, L., et al., 2023. Diapiric Initiation and Formation Mechanism — Insights from Analogue Modeling. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(5): 1069-1084 (in Chinese with English abstract).
- Hubbert, M. K., 1937. Theory of Scale Models as Applied to the Study of Geologic Structures. *Bulletin of the geological society of America*, 48(10): 1459-1520. <https://doi.org/10.1130/GSAB-48-1459>
- Jackson, M. P. A., Talbot, C. J., 1989. Anatomy of Mushroom-Shaped Diapirs. *Journal of Structural Geology*, 11(1-2): 211-230. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90044-8](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90044-8)
- Jackson, M. P., Talbot, C. J., 1986. External Shapes, Strain Rates, and Dynamics of Salt Structures. *Geological Society of America Bulletin*, 97(3): 305-323. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<305:ESSRAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<305:ESSRAD>2.0.CO;2)
- Jia D., Yang S. F., Yin H. W., et al., 2023. Physical Modelling Experiments of Fold-Thrust Belts: A Review Based on Previous and New Experimental Models. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2896-2913 (in Chinese with English abstract).
- Koyi, H., 1988. Experimental Modeling of Role of Gravity and Lateral Shortening in Zagros Mountain Belt. *AAPG bulletin*, 72(11): 1381-1394. <https://doi.org/10.1306/703C99AB-1707-11D7-8645000102C1865D>
- Koyi, H., 1991. Gravity Overturns, Extension, and Basement Fault Activation. *Journal of Petroleum Geology*, 14: 117-142. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1991.tb00358.x>
- Koyi, H., 1997. Analogue Modelling: from A Qualitative to A Quantitative Technique—A Historical Outline. *Journal of Petroleum Geology*, 20(2): 223-238. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1997.tb00774.x>
- Koyi, H., Petersen, K., 1993. Influence of Basement Faults on the Development of Salt Structures in the Danish Basin. *Marine and Petroleum geology*, 10(2): 82-94. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(93\)90015-K](https://doi.org/10.1016/0264-8172(93)90015-K)
- Koyi, H. A., Skelton, A., 2001. Centrifuge Modelling of the Evolution of Low-Angle Detachment Faults from High-Angle Normal Faults. *Journal of structural Geology*, 23(8): 1179-1185. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00185-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00185-1)
- Liu, S. M., Dixon J. M., 1991. Centrifuge Modelling of Thrust Faulting: Structural Variation along Strike in Fold-Thrust Belts. *Tectonophysics*, 188(1-2): 39-62. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90313-H](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90313-H)
- López, C., Del Ventisette, C., Bonini, M., et al., 2022. The Relationship between Inverted Normal Faults and Pure

- Thrusting during the Tectonic Inversion of the Domeyko Cordillera, Northern Chile: Structural and Seismic Interpretation and Analog Modeling Experiments. *Tectonics*, 41(12): e2022TC007378. <https://doi.org/10.1029/2022TC007378>
- Maestrelli D., Montanari D., Corti G., et al., 2020. Exploring the Interactions between Rift Propagation and Inherited Crustal Fabrics through Experimental Modeling. *Tectonics*, 39(12): e2020TC006211. <https://doi.org/10.1029/2020TC006211>
- Mart, Y., Aharonov, E., Mulugeta, G., et al., 2005. Analogue Modelling of the Initiation of Subduction. *Geophysical Journal International*, 160(3): 1081-1091. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02544.x>
- Michon, L., Sokoutis, D., 2005. Interaction between Structural Inheritance and Extension Direction during Graben and Depocentre Formation: An Experimental Approach. *Tectonophysics*, 409(1-4): 125-146. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.08.020>
- Milazzo, F., Cavozi, C., Corti, G., et al., 2021. Centrifuge Modelling of Thrust Systems in the Brittle Crust: Role of Frictional Décollement Geometry. *Journal of Structural Geology*, 153: 104450. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104450>
- Mulugeta, G., 1988a. Modelling the Geometry of Coulomb Thrust Wedges. *Journal of Structural Geology*, 10(8): 847-859. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(88\)90099-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(88)90099-5)
- Mulugeta, G., 1988b. Squeeze Box in a Centrifuge. *Tectonophysics*, 148(3-4): 323-335. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90139-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90139-4)
- Nestola, Y., Storti, F., Cavozi, C., 2015. Strain Rate-Dependent Lithosphere Rifting and Necking Architectures in Analog Experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1): 584-594. <https://doi.org/10.1002/2014JB011623>
- Nikkilä K., Korja A., Koyi H., et al., 2015. Analog Modeling of One-Way Gravitational Spreading of Hot Orogens-A Case Study from the Svecofennian Orogen, Fennoscandian Shield. *Precambrian research*, 268: 135-152. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.07.011>
- Noble, T. E., Dixon, J. M., 2011. Structural Evolution of Fold-Thrust Structures in Analog Models Deformed in A Large Geotechnical Centrifuge. *Journal of Structural Geology*, 33(2): 62-77. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.12.007>
- Philippon, M., Corti, G., 2016. Obliquity Along Plate Boundaries. *Tectonophysics*, 693: 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.033>
- Philippon, M., Willingshofer, E., Sokoutis, D., et al., 2015. Slip Re-Orientation in Oblique Rifts. *Geology*, 43(2): 147-150. <https://doi.org/10.1130/G36208.1>
- Ramberg, H., 1967. Model Experimentation of the Effect of Gravity on Tectonic Processes. *Geophysical Journal International*, 14(1-4): 307-329. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1967.tb06247.x>
- Ramberg, H., 1970. Folding of Laterally Compressed Multilayers in the Field of Gravity, I. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2(4): 203-232. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(70\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(70)90010-5)
- Ramberg, H., 1971. Folding of Laterally Compressed Multilayers in the Field of Gravity, II Numerical examples. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 4(2): 83-120. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(71\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(71)90006-9)
- Ramberg, H., 1981. The Role of Gravity in Orogenic Belts. Geological Society, London, Special Publications, 9(1): 125-140. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1981.009.01.11>
- Ritter, M. C., Leever, K., Rosenau, M., et al., 2016. Scaling the Sandbox-Mechanical (dis) Similarities of Granular Materials and Brittle Rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9): 6863-6879. <https://doi.org/10.1002/2016JB012915>
- Santolaria, P., Harris, L. B., Casas, A. M., et al., 2022. Influence of Décollement-Cover Thickness Variations in Fold-and-

- Thrust Belts: Insights from Centrifuge Analog Modeling. *Journal of Structural Geology*, 163: 104704. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104704>
- Schlagenhauf, A., Manighetti, I., Malavieille, J., et al., 2008. Incremental Growth of Normal Faults: Insights from A Laser-Equipped Analog Experiment. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(3-4): 299-311. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.042>
- Talbot C. J., 1977. Inclined and Asymmetric Upward-Moving Gravity Structures. *Tectonophysics*, 42(2-4): 159-181. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90166-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90166-4)
- Tentler T., 2003. Analogue Modeling of Overlapping Spreading Centers: Insights into their Propagation and Coalescence. *Tectonophysics*, 376(1-2): 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.08.011>
- Tentler, T., Temperley, S., 2003. Segment Linkage during Evolution of Intracontinental Rift Systems: Insights from Analogue Modelling. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.12>
- Wang, L., Maestrelli, D., Corti, G., et al., 2021. Normal Fault Reactivation during Multiphase Extension: Analogue Models and Application to the Turkana Depression, East Africa. *Tectonophysics*, 811: 228870. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228870>
- Wu, Z. Y., Yang, X. L., Yin, H. W., et al., 2023. Characteristics and Influencing Factors of Salt Structure Evolution in Awate Transfer Zone, Western Kuqa Depression. *Earth Science*, 48(4): 1271-1287 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. P., Yang, G. X., Luo, H. Y., et al., 2024. The Influence Lithologic Differences at Different Depths on the Segmentation between the Eastern and the Western zones of Kuqa Depression. *Earth Science*, 49(8): 3029-3042 (in Chinese with English abstract).
- Yakymchuk, C., Godin, L., 2012. Coupled Role of Deformation and Metamorphism in the Construction of Inverted Metamorphic Sequences: an Example from Far-Northwest Nepal. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(5): 513-535. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2012.00979.x>
- Yang, K. J., Qi, J. F., Liu, A. R., et al., 2022. Characteristics of Basement Faults in the Middle Section of Kuqa Depression and their Influence on Salt Tectonic Deformation. *Earth Science*, 57(4): 991-1008 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. F., Jia, C. Z., Chen, H. L., et al., 2022. Core theories of sedimentary basin structure and the related key research techniques: Frontiers and development directions. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 10-23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Y., Huang, L., Li, X, et al., 2025. Physical Simulation Study on the Development and Evolution of Fault Systems under the Coupled Control of Extension Direction Changes and Basement Fault Activation. *Acta Geologica Sinica*, 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. W., Dong, Y. P., Xiao, A. C., et al., 2023. Effect of Strike-Slip Activity of Basement Faults on Hydrocarbon Accumulation in Dongying Sag. *Earth Science*, 48(7): 2718-2732 (in Chinese with English abstract).
- Zou, Y. Y., 2024. The Influence of Preexisting Structures on the Cenozoic Tectonic Evolution of Western Branch of the East African Rift Basin: Insights from Analog Modeling. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zou, Y. Y., Maestrelli, D., Corti, G., et al., 2024. Influence of Inherited Brittle Fabrics on Continental Rifting: Insights from Centrifuge Experimental Modeling and Application to the East African Rift System. *Tectonics*, 43(1): e2023TC007947. <https://doi.org/10.1029/2023TC007947>
- Zwaan, F., Corti, G., Keir, D., et al., 2020. Analogue Modelling of Marginal Flexure in Afar, East Africa: Implications for Passive Margin Formation. *Tectonophysics*, 796: 228595. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228595>
- Zwaan, F., Schreurs, G., 2023. Analog Models of Lithospheric-Scale Rifting Monitored in an X-Ray CT Scanner. *Tectonics*, 42(3): e2022TC007291. <https://doi.org/10.1029/2022TC007291>

中文参考文献

- 陈云敏, 2020. 离心超重力实验: 探索多相介质演变的革命性手段. 浙江大学学报(工学版), 54(4): 631-632.
- 何文刚, 沈传波, 吴磊, 等, 2023. 底辟构造启动及其沉积建造形成机制探讨——来自物理模拟的启示. 大地构造与成矿学, 47(5): 1069-1084.
- 贾东, 杨树锋, 尹宏伟, 等, 2023. 褶皱冲断带物理模拟实验研究进展. 地质学报, 97(9): 2896-2913.
- 吴珍云, 杨秀磊, 尹宏伟, 等, 2023. 库车坳陷西段阿瓦特构造转换带盐构造演化特征及影响因素. 地球科学, 48(4): 1271-1287.
- 徐振平, 杨庚兄, 罗浩渝, 等, 2024. 不同深度岩性差异对库车坳陷构造分段特征的影响. 地球科学, 49(8): 3029-3042.
- 徐义刚, 陈骏, 2025. 中国深地科学 2035 发展战略. 北京: 科学出版社.
- 杨克基, 漆家福, 刘傲然, 等, 2022. 库车坳陷中段基底断裂特征及其对盐构造变形的影响. 地质科学, 57(4): 991-1008.
- 杨树锋, 贾承造, 陈汉林, 等, 2022. 沉积盆地构造核心理论和关键技术方法: 前沿与发展方向. 地学前缘, 29(6): 10-23.
- 张亦永, 黄雷, 李鑫, 等, 2025. 伸展方向转变与基底断裂耦合控制下断裂体系发育演化的物理模拟. 地质学报 (网络首发). doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao. 2025091
- 周维维, 董有浦, 肖安成, 等, 2023. 东营凹陷基底断裂走滑活动对油气成藏的影响. 地球科学, 48(7): 2718-2732.
- 邹耀遥, 2024. 先存构造对东非裂谷盆地西支新生代构造演化的影响 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.