

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.04.001

先存构造对大陆裂谷演化的构造继承性作用

邹耀遥^{1,2,3}, 李 堃^{1,2}, 沈传波³, 刘 飞^{1,2}, 王 亮⁴

ZOU Yao-Yao^{1,2,3}, LI Kun^{1,2}, SHEN Chuan-Bo³, LIU Fei^{1,2}, WANG Liang⁴

1. 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; 2. 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; 3. 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;

4. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002

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

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

3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China

摘要: 大陆岩石圈在多次构造活动中形成了不同尺度、不同类型的先存构造, 这些先存构造对晚期大陆裂谷的构造继承性作用深刻地影响了裂谷盆地的演化过程, 塑造了裂谷的结构及相关断层的几何特征。如何准确地揭示先存构造对大陆裂谷的构造继承性影响, 是裂谷盆地构造研究中的热点和难点。针对这一科学问题, 本文基于前人研究成果, 简要介绍了大陆裂谷盆地中岩石圈尺度和上地壳尺度的先存构造类型, 以及野外地质调查、卫星遥感图像识别、地球物理资料解译等识别先存构造的主要技术方法, 重点介绍了先存构造的“再活化”和“应变/应力重定向”这两类主要的构造继承性作用机制, 以及其诱发的断层平面、剖面模式, 阐释了先存构造的空间展布、深度和规模是决定其影响强弱的重要因素。重点展现了构造物理/数值模拟实验在先存构造-裂谷演化研究中的近期成果, 讨论了模拟实验在先存构造活化机制研究和对裂谷演化影响研究中的应用前景。最后探讨了当前研究中存在的局限性, 认为构建不同类型先存构造的地表-地下识别标准, 开展先存构造与晚期裂谷结构的三维精细刻画和空间叠置特征研究, 以及加强构造物理模拟和数值模拟的相互印证将是未来的重点研究方向。

关键词: 先存构造; 裂谷盆地; 构造继承性; 构造物理/数值模拟实验

中图分类号: P541

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-04-0601-18

Zou Y Y, Li K, Shen C B, Liu F and Wang L. 2024. The Structural Inheritance of Pre-existing Structure on the Evolution of Continental Rifts. *South China Geology*, 40(4): 601–618.

Abstract: Pre-existing structures of different scales and types have formed in continental lithosphere during multiple-stages tectonic activity, the structural inheritance of which profoundly influenced the evolution of the continental rift basins, and shaped the architecture of rifts and the geometry of rift-related faults. How to accurately reveal the influence of pre-existing structures on the continental rift has always been a challenge in the tectonics and structural study of rift basins. Focusing on this problem, this paper briefly introduces the types of pre-existing structures at the lithospheric scale and the upper crustal scale in the continental rift basin based on previous study, as well as the main identification techniques including field geological survey,

收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2024-10-08

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20240062)、国家留学基金委资助项目(202106410031)、十三五国家科技重大专项子课题(2017ZX05032-002-004)

第一作者: 邹耀遥(1995—), 男, 博士, 工程师, 从事盆地构造和矿田构造研究, E-mail: zouyaoyaogeo@163.com

satellite remote sensing image recognition, geophysical data interpretation etc. The two main structural inheritance mechanisms, “reactivation” and “strain/stress re-orientation” of pre-existing structures are introduced, as well as the atypical fault pattern in both plane and cross-section view caused by them, and the spatial distribution, depth and scale of pre-existing structures are important factors that determine the strength of their influence. Specially, recent results of structural analogue/numerical modeling experiments of pre-existing structures versus rift evolution are presented and reviewed. The application prospect of modeling experiments in the study of the activation mechanism of pre-existing structures and the influence on rift evolution is discussed. Finally, the limitations of the current research is discussed, as well as some key research direction in the future, including the construction of surface-subsurface identification standards for different types of pre-existing structures, the 3D fine characterization and spatial superposition characteristics of pre-existing structures and rift structures, and the mutual corroboration of analogue and numerical modeling.

Key words: pre-existing structures; rift basins; structural inheritance; structural analogue/numerical modeling experiments

大陆岩石圈在漫长的地质历史和多期次构造活动的作用中形成了大量多尺度、多类型的先存构造(pre-existing structure), 它们强烈地影响了晚期大陆裂谷的构造样式和构造演化过程。在岩石圈尺度上, 这些先存构造主要包括岩石圈深部的薄弱带、深大剪切带、板块缝合带、地幔柱(plumes)或者热点构造(hot spot)等(Corti et al., 2022; Brune et al., 2023)。在上地壳尺度上, 这些先存构造主要为地质体接触面、剪切带及内部变质组构、先存断层/断裂带、基底面理/线理等(Kolawole et al., 2021a; Brune et al., 2023; Samsu et al., 2023)。

这些不同类型、不同尺度的先存构造在适当的应力和流体作用下会发生活化, 并显著影响晚期大陆裂谷的构造特征及演化过程(Dunbar and Sawyer, 1988; Morley, 1995; Krabbendam and Barr, 2000; Schumacher, 2002; 童亨茂等, 2009, 2011, 2014; 詹润和朱光, 2012; Chenin and Beaumont, 2013; Bladon et al., 2015; Fossen, 2016; Schiffer et al., 2020; Corti et al., 2022; Brune et al., 2023; Samsu et al., 2023)。这种影响也被称为构造继承性(structural inheritance), 该作用广泛存在于地壳与岩石圈地幔当中, 是一个跨越了多个时间和空间尺度的普遍现象, 且在大陆裂谷的研究中被诸多观测和研究工作所证实(Schiffer et al., 2020; Samsu et al., 2023)。因此, 先存构造导致的构造继承性影响是大陆裂谷盆地构造演化研究中

的一个重要研究课题。揭示先存构造对裂谷构造的继承性影响, 首先需要厘清先存构造的主要类型及空间展布特征。不同类型的先存构造对晚期裂谷的影响是具有差异性的, 即便是同种类型的先存构造, 由于其空间展布规模的大小与岩石力学强度上的不同, 也会导致其对晚期的裂谷发育产生不同的影响。此外, 对地质体中先存构造的识别仍具有一定的难度, 野外地质调查只能够识别地表露头的先存构造, 无法揭示深埋在巨厚沉积物之下的先存构造; 地球物理资料尽管能够在一定程度上对地质体内部的先存构造进行刻画, 但受限于资料的品质和分辨率精度, 依然具有一定的局限性。

此外, 关于先存构造的构造继承性对大陆裂谷盆地构造演化的作用机制依然存在争议。关于构造继承性影响的机制, Samsu et al.(2023)综合前人的研究成果提出了两种机制, 分别为先存构造的“再活化”和“应变重定向”, 但关于这两种机制的认识仍然存在较大的争议, 需要更多的野外构造分析、盆地构造解析以及构造物理模拟/数值模拟实验对这两种机制进行验证。

先存构造的继承性作用对大陆裂谷盆地的结构构造特征、局部构造样式以及构造演化过程具有显著的控制作用, 因此阐明裂谷盆地内先存构造的继承性作用, 有助于揭示地震地球物理资料难以识别的基底先存构造特征, 厘清盆地演化的

动力学主控因素,并更好地重建裂谷盆地的构造演化过程(Peace et al., 2018; Wu L L et al., 2020; Ye Q et al., 2020; Zou Y Y et al., 2024),进而指导裂谷盆地内部的油气资源与地热勘探(Schumacher, 2002; Lyon et al., 2007; 童亨茂等, 2009; 束宁凯等, 2017; Bertrand et al., 2018; 任健等, 2019; 刘恒麟等, 2022; 刘露等, 2022; Dávalos-Elizondo and Laó-Dávila, 2023)、金属矿产勘探(Sibson et al., 1998; Goldfarb et al., 2001; 杨林等, 2023)等。本文系统回顾了大陆裂谷盆地中的先存构造类型、识别方式、影响机制、构造物理/数值模拟的前人研究工作,以期为后续裂谷盆地中先存构造的构造继承影响研究提供思路,并为裂谷盆地中的构造-成藏-成矿作用研究提供参考。

1 裂谷盆地中的先存构造类型及识别

1.1 主要的先存构造类型

岩石圈尺度上的先存构造主要包括薄弱带、深大剪切带、板块缝合带、地幔柱或热点构造等(表 1),这些先存构造跨越了地壳的脆-韧性过渡带,甚至能够贯穿整个岩石圈(图 1)。这些先存

构造可以定位裂谷系统的发育位置,或者分割整个裂谷系统。岩石圈中薄弱带的位置和规模控制了裂谷发育的位置(Dunbar and Sawyer, 1988),其与伸展方向之间的角度则能够控制裂谷的属性(如正交裂谷/斜裂谷, Corti, 2008; Agostini et al., 2011; 王真真等, 2021; Yang G X et al., 2022)。板块缝合带的作用与先存薄弱带的作用类似,能够控制裂谷位置和整体结构(Corti et al., 2011)。深大的韧性剪切带则能够中止或者分割裂谷,例如东非裂谷西支的北部就中止于 Aswa 剪切带(Morley, 1999a)。地幔柱对大陆裂谷的影响主要包括两个方面:(1)大规模地幔柱的上涌能够触发主动裂谷作用,例如大量研究表明东非超级地幔柱可能是触发东非裂谷东支主动裂谷演化的重要因素(Ritsema et al., 1999; Celli et al., 2020);(2)小规模地幔柱及其分支的活动则可以加速软流圈的流动,进而促进裂谷的演化(Rajaonarison et al., 2023)。火山热点则可以在局部影响裂谷的结构及相关边界断层的形态,例如东非裂谷西支 Rukwa 裂谷南部的深部火山-岩浆活动,是导致裂谷南段 Lupa 边界断层由平直断层转变为铲式断层的潜在原因(Morley, 1999a; Hodgson et al.,

表 1 全球大陆裂谷中主要的先存构造类型
Table 1 The main types of pre-existing structures in global continental rifts

类型	尺度	主要影响	自然实例	
薄弱带	岩石圈	控制裂谷位置和整体结构	加利福尼亚大盆地(Dunbar and Sawyer, 1988), 埃塞俄比亚主裂谷(Corti, 2008; Agostini et al., 2011), 琼东南盆地(王真真等, 2021; Yang G X et al., 2022)	
板块缝合带		控制裂谷位置和整体结构	贝加尔湖裂谷(Corti et al., 2011)	
深大剪切带		中止或者分割裂谷	东非Aswa剪切带(Morley, 1999a)	
地幔柱		控制裂谷的主动演化	东非超级地幔柱(Celli et al., 2020)	
热点构造		影响裂谷结构及断层属性	Rukwa裂谷(Hodgson et al., 2017; Heilman et al., 2019)	
地质体接触面	上地壳	影响裂谷相关断层的几何形态, 使裂谷结构复杂化	Rukwa裂谷(Kolawole et al., 2021b)	
剪切带及内部变质组构			Tanganyika裂谷(Shaban et al., 2023), Rukwa裂谷(Heilman et al., 2019), Malawi裂谷(Dawson et al., 2018), Magadi裂谷(Muirhead and Kattenhorn, 2018), 北海裂谷盆地(Osagiede et al., 2020)	
			阿根廷Colorado盆地(Lovecchio et al., 2018), 北海裂谷盆地(Whipp et al., 2014; Duffy et al., 2015; Deng C et al., 2017a), Turkana凹陷(Wang L et al., 2021), 珠江口盆地(Ye Q et al., 2020), 海拉尔盆地(刘恒麟等, 2022)、苏北盆地(束宁凯等, 2017), 渤海湾盆地(漆家福等, 2008; 詹润和朱光, 2012; 任健等, 2019; 刘露等, 2022)	
			Albertaine裂谷(Katumwehe et al., 2015)	
先存断层/断裂带				
基底面理/线理				

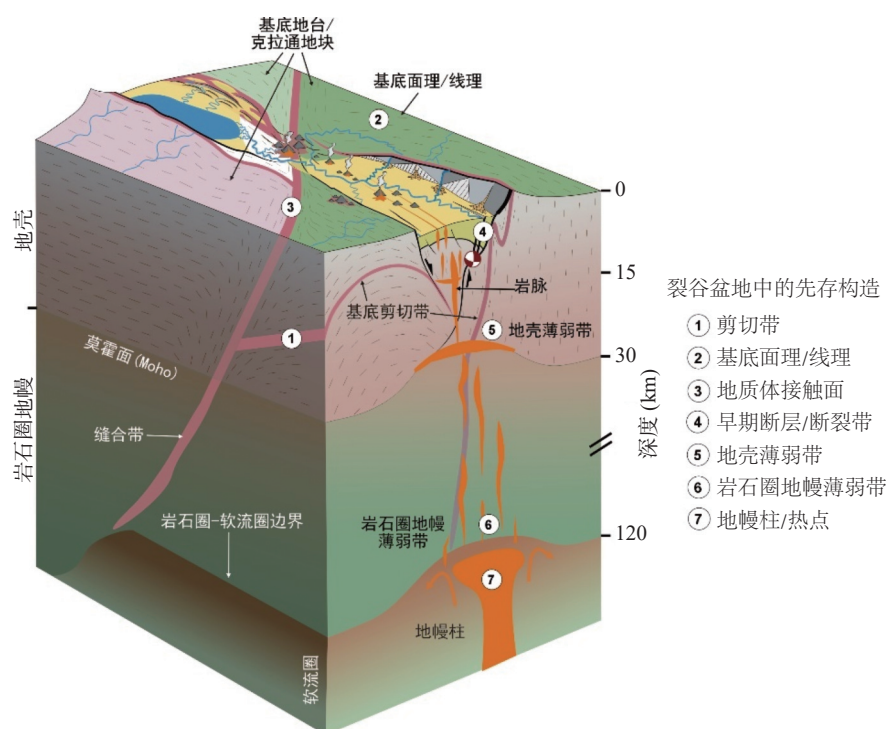


图 1 裂谷盆地中主要的构造要素及先存构造类型

Fig. 1 The main tectonic elements and types of pre-existing structures in rift basins

据 Brune et al.(2023)修改

2017; Heilman et al., 2019)。在理想情况下,岩石圈尺度先存构造的影响可以从大陆裂谷的初始阶段一直持续到晚期(Samsu et al., 2023)。

在上地壳尺度上,能够影响裂谷结构和演化的先存构造主要包括地质体接触面(例如 Wedmore et al., 2020a; Kolawole et al., 2021b),先存的断层/断裂带(McCaffrey, 1997; Holdsworth et al., 2001; 詹润和朱光, 2012; Whipp et al., 2014; Bladon et al., 2015; Duffy et al., 2015; 束宁凯等, 2017; Deng C et al., 2017a; Lovecchio et al., 2018; 任健等, 2019; Henstra et al., 2019; Phillips and McCaffrey, 2019; Wedmore et al., 2020b; Wang L et al., 2021; Tamas et al., 2022; 刘恒麟等, 2022; 刘露等, 2022),剪切带及内部变质组构(Kirkpatrick et al., 2013; Bird et al., 2015; Phillips et al., 2016; Fazlikhani et al., 2017; Kolawole et al., 2018; Peace et al., 2018; Heilman et al., 2019; Vasconcelos et al., 2019; Shaban et al., 2023),以及基底上的面理/线理等(Katumwehe et al., 2015)。这些上地壳尺度的先存构造会对裂谷内断层的特征产生重要影响(表 1)。

地质体接触面是两种具有不同岩性地质体的接触面。岩性的差异导致了两个地质体之间出现了物理性质(如强度)上的突变,这在一定程度上会促进断层的发育,或者改变穿过地质体接触面的断层形态。例如,在东非裂谷系统西支 Rukwa 裂谷,其西部边界的 Lupa 断层异常平直,就极有可能是两个地质体的接触面所控制的(Kolawole et al., 2021b)。

先存断层/断裂带是当前裂陷作用之前形成的断层,包括伸展、走滑和逆冲推覆断层。这些停止活动的断层会在新的伸展和裂陷作用中发生再次活化,进而影响晚期裂谷及相关断层的几何形态和演化,导致晚期裂谷盆地结构构造特征进一步复杂化。例如,在东非裂谷东支的 Turkana 凹陷,新生代的断层就受到了白垩纪先存断层的影响,形成了“J”字形的断层样式(Wang L et al., 2021)。这一现象在我国的含油气盆地构造研究中也广泛关注,例如珠江口盆地基底的先存逆冲断层的活化就在一定程度影响了新生代裂陷期断层的发育(Ye Q et al., 2020)。

剪切带及内部变质组构是剪切带在韧性变形

中形成的大量线理或面理。这些面理会促使断层沿其走向发育,进而形成走向异于伸展方向法线的断层。这一现象在东非裂谷西支的 Tanganyika 裂谷、Rukwa 裂谷以及 Malawi 裂谷北部体现得最为明显 (Dawson et al., 2018; Kolawole et al., 2018, 2021a, 2021b; Heilman et al., 2019; Shaban et al., 2023)。

此外,在多期次的构造运动(例如碰撞造山运动)中,也会在基底中形成一些区域上的面理/线理,这些面理和线理在某种程度上会导致部分裂谷断层沿其走向发育。在东非裂谷西支的 Albertine 裂谷北段,前寒武纪造山运动中形成的线理就控制了北东-南西向裂谷断层的发育 (Katumwehe et al., 2015)。

1.2 识别先存构造的主要方法

裂谷盆地中识别先存构造主要方法包括野外地质调查、遥感图像识别、以及重磁电震等地球物理资料解译。针对裂谷盆地中不同类型和不同尺度的先存构造,通常会采用不同的地质观测和识别方法。

野外地质调查是识别地表先存构造最直接、最准确的方法,能够精确地描述和记录先存构造的类型和特征,例如面理带、剪切带、先存断层/断裂等 (Albertine 裂谷, Walter et al., 2018; Malawi 裂谷, Kolawole et al., 2018, 图 2a 和图 2b)。对于地表出露的较大尺度先存构造,可以采用卫星遥感图像进行识别,进而表征出其在区域上的展布情况,如先存断层和较大规模的构造线 (Smets et al., 2016; Walter et al., 2019)。值得注意的是,单一运用卫星图像进行解译的误差相对较大,需要结合多种方式(如野外观测、地球物理资料等)进行综合解译。

地球物理资料是识别地质体内部先存构造的有效方法,这些地球物理资料主要包括高精度的重磁电资料和地震资料。高精度的重磁电资料可以较好地揭示基底地块上的先存构造特征,例如面理带/和剪切带在地质体内部的展布特征,这一方法已经被广泛应用于东非裂谷西支的先存构造解释 (Katumwehe et al., 2015; Kolawole et al., 2018; Heilman et al., 2019; Lemna et al., 2019;

Kolawole et al., 2021a, 2021b, 图 2c 和图 2d)。对于埋藏在厚层沉积物之下的先存构造,则需通过高精度的地震资料进行识别和刻画。这一方法已经在北海裂谷盆地 (Osagiede et al., 2020)、珠江口盆地 (Ye Q et al., 2020, 图 2e 和图 2f) 等一系列含油气裂谷盆地的构造研究中得到了应用并取得了较好的效果。

2 先存构造对裂谷盆地构造演化的影响作用

2.1 先存构造的构造继承性作用

“构造继承性 (structural inheritance)”是在裂谷盆地先存构造的研究中最常使用的一个概念。一般来说,“构造继承性”是一个通用的、描述性的术语,它广泛地涵盖了先存构造对晚期地质过程的全部影响。“再活化 (reactivation)”则是对“构造继承性”机制的一种简化,重点强调先存构造的重新活动对晚期构造的直接影响。但最新研究表明,在裂谷盆地中还存在另一种构造继承性机制,即“应变/应力重定向 (strain/stress re-orientation)”。探索不同的构造继承性机制,有助于探讨先存构造在裂谷运动学演化过程中的重要意义,以及其在裂谷断层生长连接中起到的关键作用。

2.1.1 先存构造的“再活化”

“再活化”是指在区域应力作用下,先存构造面发生脆性断裂滑动,并与晚期的上覆断层发生硬连接,进而直接影响裂谷盆地边界及内部断层的走向、展布和生长,使裂谷的结构进一步复杂化 (图 3a)。大量构造研究表明,裂谷盆地存在一系列与区域伸展方向不一致的断层,这极有可能是与区域伸展方向斜交的先存构造所导致的 (Morley et al., 2004; Lyon et al., 2007; 童亨茂等, 2009; 任健等, 2019)。受到先存构造影响的断层与未受影响的断层的相互作用导致了裂谷内复杂的断层模式 (詹润和朱光, 2012; Bladon et al., 2015; Hodge et al., 2018; Muirhead and Kattenhorn, 2018; Maestrelli et al., 2020; Zwaan et al., 2021; Zou Y Y et al., 2024)。此外,这些活跃的先存构造亦有可能控制裂谷内沉积中心的位置和形态

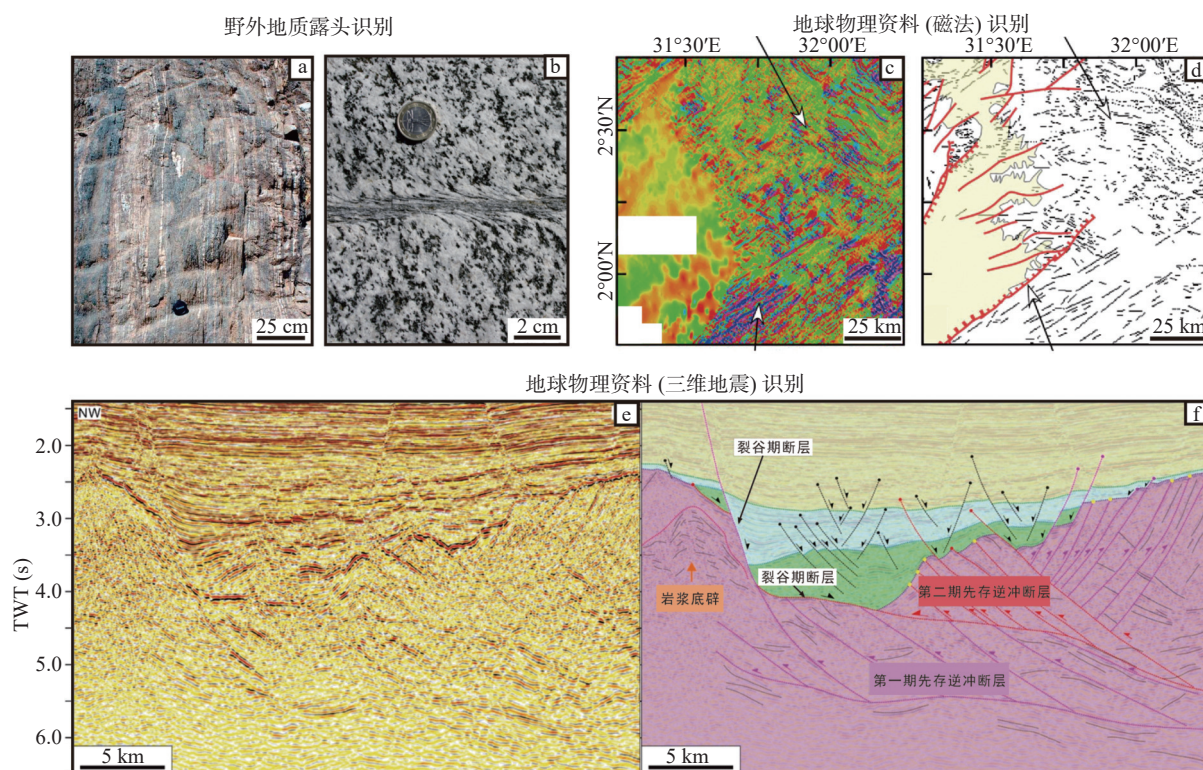


图2 裂谷盆地中不同尺度的先存构造识别

Fig. 2 Identification of pre-existing structures at different scales in rift basins

a. Malawi 裂谷肩部沿前寒武纪 Mughese 剪切带中发育的变质组构(Kolawole et al., 2018); b. 阿尔卑斯山东段花岗岩中发育的小型剪切带(Ceccato et al., 2022); c 和 d. 航磁数据揭示的 Albertine 裂谷北部前寒武纪先存构造(Katumwehe et al., 2015); e 和 f. 三维地震资料揭示的珠江口盆地中生代先存逆冲断层(Ye Q et al., 2020)

(Morley et al., 2004; Zou Y Y et al., 2024)。

2.1.2 先存构造导致的“应变/应力重定向”

在“再活化”机制之外,野外调查和模拟研究还指出了另一种构造继承性机制,即应变(Corti et al., 2013; Philippon et al., 2015; Hodge et al., 2018)和应力(Morley, 2010)的重新定向。在这种机制中,先存构造并未经历显著的滑动或位移,且未与晚期的裂谷断层发生硬连接,但这些先存构造依然会影响晚期伸展断层的走向、形态和展布特征(图 3b),导致晚期断层中出现一些异常走向断层。同样地,这些断层的走向与区域伸展方向并不一致,而是更多地遵循先存构造的走向。

这一影响机制可能与岩石机械强度差异所导致的局部应力场变化有关(Bell, 1996; Samsu et al., 2023)。主应力在穿过两种机械强度不同的材料时会发生偏转,进而导致界面附近的应力和应变发生变化。在野外调查中可以观测到先存构造附近的断层或节理弯曲(Muirhead and Kattenhorn,

2018; Samsu et al., 2020),以及大型断层附近次级断层的应变轴和运动学变化(Riller et al., 2017)。这都表明了“应变重定向”机制对裂谷断层的重要影响。由于这一机制比“再活化”机制更难以观测和定量分析,因此现阶段对其的研究还较薄弱,但其在裂谷盆地构造演化中扮演的重要作用应当在后续的研究中引起更多的重视(Samsu et al., 2023)。

这两种裂谷盆地构造继承性机制的科学揭示主要通过两种途径,一是通过先存构造和晚期裂谷构造在空间上的空间叠置和几何相似关系来分析先存构造带来的继承性影响;二是通过构造物理/数值实验来验证边界条件(如伸展方向、伸展速率)和先存构造参数(如空间展布特征、与围岩的强度差异)对晚期构造的继承性作用。这两种研究方式将在后文中进行简述。

2.2 先存构造与裂谷断层的继承性关系

2.2.1 平面几何关系

在平面图上,裂谷盆地的构造继承性通常表

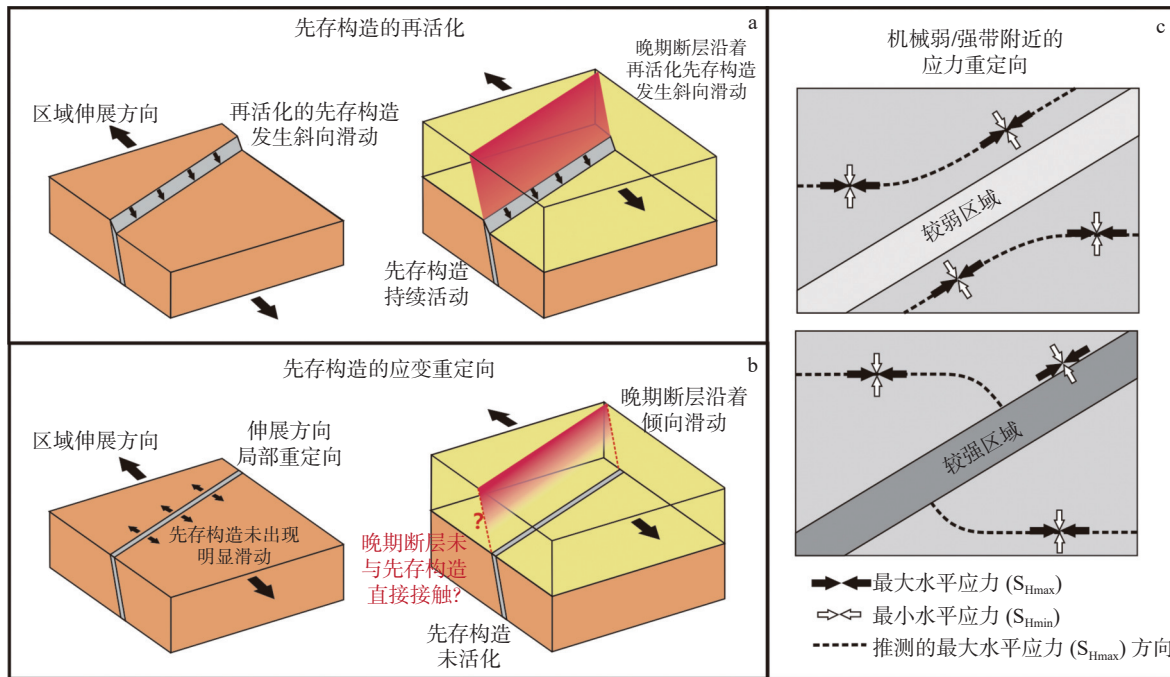


图 3 先存构造对伸展断层的两种影响机制

Fig. 3 Two influence mechanisms of pre-existing structures on extensional faults

- a. “再活化”机制通常与沿着先存的薄弱面/带, 并常常导致断层的斜滑 (Morley, 1995; Corti et al., 2007; Corti, 2012), 以及早晚两构造之间的硬连接 (Phillips et al., 2016); b. 局部应变重定向, 这可能导致断层的倾滑运动 (Corti et al., 2013; Philippon et al., 2015); c. 机械弱带/强带附近的应力重定向 (据 Bell, 1996 修改)

现为裂谷断层与先存构造之间的“空间叠置”和“几何相似”(Phillips et al., 2016; 束宁凯等, 2017; Fazlikhani et al., 2017; Collanega et al., 2019; Wedmore et al., 2020b)。“空间叠置”是指裂谷相关断层在先存构造的上方或附近发生(图 4)。“几何相似”是指在俯视图或者剖面上, 裂谷相关断层的断层线与先存构造近似平行(图 4)。值得注意的是, 两种不同的构造继承性机制所导致的构造表现存在细微的差异, “再活化”机制大多表现为“空间叠置”和“几何相似”的同时发生; 而“应变重定向”机制主要表现为“几何相似”, “空间叠置”并不显著(图 4)。

“空间叠置”和“几何相似”现象在全球的大陆裂谷盆地中均有表现。例如, 新生代东非裂谷的整体展布就大致遵循元古宙的泛非 (Pan-African) 构造带, 其中的部分裂谷段如西支的 Rukwa 裂谷也与中生代卡鲁期裂谷处于同一位置, 且其新生代的边界断裂走向也遵循中生代断层的走向 (McConnell, 1972; Versfelt and Rosendahl, 1989; Castaing, 1991; Corti et al., 2007; Corti, 2012;

Kolawole et al., 2021a)。这些现象均展现出了先存构造对晚期裂谷构造的强烈控制作用。

2.2.2 剖面几何关系

地球物理资料 (如地震资料) 可以深入了解先存构造和与裂谷有关的断层之间的几何关系, 有效地补充了平面上的观测和研究结果, 进而揭示先存构造在三维空间中的影响。Phillips et al. (2016) 根据挪威南部海域的地震反射资料 and 前人研究, 总结了基底先存剪切带与晚期裂谷断层在剖面上的三种关系, 即“利用型”关系、“合并型”关系、“横切型”关系。

Phillips et al. (2016) 推断, 先存构造与晚期裂谷断层之间“利用型”关系的形成, 是因为晚期裂谷断层是起始于剪切带内强度较弱的糜棱岩当中, 并向上传播到沉积盖层中所导致的。詹润和朱光 (2012) 在渤海湾盆地、Collanega et al. (2019) 在 Taranaki 盆地 (新西兰北岛近海) 的研究也得出了类似的结论。这些研究均表明, 先存构造的再活化和断层的向上传播是“利用型”关系背后的潜在机制 (图 4)。

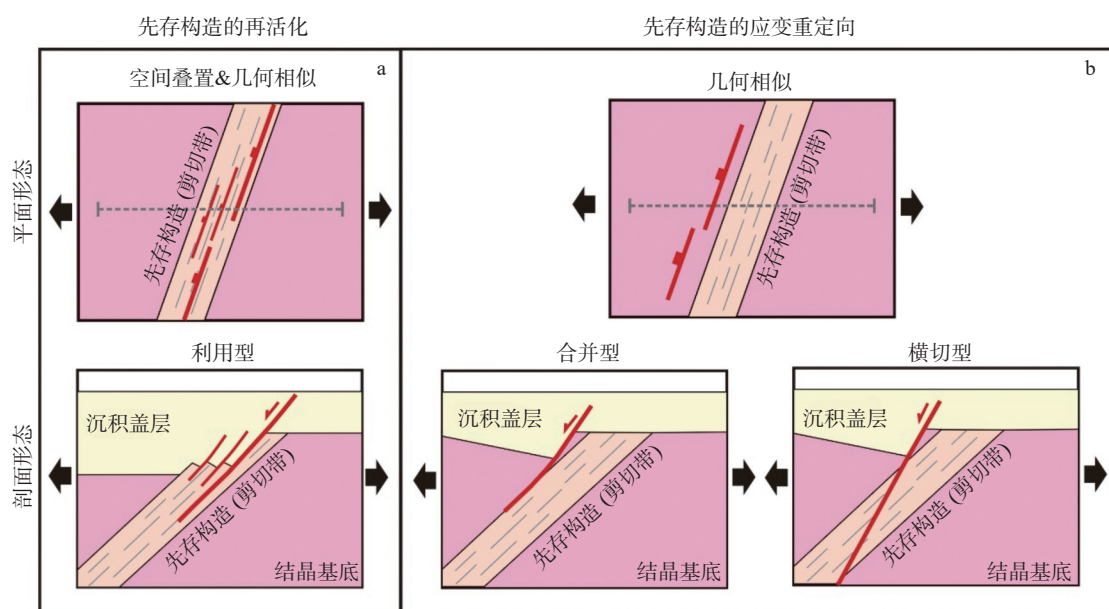


图 4 先存构造的两种构造继承性机制及在平面和剖面上的主要构造特征

Fig. 4 Two tectonic inheritance mechanisms of pre-existing structures and their main tectonic characteristics in plane and section

据 Samsu et al.(2023)修改

“合并型”和“横切型”关系的形成则有别于“利用型”关系，因为晚期的裂谷相关断层是在先存构造的上部区域成核。在“合并型”关系中，晚期裂谷断层在结晶基底内成核形成倾角较大的断层，在深部与倾角较缓的先存剪切带合并。在“横切型”关系中，晚期裂谷断层可能继承基底构造的走向，但其倾角可能会与先存剪切带有着较大差异，甚至会横切过先存剪切带。Phillips et al.(2016)将“合并型”和“横切型”关系归结于基底先存构造所导致的“应变重定向”机制。

2.2.3 先存构造深度和规模的影响

随着上覆地层厚度的增加，先存构造对晚期裂谷断层的影响在逐渐减弱(图 5a)。在较深的沉积地层中，裂谷相关断层与基底中再活化的先存构造紧密相连，并且在平面上表现出较为强烈的几何相似性(图 5b)。相比之下，较浅的断层则垂直于区域伸展方向，但会形成与先存构造平行的雁列状断层组合(图 5c, 詹润和朱光, 2012; Deng C et al., 2017b; Collanega et al., 2019; Deng H D and McClay, 2021; 刘露等, 2022); 在平面上，这些浅层断层会通过转换带或者转换斜坡进行软连接。随着伸展程度的增加和断层的持续演化，浅部断裂也可能在地表发生横向连接(詹润和朱光,

2012; Deng H D and McClay, 2021)。深层和浅层断层之间的垂直联系导致了断层走向的旋转，从而造成了二维平面和剖面上的“S”形断层几何形状和三维上的扭曲断层面。

另一个影响先存构造的继承性作用强烈程度的因素是先存构造的规模。Collanega et al.(2019)认为，与较薄的剪切带(宽度为 100 m, 倾角为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$)相比，在较厚的先存剪切带(宽度约为 1 km, 倾角为 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$)中成核的裂谷相关断层能够更好地再活化并进一步向上传播到更浅的区域。这一论断在最近的物理模拟实验中得到了证实(Osagiede et al., 2021; Zou Y Y et al., 2024)。

2.2.4 先存构造对裂谷盆地整体结构的影响

在大陆裂谷的演化过程中，先存构造的活化往往促进了裂谷盆地边界断层及主干断层的发育，进而从整体上控制了裂谷盆地的轮廓。在中国近海盆地中，琼东南盆地下地壳先存薄弱带的规模和走向分段，就直接控制了新生代盆地的裂陷范围和“东西分块”的结构特征(Yang G X et al., 2022); 在渤海湾盆地，部分凹陷的边界断层发育利用了先存中生代郯庐断裂带的断层面(辽中凹陷, 漆家福等, 2008; 青东凹陷, 詹润和朱光, 2012); 在东非裂谷，Rukwa 裂谷东侧的 Lupa 断层就受到

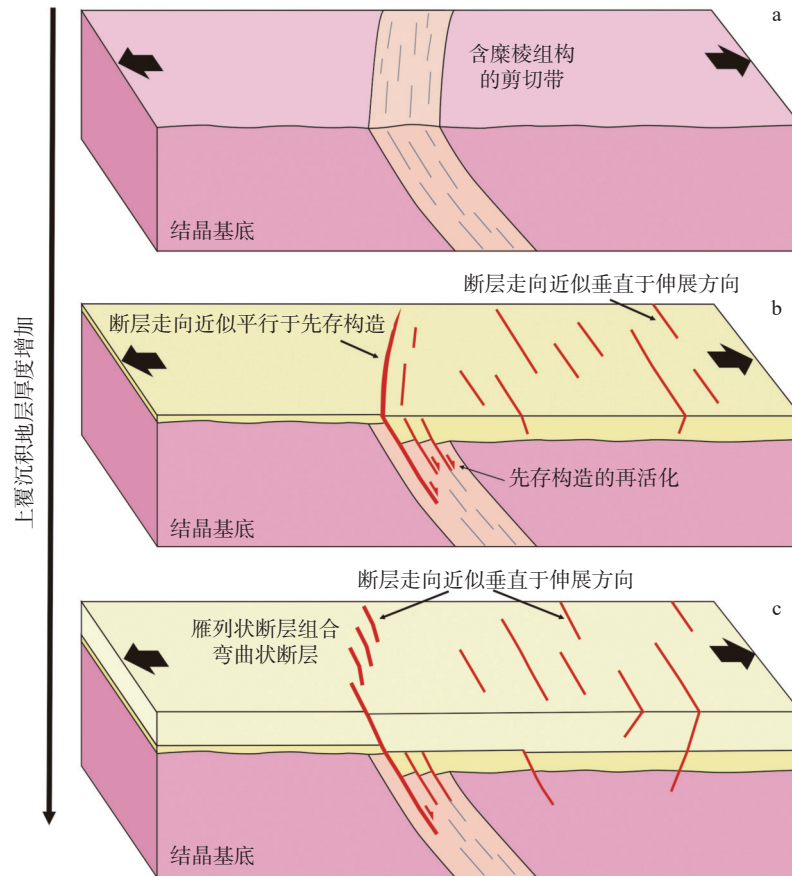


图5 先存构造的影响随着上覆沉积地层厚度的增加在逐渐减弱

Fig. 5 The influence of pre-existing structures gradually weakens with the increase of the thickness of the overlying sediments

据 Samsu et al.(2023)修改

了地块接触面(地质体接触面)的影响,形成了长直连续的边界断层样式,控制了裂谷东侧的轮廓(Kolawole et al., 2021b)。这些能够控制裂谷盆地边界断层发育的先存构造往往都是深入地壳内部甚至穿透岩石圈的深大构造(例如韧性剪切带、深大断裂等),因此常常能够影响甚至奠定裂谷从局部到整体的构造格局。

2.3 先存构造活化机制的模拟实验

构造物理模拟/数值模拟实验是解决先存构造的活化机制的重要实验方法,在探究先存构造对晚期裂谷结构构造特征的影响等方面发挥了重要的作用。构造物理模拟/数值模拟实验能够在裂谷盆地构造几何学和运动学分析的基础上,通过建立合理的缩放模型实验,重现裂谷盆地的二维/三维形成过程,是对自然界中裂谷盆地研究结果的有效补充和验证(Allemand and Brun, 1991; Brun, 1999; 童亨茂等, 2009; Corti, 2012; Molnar et al., 2020; Maestrelli et al., 2020, 2022, 2024; Zwaan

and Schreurs, 2023)。物理模拟与数值模型实验能够通过调整边界条件和先存构造的参数设置,来验证主控因素的单一影响或者共同作用(例如,深部薄弱带的流变结构和强度: Corti et al., 2011; Osagiede et al., 2021; Xue L et al., 2024; 浅部剪切带/先存断层的倾角和几何形态等: Deng C et al., 2017b, 2018; Bonini et al., 2023; Maestrelli et al., 2020; Zwaan et al., 2021, 2022; Zou Y Y et al., 2024)。

2.3.1 物理模拟实验

构造物理模拟技术在探究裂谷盆地中的先存构造活化机制中扮演了重要的作用(Morley, 1999b; Corti, 2012; Samsu et al., 2023)。目前伸展构造物理模拟实验类型主要包括常规重力场下的砂箱物理模拟实验(Maestrelli et al., 2020)、湿粘土物理模拟实验(Bonini et al., 2023)以及离心机中的超重力物理模拟实验(Corti, 2008; Agostini et al., 2009, 2011; Corti et al., 2011; Philippon et al.,

2015)。这些模拟技术能够有效地重建三维空间中裂谷的演化过程,较好地重现先存构造影响下的裂谷断层几何学样式。在此基础上通过 PIV、X 射线扫描等技术,还能够较好地验证和研究先存构造对局部变形和局部应力场变化的影响 (Zwaan and Schreurs, 2023)。

随着物理模拟实验建模思路的拓展和观测技术不断进步,近年来,一系列新的物理模拟实验较好地回答了先存构造与裂谷构造演化研究中的某些重要问题。Maestrelli et al.(2020)开展的砂箱物理模拟实验表明,地壳中的先存不连续(即先存组构)会与晚期的裂谷结构相互作用,形成异常走向的断层和转换斜坡。Bonini et al.(2023)通过湿粘土物理模拟实验,探究了不同走向和不同倾角的先存断层对窄裂谷构造的影响。结果表明,走向小于 45°、倾角大于 45°的先存断层在伸展过程中更容易活化并会显著影响边界断层的形态(图 6)。

Zou Y Y et al.(2024)报道的离心机超重力物理模拟实验则更清晰地展示了脆性地壳中的垂直先存剪切带对裂谷相关断层和结构的影响(图 7),强调了走向小于 45°的先存构造会导致边界断层和裂谷内断层的弯曲,同时控制裂谷内部沉积中心的发育,进而使裂谷的结构进一步复杂化。这些物理模拟实验的结果均清晰地表明先存断层的倾角和走向是影响先存断层活化的关键因素。

2.3.2 数值模拟实验

数值模拟实验可以在模拟构造变形的同时,定量观测和分析变形系统的应力和应变演化特征,主要分为有限元方法和离散元方法。有限元方法立足于连续介质理论,将物体视为由无穷小的微元构成,在解决热传导、流固耦合等方面更有优势,因此在岩石圈尺度的裂谷构造演化研究中使用较多,特别是在涉及岩石圈多层流变结构、深部热演化、大尺度裂谷演化的研究中 (Brune et

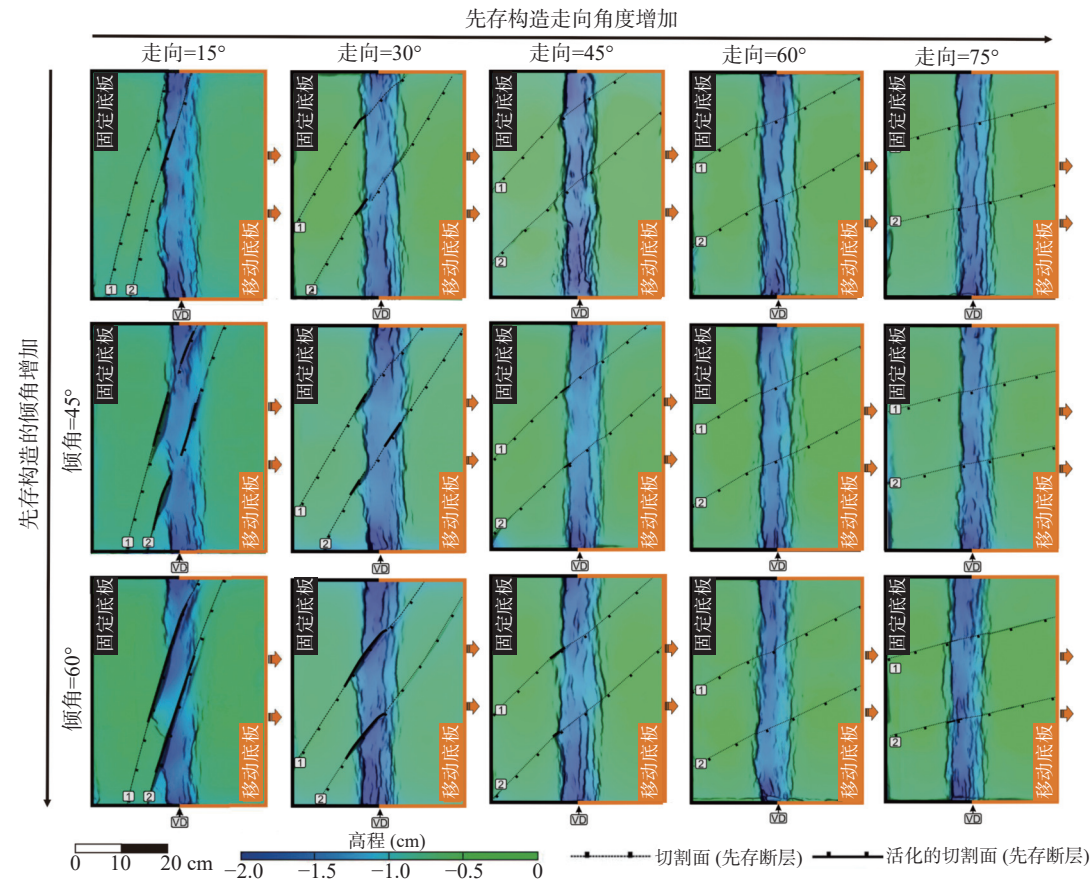


图 6 裂谷盆地中先存断层再活化的湿粘土物理模拟实验结果

Fig. 6 Results of wet clay analogue modeling experiments on the reactivation of pre-existing faults in rift basins

据 Bonini et al.(2023)

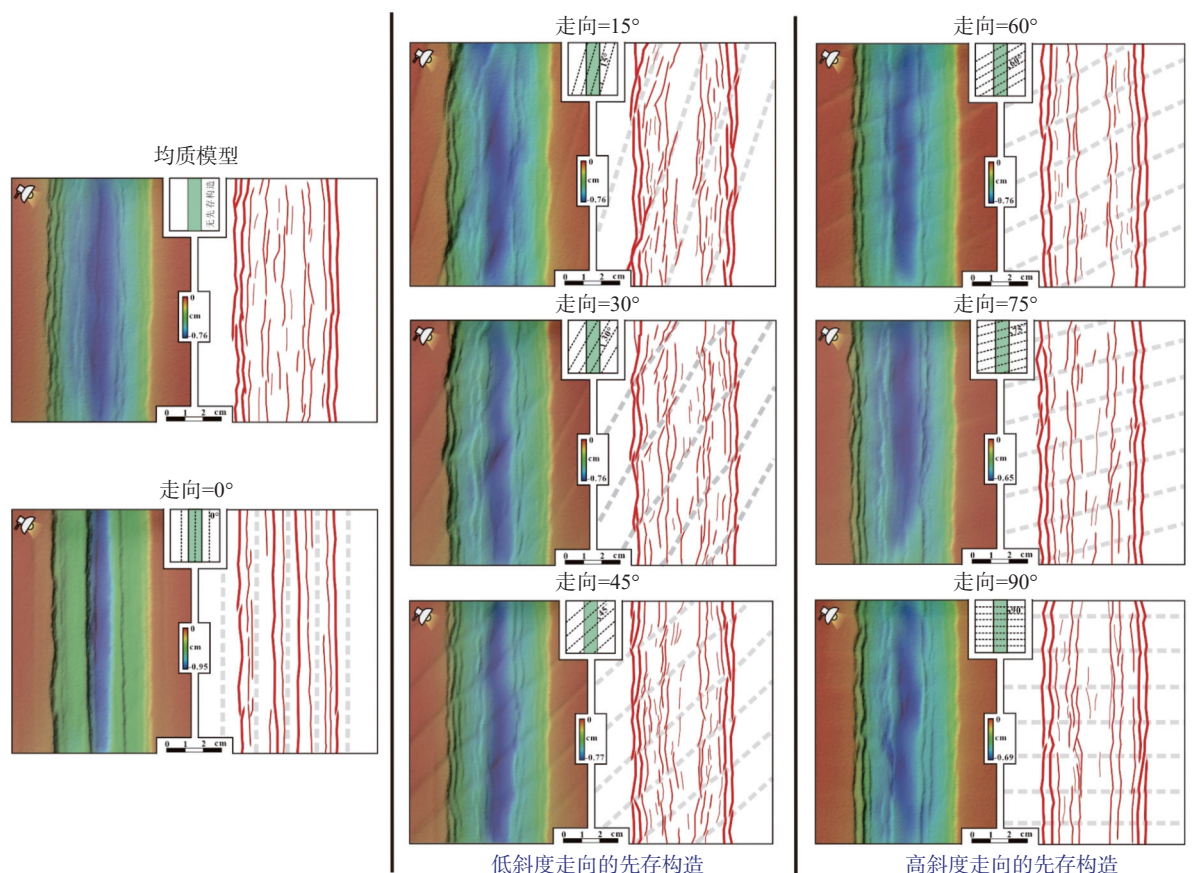


图7 裂谷盆地中的先存剪切带对晚期裂谷断层影响的物理模拟实验

Fig. 7 Analogue modeling experiments on the influence of pre-existing shear zones on late rift faults in rift basins

据 Zou Y Y et al.(2024)

al., 2017; Glerum et al., 2020)。

离散元方法 (discrete element method, DEM) 是一种基于颗粒性质的数值模拟方法, 将实际物体或结构视作由众多微小颗粒组成, 在原理上与砂箱物理模拟实验极为相似, 因此常用于模拟上地壳中的脆性构造变形, 如正断层 (Finch and Gawthorpe, 2017; Deng et al., 2017b, 2018)、褶皱 (Hardy and Finch, 2005; Li C S et al., 2021; Yang K J et al., 2024)。在裂谷盆地先存构造的研究中, Deng C et al.(2017b, 2018)通过离散元数值模拟重建了伸展背景下先存断层的再活化过程, 验证了先存断层的走向和倾角角度是其再活化过程中的关键因素, 并揭示了再活化过程中先存断层周缘的应力变化特征(图8)。

构造数值模拟相比于物理模拟, 其主要优势在于: (1)能够在模拟实验中考虑更多的参数(如温度场、压力场的变化); (2)更定量化和更便捷地调整变量参数(如先存构造与围岩的强度差异),

这些参数在物理模拟实验中通常难以调整; (3)能够直接反映模型演化过程中应力的变化, 特别是断层周缘的应力变化; (4)更好地建立岩石圈尺度的多层流变结构并进行演化模拟。但受限于计算机算力、建模方式等因素, 数值模拟技术在重现地质体的三维几何特征及构造演化方面尚难以取代物理模拟实验, 如何科学地建立符合自然界实例的精细模型并设定合理的参数也是一个较大的挑战。

3 研究展望

前述相关研究工作, 展现了先存构造研究在大陆裂谷构造演化研究及矿产油气勘探中的重要作用, 亦存在一系列有待深入的研究方向, 主要包括: (1)大陆裂谷盆地中不同类型先存构造的识别; (2)先存构造与晚期裂谷结构的三维精细刻画与空间叠置特征研究; (3)不同类型不同强度先存构造的精细物理模拟与数值模拟。

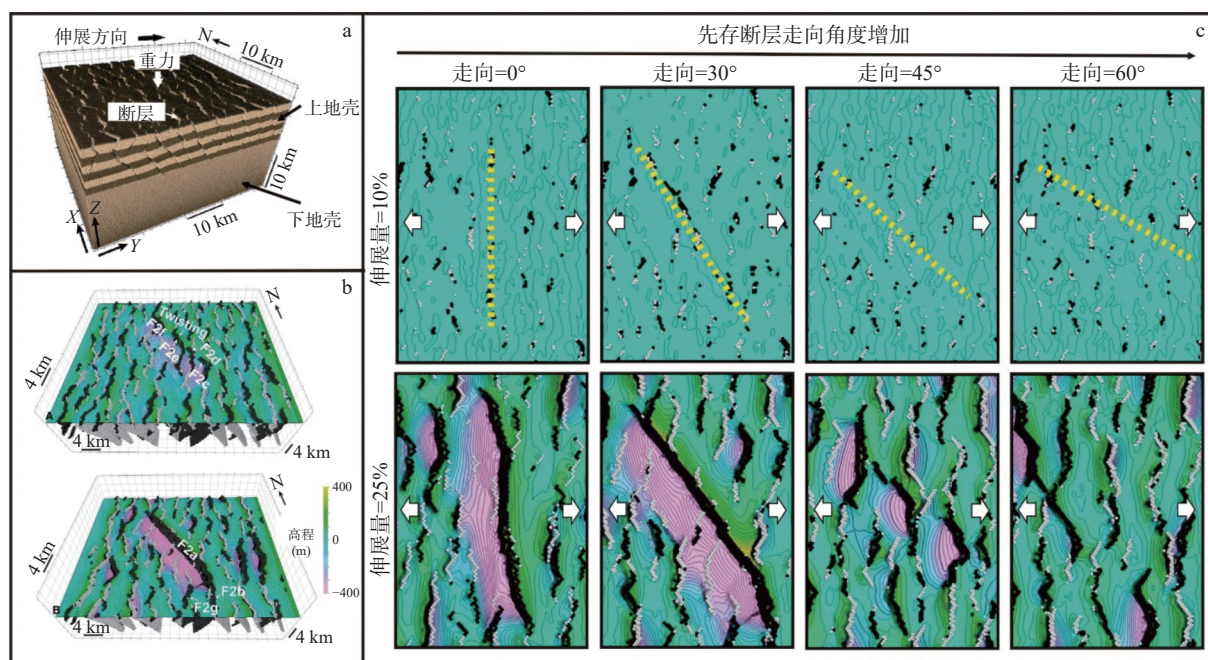


图8 先存断层活化的三维离散元数值模拟实验

Fig. 8 Three-dimensional discrete element numerical simulation experiments on the activation of pre-existing faults

a. 三维离散元模型建模示意图; b. 模型表面与模型内部面的断层模式; c. 先存断层走向不同导致的模型表面断层形态差异 (黄色虚线为先存断层的位置和走向) 据 Deng C et al.(2017b)

大陆裂谷盆地中先存构造的识别主要依靠野外地质观测、遥感影像资料以及与地球物理资料,但目前的研究大部分受限于遥感和地球物理资料的品质与精度,难以对先存构造进行精准刻画;此外,不同强度、不同深度、不同规模尺度的先存构造的识别特征和标准也存在一定的区别。随着遥感影像精度的不断提高,以及地球物理探测技术的持续改良,不同类型先存构造可以得到更加的精准的识别。因此在未来,系统总结不同类型先存构造在遥感影像上的识别特征,以及岩体内部和厚层沉积物之下的地球物理识别特征,将是一项非常重要的研究工作。此外,野外地质工作、钻探工作及配套的岩石力学研究亦可确定先存构造及围岩的岩石力学参数,在此基础上开展地球物理正演并与实际的地球物理资料进行对比,将为先存构造地球物理特征的总结提供更多的依据和参考,进而构建起不同类型先存构造的地表-地下识别标准,为先存构造的地质-地球物理解释提供较为统一的参考标准。

在总结先存构造类型和识别特征的基础上,可以选取典型研究区开展先存构造与晚期裂谷结

构的三维精细刻画和空间叠置特征研究。这项工作将为探索先存构造与晚期裂谷结构之间的相互作用关系提供重要的地质实例,亦是研究先存构造在伸展作用下的活化机制的重要地质证据。这项研究对于地球物理资料的要求较高,通常要求研究区采集有较高品质的三维地震资料,能够较好地识别、刻画并建立先存构造和晚期断层体系的空间展布特征,进而在三维空间中探讨先存构造对断层结构的影响。对于地球物理资料较为缺乏的研究区(例如只有二维地震测线和少量重磁电资料的研究区),可以考虑选取典型地球物理剖面进行先存构造及断层的解译工作,再结合关键地质界面(如基底)上先存构造和断层的解译成果探讨两者之间的相互关系。该研究方向的成果能够丰富先存构造-裂谷构造演化的地质实例库,为后续的机理性研究提供地质实例支撑。

构造物理模拟实验和数值模拟是探究先存构造-裂谷构造相互作用机制的主要研究方法。在当前的构造物理模拟实验中,尽管已经具有针对不同类型的先存构造的建模方式,例如用刀切割砂体或粘土体来模拟先存断层和剪切带,但这些

方式都难以量化地考虑先存构造与围岩之间的岩石力学强度差异,这可能是当前物理模拟实验的主要局限。针对这一问题,一方面可以尝试更多的材料进行先存构造的建模,另一方面可以考虑开展配套的数值模拟实验。有限元/离散元数值模拟能够通过调整建模参数,对先存构造的强度和空间展布特征进行调整,进而更好地探讨不同岩石力学特征的先存构造对裂谷构造特征的影响。此外,数值模拟实验还能够量化地表征先存构造和断层在区域应力作用下的应力变化,是构造物理模拟实验的有效补充。因此,如何实现构造物理模拟和数值模拟的相互印证,将是后续先存构造实验研究工作中的关键和重点。

4 结论

(1)不同尺度的先存构造在大陆裂谷的构造演化中扮演了重要的作用,在岩石圈尺度上这些先存构造主要包括薄弱带、韧性剪切带、板块缝合带、地幔柱或者热点构造,在上地壳尺度上这些先存构造主要包括地质体接触面、剪切带及内部变质组构、先存断层/断裂带、基底面理/线理等。野外地质调查、卫星遥感图像识别、地球物理资料解译是观测和识别先存构造的重要技术方法。

(2)上地壳尺度的先存构造对裂谷演化的继承性影响机制主要包括先存构造的“再活化”和“应变/应力重定向”。这两种机制会导致晚期裂谷构造与先存构造在平面和剖面上存在一定程度的几何相似性,从而导致晚期裂谷的结构和断层形态复杂化。先存构造的空间展布特征、深度和规模是决定其影响强弱的重要因素。

(3)构造物理/数值模拟实验能够有效地重现大陆裂谷的演化过程,并探究先存构造继承性影响的主控因素和动力学机制。最近的构造物理模拟实验和数值模拟实验较好地解释了不同空间展布特征的先存构造在伸展应力作用下的活化机制及对裂谷结构和断层样式的控制作用,展现了构造物理/数值模拟实验在该领域中的广泛应用前景。

(4)构建不同类型先存构造的地表-地下识别标准,开展先存构造与晚期裂谷结构的三维精细

刻画和空间叠置特征研究,以及加强构造物理模拟和数值模拟的相互印证,将是后续先存构造对大陆裂谷盆地继承性影响研究中的重点方向。

感谢编辑和两位匿名评审专家对本文提出的宝贵修改建议。论文撰写过程中还得到了意大利国家研究理事会 Giacomo Corti 主任研究员和意大利佛罗伦萨大学 Maestrelli Daniele 研究员的指导建议,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 刘恒麟,李忠权,李根,李敬生,蒙启安,彭杨,胡懿灵,龙伟,晏山,万双双.2022.先存构造对断层后期生长及形态的影响:以海拉尔盆地红旗凹陷为例[J].地球科学,47(7):2646-2666.
- 刘露,孙永河,陈昌,娄瑞,王琦.2022.南堡凹陷4号构造带断裂活化及其对油气成藏的控制作用[J].石油勘探与开发,49(4):716-727.
- 漆家福,邓荣敬,周心怀,张克鑫.2008.渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造[J].中国科学:地球科学,38(z1):19-29.
- 任健,吕丁友,陈兴鹏,刘朋波,官大勇,苏凯,张宏国.2019.渤海东部先存构造斜向拉伸作用及其石油地质意义[J].石油勘探与开发,46(3):530-541.
- 束宁凯,吴林,汪新文,郭建平.2017.苏北盆地高邮凹陷基底先存断裂成因及其对新生断裂的控制[J].石油实验地质,39(1):8-14+23.
- 童亨茂,聂金英,孟令箭,张红波,李晓宁.2009.基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J].地学前缘,16(4):97-104.
- 童亨茂,蔡东升,吴永平,李晓光,李绪深,孟令箭.2011.非均匀变形域中先存构造活动性的判定[J].中国科学:地球科学,41(2):158-168.
- 童亨茂,王建君,赵海涛,李波,郝化武,王明阳.2014.“摩尔空间”及其在先存构造活动性预测中的应用[J].中国科学:地球科学,44(9):1948-1957.
- 王真真,朱继田,李安琪,胡潜伟,毛雪莲,尹宏伟.2021.琼东南盆地新生代东西分块差异构造演化及控藏意义[J].海洋地质与第四纪地质,41(4):157-169.
- 杨林,王庆飞,赵世宇,李华健,赵鹤森,董超一,刘学飞,邓军.2023.造山型金矿构造控矿作用[J].岩石学报,39(2):277-292.
- 詹润,朱光.2012.济阳坳陷青东凹陷基底断裂复活规律和

- 方式[J]. 地质论评, 58(5): 816-828.
- Allemand P, Brun J P. 1991. Width of continental rifts and rheological layering of the lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 188(1-2): 63-69.
- Agostini A, Corti G, Zeoli A, Mulugeta G. 2009. Evolution, pattern, and partitioning of deformation during oblique continental rifting: Inferences from lithospheric-scale centrifuge models[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(11): e2009GC002676.
- Agostini A, Bonini M, Corti G, Sani F, Mazzarini F. 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.
- Bertrand L, Jusseaume J, Géraud Y, Diraison M, Damy P C, Navelot V, Haffen S. 2018. Structural heritage, reactivation and distribution of fault and fracture network in a rifting context: Case study of the western shoulder of the Upper Rhine Graben[J]. *Journal of Structural Geology*, 108: 243-255.
- Bell J S. 1996. In situ stresses in sedimentary rocks (part 2): Applications of stress measurements[J]. *Geoscience Canada*, 23: 135-153.
- Bladon A J, Clarke S M, Burley S D. 2015. Complex rift geometries resulting from inheritance of pre-existing structures: Insights and regional implications from the Barmer Basin rift[J]. *Journal of Structural Geology*, 71: 136-154.
- Bird P C, Cartwright J A, Davies T L. 2015. Basement reactivation in the development of rift basins: an example of reactivated Caledonide structures in the West Orkney Basin[J]. *Journal of the Geological Society*, 172(1): 77-85.
- Bonini L, Fracassi U, Bertone N, Maesano F E, Valensise G, Basili R. 2023. How do inherited dip-slip faults affect the development of new extensional faults? Insights from wet clay analog models[J]. *Journal of Structural Geology*, 169: 104836.
- Brun J P. 1999. Narrow rifts versus wide rifts: inferences for the mechanics of rifting from laboratory experiments[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 357: 695-712.
- Brune S, Corti G, Ranalli G. 2017. Controls of inherited lithospheric heterogeneity on rift linkage: Numerical and analog models of interaction between the Kenyan and Ethiopian rifts across the Turkana depression[J]. *Tectonics*, 36(9): 1767-1786.
- Brune S, Kolawole F, Olive J A, Stamps D S, Buck W R, Buiter S J H, Furman T, Shillington D J. 2023. Geodynamics of continental rift initiation and evolution[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 4(4): 235-253.
- Castaing C. 1991. Post-Pan-African tectonic evolution of South Malawi in relation to the Karroo and recent East African rift systems[J]. *Tectonophysics*, 191(1-2): 55-73.
- Ceccato A, Goncalves P, Menegon L. 2022. On the petrology and microstructures of small-scale ductile shear zones in granitoid rocks: an overview[J]. *Journal of Structural Geology*, 161: 104667.
- Chenin P, Beaumont C. 2013. Influence of offset weak zones on the development of rift basins: Activation and abandonment during continental extension and breakup[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4): 1698-1720.
- Celli N L, Lebedev S, Schaeffer A J, Gaina C. 2020. African cratonic lithosphere carved by mantle plumes[J]. *Nature Communications*, 11(1): 1-10.
- Corti G, van Wijk J, Cloetingh S, Morley C K. 2007. Tectonic inheritance and continental rift architecture: Numerical and analogue models of the East African Rift system[J]. *Tectonics*, 26(6): 2006TC002086.
- Corti G. 2008. Control of rift obliquity on the evolution and segmentation of the main Ethiopian rift[J]. *Nature Geoscience*, 1(4): 258-262.
- Corti G, Calignano E, Petit C, Sani F. 2011. Controls of lithospheric structure and plate kinematics on rift architecture and evolution: An experimental modeling of the Baikal rift[J]. *Tectonics*, 30(3): 2011TC002871.
- Corti G. 2012. Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System[J]. *Tectonophysics*, 522: 1-33.
- Corti G, Philippon M, Sani F, Keir D, Kidane T. 2013. Re-orientation of the extension direction and pure extensional faulting at oblique rift margins: Comparison

- between the Main Ethiopian Rift and laboratory experiments[J]. *Terra Nova*, 25(5): 396-404.
- Corti G, Maestrelli D, Sani F. 2022. Large-to local-scale control of pre-existing structures on continental rifting: Examples from the Main Ethiopian Rift, East Africa[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 808503.
- Collanega L, Siuda K, Jackson C A L, Bell R E, Coleman A J, Lenhart A, Magee C, Breda A. 2019. Normal fault growth influenced by basement fabrics: The importance of preferential nucleation from pre-existing structures[J]. *Basin Research*, 31(4): 659-687.
- Dávalos-Elizondo E, Laó-Dávila D A. 2023. Structural analysis of fracture networks controlling geothermal activity in the northern part of the Malawi Rifted Zone from aeromagnetic and remote sensing data[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 433: 107713.
- Dawson S M, Laó-Dávila D A, Atekwana E A, Abdelsalam M G. 2018. The influence of the Precambrian Mughese Shear Zone structures on strain accommodation in the northern Malawi Rift[J]. *Tectonophysics*, 722: 53-68.
- Deng C, Fossen H, Gawthorpe R L, Rotevatn A, Jackson C A L, FazliKhani H. 2017a. Influence of fault reactivation during multiphase rifting: The Oseberg area, northern North Sea rift[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 1252-1272.
- Deng C, Gawthorpe R L, Finch E, Fossen H. 2017b. Influence of a pre-existing basement weakness on normal fault growth during oblique extension: Insights from discrete element modeling[J]. *Journal of Structural Geology*, 105: 44-61.
- Deng C, Gawthorpe R L, Fossen H, Finch E. 2018. How does the orientation of a preexisting basement weakness influence fault development during renewed rifting? Insights from three-dimensional discrete element modeling[J]. *Tectonics*, 37(7): 2221-2242.
- Deng H D, McClay K. 2021. Three-dimensional geometry and growth of a basement-involved fault network developed during multiphase extension, Enderby Terrace, North West Shelf of Australia[J]. *AAPG Bulletin*, 133(9-10): 2051-2078.
- Duffy O B, Bell R E, Jackson C A L, Gawthorpe R L, Whipp P S. 2015. Fault growth and interactions in a multiphase rift fault network: Horda Platform, Norwegian North Sea[J]. *Journal of Structural Geology*, 80: 99-119.
- Dunbar J A, Sawyer D S. 1988. Continental rifting at pre-existing lithospheric weaknesses[J]. *Nature*, 333(6172): 450-452.
- Fossen H. 2016. *Structural geology*[M]. Cambridge: Cambridge university press.
- FazliKhani H, Fossen H, Gawthorpe R L, Faleide J I, Bell R E. 2017. Basement structure and its influence on the structural configuration of the northern North Sea rift[J]. *Tectonics*, 36(6): 1151-1177.
- Finch E, Gawthorpe R. 2017. Growth and interaction of normal faults and fault network evolution in rifts: insights from three-dimensional discrete element modelling[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 439(1): 219-248.
- Glerum A, Brune S, Stamps D S, Strecker M R. 2020. Victoria continental microplate dynamics controlled by the lithospheric strength distribution of the East African Rift[J]. *Nature Communications*, 11(1): 1-15.
- Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. *Ore geology reviews*, 18(1-2): 1-75.
- Hardy S, Finch E. 2005. Discrete-element modelling of detachment folding[J]. *Basin Research*, 17(4): 507-520.
- Henstra G A, Kristensen T B, Rotevatn A, Gawthorpe R L. 2019. How do pre-existing normal faults influence rift geometry? A comparison of adjacent basins with contrasting underlying structure on the Lofoten Margin, Norway[J]. *Basin Research*, 31(6): 1083-1097.
- Heilman E, Kolawole F, Atekwana E A, Mayle M. 2019. Controls of basement fabric on the linkage of rift segments[J]. *Tectonics*, 38(4): 1337-1366.
- Hodgson I, Illsley-Kemp F, Gallacher R J, Keir D, Ebinger C J, Mtelela K. 2017. Crustal structure at a young continental rift: A receiver function study from the Tanganyika Rift[J]. *Tectonics*, 36(12): 2806-2822.
- Hodge M, Fagereng Å, Biggs J, Mdala H. 2018. Controls on early-rift geometry: New perspectives from the Bilila-Mtakataka Fault, Malawi[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(9): 3896-3905.
- Holdsworth R E, Stewart M, Imber J, Strachan R A. 2001. The structure and rheological evolution of reactivated continental fault zones: a review and case study[J].

- Geological Society, London, Special Publications, 184(1): 115-137.
- Katumwehe A B, Abdelsalam M G, Atekwana E A. 2015. The role of pre-existing Precambrian structures in rift evolution: The Albertine and Rhino grabens, Uganda[J]. *Tectonophysics*, 646: 117-129.
- Krabbendam M, Barr T D. 2000. Proterozoic orogens and the break-up of Gondwana: why did some orogens not rift?[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 31(1): 35-49.
- Kolawole F, Atekwana E A, Laó - Dávila D A, et al. 2018. Active deformation of Malawi rift's north basin Hinge zone modulated by reactivation of preexisting Precambrian Shear zone fabric[J]. *Tectonics*, 37(3): 683-704.
- Kolawole F, Firkins M C, Al Wahaibi T S, Abdelsalam M G, Chindandali P R, Salima J. 2021a. Rift interaction zones and the stages of rift linkage in active segmented continental rift systems[J]. *Basin Research*, 33(6): 2984-3020.
- Kolawole F, Phillips T B, Atekwana E A, Jackson C A L. 2021b. Structural inheritance controls strain distribution during early continental rifting, Rukwa rift[J]. *Frontiers in Earth Science*, 9: 707869.
- Kirkpatrick J D, Bezerra F H R, Shipton Z K, Do Nascimento A F, Pytharouli S I, Lunn R J, Soden A M. 2013. Scale-dependent influence of pre-existing basement shear zones on rift faulting: a case study from NE Brazil[J]. *Journal of the Geological Society*, 170(2): 237-247.
- Lemna O S, Stephenson R, Cornwell D G. 2019. The role of pre-existing Precambrian structures in the development of Rukwa Rift Basin, southwest Tanzania[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 150: 607-625.
- Li C S, Yin H W, Wu C, Zhang Y C, Zhang J X, Wu Z Y, Wang W, Jia D, Guan S W, Ren R. 2021. Calibration of the discrete element method and modeling of shortening experiments[J]. *Frontiers in Earth Science*, 9: 636512.
- Lovecchio J P, Rohais S, Joseph P, Bolatti N D, Kress P R, Gerster R, Ramos V A. 2018. Multistage rifting evolution of the Colorado basin (offshore Argentina): Evidence for extensional settings prior to the South Atlantic opening[J]. *Terra Nova*, 30(5): 359-368.
- Lyon P J, Boulton P J, Hillis R R, Bierbrauer K. 2007. Basement controls on fault development in the Penola Trough, Otway Basin, and implications for fault-bounded hydrocarbon traps[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 54(5): 675-689.
- Maestrelli D, Montanari D, Corti G, Del Ventisette C, Moratti G, Bonini M. 2020. Exploring the interactions between rift propagation and inherited crustal fabrics through experimental modeling[J]. *Tectonics*, 39(12): e2020TC006211.
- Maestrelli D, Brune S, Corti G, Keir D, Muluneh A A, Sani F. 2022. Analog and Numerical Modeling of Rift-Rift-Rift Triple Junctions[J]. *Tectonics*, 41(10): e2022TC007491.
- Maestrelli D, Sani F, Keir D, Rosa A L, Muluneh A A, Brune S, Corti G. 2024. Reconciling plate motion and faulting at a rift-rift-rift triple junction[J]. *Geology*, 52(5): 362-366.
- McConnell R B. 1972. Geological development of the rift system of eastern Africa[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 83(9): 2549-2572.
- McCaffrey K J W. 1997. Controls on reactivation of a major fault zone: the Fair Head-Clew Bay line in Ireland[J]. *Journal of the Geological Society*, 154(1): 129-133.
- Morley C K. 1995. Developments in the structural geology of rifts over the last decade and their impact on hydrocarbon exploration[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 80(1): 1-32.
- Morley C K. 1999a. Geoscience of rift systems—evolution of East Africa[M]. *American Association of Petroleum Geologists*.
- Morley C K. 1999b. How successful are analogue models in addressing the influence of pre-existing fabrics on rift structure?[J]. *Journal of Structural Geology*, 21(8-9): 1267-1274.
- Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, Pongwapee S, Kornawan A, Wonganan N. 2004. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand[J]. *Journal of Structural Geology*, 26(10): 1803-1829.
- Morley C K. 2010. Stress re-orientation along zones of weak fabrics in rifts: An explanation for pure extension in 'oblique' rift segments?[J]. *Earth and Planetary Science*

- Letters, 297(3-4): 667-673.
- 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.
- Muirhead J D, Kattenhorn S A. 2018. Activation of preexisting transverse structures in an evolving magmatic rift in East Africa[J]. *Journal of Structural Geology*, 106: 1-18.
- Osagiede E E, Rotevatn A, Gawthorpe R, Kristensen T B, Jackson C A L, Marsh N. 2020. Pre-existing intra-basement shear zones influence growth and geometry of non-colinear normal faults, western Utsira High-Heimdal Terrace, North Sea[J]. *Journal of Structural Geology*, 130: 103908.
- Osagiede E E, Rosenau M, Rotevatn A, Gawthorpe R, Jackson C A L, Rudolf M. 2021. Influence of zones of pre-existing crustal weakness on strain localization and partitioning during rifting: Insights from analog modeling using high - resolution 3D digital image correlation[J]. *Tectonics*, 40(10): e2021TC006970.
- Peace A, McCaffrey K, Imber J, van Hunen J, Hobbs R, Wilson R. 2018. The role of pre-existing structures during rifting, continental breakup and transform system development, offshore West Greenland[J]. *Basin Research*, 30(3): 373-394.
- Phillips T B, Jackson C A L, Bell R E, Duffy O B, Fossen H. 2016. Reactivation of intrabasement structures during rifting: A case study from offshore southern Norway[J]. *Journal of Structural Geology*, 91: 54-73.
- Phillips T B, McCaffrey K J W. 2019. Terrane boundary reactivation, barriers to lateral fault propagation and reactivated fabrics: Rifting across the median batholith zone, great South Basin, New Zealand[J]. *Tectonics*, 38(11): 4027-4053.
- Philippon M, Willingshofer E, Sokoutis D, Corti G, Sani F, Bonini M, Cloetingh S. 2015. Slip re-orientation in oblique rifts[J]. *Geology*, 43(2): 147-150.
- Ritsema J, Heijst H J, Woodhouse J H. 1999. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland[J]. *Science*, 286(5446): 1925-1928.
- Rajaonarison T A, Stamps D S, Naliboff J, Nyblade A, Njini E A. 2023. A Geodynamic Investigation of Plume - Lithosphere Interactions Beneath the East African Rift[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(4): e2022JB025800.
- Riller U, Clark M D, Daxberger H, Doman D, Lenauer I, Plath S, Santimano T. 2017. Fault-slip inversions: Their importance in terms of strain, heterogeneity, and kinematics of brittle deformation[J]. *Journal of Structural Geology*, 101: 80-95.
- Samsu A, Cruden A R, Mickelthwaite S, Grose L, Vollgger SA. 2020. Scale matters: the influence of structural inheritance on fracture patterns[J]. *Journal of Structural Geology*, 130: 103896.
- Samsu A, Mickelthwaite S, Williams J N, Fagereng Å, Cruden A R. 2023. Structural inheritance in amagmatic rift basins: Manifestations and mechanisms for how pre-existing structures influence rift-related faults[J]. *Earth-Science Reviews*, 246: 104568.
- Schiffer C, Doré A, Foulger G, Franke D, Geoffroy L, Gernigon L, Holdsworth B, Kuszniir N, Lundin E, McCaffrey K, Peace A, Petersen K, Phillips T, Stephenson R, Stoker M, Welford K. 2020. Structural inheritance in the North Atlantic[J]. *Earth-Science Reviews*, 206: 102975.
- Schumacher M E. 2002. Upper Rhine Graben: role of preexisting structures during rift evolution[J]. *Tectonics*, 21(1): 6-16-17.
- Shaban S N, Kolawole F, Scholz C A. 2023. The deep basin and underlying basement structure of the Tanganyika Rift[J]. *Tectonics*, 42(7): e2022TC007726.
- Sibson R H. 1998. Brittle failure mode plots for compressional and extensional tectonic regimes[J]. *Journal of Structural Geology*, 20(5): 655-660.
- Smets B, Delvaux D, Ross K A, Poppe S, Kervyn M, d'Oreye N, Kervyn F. 2016. The role of inherited crustal structures and magmatism in the development of rift segments: Insights from the Kivu basin, western branch of the East African Rift[J]. *Tectonophysics*, 683: 62-76.
- Tamas A, Holdsworth R E, Underhill J R, Tamas D M, Dempsey E D, Hardman K, Bird A, McCarthy D, McCaffrey K J W, Selby D. 2022. New onshore insights into the role of structural inheritance during Mesozoic opening of the Inner Moray Firth Basin, Scotland[J]. *Journal of the Geological Society*, 179(2): jgs2021-066.

- Vasconcelos D L, Bezerra F H, Medeiros W E, de Castro D L, Clausen O R, Vital H, Oliveira R G. 2019. Basement fabric controls rift nucleation and postrift basin inversion in the continental margin of NE Brazil[J]. *Tectonophysics*, 751: 23-40.
- Versfelt J, Rosendahl B R. 1989. Relationships between pre-rift structure and rift architecture in Lakes Tanganyika and Malawi, East Africa[J]. *Nature*, 337(6205): 354-357.
- Wang L, Maestrelli D, Corti G, Zou Y Y, Shen C B. 2021. Normal fault reactivation during multiphase extension: Analogue models and application to the Turkana depression, East Africa[J]. *Tectonophysics*, 811: 228870.
- Walter B, Géraud Y, Hauteville Y, Diraison M, Raisson F. 2019. Fluid Circulations at Structural Intersections through the Toro - Bunyoro Fault System (Albertine Rift, Uganda): A Multidisciplinary Study of a Composite Hydrogeological System[J]. *Geofluids*, (1): 8161469.
- Walter B, Géraud Y, Bartier D, Kluska J M, Diraison M, Morlot C, Raisson F. 2018. Petrophysical and mineralogical evolution of weathered crystalline basement in western Uganda: Implications for fluid transfer and storage[J]. *AAPG Bulletin*, 102(6): 1035-1065.
- Wu L L, Mei L F, Paton D A, Liu Y S, Shen C B, Liu Z Q, Luo J, Min C Z, Li M H, Wen H. 2020. Basement structures have crucial influence on rift development: Insights from the Jiangnan Basin, Central China[J]. *Tectonics*, 39(2): e2019TC005671.
- Wedmore L N J, Biggs J, Williams J N, Fagereng Å, Dulanya Z, Mphepo F, Mdala H. 2020a. Active fault scarps in southern Malawi and their implications for the distribution of strain in incipient continental rifts[J]. *Tectonics*, 39(3): e2019TC005834.
- Wedmore L N J, Williams J N, Biggs J, Fagereng Å, Mphepo F, Dulanya Z, Willoughby J. 2020b. Structural inheritance and border fault reactivation during active early-stage rifting along the Thyolo fault, Malawi[J]. *Journal of Structural Geology*, 139: 104097.
- Whipp P S, Jackson C A L, Gawthorpe R L, Dreyer T, Quinn D. 2014. Normal fault array evolution above a reactivated rift fabric: a subsurface example from the northern Horda Platform, Norwegian North Sea[J]. *Basin Research*, 26(4): 523-549.
- Xue L, Moucha R, Kolawole F, Muirhead J D, Scholz C A. 2024. The influence of the strength of pre-existing weak zones on rift geometry and strain localization[J]. *Tectonophysics*, 890: 230472.
- Ye Q, Mei L F, Shi H S, Du J Y, Deng P, Shu Y, Camanni G. 2020. The influence of pre-existing basement faults on the Cenozoic structure and evolution of the proximal domain, northern South China Sea rifted margin[J]. *Tectonics*, 39(3): 2019TC005845.
- Yang G X, Yin H W, Gan J, Wang W, Zhu J T, Jia D, Xiong X F, Xu W Q. 2022. Explaining structural difference between the eastern and western zones of the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea: Insights from scaled physical models[J]. *Tectonics*, 41(2): e2021TC006899.
- Yang K J, Qi J F, Xu L W, Yu Y Q, Sun T, Shen F L, Peng L, Lv J, Zhao H T. 2024. Influence of preexisting structures on salt structures in the Kuqa Depression, Tarim Basin, Western China: Insights from seismic data and numerical simulations[J]. *Basin Research*, 36(1): e12850.
- Zou Y Y, Maestrelli D, Corti G, Del Ventisette C, Wang L, Shen C B. 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, Chenin P, Erratt D, Manatschal G, Schreurs G. 2021. Complex rift patterns, a result of interacting crustal and mantle weaknesses, or multiphase rifting? Insights from analogue models[J]. *Solid Earth*, 12(7): 1473-1495.
- Zwaan F, Chenin P, Erratt D, Manatschal G, Schreurs G. 2022. Competition between 3D structural inheritance and kinematics during rifting: Insights from analogue models[J]. *Basin Research*, 34(2): 824-854.
- Zwaan F, Schreurs G. 2023. Analog Models of Lithospheric-Scale Rifting Monitored in an X-Ray CT Scanner[J]. *Tectonics*, 42(3): e2022TC007291.