引用格式：管涛，吴磊，杨波，等，2026. 超重力构造物理模拟实验方法研究进展[J]. 地质力学学报，32（3）：721−740. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026019

Citation: GUAN T，WU L，YANG B，et al.，2026. Advances in tectonic physical analog modeling under hypergravity[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：721−740. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026019

超重力构造物理模拟实验方法研究进展

管 涛[1,2]，吴 磊[1,2]，杨 波[1,2]，贾 东[3]，吴晓俊[3]，杨树锋[1,2]，陈汉林[1,2]

GUAN Tao[1,2]，WU Lei[1,2]，YANG Bo[1,2]，JIA Dong[3]，WU Xiaojun[3]，YANG Shufeng[1,2]，CHEN Hanlin[1,2]

1. 浙江大学地球科学学院，浙江 杭州 310058；
2. 教育部含油气盆地构造研究中心，浙江 杭州 310058；
3. 南京大学地球科学与工程学院，江苏 南京 210023

1. *School of Earth Sciences*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *Zhejiang*, *China*;
2. *Research Center for Structures in Oil and Gas Bearing Basins*, *Ministry of Education*, *Hangzhou* 310058, *Zhejiang*, *China*;
3. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210023, *Jiangsu*, *China*

Advances in tectonic physical analog modeling under hypergravity

Abstract: ［**Objective**］Physical analog modeling is an effective laboratory method for reconstructing geological structure evolution, yet conventional normal-gravity experiments face limitations due to significant deviations in stress levels compared to natural prototypes. Hypergravity technology offers a novel pathway to address this issue and has emerged as a frontier approach for investigating deep and large-scale spatio-temporal scale Earth deformation. ［**Methods**］This paper systematically reviews the research progress of hypergravity tectonic physical analog modeling, summarizes the characteristics and applications of experimental devices including small laboratory centrifuges and cantilever centrifuges used worldwide, analyzes the suitability of non-powered and powered driving systems, elaborates on the application principles of analog material systems for ductile, brittle, and complete crustal profiles, and introduces key techniques for surface deformation observation and internal structure detection. ［**Conclusions**］Through the analysis of analog experiments simulating compressional structures, extensional structures, diapirs, and subduction, the unique advantages of hypergravity in amplifying density-driven effects, accelerating tectonic deformation, and improving simulation similarity are revealed, with specific patterns of its influence on structural styles and propagation processes clarified. During the research, the authors also developed a hypergravity physical analog modeling experimental chamber compatible with the Zhejiang University ZJU400 centrifuge and conducted related experimental studies. ［**Significance**］This research provides a systematic reference for methodological innovation and theoretical development in hypergravity physical analog modeling, and holds positive significance for advancing structural geology toward quantification and interdisciplinary integration.

Keywords: tectonic physical analog modeling; hypergravity experiment; centrifuge; tectonic deformation; geological process

摘 要：构造物理模拟是实验室重现地质构造演化的有效手段，但常重力实验存在应力水平与自然原型偏差较大的局限。超重力技术为解决这一问题提供了新路径，已成为探究深部及大时空尺度地球变形的前沿方向。文章系统梳理了超重力构造物理模拟的研究进展，总结了国内外小型实验室离心机与大型悬

基金项目：国家自然科学基金卓越研究群体项目（52588202）；国家自然科学基金面上项目（42272233）

This research was financially supported by the Excellent Research Group Project of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52588202) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42272233).

第一作者：管涛（1997—），女，博士，主要从事构造物理模拟、超重力模拟研究。Email：guantao1123@zju.edu.cn

通信作者：吴磊（1983—），男，教授，博士生导师，主要从事盆地构造与盆山耦合、深部地质过程与地表作用耦合等研究工作。Email：leiwu@zju.edu.cn

收稿日期：2026−02−04；**修回日期**：2026−05−16；**录用日期**：2026−05−26；**网络出版日期**：2026−05−28；**责任编辑**：范二平

Received：2026−02−04；Revised：2026−05−16；Accepted：2026−05−26；Available Online：2026−05−28；Handling Editor：FAN Erping

臂式离心机等实验装置的特点及应用，分析了无动力与动力驱动装置的适配场景，阐述了韧性、脆性及完整地壳剖面模拟材料体系的应用逻辑，并介绍了表面变形观测与内部结构探测的关键技术。通过挤压构造、伸展构造、底辟及俯冲等多类构造的模拟实验分析，揭示了超重力在放大密度差驱动效应、加速构造变形、提升模拟相似性等方面的独特优势，明确了超重力对构造变形样式、传递过程的影响规律。同时利用适配浙江大学 ZJU400 大型悬臂式离心机的超重力构造物理模拟实验箱，进行了相关实验研究。该研究为超重力构造物理模拟的方法创新和理论发展提供了系统参考，并对推动构造地质学向定量化、多学科交叉方向演进具有积极意义。

关键词：构造物理模拟；超重力实验；离心机；构造变形；地质过程

中图分类号：P313; P542; P554 **文献标识码**：A **文章编号**：1006−6616(2026)03−0721−20

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026019

0 引言

地质过程通常具有大时空尺度的特征——跨越数千千米、历时数千万年，其复杂构造的形成机制与演化历史难以直接观测与重建。构造物理模拟是一种在实验室内重现构造演化过程的有效方法。其原理是基于相似性原则，以不同的模拟材料（如干燥石英砂、硅胶、微玻璃珠、黏土等）模拟实际岩层，将自然界地质模型缩尺至实验室尺度，从而在可控条件下研究变形机制。

自 19 世纪初起，物理模拟技术逐步应用于地质过程研究（Hall, 1815; Cadell, 1889）。历经 2 个多世纪的发展，构造物理模拟在相似理论、实验设备、观测与分析技术等方面不断完善，已成为构造地质学定性与定量研究的重要手段（Hubbert, 1937, 1951; Ramberg, 1981; Weijermars and Schmeling, 1986; Davy and Cobbold, 1991; Koyi, 1997; Schellart, 2002; Schreurs et al., 2003; White et al., 2003; Wu et al., 2009; Graveleau et al., 2012; Adam et al., 2013; Thielicke and Stamhuis, 2014; Schellart and Strak, 2016; Reber et al., 2020; Thielicke and Sonntag, 2021）。其主要优势在于：①可灵活设置模型参数与边界条件，从而精准揭示单一或复合控制因素对构造变形的影响（Persson and Sokoutis, 2002; Molnar et al., 2020; Long et al., 2021）；②能有效检验复杂构造解释模型的合理性，再现多尺度构造演化过程并获取连续、清晰的运动学图像，为解释自然地质过程提供依据（Tapponnier et al., 1982; Schellart, 2002; Schmid et al., 2022; Guan et al., 2025）。本质上，物理模拟是对地质三维演化过程的实验重建，现已广泛应用于深部构造变形、地表过程、板块运动、构造−气候耦合等研究（Schellart, 2002; Corti et al., 2003; Bajolet et al., 2015; Graveleau et al., 2015; Molnar et al., 2017; Zwaan et al., 2020b; Yan et al., 2024; Nabavi and Fossen, 2025; 杨波等, 2025）。

20 世纪 60 年代，超重力技术被引入构造物理模拟领域，成为研究不同深度构造变形尤其是体力主导地质过程的有效方法（Ramberg, 1967, 1971; Dixon, 1975; Koyi, 1997）。瑞典乌普萨拉大学地球科学学院 Ramberg 实验室率先开展了超重力构造物理模拟研究（Ramberg, 1967, 1981; Ghosh and Ramberg, 1968），实验方向涉及穹隆、底辟构造（Dietl and Koyi, 2002; Dietl et al., 2006）、褶皱弯曲（Mulugeta, 1988）、裂谷与岩浆活动 (Mulugeta and Ghebreab, 2001; Harris and Koyi, 2003)、板块俯冲（Mart et al., 2005）等地质过程。现今，超重力技术已拓展至地球岩石圈和地幔变形的系统研究，涵盖大陆裂谷及拉分盆地（Bonini et al., 2001; Corti et al., 2004; Corti and Dooley, 2015; Zwaan et al., 2020a; Zou et al., 2024）、褶皱冲断带 (Noble and Dixon, 2011; Faisal and Dixon, 2015; Santolaria et al., 2022)、岩浆活动与底辟构造（Corti et al., 2002; Dietl and Koyi, 2011）等，在实验装置创新和对地球变形的认识上都取得了重要进展。

作为物理模拟技术的重要分支与前沿方向，超重力物理模拟在探究深部及大时空尺度地球变形方面具有独特优势，为解决极端地质构造问题提供了新途径。然而，该领域目前仍缺乏系统的总结和深入研究，若干关键问题有待进一步探讨，如超重力与常重力实验的定量对比尚不充分，实验中的干扰因素（如超重力效应的随机性、模型重力不均衡、摩擦力影响等）需要系统辨析与量化，相似性计算的合理性及实验科学意义的阐释仍需完善，现有实验装置与观测手段仍存在一定局限等。文章旨在系统梳理超重力物理模拟的实验装置及相关科

学问题的研究进展，以期为该技术的创新与发展提供新的认识与思路。

1　超重力物理模拟基本原理

地球上所有物质都受到重力的作用，地球重力场为常重力场（记为 1g），其重力加速度 g≈9.8 m/s^2，重力加速度大于 1g 的环境为超重力场。重力是产生地应力的主要原因，在地球浅部，岩体的自重应力随深度呈线性增长（Brown and Hoek, 1978）。在诸如褶皱、冲断、俯冲等大规模岩石圈变形过程以及涉及盐底辟等流变行为的构造演化中，重力发挥着十分关键的作用（England and McKenzie, 1982; Davy and Cobbold, 1991; Mart et al., 2005; Dietl et al., 2006; Adam et al., 2012）。

在常重力物理模拟中，模型内部的应力远低于真实地质环境。这导致材料的黏聚力与内摩擦力的影响被放大，使得模拟结果在发育模式、演化速率和最终形态等方面与自然原型存在较大偏差。如受颗粒材料内摩擦角的影响，模拟结果的断层倾角往往偏高，且传播距离有限。超重力环境为克服这些局限提供了有效手段。

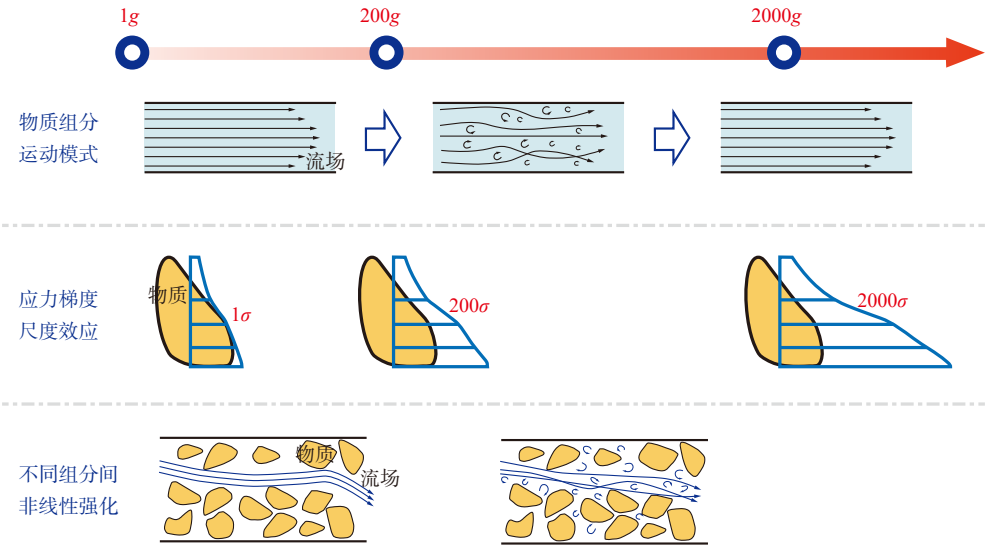
目前，超重力实验主要通过离心机实现，其基本原理是用离心机高速旋转产生的离心加速度模拟模型环境的重力加速度。在工学领域，利用离心机开展超重力实验已有较长历史，主要通过超重力将实际岩土结构缩尺为实验模型。而构造物理模拟中，实验模型通常不要求与地质原型严格一一对应，只需满足以下条件：①模拟材料的物理属性和流变学特征与地质原型一致；②演化结构在几何学、运动学、动力学三方面相似，且相似性参数处于同一数量级即可（Hubbert, 1937; Weijermars and Schmeling, 1986; Reber et al., 2020）。

通过调整重力参数，可以实现对时间、速度等动力学参数，长度等几何参数，以及密度、黏度等流变学参数的合理缩放。具体体现在动力学相似因子（σ^*）上（Ramberg, 1967; Dixon and Summers, 1985）：

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^* \tag{1}$$

式中，σ^*—动力学相似因子；ρ^*—密度相似因子；g^*—重力加速度相似因子；l^*—相似因子。从公式（1）可以看出，增大重力加速度值可以增大g^*，从而对其他因子产生影响。

超重力本质是改变了模型的体力，使其具有缩尺和缩时两大优势（陈云敏，2020）。然而，在离心机高速旋转过程中，不可避免地会产生超重力效应，并伴随着显著的随机性（图 1）。具体表现为：①物质组分的运动模式发生改变，变形过程存在扰动；②应力梯度引起尺度效应，自重应力并非随深度线性增长；③不同物质组分之间存在非线性强化效应，由重力势能引起的差异被进一步放大（Chen et al., 2022）。



g—等效重力加速度；σ—应力

图 1　超重力效应概念图（据 Chen et al., 2022 修改）

Fig. 1　Conceptual diagram of hypergravity effects (modified from Chen et al., 2022)

g—equivalent gravitational acceleration; σ—stress

2 超重力物理模拟实验装置

2.1 离心机

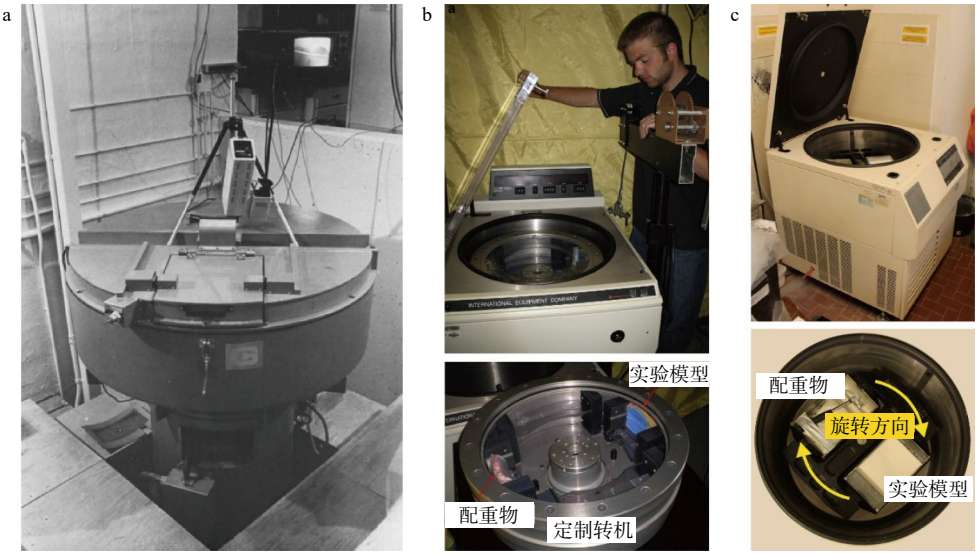
构造物理模拟实验中所用的离心机根据其外观和常规应用可分2类：小型实验室离心机和悬臂式土工离心机。

(1)小型实验室离心机

目前，超重力物理模拟研究大多采用小型实验室离心机，其整体结构与生物、化工教学实验中常用的离心设备类似。为满足具体研究需要，需对离心机的内部结构进行定制与改造，包括加装模型实验箱、配重物、观察窗口、冷却装置等(图2)。

小型实验室离心机具有模型尺寸较小、可达到的最大重力加速度高两大特点。如加拿大女王大学改造的Genisco Technology Corp. 1075离心机最高转速为7200 r/min(图2a)，最大模型尺寸为127 mm×76 mm×51 mm，最大重力加速度可达20000*g*，实际实验中使用2000*g*～4000*g*(Dixon and Summers, 1985)、4000*g*(Faisal and Dixon, 2015; Waffle et al., 2016)。加拿大国家科学研究院使用的PR-7000离心机旋转半径为200 mm，为减少离心加速度分布不均的影响，实验装置底面设计为57°的圆弧形(图2b)。该装置最大模型尺寸为200 mm×95 mm×50 mm，最大重力加速度可达8000*g*，实际实验中使用900*g*、1100*g*(Godin et al., 2011)、1000*g*(Harris et al., 2012; Waffle et al., 2016)、898*g*(Santolaria et al., 2022)。瑞典乌普萨拉大学Ramberg实验室的一台改装离心机最大重力加速度可达5000*g*，实际实验中Mulugeta and Ghebreab(2001)开展的大陆裂谷演化实验，模型箱尺寸为140 mm×70 mm×50 mm，重力加速度为200*g*; Dietl et al.(2006)开展的剪切走滑实验模型尺寸为100 mm×80 mm×100 mm；重力加速度为700*g*；Mulugeta(1988)研制的超重力液压装置实验尺寸为200 mm×80 mm×20 mm，实际实验中使用800*g*。

部分离心机中的实验箱位置固定，模型只能垂直放置(图2b)。这种布置要求模型在铺设、运行、观测及分析过程中保持稳定，不发生散落、坍塌或解体，因此所使用的模拟材料需具备较高的黏聚力(Harris and Koyi, 2003; Corti et al., 2004; Harris et al., 2012)。为突破这一限制，意大利佛罗伦萨大学研制了一种可水平放置模型的离心机，模型箱尺寸为



a—加拿大女王大学使用的离心机(据Dixon and Summers, 1985修改)；b—加拿大国家科学研究院水、地质、环境研究中心(INRS-ETE)使用的离心机(据Harris et al., 2012修改)；c—意大利佛罗伦萨大学地球科学系(UNIFI-DST)和意大利国家研究委员会地球科学与地球资源研究所(CNR-IGG)的构造建模实验室(TOOLab)使用的离心机(据Zwaan et al., 2020a修改)

图2 用于超重力构造物理模拟的小型实验室离心机设备

Fig. 2 Small laboratory centrifuges for hypergravity tectonic analog modeling

(a) Centrifuge at Queen's University, Canada (modified from Dixon and Summers, 1985); (b) Centrifuge at the l'Institut national de la recherche scientifique—Eau Terre Environnement (INRS-ETE), Canada (modified from Harris et al., 2012); (c) Centrifuge at the Tectonic Modeling Laboratory (TOOLab), Department of Earth Sciences, University of Florence, Italy (UNIFI-DST) and the Institute of Geosciences and Earth Resources, National Research Council of Italy (CNR-IGG; modified from Zwaan et al., 2020)

250 mm×160 mm×70 mm(图 2c)。该设备内部结构类似于悬臂式离心机，在启动后，模型箱和配重物在离心力作用下逐渐抬升至垂直角度，旋转抬升过程中离心力始终垂直于模型表面(Corti and Dooley, 2015; Zwaan et al., 2020a; Zou et al., 2024)。这一设计降低了对模拟材料黏性的要求，使得纯脆性颗粒模型的铺设与实验成为可能(Milazzo et al., 2021)。

总体上，采用小型实验室离心机的超重力实验相较于常重力实验操作简便、耗材少，具有省时省力的优势。然而，由于内部空间有限，难以安装精密控制驱动装置与观察监测设备，在变形参数(如速率)的精准控制方面存在一定局限。

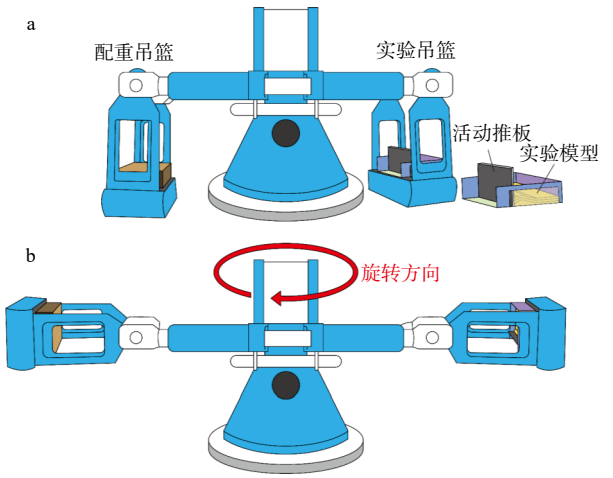
(2)悬臂式土工离心机

悬臂式土工离心机主要应用于岩土工程领域，在能源、交通、环境等实际工程问题研究中发挥着重要作用。离心机启动后，转臂绕转轴高速旋转，吊篮在离心力作用下逐渐抬升至接近垂直角度。此过程中离心力与自然重力的合力始终垂直于吊篮平台，为模型提供稳定可控的超重力环境(图 3)。与小型实验室离心机相比，吊篮内空间更为充足，可容纳大型实验箱、驱动装置及各类观察监测设备，并且可通过电机对活动速率和位移参数精准控制。

悬臂式土工离心机显著拓展了超重力实验的模型尺寸。如 Peltzer(1988)使用法国南特中央理工大学 Acutronic 离心机开展了印−亚碰撞侧向挤出实验，模型尺寸为 90 cm×80 cm×11 cm。Noble and Dixon (2011)使用加拿大 C-CORE 机构的 Accutronic 680-2 离心机进行了褶皱−冲断系统演化实验，模型尺寸为 100 cm×10 cm×10 cm(图 4a)。浙江大学与南京大学合作研制的超重力物理模拟专用实验箱最大实验尺寸为 85 cm×40 cm×10 cm，研究团队使用该实验箱在浙江大学 ZJU400 离心机上开展了挤压条件下先存构造对断层系统演化影响的实验(Guan et al., 2025)，模型尺寸为 60 cm×40 cm×2.5 cm(图 4b)。离心机详细参数见表 1。

上述实验均采用与常重力条件下相同的模拟材料和相近的实验设置。悬臂式离心机的优势在于能准确缩放垂向应力条件，使平面应变及其与纵向增厚之间的关系更贴近自然过程，从而克服模型尺寸及其对应模拟范围的限制，提高应力相似性的准确性。

总体上，悬臂式土工离心机的应用显著增大了超重力模型的尺寸(表 2)，可进行与常重力条件下相同设置的实验，增强模型与自然原型的相似性，并实现不同重力条件的对照。此外，借助驱动装置，超重力实验可在恒定速率下进行，且位移量能得到精准控制与记录。然而，该类离心机实验操作流程复杂、运行成本较高，在实际应用中有一定局限。为推进超重力构造物理模拟研究，南京大学研究团队与浙江大学、中国石油勘探开发研究院合作研制了多类型构造物理模拟实验装置，其中包括构造物理模拟专用离心机(图 4c, 表 1)及配套的实验箱、驱动与观测设备。目前该装置已进入验收与测试实验阶段，设计最大重力加速度为 1050*g*，当前正在开展 100*g*～300*g* 及 300*g*～1000*g* 量级的测试实验，有望为中国物理模拟研究水平的提升提供重要支撑。



a—静止状态；b—高速旋转状态

图 3　悬臂式土工离心机实验原理(以浙江大学 ZJU400 离心机为例)

Fig. 3　Principle of cantilever geotechnical centrifuge experiment (taking the ZJU400 centrifuge at Zhejiang University as an example)

(a) Stationary state; (b) High-speed rotation state

2.2　驱动方式

2.2.1　无动力装置驱动

正如上文所述，小型实验室离心机的内部空间有限，难以安装电机等控制驱动装置，因此多采用无外加动力装置的驱动方式。

(1)坍塌楔实现挤压

坍塌楔是模拟挤压条件的常用设置(Dixon and Summers, 1985; Godin et al., 2011; Harris et al., 2012; Faisal and Dixon, 2015; Waffle et al., 2016; Milazzo et al., 2021; Santolaria et al., 2022)，其原理是在模型后方铺设高黏度材料(如硅胶、黏土等)形成坍塌楔



a—加拿大 C-CORE 机构 Accutronic 680-2 离心机(据 Noble and Dixon, 2011 修改);b—浙江大学 ZJU400 离心机;c—南京大学构造物理模拟专用离心机

图 4 用于超重力构造物理模拟的悬臂式离心机实验设备

Fig. 4 Cantilever centrifuges for hypergravity tectonic analog modeling

(a) Accutronic 680-2 centrifuge at C-CORE, Canada (modified from Noble and Dixon, 2011); (b) ZJU400 centrifuge at Zhejiang University; (c) Dedicated centrifuge for tectonic analog modeling at Nanjing University

表 1 用于构造物理模拟的悬臂式离心机

Table 1 Cantilever geotechnical centrifuges used for physical analog modeling

序号	离心机	所属单位	旋转半径	吊篮有效容积	最大实验g值	实际实验g值	实验模型尺寸
1	Acutronic	法国南特中央理工大学	5.5 m	1.4 m×1.15 m×1.5 m	200g	80g(Peltzer, 1988)	90 cm×80 cm×11 cm
2	Accutronic 680-2	加拿大C-CORE机构	5.5 m	1.1 m×1.4 m×1.1 m	200g	160g(Noble and Dixon, 2011)	100 cm×10 cm×10 cm
3	ZJU400	浙江大学	4.5 m	1.5 m×1.2 m×1.5 m	150g	50g(Guan et al., 2025)	60 cm×40 cm×2.5 cm
						80g(管涛, 2026)	60 cm×40 cm×3.5 cm
4	构造模拟专用离心机	南京大学	1.25 m	0.4 m×0.4 m×0.35 m	1050g	100g～300g	30 cm×19 cm×12 cm
						300g～1000g	28 cm×19 cm×10 cm

(collapsing wedge),离心机启动后,楔体在惯性力作用下逐渐失稳、垮塌,从而对前方模型产生推力(图 5a)。为了确保推力均匀分布与传递,通常在坍塌楔与模型之间设置一块推板。这类实验需要分多个阶段进行(通常为 4～9 个阶段),每阶段结束后需要补充坍塌楔材料。模型的水平缩短量可通过新补充材料的质量与挡板面积控制(Santolaria et al., 2022):

$$S = m/(\rho_{楔} \times A) \tag{2}$$

式中,S—模型水平缩短量,m;m—新补充的材料质量,kg;$\rho_{楔}$—坍塌楔材料的密度,kg·m^{-3};A—挡板的面积,m^2。缩短速率通过每个阶段的实验时间和缩短量进行大致估算。

(2)手动移除间隔板实现拉张伸展

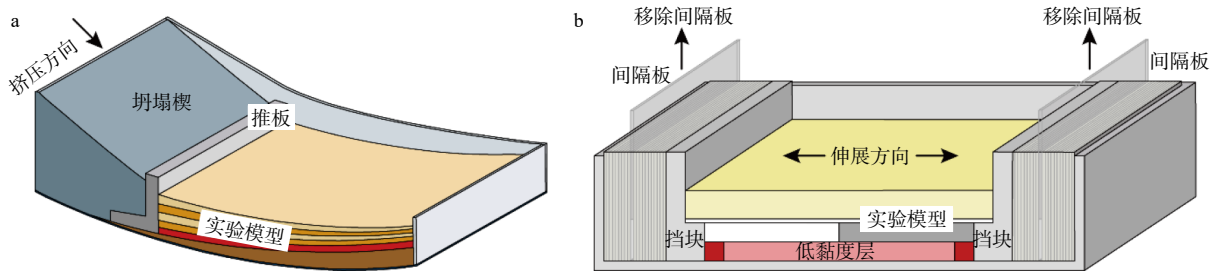
移除间隔板是模拟伸展条件的常用设置(Mulugeta and Ghebreab, 2001; Harris and Koyi, 2003; Corti and Dooley, 2015; Zwaan et al., 2020a; Zou et al., 2024),如图 5b 所示。实验模型被置于 2 组可拆卸的间隔板和“L”形刚性挡块之间,通过移除模型两侧的间隔板形成侧向空隙。空隙形成后,模型底部的低黏度层在离心力作用下发生侧向流动,进而带动上覆地层向两侧伸展,因此这类实验通常需要分阶段完

表 2　不同类型离心机开展的超重力实验

Table 2　Hypergravity tectonic analog modeling using different types of centrifuges

离心机	实验单位	模型尺寸/长×宽×高	实验g值	实验类型	驱动装置	参考文献
小型离心机	加拿大女王大学	12.7 cm×7.6 cm×5.1 cm	2000g、3000g、4000g	挤压	坍塌楔	Dixon and Summers, 1985
小型离心机	Ramberg实验室	18 cm×20 cm×10 cm	800g	挤压	离心力液压	Mulugeta, 1988
小型离心机	Ramberg实验室	9 cm×7.5 cm×1.9 cm	200g	伸展	橡皮泥控制两侧间隔	Bonini et al., 2001
小型离心机	Ramberg实验室	厘米级	700g	底辟		Dietl and Koyi, 2002
小型离心机	Ramberg实验室	7 cm×7 cm×1.9 cm	200g	伸展	橡皮泥控制两侧间隔	Corti et al., 2002
小型离心机	Ramberg实验室	厘米级	900g～1000g	伸展	移除间隔板	Harris and Koyi, 2003
小型离心机	Ramberg实验室	厘米级	500g	俯冲		Mart et al., 2005
小型离心机	Ramberg实验室	10 cm×8 cm×10 cm	700g	底辟	剪切底辟协同	Dietl et al., 2006
小型离心机	INRS-ETE	17 cm×8 cm×(2～3) cm	900g、1100g	挤压	坍塌楔	Godin et al., 2011
小型离心机	Ramberg实验室	厘米级	700g	底辟		Dietl and Koyi, 2011
小型离心机	INRS-ETE	(17～20) cm×8 cm×(1.5～2.0) cm	1000g	挤压	坍塌楔	Harris et al., 2012
小型离心机	CNR-IGG	25 cm×16 cm×7 cm	18g	伸展	移除间隔板	Corti and Dooley, 2015
小型离心机	加拿大女王大学	8.6 cm×7.6 cm×0.4 cm	4000g	挤压	坍塌楔	Faisal and Dixon, 2015
小型离心机	INRS-ETE	20 cm×8 cm×5 cm	1000g	挤压	坍塌楔	Waffle et al., 2016
小型离心机	加拿大女王大学	12.7 cm×7.6 cm×5.1 cm	4000g			
小型离心机	CNR-IGG	25 cm×15.8 cm×(2.8～4.2) cm	18g	伸展	移除间隔板	Zwaan et al., 2020a
小型离心机	CNR-IGG	15 cm×16 cm×(5～ 6) cm	18g	挤压	坍塌楔	Milazzo et al., 2021
小型离心机	INRS-ETE	16 cm×9 cm×(0.3～1.5) cm	898g	挤压	坍塌楔	Santolaria et al., 2022
小型离心机	CNR-IGG	25 cm×16 cm×3.5 cm	18g	拉张	移除间隔板	Zou et al., 2024
土工离心机	法国巴黎地球物理研究所构造实验室	90 cm×80 cm×11 cm	80g	挤压	电机驱动	Peltzer, 1988
土工离心机	加拿大女王大学	100 cm×10 cm×10 cm	160g	挤压	电机驱动	Noble and Dixon, 2011
土工离心机	浙江大学	60 cm×40 cm×2.5 cm	50g	挤压	电机驱动	Guan et al., 2025

INRS-ETE—加拿大国家科学研究院水、地质、环境研究中心；CNR-IGG—意大利国家研究委员会地球科学与地球资源研究所



a—通过坍塌楔垮塌推动挡板活动的挤压缩短装置(据 Santolaria et al., 2022 修改)；b—通过移除两侧间隔板实现拉张的伸展实验装置(据 Zwaan et al., 2020a 修改)

图 5　无动力驱动的超重力实验装置

Fig. 5　Non-powered hypergravity experimental devices

(a) Experimental device for compressional deformation by collapsing wedge (modified from Santolaria et al., 2022); (b) Experimental device for extensional deformation by removing two sets of spacers (modified from Zwaan et al., 2020)

成。早期伸展模拟实验也有采用在两侧挡板外侧填充橡皮泥的方式，通过橡皮泥控制横向拉伸量(Bonini et al., 2001; Corti et al., 2002)。相比之下，采用统一规格的间隔板可显著简化实验操作，并可通过每阶段移除特定数量的间隔板，精准控制总伸展量与伸展速率。

(3)重力(离心力)、浮力驱动

基于重力或浮力驱动的物理模拟实验无需外

部动力源，其原理在于利用物质间的密度差在重力场中产生驱动效应，离心机实验的优势是能够放大这一效应。纵向密度差异形成向上的驱动力，适用于模拟2类地质过程：①重力失稳相关构造，如低密度岩体（盐丘、泥丘等）在浮力作用下上涌形成的底辟构造（Dietl and Koyi, 2002, 2011; 何文刚等, 2023）；②受重力势能控制的薄层盐构造，如因热沉降或沉积楔向前推进导致地层倾斜，进而诱发斜坡环境下的重力滑塌、滑移、褶皱及底辟变形等（Adam et al., 2012; Ge et al., 2019a, 2019b）。底辟体的上升与变形，主要依赖其在相对高密度围岩中受到的浮力与重力之差。在自然界中，这一过程通常极为缓慢，常规物理模拟受限于材料密度差较小、驱动力弱，往往需数天至数十天才能观察到明显变形，且变形幅度有限。而在超重力条件下，密度差引起的驱动力被显著放大，可大幅加速底辟过程。如Dietl and Koyi（2002, 2011）在700*g*条件下开展的岩浆底辟实验，仅运行6～10 min即获得理想的变形效果。而横向上的密度差异在离心机作用下可产生横向应力，可用于模拟俯冲初始阶段的变形演化过程（Mart et al., 2005）。

（4）离心力驱动的液压挤压装置

Mulugeta（1988）研制了一种离心机内的液压挤压装置，成功利用离心力将模拟超重力和推力相结合。离心机内一端固定液压缸并灌入适量的油，通过半圆弧形长管连接到另一端的实验箱推板，实验箱兼具模型载体与配重平衡功能，如图6a所示。离心机启动后，实验箱内模型所受的离心力模拟了超重力，液压缸内的流体在离心力作用下沿着长管向推板施加推力。模型所受挤压力可由液压缸内的流体大致控制：

$$\mathrm{d}F = \mathrm{d}m \times a \tag{3}$$

式中，dF—模型所受挤压力，N；dm—流体质量，kg；a—离心加速度，m·s^{-2}。

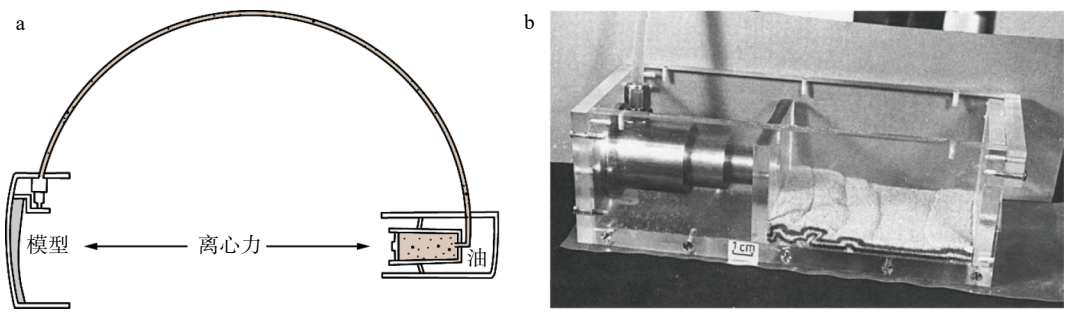
通过测量液压缸的位移可记录模型的挤压缩短量并估算缩短速率。该装置突破了以往物理模拟实验中仅能模拟单一超重力或推力的局限。然而，由于无法精准控制挤压力和缩短速率，并且实验装置中摩擦阻力的影响无法忽略，尚未得到广泛应用。

（5）剪切与底辟协同作用装置

Dietl et al.（2006）设计了一套螺丝驱动的剪切实验装置，用以模拟走滑断层活动及其伴生的拉分盆地演化过程（图7a）。该装置通过手动旋转螺丝，驱动底部2片长方形板沿相反方向滑移，从而实现剪切与走滑的运动条件。实验需要分为多个阶段进行，每阶段先将螺丝旋转至预设位移，再将整个装置置于离心机中，利用超重力环境下材料间的密度差，激发由浮力主导的底辟构造变形（图7b）。该装置将剪切变形和超重力底辟实验相结合，实现了拉张环境下岩浆侵入过程的动态物理模拟。

2.2.2 *动力装置驱动*

正如上文所述，悬臂式土工离心机的吊篮内空间充足，可容纳大型实验箱并安装动力驱动装置，在离心机振动工况下仍能对实验速度与位移进行精确控制。目前采用动力驱动的超重力实验研究多集中于挤压条件，驱动装置通常与定制实验箱采用一体化设计（图8）。如Peltzer（1988）研制的实验箱采用伺服电机驱动推板向前移动，并在推板前设置了刚性挤入体，在80*g*条件下开展了速度为2.5 cm/min的刚性块体挤入实验（图8a）。浙江大学与南京大学合作研制的实验箱的驱动原理与此相似，但采用

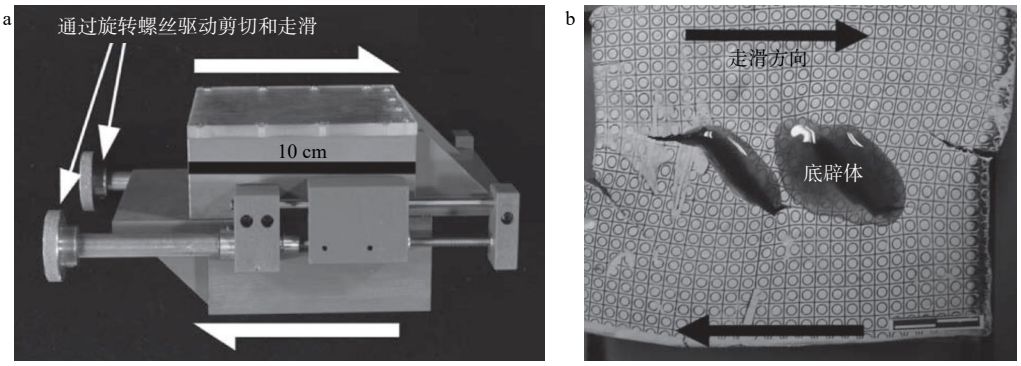


a——实验装置原理示意；b——实验箱照片

图6 Mulugeta（1988）研制的离心力驱动液压装置

Fig. 6 Centrifugal force-driven hydraulic device developed by Mulugeta (1988)

(a) Schematic diagram of the experimental setup; (b) Photograph of the experimental box

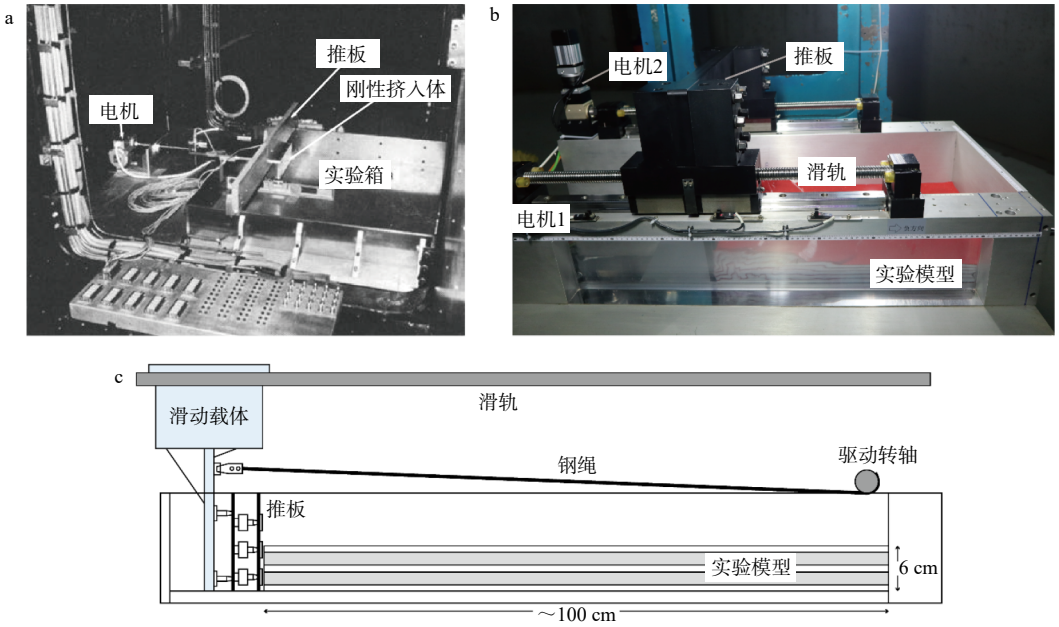


a—剪切实验装置；b—结合剪切和底辟变形的超重力实验结果

图 7　Dietl et al.（2006）研制的剪切与底辟协同作用的超重力实验装置

Fig. 7　Hypergravity experimental device for the synergistic effects of shear and diapirism developed by Dietl et al. (2006)

(a) Shear experimental device; (b) Experimental results of hypergravity modeling combining shear and diapiric deformation



a—Peltzer（1988）研制的实验箱照片；b—由浙江大学与南京大学合作研制的实验箱照片；c—Noble and Dixon（2011）研制的实验箱驱动原理示意

图 8　动力驱动的超重力实验装置

Fig. 8　Power-driven hypergravity experimental devices

(a) Photograph of the experimental box developed by Peltzer (1988); (b) Photograph of the experimental box co-developed by Zhejiang University and Nanjing University; (c) Schematic diagram of the driving principle of the experimental box developed by Noble and Dixon (2011)

双伺服电机同步驱动推板，使其推力分布更均匀、运行更稳定（图 8b）。经过多次上机测试与改进，该实验箱可在 10*g*～150*g* 条件下稳定运行，速度控制精度可达 0.100～0.001 mm/s，目前相关工作均聚焦于挤压实验方向（Guan et al., 2025; 管涛，2026）。Noble and Dixon（2011）设计的超重力实验箱则通过伺服电机驱动转轴旋转，使钢绳逐步缠绕收紧，牵引滑动载体沿滑轨匀速前移，进而带动推板实现匀速挤压（图 8c）。该装置在 160*g* 条件下开展了挤压速度为 0.05 mm/s 的褶皱冲断带演化实验。

2.3　实验材料

（1）韧性变形的模拟材料

硅胶、橡皮泥、石蜡、凡士林等是模拟流变层的常用材料（Schellart and Strak, 2016; Reber et al., 2020），在超重力物理模拟实验中也得到广泛应用。剪切实验表明，硅胶、橡皮泥等常用韧性材料在高达 2000*g*～6000*g* 的超重力条件及 10^{-6}～10^{-3} s^{-1} 的应变率范围内，仍可有效模拟褶皱冲断带等构造的变形

特征(Dixon and Summers, 1985)。超重力通过调节重力参数,提升了模型与地质原型间的动力学相似性,使实验可使用相对更高黏度、更“硬”的材料来模拟岩石圈变形,如高黏度聚合物流体、高黏度硅胶等(Corti et al., 2003, 2004; Agostini et al., 2011; Zwaan et al., 2020a)。相比之下,常重力实验中黏度较低的材料(如低黏度硅胶)易在模型制备、搬运及后期处理过程中发生流动或坍塌,难以维持稳定构造形态。而超重力条件下使用的高黏度材料,不仅能更好地匹配动力学相似性,使实验模型更加稳定,还能让实验操作更加简便(Ramberg, 1981; Schellart, 2002; Corti et al., 2003)。

(2)上地壳脆性变形的模拟材料

石英砂、糖、微玻璃珠等颗粒材料遵循莫尔−库伦(Mohr-Coulomb)屈服准则,是模拟上地壳脆性变形的常用材料(Byerlee, 1978; Davis et al., 1983; Krantz, 1991)。但在离心机超重力实验中,受限于装置结构及操作条件,直接使用松散颗粒材料模拟脆性变形存在困难。悬臂式土工离心机和部分改装的小型实验室离心机可水平铺设模型并使用颗粒材料(Peltzer, 1988; Noble and Dixon, 2011; Corti and Dooley, 2015; Zwaan et al., 2020a; Milazzo et al., 2021; Zou et al., 2024; Guan et al., 2025)。对于其他离心机,实验箱在转机的位置固定,模型只能垂直放入,要求材料在铺设、运行、观测及切片过程中不发生散落或坍塌。传统脆性材料因缺乏黏聚力难以满足这一要求,因此超重力实验中常采用具有一定黏聚力的半脆性(脆−韧性)材料模拟上地壳,如混入石蜡油的砂(Bonini et al., 2001; Corti et al., 2004; Zwaan et al., 2020a)、橡皮泥与甜味剂粉末混合物(Harris and Koyi, 2003)、商业油砂混合物砂(“太空砂”等儿童塑形玩具用材)(Waffle et al., 2016; Santolaria et al., 2022)等。其中,油砂混合物在计算机断层扫描(CT)透射成像分析中表现出良好性能,能够提供高对比度、高分辨率的内部结构图像,减少传统实验材料中影像干扰的问题(Waffle et al., 2016)。此外,半脆性材料在保持脆性变形特征的同时具备一定可塑性,极大便利了模型的制备与后期处理。

(3)地壳剖面完整材料体系

Waffle et al.(2016)首先在普通小型实验室离心机中对多种脆性模拟材料在4000*g*下的结构稳定性进行了测试,随后分别使用Genisco Technology Corp. 1075离心机(图2a)和PR-7000离心机(图2b)在4000*g*与1000*g*条件下对多类黏性材料开展了挤压与伸展变形实验。实验通过光学显微镜观测表面断层类型(逆冲断层、走滑断层、伸展断层)、褶皱形态与尺度分布,并借助CT扫描获取内部结构与应变信息。

基于上述测试及已有研究,Waffle et al.(2016)构建了一套覆盖“刚性基底—下地壳—中地壳—上地壳”的完整模拟材料体系(图9),适用于厚皮造山带、薄皮褶皱冲断带等多种构造场景:油砂混合物(Moon sand™、Deltasand™)可作为上地壳材料,能有效模拟1～50 km尺度的逆冲断层、走滑断层与伸展断层;黏性主导材料(如硅胶Dow Corning 3139、油基橡皮泥Crazy Aaron's Thinking Putty™)等在应变率$< 0.5\times10^{-2}\ s^{-1}$时,适用于模拟中—下地壳的韧性变形;弹性主导材料(如黏土Chavant™ Y2 Klay)具有高黏度与高刚性,是模拟基底克拉通的理想材料。这些材料因其独特的物理与流变特性,显著提升了超重力实验的设计灵活性与相似性精度,已被广泛应用于多项研究(Godin et al., 2011; Harris et al., 2012; Faisal and Dixon, 2015; Waffle et al., 2016; Santolaria et al., 2022)。

2.4 实验观测与处理

2.4.1 表面变形观测

在超重力与常重力实验中,表面变形的观测方法与处理流程基本一致,仅在具体操作环节略有差异。

(1)图像采集:图像是分析表面变形的主要数据来源。部分离心机及实验箱配有透明观察窗,可采用频闪仪、灯带作为辅助光源,配合数码相机记录连续影像(Mulugeta, 1988; Peltzer, 1988; Guan et al., 2025)。对于垂直放置的模型,因设备主体多为不透明材质,观察角度受限,可借助镜面反射实现图像观测与记录(Harris and Koyi, 2003);也可在各变形阶段结束后及实验全部完成时,对模型顶部及侧面进行拍摄采集(Dietl and Koyi, 2011; Noble and Dixon, 2011)。

(2)应变标记分析:在模型表面绘制圆形或网格等标记,可通过其变形计算水平应变,并结合应变椭圆提取旋转轴、位移方向等运动学信息(Peltzer, 1988; Dietl and Koyi, 2002; Dietl et al., 2006; Santolaria et al., 2022)。

(3)地表高程重建:利用多角度拍摄的照片,可通过Agisoft Metashape等摄影测量软件生成数字高程模型,进一步开展定量地形分析(Zwaan et al., 2020a; Zou et al., 2024)。此外,也可在每次离心机运

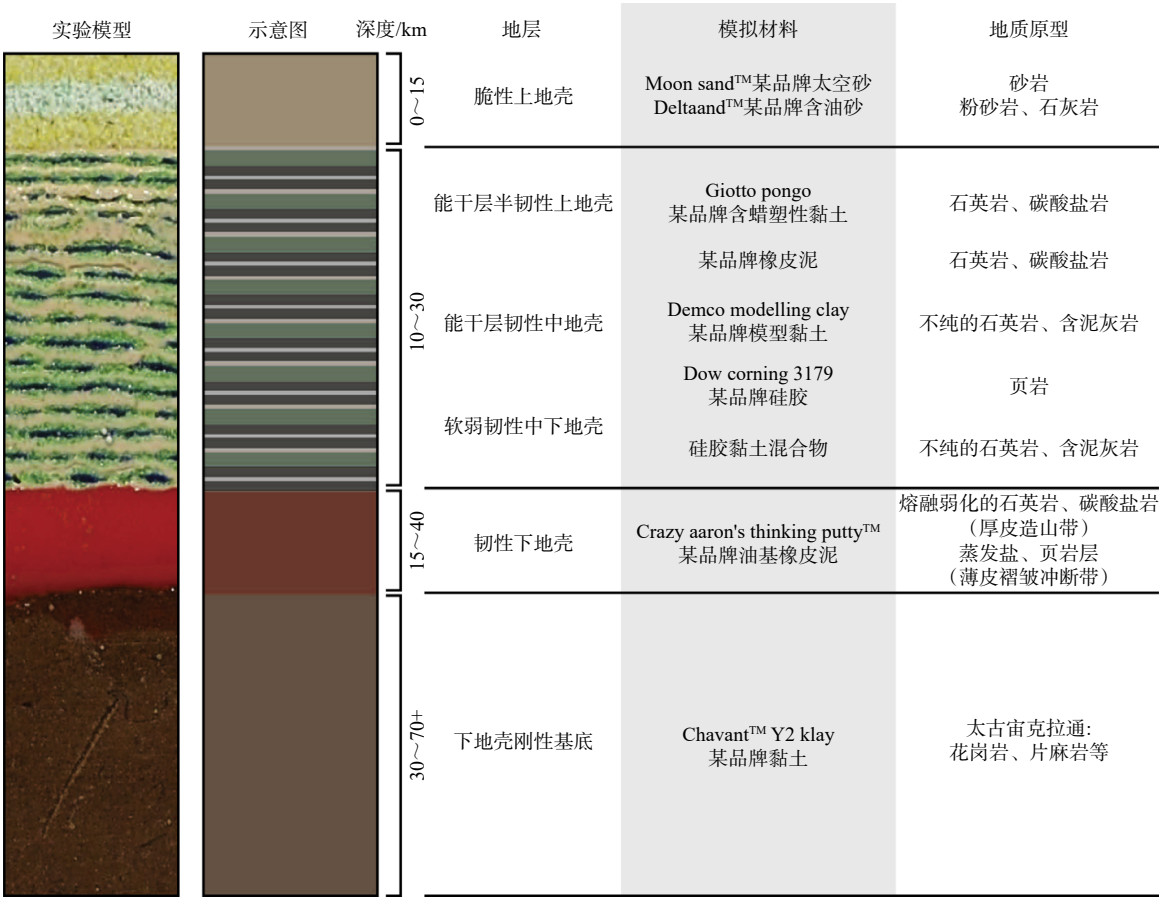


图 9　超重力模型的地壳剖面模拟材料体系（据 Waffle et al.，2016 修改）

Fig. 9　Analog material system for a crustal cross section in hypergravity models (modified from Waffle et al., 2016; The Columns show, form left to right: a photograph of a generic multilayer experimental model, a schematic section of the actual model, the approximate depth, crustal layer, and relative competence of each section, the analog materials, and the corresponding prototype rock types.)

行后使用激光扫描仪获取模型表面三维形态(Corti and Dooley, 2015)。

(4)数字图像分析：基于采集的图像，可运用各类专业软件提取变形信息。如使用 MATLAB 中的 PIVlab 分析速度场和应变场(Guan et al., 2025)；使用 FracPaQ 统计断层长度、走向、数量与组合模式等参数(Zou et al., 2024)。

2.4.2　内部变形观测

(1)剖面切片：剖面切片是观测模型内部变形最常用的方法。早期超重力实验中模型通常竖直放置，为获取不同阶段的内部结构，研究者主要采用 2 种方式：①准备多个相同模型，分别变形至不同程度后依次切片(Dixon, 1975)；②对单一模型进行分阶段切片，每次切片后将切下的部分重新拼合，继续开展下一阶段实验，反复此过程至实验结束(Dixon and Summers, 1985; Dietl and Koyi, 2002; Harris et al., 2012; Faisal and Dixon, 2015)。对比实验表明，重复切片对模型整体变形的影响较小(Dixon and Summers, 1985)。由于超重力模型多采用黏性材料，切片前通常需浸水冷冻以保持剖面形态(Bonini et al., 2001; Harris and Koyi, 2003; Harris et al., 2012; Corti and Dooley, 2015; Zwaan et al., 2020a; Milazzo et al., 2021)。

(2)CT 透射成像：CT 成像目前是唯一能够在实验过程中无损获取模型内部结构的方法(Schreurs et al., 2003; Adam et al., 2013)。对于采用小型实验室离心机的小尺度模型，因其便于移取与扫描，使用 CT 技术具有显著优势(Harris et al., 2012; Waffle et al., 2016; Santolaria et al., 2022)。

3　超重力物理模拟实验应用分析

3.1　挤压构造

3.1.1　褶皱冲断带

早期的挤压构造超重力物理模拟研究都是在

极高的重力加速度条件下(160*g*～6000*g*)开展,并常使用黏性和塑性材料(如黏土、硅胶、橡皮泥)模拟地壳变形(Ghosh and Ramberg, 1968; Mulugeta, 1988; Godin et al., 2011; Noble and Dixon, 2011; Harris et al., 2012; Faisal and Dixon, 2015)。尽管也有学者(Noble and Dixon, 2011)使用土工离心机进行实验,使相似性缩放更为合理;但由于采用韧性材料,模拟结果往往以褶皱作用为主导,如前陆剥蚀促进中下地壳韧性流动引起的褶皱扩展(Godin et al., 2011; Harris et al., 2012)或盐岭冲断带的演化过程(Faisal and Dixon, 2015),而未能有效刻画冲断构造的演化机制。

相比之下,使用脆性材料的实验设计较为简单,通常设置2类对比模型:①均匀脆性模型、②含基底滑脱层模型。相关研究也常作为对所研制离心机实验装置的功能验证。Mulugeta(1988)使用浸湿的石英砂开展了常重力和800*g*超重力条件下的4组对比实验(图10a):常重力实验中,变形主要表现为叠瓦状冲断,地表坡度较陡(含韧性基底的模

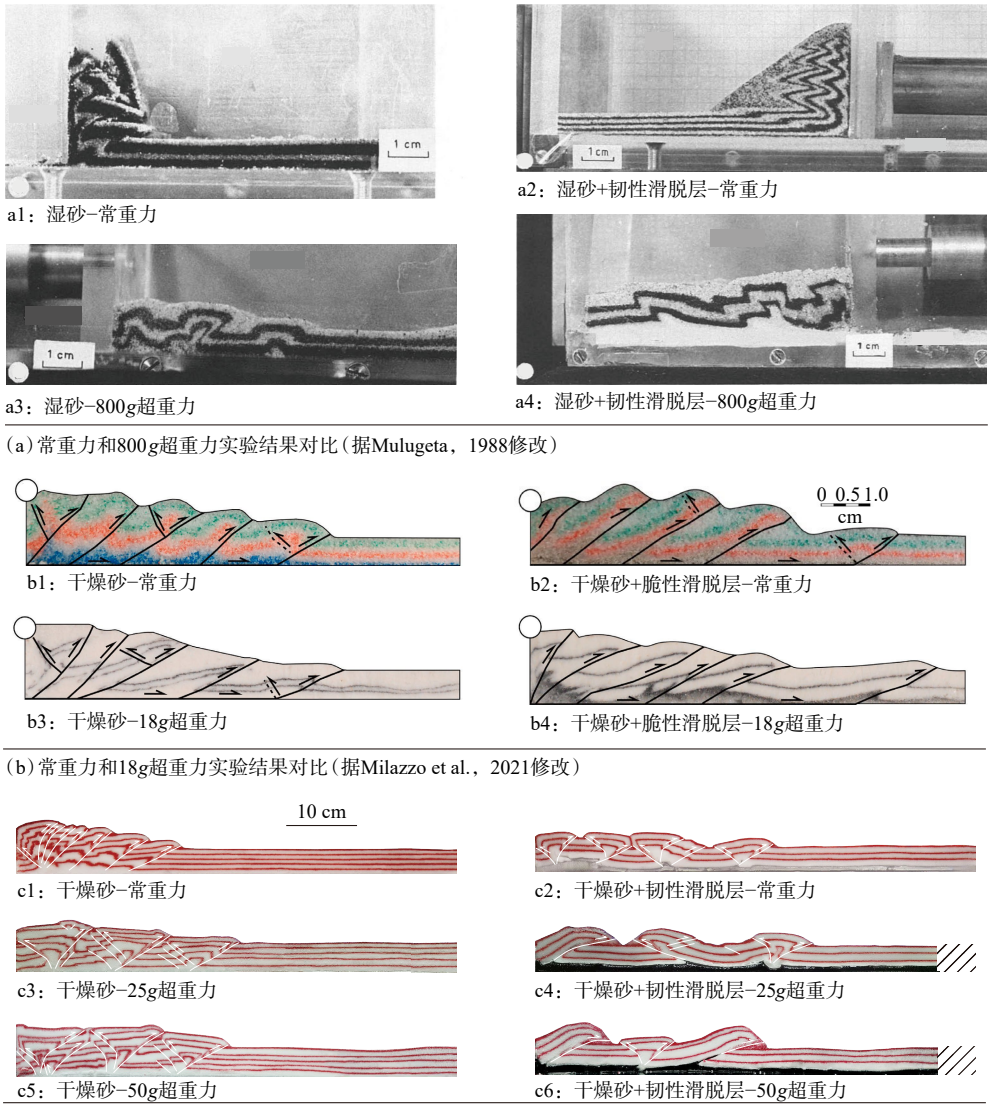


图 10 均匀脆性模型与含滑脱层模型的常重力−超重力实验结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental results under normal gravity and hypergravity conditions for homogeneous brittle models and models containing a detachment layer

(a) Comparison of results under normal gravity and 800-g hypergravity (modified from Mulugeta, 1988); (b) Comparison of results under normal gravity and 18-g hypergravity (modified from Milazzo et al., 2021); (c) Comparison of results under normal gravity and 25-g and 50-g hypergravity (modified from Guan, 2026)

型坡度可达 36°)，岩层厚度基本保持不变；而在超重力实验中，模型形成表面坡度较低的逆冲楔体，伴随背斜核部增厚与顶部减薄，韧性基底发生流动并侵入背斜核部，形成不对称的箱状褶皱。

近年来，Milazzo et al.(2021)完全使用干燥颗粒材料进行超重力实验。实验中，常重力模型与 18*g* 超重力模型尺寸相同，根据应力缩放关系所用的材料不同：常重力实验使用石英砂和低内聚力的玻璃珠，超重力实验使用钾长石细砂和零内聚力的微玻璃珠。研究结果表明，基底滑脱层的存在会降低楔体内部坡度与高度，促进逆冲体向前陆方向扩展，同时增大逆冲体波长，使变形更为分散(图 10b)。两类模型的楔体最终构造形态高度相似，证实了离心机超重力模型能够有效模拟脆性地壳的缩短过程，并显著缩短实验时间。

然而，上述研究与传统的常重力实验在材料或设置上存在一定区别，且模型长度均小于 20 cm，易受实验箱侧壁摩擦力的干扰。基于已有工作，管涛(2026)开展了尺寸为 80 cm×40 cm×3.5 cm 的大尺度定量对比实验，在超重力与常重力条件下采用完全一致的材料与实验设置(图 10c)。通过对运动学过程与构造变形样式的定量比较发现：在均匀脆性模型中，超重力环境使得变形传播更快、更远，且重力加速度越高，模型内部形成的冲起构造数量越多，地形也越平缓；而在含韧性滑脱层的模型中，不同重力条件下的运动学特征较为接近，重力加速度越大，构造单元之间的间隔波长也相应增大。

3.1.2　挤出−走滑

相关学者(Tapponnier et al., 1982, 1986; Peltzer and Tapponnier, 1988)通过整合青藏高原东南部的地质、地震及年代学数据，开展了一系列单向挤入平面应变的橡皮泥实验(图 11)，模拟了刚性块体(对应印度板块)挤入塑性体(对应亚洲板块)的构造变形过程，验证了印度与亚洲大陆碰撞引起侧向挤出的假说。初期实验在常重力条件下进行(图 11a)，实验结果有效再现了亚洲新生代形成的 2 条主要断层(红河断层和阿尔金断层)以及大陆块体沿这 2 条走滑断层的多期次向东侧向挤出的过程(图 11a3)。

然而，常重力实验存在以下局限：①模型上下表面均受透明玻璃板约束，阻碍了模型垂向增厚，与青藏高原显著隆升的地质事实不符；②模型重力场无法按实际相似比进行缩放。为解决这些问题，Peltzer (1988)在前期实验基础上开展了 80*g* 超重力实验(图 11b)。其实验结果显示出与常重力实验相似的大型走滑断层及块体侧向挤出过程(图 11b3)。实验第一阶段出现的对称共轭断层，源于超重力作用下模拟大陆岩石圈的材料整体向右偏移，使模型两侧在初始阶段都处于“自由边界”状态，从而形成较为对称的断层系统。随着刚性块体持续挤入，模型被向左推回，重新与实验箱侧壁接触，仅右侧保持自由边界。

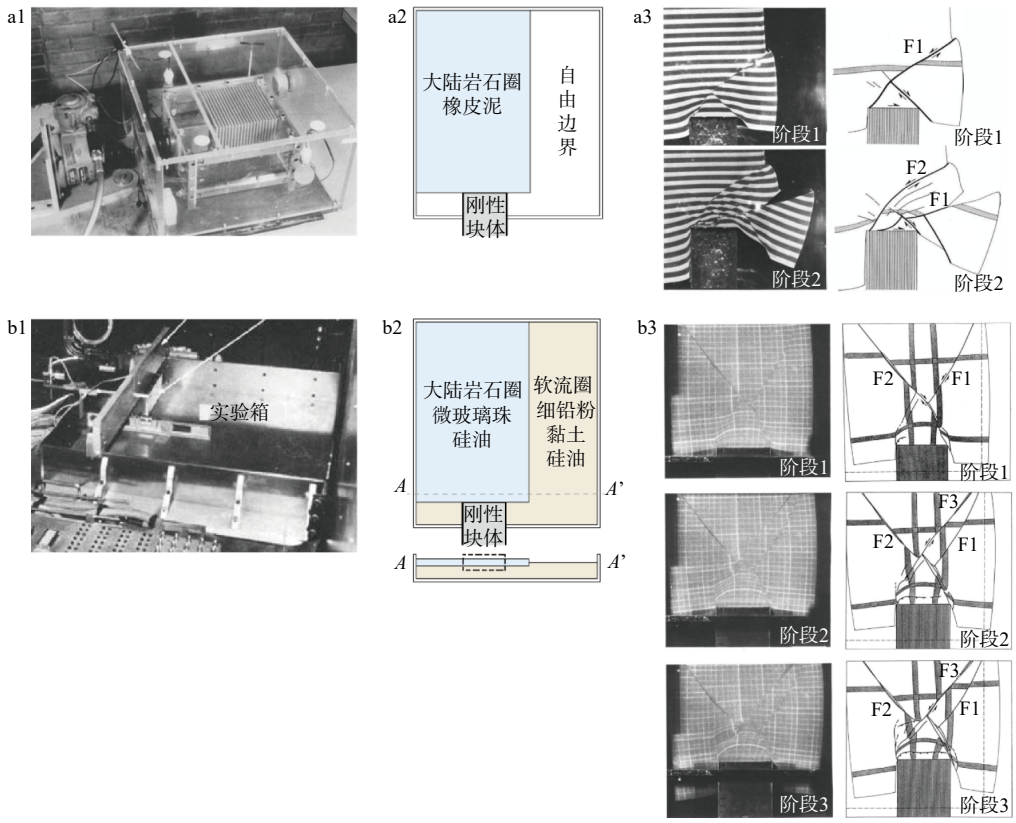
实验结束后，模型侧面观察显示，增厚区域主要集中在刚性块体前方由共轭走滑断层所围限的三角形范围内。该增厚区及其形成的陡峭地形边界与新生代亚洲地区实际地质特征具有一定相似性。通过表面网格及相关计算，对印度−亚洲板块碰撞所引起的缩短应变进行了量化分配：约 30% 的应变由地壳增厚吸收，其余 70% 通过走滑断层和侧向挤出调节(Peltzer, 1988)。该实验在重力约束下实现了“挤入—增厚—挤出—走滑”全过程的构造变形模拟，为解释印度−亚洲板块碰撞过程中 2000～3000 km 的地壳缩短提供了直接实验依据。

3.2　伸展构造

3.2.1　裂谷

物理模拟被广泛应用于研究裂谷活动及断层演化，涵盖大陆裂谷演化过程、形成机制和控制因素等(Corti et al., 2003; Agostini et al., 2011)。离心机超重力实验能够模拟涉及韧性流变的裂谷演化过程，如由深部黏性物质底辟上涌引发的裂谷作用中，中—下地壳的褶皱变形及岩石圈耦合关系(Ramberg, 1971; Mulugeta, 1985; Harris and Koyi, 2003)；以及基于自然流变学分层缩放的脆−韧模型实验，如被动大陆边缘裂谷系统中脆性层厚度、流变学差异及同沉积作用的影响(Zwaan et al., 2020a)、先存断层组的宽度及其与裂谷轴走向的夹角对大陆裂谷演化的控制等(Zou et al., 2024)。

Mulugeta and Ghebreab(2001)在离心机实验中系统研究了大陆裂谷活动的四维动力学过程，重点关注了大陆持续或间歇裂陷相关的大陆岩石圈脆−韧性伸展变形及正断层发育模式。实验以恒定侧向边界位移速率模拟持续伸展，以恒定位移与无位移交替模拟伸展间歇。结果表明，稳定伸展导致脆性地壳快速差异沉降或弯曲，形成中央裂谷带并伴随多米诺式断块组合，构造样式复杂且集中；间歇式伸展则形成间隔分布的地垒−地堑构造，断层呈共轭组合，构造分布更分散。



a—常重力实验设置及结果(a1—常重力实验箱; a2—常重力实验设置; a3—常重力实验结果, 最终形成 F1 和 F2 这 2 条主要的走滑断层); b—超重力实验设置及结果(b1—超重力实验箱; b2—超重力实验设置; b3—超重力实验结果, 最终形成 F1、F2 和 F3 这 3 条主要的走滑断层)

图 11 常重力与超重力条件下印度–亚洲板块碰撞引发青藏高原侧向挤出模型实验对比(据 Peltzer, 1988; Peltzer and Tapponnier, 1988 修改)

Fig. 11 Comparison of normal-gravity and hypergravity experiments modeling the lateral extrusion of the Tibetan Plateau induced by the Indo-Asia collision (modified from Peltzer, 1988; Peltzer and Tapponnier, 1988)

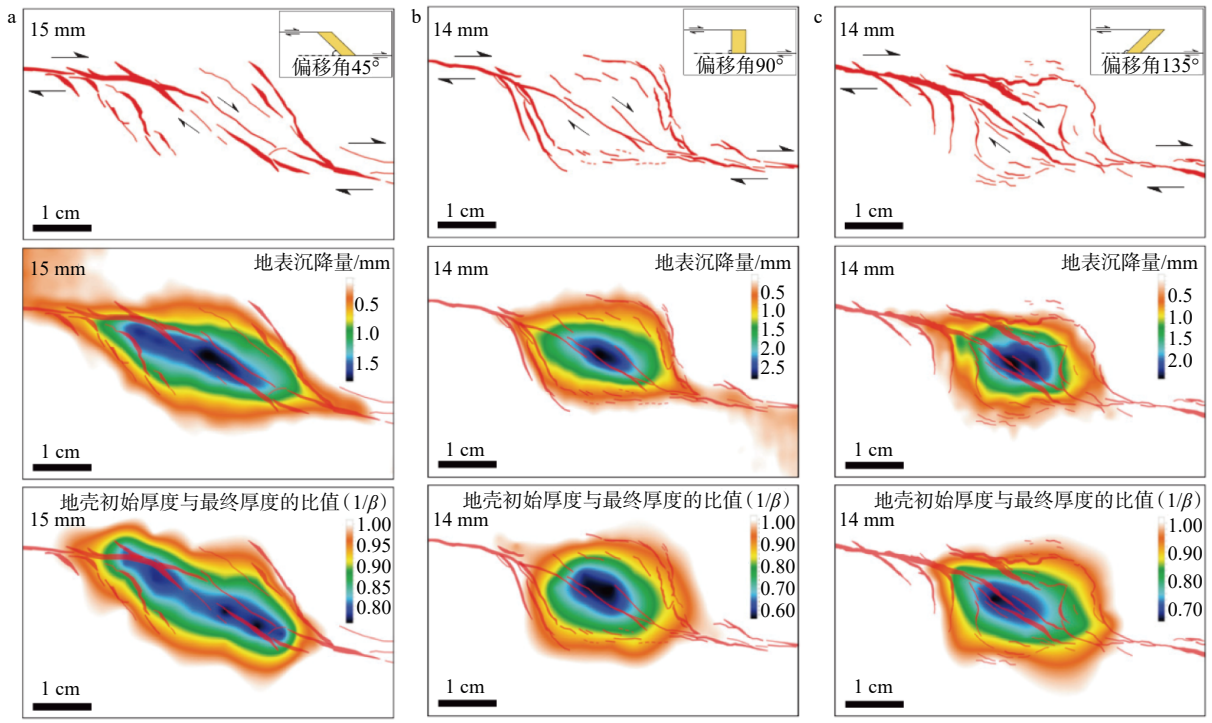
(a) Experimental settings and results under normal gravity: (a1) Normal-gravity experimental box; (a2) Normal-gravity experimental setup; (a3) Normal-gravity experimental results, with two major strike-slip faults formed; (b) Experimental settings and results under hypergravity: (b1) Hypergravity experimental box; (b2) Hypergravity experimental setup; (b3) Hypergravity experimental results, with three major strike-slip faults formed (F1, F2, and F3)

3.2.2 走滑断层与拉分盆地

Corti and Dooley(2015)进行了岩石圈尺度的拉分盆地超重力物理模拟研究。该实验在盆地边缘预设了具有不同偏移角度的先存断层, 通过分阶段采集实验照片与激光扫描数据, 系统记录了断层演化模式并构建了数字高程模型。结果表明, 偏移角为 45°时形成清晰的菱形盆地(图 12a); 偏移角为 90°时形成较为平缓的 Z 字形盆地(图 12b); 偏移角为 135°时断层样式较为复杂, 出现一组与走滑位移方向近垂直的断层, 盆地形态近似为方形(图 12c)。这说明拉分盆地的形态受盆地边缘斜滑断层及凹陷内部跨越盆地的先存断层共同影响。3 个模型的最大沉降量和岩石圈减薄都发生在盆地中心, 表明拉分盆地能有效促进地壳和岩石圈的局部减薄, 这一过程与减薄区下方软流圈物质流动及深部补偿作用相关。

3.3 底辟

Dietl and Koyi(2002)为研究同心扩展深成岩体的侵入机制, 开展了两阶段的底辟物理模拟实验(图 13a、13b)。第 1 阶段底辟完成后(紫色区域), 将模型切片、拍照, 并重新组装, 再于模型底部铺设新的上浮层(粉红色区域), 随后进行第 2 阶段离心操作。两阶段使用的上浮层(底辟体)材料相同, 仅以不同染色进行区分。实验结果显示, 第 1 阶段形成了蘑菇状底辟体, 并伴随上覆层拖拽和边缘向斜等典型底辟特征(图 13a); 第 2 阶段上浮层则沿前一阶段底辟体形成的薄弱通道上升, 呈脉状韧性侵入形态(图 13b)。该研究表明, 多期次侵入需



红色线条代表断层，黑色箭头指示主要断层活动方向

a—偏移角为 45°; b—偏移角为 90°; c—偏移角为 135°

图 12　不同偏移角度下拉分盆地的地表断层模式、地表沉降量以及岩石圈减薄模式（据 Corti and Dooley, 2015 修改）

Fig. 12　Surface fault patterns, amount of subsidence, and lithospheric thinning patterns in pull-apart basins at different offset angles (modified from Corti and Dooley, 2015)

(a) Offset angle = 45°; (b) Offset angle = 90°; (c) Offset angle = 135°

Red lines denote faults; black arrows indicate the main movement directions of the faults.

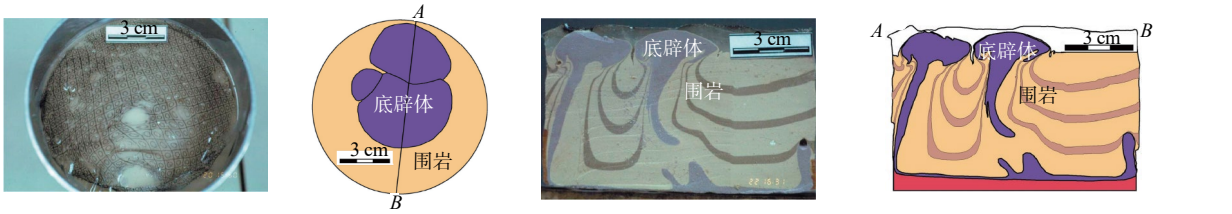
以岩层发生韧性变形为前提，同心扩展深成岩体是初始底辟作用与后续韧性岩脉侵入的共同作用结果。

在单一底辟构造研究基础上，Dietl and Koyi (2011)在同一实验中设置了 3 个不同黏度的底辟体进行对比(图 13c)。最终 3 个底辟体呈现了底辟演化的 2 个不同阶段：底辟体 1 抵达了模型表面并发生涌出，此时浮力与重力达到平衡，涌出物质在表面呈平面展布(图 13c1、13c2)，其剖面形态类似于前期研究中由多期次底辟侵入形成的同心扩张的深成岩体(图 13b; Dietl and Koyi, 2002)。底辟体 2 和 3 仍处于上升阶段，剖面呈悬浮的气球状，内部包裹物质呈指状结构，类似于含侵入体岩脉的复合深成岩体(图 13c3、13c4)。该研究进一步揭示，底辟体形态受浮力面位置和自身与围岩黏度比控制，抵达地表后的形态受扩散作用主导。

除单一底辟作用外，Dietl et al.(2006)还将底辟与剪切变形相结合进行研究(图 7)。通过系列实验并结合地质观测提出：走滑剪切带中，岩浆受到围岩压力难以通过自发底辟上升侵入，需借助先存力学薄弱带(如张裂隙)以岩脉形式侵入(图 13d1、13d2)。此外，若先存破裂走向垂直于 σ_1(最大主应力)，右旋简单剪切会使该破裂闭合，阻碍岩浆上升，在走滑伸展与重力坍塌共同作用下形成拉分盆地(图 13d3、13d4)。

3.4　俯冲

在常重力构造物理模拟中，俯冲变形通常通过上层的高密度材料在重力作用下沉入下层低密度黏性材料来实现(Bellahsen et al., 2005; Willingshofer et al., 2013; Strak and Schellart, 2014; Chen et al., 2016)。Mart et al.(2005)在超重力条件下开展的俯冲初始阶段变形演化实验，在模型设置上与传统的常重力实验有明显区别。该研究设计了 2 种模型：①双层模型，上层由 3 块黏性板组成，下层为低黏度的软流圈(图 14a1)；②三层模型，用于模拟具有脆性−韧性差异的大洋和大陆岩石圈以及下伏软流圈(图 14b1)。实验借助离心机放大材料横向密度差异产生的驱



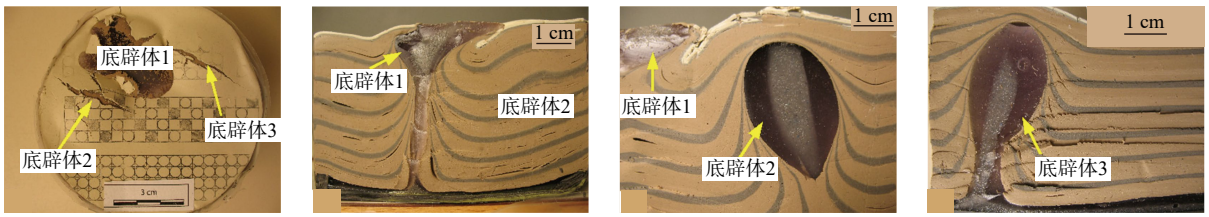
a1：第一阶段实验结果俯视图　a2：底辟及切面位置示意　a3：第一阶段实验结果*AB*切面　a4：底辟结果示意及第二阶段初始设置

（a）多期次底辟模型第一阶段实验结果（据Dietl and Koyi，2002修改）



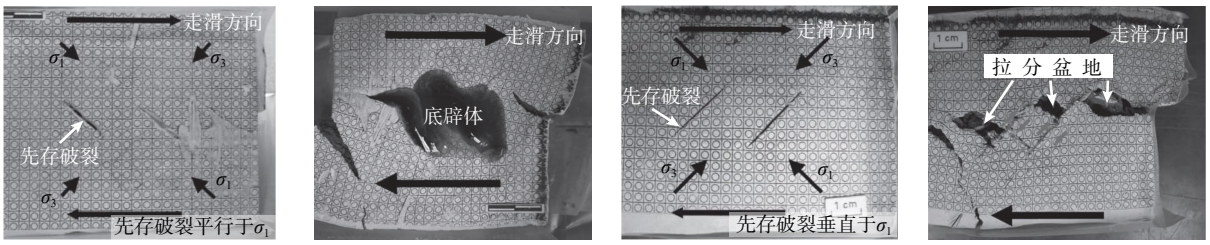
b1：第二阶段实验结果俯视图　b2：底辟及切面位置示意　b3：第二阶段实验结果*AB*切面　b4：底辟结果示意

（b）多期次底辟模型第二阶段实验结果（据Dietl and Koyi，2002修改）



c1：实验结果俯视图　c2：底辟体1切面　c3：底辟体2切面　c4：底辟体3切面

（c）不同黏度的底辟体实验结果（据Dietl and Koyi，2011修改）



d1：模型1设置　d2：模型1结果　d3：模型2设置　d4：模型2结果

（d）先存破裂条件下，剪切与底辟协同作用实验设置及结果（据Dietl et al.，2006修改）

σ_1—最大主应力；σ_3—最小主应力

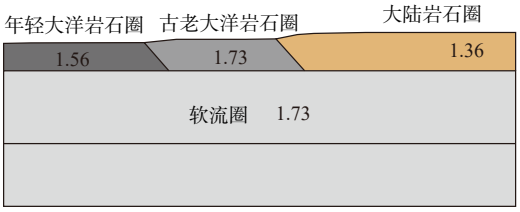
图 13　离心机超重力底辟实验

Fig. 13　Centrifuge hypergravity diapir experiments

(a) Experimental results of the first stage of a multi-stage diapir model (modified from Dietl and Koyi, 2002); (b) Experimental results of the second stage of a multi-stage diapir model (modified from Dietl and Koyi, 2002); (c) Experimental results of diapirs with different viscosities (modified from Dietl and Koyi, 2011); (d) Setups and results of experiments on the synergistic effects of shearing and diapirism with pre-existing fractures (modified from Dietl et al., 2006)

σ_1 and σ_3 denote the maximum and minimum principal stresses, respectively.

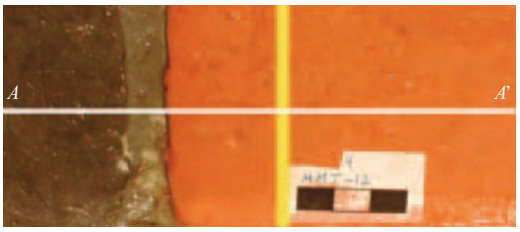
动力，系统研究了岩石圈密度与性质差异、以及俯冲带摩擦性质对俯冲初始阶段的影响。研究发现，即使古老大洋岩石圈与软流圈密度一致、年轻大洋岩石圈密度低于软流圈，俯冲仍能发生（图 14a）。这说明大陆与大洋岩石圈的侧向密度差异是俯冲起始的关键驱动力，无需依赖外部侧向推力（如洋脊推力）或大洋岩石圈的负浮力。此外，实验揭示出 Argand 数对岩石圈变形有控制作用，而摩擦性质影响俯冲带的形态与演化，低摩擦条件更容易形成弧形俯冲带和弧后盆地（图 14b）。该实验结果与西



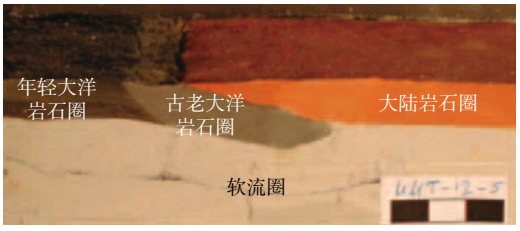
a1：双层俯冲模型初始设置



a2：模型初始状态平面图

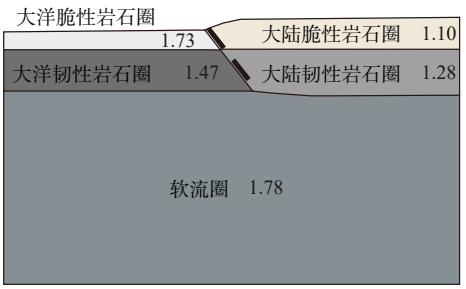


a3：模型最终状态平面图

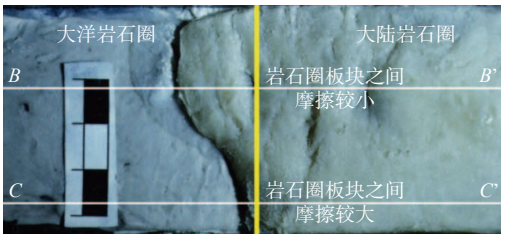


a4：模型最终状态*AA'*剖面

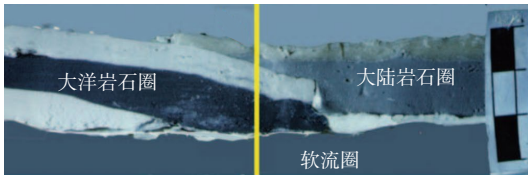
(a) 双层俯冲模型



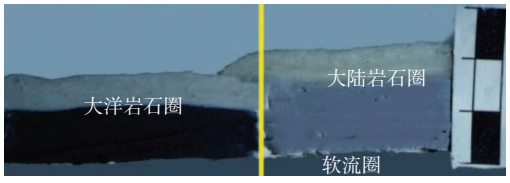
b1：三层俯冲模型初始设置



b2：模型最终状态平面图



b3：模型最终状态*BB'*剖面（板块间摩擦较小）



b4：模型最终状态*CC'*剖面（板块间摩擦较大）

(b) 三层俯冲模型

图 a1、图 b1 中的数字为材料的密度，单位为 10^3 kg m^{-3}

图 14　离心力驱动的岩石圈俯冲实验（据 Mart et al.，2005 修改）

Fig. 14　Centrifuge-driven lithospheric subduction experiments (modified from Mart et al., 2005)

(a) Subduction experiments with a two-layer model; (b) Subduction experiments with a three-layer model

The numbers in panels a1 and b1 represent the densities of the layers, in units of 10^3 kg m^{-3}.

地中海、阿留申弧等自然俯冲系统的构造形态高度吻合，为理解俯冲起始过程及相关地质构造的形成提供了重要依据。

4　结束语

超重力构造物理模拟作为传统常重力实验的重要补充与拓展，在揭示重力主导的地质过程、再现深部流变行为及刻画多尺度构造耦合机制等方面展现出显著优势。文章系统梳理了当前主流的实验装置、驱动技术、材料体系及观测方法，结合典型构造类型的实验案例，分析了超重力环境对构造变形样式、应变分配与演化进程的影响，阐明了超重力技术在揭示构造变形机制中的独特优势。

然而，当下超重力构造物理模拟研究也面临诸多亟待解决的挑战：①科学意义方面，超重力效应与离心加速度增幅之间的定量关联尚不明确，超重力效应的随机性问题难以解决，模型设计的合理性及实验的深层科学价值仍需进一步探究。②实验技术方面，离心重力场存在分布不均匀的问题，小型离心机可通过弧形的实验箱底面加以改善，但土工离心机因大尺寸实验箱与驱动装置一体化，难以采用弧形设计优化，且地球引力引起的垂向重力加速度和摩擦效应的干扰无法完全消除。③实验材

料方面，材料相似性难以精准量化，超重力环境下材料物化性质是否发生变化仍不明确，同时缺乏有效的定量检测手段。④实验观测方面，小型实验室离心机难以实时监测记录高应力状态下的实验图像，而土工离心机虽可搭载相机，但其在较高的应力工况下无法稳定工作。⑤实验成本方面，土工离心机实验成本高昂，人力消耗大，实验周期长。上述挑战增加了超重力物理模拟在实验设计、模型制备、实验实施及结果分析等环节的难度。

尽管面临上述诸多挑战，超重力构造物理模拟在“深时、深地、深海”等地球科学前沿热点问题研究中，为创新相关研究方法提供了重要突破，同时在能源勘探、油气开发等国家重大战略需求中具有广阔的应用前景。近年来，国内超重力构造物理模拟实验平台的建设持续推进，由浙江大学牵头建设的CHIEF超重力综合实验平台地质实验舱，以及南京大学建设的构造物理模拟专用离心机，将为构造物理模拟的技术升级与方法创新提供重要支撑。依托上述先进研究平台，未来研究可重点开展多梯度、多类型的超重力对比实验，明确适合超重力环境下开展的地质过程类型，建立标准化、可参照的超重力构造物理模拟实验范式，为揭示大尺度、深部岩石圈变形和动力学机制提供实验参考。

作者贡献声明： 管涛负责论文构思、数据分析、论文写作和绘图；吴磊参与论文构思和修改；杨波参与数据分析和绘图；贾东、吴晓俊、杨树锋、陈汉林参与学术指导。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: GUAN Tao conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; WU Lei participated in study conception and manuscript revision; YANG Bo participated in data analysis and figure preparation. JIA Dong, WU Xiaojun, YANG Shufeng and CHEN Hanlin provided academic supervision. All authors have read and approved the submission and publication of this manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

ADAM J, GE Z Y, SANCHEZ M, 2012. Post-rift salt tectonic evolution and key control factors of the Jequitinhonha deepwater fold belt, central Brazil passive margin: insights from scaled physical experiments[J]. Marine and Petroleum Geology, 37(1): 70-100.

ADAM J, KLINKMÜLLER M, SCHREURS G, et al., 2013. Quantitative 3D strain analysis in analogue experiments simulating tectonic deformation: integration of X-ray computed tomography and digital volume correlation techniques[J]. Journal of Structural Geology, 55: 127-149.

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[J]. Earth and Planetary Science Letters, 301(3-4): 479-492.

BAJOLET F, CHARDON D, MARTINOD J, et al., 2015. Synconvergence flow inside and at the margin of orogenic plateaus: lithospheric-scale experimental approach[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(9): 6634-6657.

BELLAHSEN N, FACCENNA C, FUNICIELLO F, 2005. Dynamics of subduction and plate motion in laboratory experiments: insights into the "plate tectonics" behavior of the Earth[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110(B1): B01401.

BONINI M, SOKOUTIS D, MULUGETA G, et al., 2001. Dynamics of magma emplacement in centrifuge models of continental extension with implications for flank volcanism[J]. Tectonics, 20(6): 1053-1065.

BROWN E T, HOEK E, 1978. Trends in relationships between measured *in-situ* stresses and depth[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(4): 211-215.

BYERLEE J, 1978. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 116(4-5): 615-626.

CADELL H M, 1889. VII. —Experimental researches in mountain building[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 35(1): 337-357.

CHEN Y M, TANG Y, LING D S, et al., 2022. Hypergravity experiments on multiphase media evolution[J]. Science China Technological Sciences, 65(12): 2791-2808.

CHEN, Y M, 2020. Constitutive models and hypergravity physical simulation of soils[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 54(04): 631-632. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z H, SCHELLART W P, STRAK V, et al., 2016. Does subduction-induced mantle flow drive backarc extension?[J]. Earth and Planetary Science Letters, 441: 200-210.

CORTI G, BONINI M, MAZZARINI F, et al., 2002. Magma-induced strain localization in centrifuge models of transfer zones[J]. Tectonophysics, 348(4): 205-218.

CORTI G, BONINI M, CONTICELLI S, et al., 2003. Analogue modelling of continental extension: a review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma[J]. Earth-Science Reviews, 63(3-4): 169-247.

CORTI G, BONINI M, SOKOUTIS D, et al., 2004. Continental rift architecture and patterns of magma migration: a dynamic analysis based on centrifuge models[J]. Tectonics, 23(2): TC2012.

CORTI G, DOOLEY T P, 2015. Lithospheric-scale centrifuge models of pull-apart basins[J]. Tectonophysics, 664: 154-163.

DAVIS D, SUPPE J, DAHLEN F A, 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 88(B2): 1153-1172.

DAVY P, COBBOLD P R, 1991. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere[J]. Tectonophysics, 188(1-2): 1-25.

DIETL C, KOYI H A, 2002. Emplacement of nested diapirs: results of centrifuge modelling[J]. Journal of the Virtual Explorer, 7: 81-88.

DIETL C, KOYI H A, De WALL H, et al., 2006. Centrifuge modelling of plutons intruding shear zones: application to the Furstenstein Intrusive Complex (Bavarian Forest, Germany)[J]. Geodinamica Acta, 19(3-4): 165-184.

DIETL C, KOYI H, 2011. Sheets within diapirs – Results of a centrifuge experiment[J]. Journal of Structural Geology, 33(1): 32-37.

DIXON J M, 1975. Finite strain and progressive deformation in models of diapiric structures[J]. Tectonophysics, 28(1-2): 89-124.

DIXON J M, SUMMERS J M, 1985. Recent developments in centrifuge modelling of tectonic processes: equipment, model construction techniques and rheology of model materials[J]. Journal of Structural Geology, 7(1): 83-102.

ENGLAND P, MCKENZIE D, 1982. A thin viscous sheet model for continental deformation[J]. Geophysical Journal International, 70(2): 295-321.

FAISAL S, DIXON J M, 2015. Physical analog (centrifuge) model investigation of contrasting structural styles in the Salt Range and Potwar Plateau, northern Pakistan[J]. Journal of Structural Geology, 77: 277-292.

GE Z Y, ROSENAU M, WARSITZKA M, et al., 2019a. Overprinting translational domains in passive margin salt basins: insights from analogue modelling[J]. Solid Earth, 10(4): 1283-1300.

GE Z Y, WARSITZKA M, ROSENAU M, et al., 2019b. Progressive tilting of salt-bearing continental margins controls thin-skinned deformation[J]. Geology, 47(12): 1122-1126.

GHOSH S K, RAMBERG H, 1968. Buckling experiments on intersecting fold patterns[J]. Tectonophysics, 5(2): 89-105.

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[J]. Journal of Structural Geology, 33(3): 329-342.

GRAVELEAU F, MALAVIEILLE J, DOMINGUEZ S, 2012. Experimental modelling of orogenic wedges: a review[J]. Tectonophysics, 538-540: 1-66.

GRAVELEAU F, STRAK V, DOMINGUEZ S, et al., 2015. Experimental modelling of tectonics-erosion-sedimentation interactions in compressional, extensional, and strike–slip settings[J]. Geomorphology, 244: 146-168.

GUAN T, WU L, YANG B, et al., 2025. Influence of pre-existing strength discontinuities on Cenozoic evolution of the Altyn Tagh fault system, Northern Tibetan Plateau: insights from physical analog modeling[J]. Tectonics, 44(8): e2024TC008715.

GUAN T, 2026. The influence of inherited lithospheric weaknesses on the tectonic evolution of the Tibetan Plateau: Insights from physical analog modeling[D]. Zhejiang University. (in Chinese with English abstract)

HALL J, 1815. II. On the vertical position and convolutions of certain strata, and their relation with granite[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 7(1): 79-108.

HARRIS L B, KOYI H A, 2003. Centrifuge modelling of folding in high-grade rocks during rifting[J]. Journal of Structural Geology, 25(2): 291-305.

HARRIS L B, YAKYMCHUK C, GODIN L, 2012. Implications of centrifuge simulations of channel flow for opening out or destruction of folds[J]. Tectonophysics, 526-529: 67-87.

HE, W. G., SHEN, C. B., WU, L., LI, S. H., ZHAO, Y. W., 2023. Diapiric Initiation and Formation Mechanism-Insights from Analogue Modelling[J]. 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[J]. GSA Bulletin, 48(10): 1459-1519.

HUBBERT M K, 1951. Mechanical basis for certain familiar geologic structures[J]. GSA Bulletin, 62(4): 355-372.

KOYI H, 1997. Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique—A historical outline[J]. Journal of Petroleum Geology, 20(2): 223-238.

KRANTZ R W, 1991. Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures[J]. Tectonophysics, 188(1-2): 203-207.

LONG Y, CHEN H L, CHENG X G, et al., 2021. Influence of paleo-uplift on structural deformation of salt-bearing fold-and-thrust belt: insights from physical modeling[J]. Journal of Structural Geology, 153: 104445.

MART Y, AHARONOV E, MULUGETA G, et al., 2005. Analogue modelling of the initiation of subduction[J]. Geophysical Journal International, 160(3): 1081-1091.

MILAZZO F, CAVOZZI C, CORTI G, et al., 2021. Centrifuge modelling of thrust systems in the brittle crust: role of frictional décollement geometry[J]. Journal of Structural Geology, 153: 104450.

MOLNAR N, CRUDEN A, BETTS P, 2020. The role of inherited crustal and lithospheric architecture during the evolution of the Red Sea: insights from three dimensional analogue experiments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 544: 116377.

MOLNAR N E, CRUDEN A R, BETTS P G, 2017. Interactions between propagating rotational rifts and linear rheological heterogeneities: insights from three-dimensional laboratory experiments[J]. Tectonics, 36(3): 420-443.

MULUGETA G, 1985. Dynamic models of continental rift valley systems[J]. Tectonophysics, 113(1-2): 49-73.

MULUGETA G, 1988. Squeeze box in a centrifuge[J]. Tectonophysics, 148(1-4): 323-335.

MULUGETA G, GHEBREAB W, 2001. Modeling heterogeneous stretching during episodic or steady rifting of the continental lithosphere[J]. Geology, 29(10): 895-898.

NABAVI S T, FOSSEN H, 2025. Thrust and nappe tectonics in orogenic settings – A historical review[J]. Earth-Science Reviews, 266: 105139.

NOBLE T E, DIXON J M, 2011. Structural evolution of fold-thrust structures in analog models deformed in a large geotechnical centrifuge[J]. Journal of Structural Geology, 33(2): 62-77.

PELTZER G, 1988. Centrifuged expermiments of continental scale tectonics in Asia[J]. Bulletin of the Geological Institution of the University of Uppsala, 14: 115-128.

PELTZER G, TAPPONNIER P, 1988. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia Collision: an experimental approach[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 93(B12): 15085-15117.

PERSSON K S, SOKOUTIS D, 2002. Analogue models of orogenic wedges controlled by erosion[J]. Tectonophysics, 356(4): 323-336.

RAMBERG H, 1967. Model experimentation of the effect of gravity on tectonic processes[J]. Geophysical Journal International, 14(1-4): 307-329.

RAMBERG H, 1971. Dynamic models simulating rift valleys and continental drift[J]. Lithos, 4(3): 259-276.

RAMBERG H, 1981. Gravity deformation and the Earth's crust[M]. 2nd ed. London: Academic Press.

REBER J E, COOKE M L, DOOLEY T P, 2020. What model material to use? A review on rock analogs for structural geology and tectonics[J]. Earth-Science Reviews, 202: 103107.

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[J]. Journal of Structural Geology, 163: 104704.

SCHELLART W P, 2002. Analogue modelling of large-scale tectonic processes: an introduction[J]. Journal of the Virtual Explorer, 7: 1-6.

SCHELLART W P, STRAK V, 2016. A review of analogue modelling of geodynamic processes: approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments[J]. Journal of Geodynamics, 100: 7-32.

SCHMID T C, SCHREURS G, ADAM J, 2022. Rotational extension promotes coeval upper crustal brittle faulting and deep-seated rift-axis parallel flow: dynamic coupling processes inferred from analog model experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(8): e2022JB024434.

SCHREURS G, HÄNNI R, PANIEN M, et al., 2003. Analysis of analogue models by helical X-ray computed tomography[J]. Geological Society, London, Special Publications, 215(1): 213-223.

STRAK V, SCHELLART W P, 2014. Evolution of 3-D subduction-induced mantle flow around lateral slab edges in analogue models of free subduction analysed by stereoscopic particle image velocimetry technique[J]. Earth and Planetary Science Letters, 403: 368-379.

TAPPONNIER R, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 10(12): 611-616.

TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIJO R, 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 19(1): 113-157.

THIELICKE W, STAMHUIS E J, 2014. PIVlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. Journal of Open Research Software, 2(1): e30.

THIELICKE W, SONNTAG R, 2021. Particle image velocimetry for MATLAB: accuracy and enhanced algorithms in PIVlab[J]. Journal of Open Research Software, 9(1): 12.

WAFFLE L, GODIN L, HARRIS L B, et al., 2016. Rheological and physical characteristics of crustal-scaled materials for centrifuge analogue modelling[J]. Journal of Structural Geology, 86: 181-199.

WEIJERMARS R, SCHMELING H, 1986. Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 43(4): 316-330.

WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D, 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Geotechnique, 53(7): 619-631.

WILLINGSHOFER E, SOKOUTIS D, LUTH S W, et al., 2013. Subduction and deformation of the continental lithosphere in response to plate and crust-mantle coupling[J]. Geology, 41(12): 1239-1242.

WU J E, MCCLAY K, WHITEHOUSE P, et al., 2009. 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 26(8): 1608-1623.

YAN B, CHEN P, GAO Y, 2024. Stepwise decrease in strike-slip rate along the eastern Altyn Tagh Fault and its relation to the Qilian Shan thrust system, northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Structural Geology, 179: 105037. (in Chinese with English abstract)

YANG, B., WU, L., GUAN, T., et al., 2025. Advances in experimental methods for physical simulation of tectonic—geomorphic processes[J]. Geological Review, 71(4). (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[J]. Tectonics, 43(1): e2023TC007947.

ZWAAN F, CORTI G, KEIR D, et al., 2020a. Analogue modelling of marginal flexure in Afar, East Africa: implications for passive margin formation[J]. Tectonophysics, 796: 228595.

ZWAAN F, SCHREURS G, ROSENAU M, 2020b. Rift propagation in rotational versus orthogonal extension: insights from 4D analogue models[J]. Journal of Structural Geology, 135: 103946.

附中文参考文献

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[J]. 浙江大学学报（工学版），54(4)：631-632.

管涛，2026. 先存强度不连续带对青藏高原构造演化影响的物理模拟研究[D]. 浙江大学.

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[J]. 大地构造与成矿学，47(5)：1069-1084.

杨波，吴磊，管涛，等，2025. 构造地貌物理模拟实验方法研究进展[J]. 地质论评，71(2)：614-632.