

DOI: 10.12401/j.nwg.2022023

不同拉伸方式和速度下的伸展构造砂箱 物理模拟实验研究

张欢¹, 陈应涛^{1,*}, 陶威², 陈涛³, 余文鑫¹, 艾卉卉¹

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 宿州学院
资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000; 3. 陕西地矿集团研究院有限公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 砂箱构造物理模拟实验是室内模拟自然界地质构造变形过程、成因机制以及动力学过程的一种高效方法。影响岩石变形的速度和力的作用方式等是影响伸展构造物理模拟实验的结果和构造形态的主要因素。基于此, 为探究砂箱物理模拟实验中拉伸速度和拉伸方式(力的作用方式)对伸展构造变形特征的影响, 笔者在已有研究基础上, 将高(0.01 mm/s)、中(0.001 mm/s)、低(0.000 5 mm/s)3种不同拉伸速度与单向拉伸、双向拉伸2种不同拉伸方式相结合, 设计6组实验进行对比研究。结果表明: ①拉伸速度对砂体的最终形态无显著影响, 但对断层的发育过程有一定的影响, 而拉伸方式对断层的发育过程和最终形态的影响均较为显著, 且断层形成前砂体速度会增大到一定高值, 并于断层形成后快速减小。②单向拉伸模型砂体最终均形成一个不对称的地堑, 双向拉伸模型砂体最终均形成一个典型的地堑。③不对称地堑通常形成于相对拉伸或差异拉伸的环境中, 相对拉伸侧发育形成一系列阶梯状正断层, 而相对固定侧发育一条断距较大的正断层, 且先存构造的位置往往决定了后期构造发育的初始位置。这一认识为伸展构造砂箱物理模拟实验中的模型设置和参数选取奠定了基础。

关键词: 构造物理模拟; 伸展构造; PIV; 几何形态; 应变

中图分类号: P554

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0327-10

Sandbox Physical Simulation Experiment of Extensional Structure under Different Stretching Modes and Speeds

ZHANG Huan¹, CHEN Yingtao^{1,*}, TAO Wei², CHEN Tao³, YU Wenxin¹, AI Huihui¹

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, Anhui, China; 3. Regional Geological Survey Academe of Shaanxi Geology and Mining Group Co., Ltd., Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: Sandbox structural physics simulation experiment is an efficient method to simulate the deformation process, genesis mechanism and dynamic process of natural structural deformation in laboratory. Factors affect-

收稿日期: 2022-04-02; 修回日期: 2022-06-25; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“龙门山构造带南段中—新生代构造变形研究”(41602212), 中国博士后科学基金面上项目“龙门山南段前陆构造扩展带构造变形特征与变形过程研究”(2019M653694), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“龙门山南段前陆构造变形特征及其构造带演化响应研究”(2019JM-126)联合资助。

作者简介: 张欢(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事构造地质学研究。E-mail: zhxust1996@163.com。

* 通讯作者: 陈应涛(1984-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事区域地质与构造地质学研究。E-mail: chenyt@xust.edu.cn。

ing the rate of rock deformation and the mode of action of forces are the main factors affecting the results of physical simulation experiments of extensional tectonics and tectonic morphology. Based on this, in order to investigate the effects of tensile speed and tensile mode (mode of the stress action) on extensional structural deformation characteristics in sandbox physical simulation experiment. This article is based on existing research, three different stretching speeds of high (0.01 mm/s), medium (0.001 mm/s) and low (0.000 5 mm/s) are combined with two different stretching methods of unidirectional and bidirectional stretching, and six sets of experiments are designed for comparative study. The results show that: ① Tensile velocity has no significant effect on the final morphology of the sand body, but has a certain influence on the development process of the fault, while the influence of the tensile mode on both the development process and the final morphology of the fault is more significant, and the velocity of the sand body increases to a certain high value before the formation of the fault and decreases rapidly after the formation of the fault. ② The sand body of the unidirectional stretching model eventually forms an asymmetric graben tectonic feature. The sand bodies of the two-way stretching model eventually form a typical graben tectonic feature. ③ Asymmetric graben structures are usually formed in a relatively stretched or differentially stretched environment, with a series of stepwise positive faults on the relatively stretched side and a large positive fault on the relatively fixed side, and the location of the pre-existing structure often determines the initial location of the later structure development. This understanding lays the foundation for the model setting and parameter selection in sandbox analogue modeling of the extensional structure.

Keywords: structural physical simulation; extensional structure; PIV; geometrical morphology; stress-strain

砂箱物理模拟实验是一种研究地壳浅层构造变形行之有效的手段(邓宾等, 2016)。与传统方法相比, 砂箱物理模拟实验具有短时间、直观、“无理有效”等优点, 对构造变形机制和动力学演化过程的反演具有重要意义(陈竹新等, 2019)。自 1815 年 James Hall 利用黏土和布料进行的相邻地块水平挤压变形机制研究以来, 砂箱物理模拟实验技术得到了十足发展, 理论体系日趋完善(赵仕俊等, 2005; 邓宾等, 2016; Hagke et al., 2019; 谢玉洪, 2021)。近年来粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)引入, 推动了砂箱物理模拟实验的技术创新。PIV 可对地质构造物理模拟进行实时监测, 并计算出各阶段模型剖面上的运动速率、切应变率、涡度变化等, 从而对构造运动过程及变形机制进行定量研究, 充分发挥砂箱实验的优势(Fan et al., 2020)。目前, 砂箱物理模拟实验被广泛应用于石油地质学、构造地质学等研究中(Toscani et al., 2014; 赖冬, 2019; 罗强等, 2020)。

当前构造物理模型主要以挤压体制下的褶皱冲断带等生长变形机制为主, 并取得了大量的研究成果(Erdős et al., 2014; 邓宾等, 2016; Yan et al., 2016; Deng et al., 2018; 潘文华, 2020; Deng et al., 2021), 而对伸展体制下构造物理模型的研究和应用相对甚少。近年来, 虽然有一些伸展构造砂箱物理模拟实验逐渐在拓

展和尝试(陈兴鹏, 2017; 漆家福, 2019; 胡林等, 2021), 但影响岩石变形的时间和应力作用方式对伸展构造物理模拟实验的变形过程和结果是如何影响的, 尚无专门研究和分析。由于时间因素对于构造物理模拟实验的影响主要体现在拉伸速度, 笔者在不同拉伸速度和不同拉伸方式的条件下进行伸展构造砂箱物理模拟实验, 并对其结果进行对比分析, 探索时间和应力作用方式对伸展构造物理模拟实验的影响, 以期为后续伸展构造的模型设置和参数选取提供理论依据。

1 砂箱实验模型设计

1.1 实验参数选取

时间因素对岩石变形具有重要的影响, 主要体现在应变速率, 特别是长期应力作用下, 即使应力小于常温常压下短期试验的屈服极限, 岩石亦会发生永久变形。在砂箱物理模拟实验中, 拉伸距离相同的情况下, 时间对岩石变形的影响主要体现在拉伸速度上。因此拉伸速度是影响砂箱物理模拟实验中砂箱模型应变和几何学特征的主要因素之一, 而不同拉伸速度影响下砂箱物理模拟实验模型的几何学特征及应变大小是实验模拟基于相似性原理条件下首要考虑的参数。全球定位系统工作表明, 地质体运动的速度并

不相同,但通常都在 0.5~1.5 mm/a(比利牛斯山脉)到 50~80 mm/a(台湾地区)之间,而在实验过程中一般将速度按照 10^{-5} 的比例进行缩放(Yu et al., 1997; Hatzfeld et al., 2010; Asensio et al., 2012; Deng et al., 2018)以开展实验。根据缩放比例和前人研究结果,本次实验设置高速(0.01 mm/s)、中速(0.001 mm/s)和低速(0.000 5 mm/s)3组速率,用以研究不同拉伸速度对构造变形特征的影响。

研究表明在实际伸展构造运动过程中,单轴应力状态下,一对拉应力其大小通常具有一定的差异,导致伸展构造作用下形成的构造变形具有差异性分布的特点,特别是在一侧应力远远大于另一侧应力时,构造变形往往最先形成在靠近应力较大一侧(瞿伟等, 2017),拉应力的作用方式和相对大小则影响了伸展构造的变形特征。在砂箱物理模拟实验中,拉伸速度恒定意味着所施加的应力大小是恒定的,拉伸方式不同则反映了应力作用方式的差异。因此,笔者分别采用单向、双向2种不同的拉伸方式和高、中、低3组不同的拉伸速度来实现应力作用方式和速度大小对伸展构造变形影响的研究。为了精细化认识速度和拉伸方式的影响和作用,每组实验只设定一个变量,共设置6组实验模型。

1.2 实验模型及其材料

本次实验是在西安科技大学陕西省煤炭绿色开

发地质保障重点实验室煤田地质构造物理模拟平台上完成,该平台是基于地质构造过程的自相似性和“无理有效性”,通过控制运动速度或力的作用方式对实验模型进行变形实验,模拟不同尺度多种应力场作用下的地质构造变形过程并反演其地质成因,可实现最低速度达 0.000 1 mm/s 步长低速率下挤压、拉伸、走滑、底劈等物理模拟实验。

实验所建立的初始模型箱由有机玻璃板搭建而成,铺设砂体长为 400 mm,宽为 470 mm,高为 30 mm,长度缩放比例约为 3×10^{-5} ,分别使用红、蓝、绿染色砂铺设厚度约 1 mm 的标志层将砂体均分为 3 层(图 1)。砂体底部铺设一条没有弹性的牵引布,借助于牵引布与砂体之间的摩擦力来实现砂体的拉伸,牵引布与两侧拉伸侧板通过螺栓进行连接。由于牵引布无延展性,为了满足足够的拉伸长度,在模型箱底板上开口将过长的牵引布垂于砂箱之下,使牵引布可以在实验过程中,随着拉伸侧挡板的运动而改变牵引布与砂体接触部分的长度,从而实现拉伸侧砂体的均匀拉伸。实验采用 100 目的干燥石英砂作为变形材料,其密度为 1.3 g/cm^3 ,球度适中,分选较好;经实验测试其内摩擦角约为 41° ,内摩擦系数为 0.89,内聚力约为 40 Pa。前人研究表明,该类石英砂能够模拟地壳浅表层次的脆性变形,被广泛地应用于模拟研究中(Lohmann, 2003; Ahmad et al., 2014; Reber et al., 2020)。

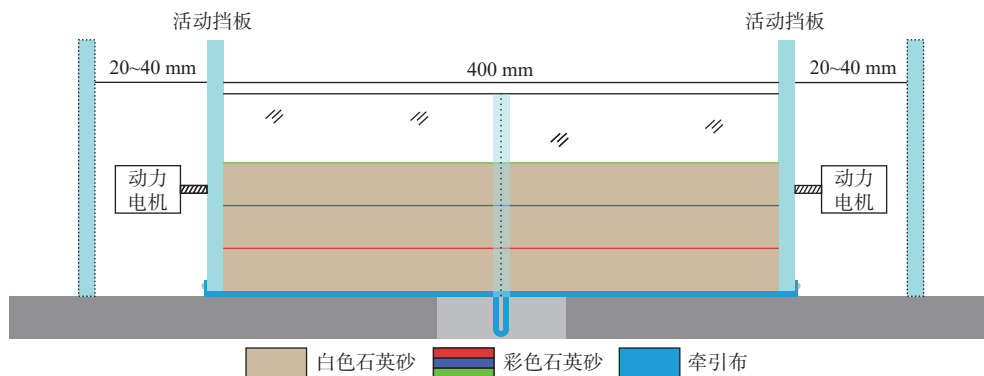


图 1 实验模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental model

2 实验结果

2.1 单向拉伸实验

单向拉伸实验(图 2)左侧为活动挡板,通过动力电机驱动,以牵引砂体底部的牵引布进行拉伸,右侧

挡板为固定侧,从而实现对砂体的单向拉伸。分别以高、中、低3组不同的速度为变量完成了3组实验,每组实验均以恒定速度实现总拉伸量 40 mm(拉伸率 10%)。

2.1.1 单向高速拉伸

实验以高速(0.01 mm/s)进行单向拉伸(图 2A),拉伸量达到 6 mm 时,砂体表面开始形成两条倾向相

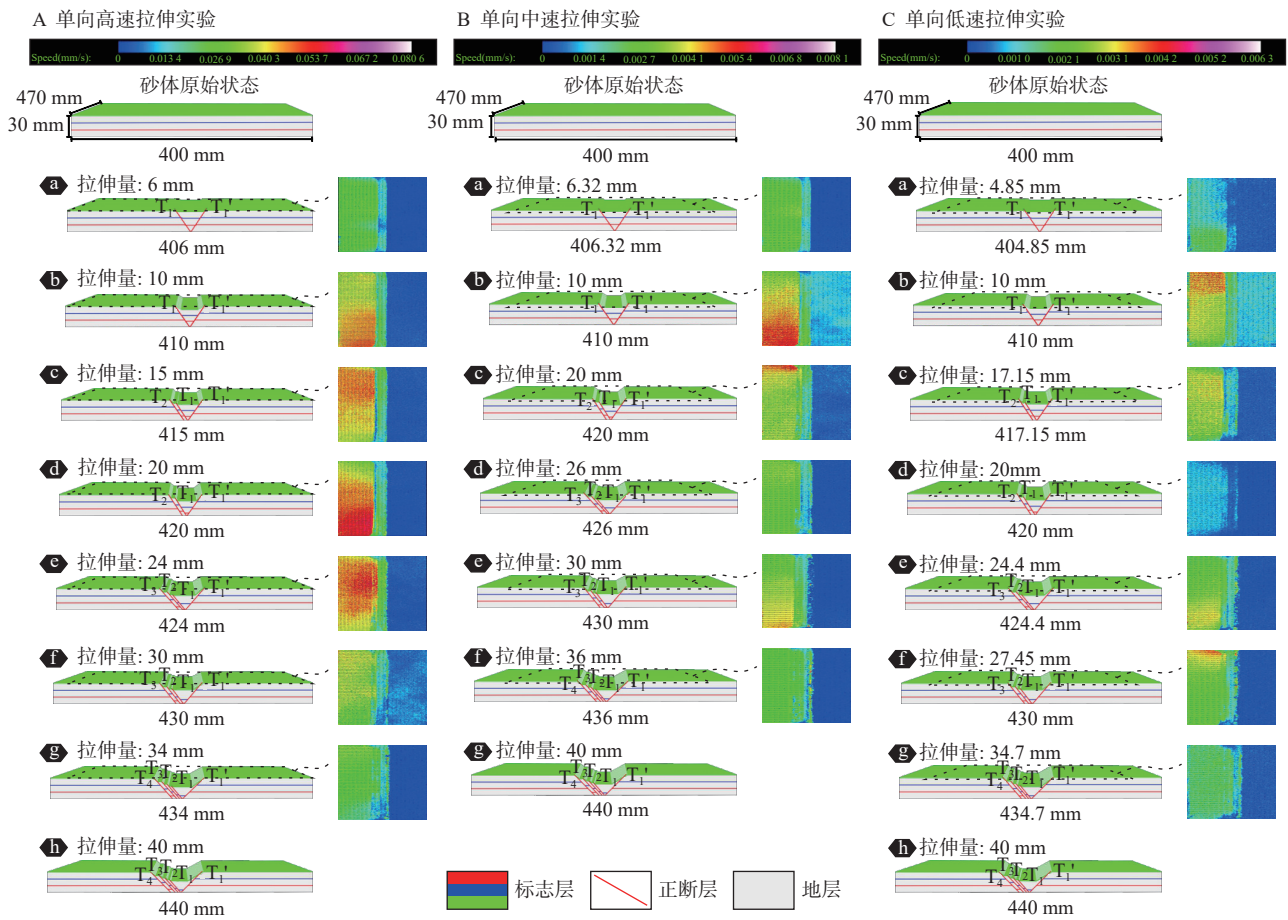


图2 单向拉伸实验过程图

Fig. 2 The process diagram of the uniaxial tensile experiment

向、倾角大致相等的正断层 T_1 和 T_1' ；拉伸量达到 10 mm 时， T_1 和 T_1' 持续发育，砂体中间共同盘部分下降；拉伸量达到 15 mm 时，地堑规模进一步发育，同时在 T_1 左侧形成一条与 T_1 倾向一致、倾角大致相等的正断层 T_2 ；拉伸量达到 20 mm 时， T_2 还在持续发育， T_1 、 T_1' 亦有一定程度的发育扩大；拉伸量达到 24 mm 时， T_2 左侧形成一条与 T_2 倾向相同、倾角大致相等的正断层 T_3 ；拉伸量达到 30 mm 时， T_3 已发育至一定规模，且还在持续发育中；拉伸量为 34 mm 时，在 T_3 左侧形成一条与 T_3 倾向一致、倾角大致相等的正断层 T_4 ；拉伸量为 40 mm 时，砂体各部分停止发育，构成一个不对称的地堑，未发育新的断层。

2.1.2 单向中速拉伸

中速 (0.001 mm/s) 单向拉伸的条件下 (图 2B)，拉伸量达到 6.32 mm 时，砂体表面开始形成两条倾向相向、倾角大致相等的正断层 T_1 和 T_1' ；拉伸量达到 10 mm 时， T_1 和 T_1' 持续发育扩大，砂体中间共同盘部分下降；拉伸量达到 20 mm 时，各断层断距不断发育

增大，同时在 T_1 左侧形成一条与 T_1 倾向相同、倾角大致相等的正断层 T_2 ；拉伸量达到 26 mm 时，此时于 T_2 左侧形成一条与 T_1 、 T_2 倾向相同、倾角大致相等的正断层 T_3 ；拉伸量达到 30 mm 时，各断层进一步发育扩大；拉伸量达到 36 mm 时，在 T_3 左侧形成一条与 T_1 、 T_2 、 T_3 倾向一致、倾角大致相等的正断层 T_4 ；拉伸量达到 40 mm 时，实验结束，砂体最终形成一个不对称的地堑，与高速拉伸实验最终形成的砂体形态极其相似。

2.1.3 单向低速拉伸

低速 (0.000 5 mm/s) 单向拉伸过程中 (图 2C)，拉伸量达到 4.85 mm 时，砂体表面开始出现两条倾向相向、倾角大致相等的正断层 T_1 和 T_1' ；拉伸量达到 10 mm 时， T_1 和 T_1' 持续发育，砂体中间共同盘部分下降；拉伸量达到 17.15 mm 时，此时在 T_1 左侧形成了一条与 T_1 倾向一致、倾角相仿的正断层 T_2 ；拉伸量达到 20 mm 时，砂体各断层进一步发育扩大， T_2 已发育至一定规模；拉伸量达到 24.4 mm 时，砂体各断层持续

发育, 同时在 T_2 右侧形成一条与 T_1 、 T_2 倾向相同、倾角大致相等的正断层 T_3 ; 拉伸量达到 27.45 mm 时, 砂体各断层持续发育扩大; 拉伸量达到 34.7 mm 时, 此时在 T_3 左侧形成一条与 T_1 、 T_2 、 T_3 倾向相反、倾角大致相等的正断层 T_4 ; 拉伸量达到 40 mm 时, 实验结束, 各断层均有不同程度的发育, 其中 T_2 规模最大, 砂体最终的变形特征与高速拉伸和中速拉伸所形成的砂体变形特征基本一致。

2.2 双向拉伸实验

双向拉伸实验(图 3)模型左、右两侧均为活动挡板, 通过左、右动力电机驱动, 以牵引砂体底部的牵引布进行拉伸, 从而实现对砂体的拉伸。在恒定速度下以双向拉伸的方式实现两侧拉伸量各 20 mm, 总拉伸量 40 mm(拉伸率 10%), 且分别以 3 组不同的速度为变量完成了 3 组实验。

2.2.1 双向高速拉伸

实验以高速(0.01 mm/s)进行双向拉伸(图 3A), 拉伸量达到 2 mm×3.5 mm 时, 砂体表面开始出现 2 条倾向相向、倾角大致相等的正断层 T_1 、 T_1' ; 拉伸量达到 2 mm×5 mm 时, T_1 、 T_1' 持续发育扩大, 砂体中间共

同盘部分下降; 拉伸量达到 2 mm×10 mm 时, T_1 、 T_1' 持续扩大, 断距约 8 mm; 拉伸量达到 2 mm×13 mm 时, T_1 、 T_1' 持续发育, 断距约 9.5 mm; 拉伸量达到 2 mm×15 mm 时, T_1 、 T_1' 继续发育扩大, 断距约 10 mm; 拉伸量达到 2 mm×20 mm 时, 断层停止发育, 此时断距约 12 mm, 砂体呈现为一个典型的地堑。

2.2.2 双向中速拉伸

中速(0.001 mm/s)双向拉伸的条件下(图 3B), 拉伸量达到 2 mm×3.4 mm 时, 砂体中形成 2 条倾向相向、倾角大致相等的正断层 T_1 、 T_1' ; 拉伸量达到 2 mm×5 mm 时, T_1 、 T_1' 持续发育, 砂体中间共同盘部分下降, 断距约 4 mm; 拉伸量达到 2 mm×8.75 mm 时, T_1 、 T_1' 持续扩大, 断距约 7.5 mm; 拉伸量达到 2 mm×13.85 mm 时, T_1 、 T_1' 持续发育, 断距约 10 mm; 拉伸量达到 2 mm×17.15 mm 时, T_1 、 T_1' 继续发育扩大, 断距约 12 mm; 拉伸量达到 2 mm×20 mm 时, 断层停止发育, 此时断距约 13 mm, 砂体亦呈现为一个典型的地堑。

2.2.3 双向低速拉伸

低速(0.000 5 mm/s)双向拉伸过程中(图 3C), 拉伸量达到 2 mm×4.24 mm 时, 砂体中开始出现 2 条倾

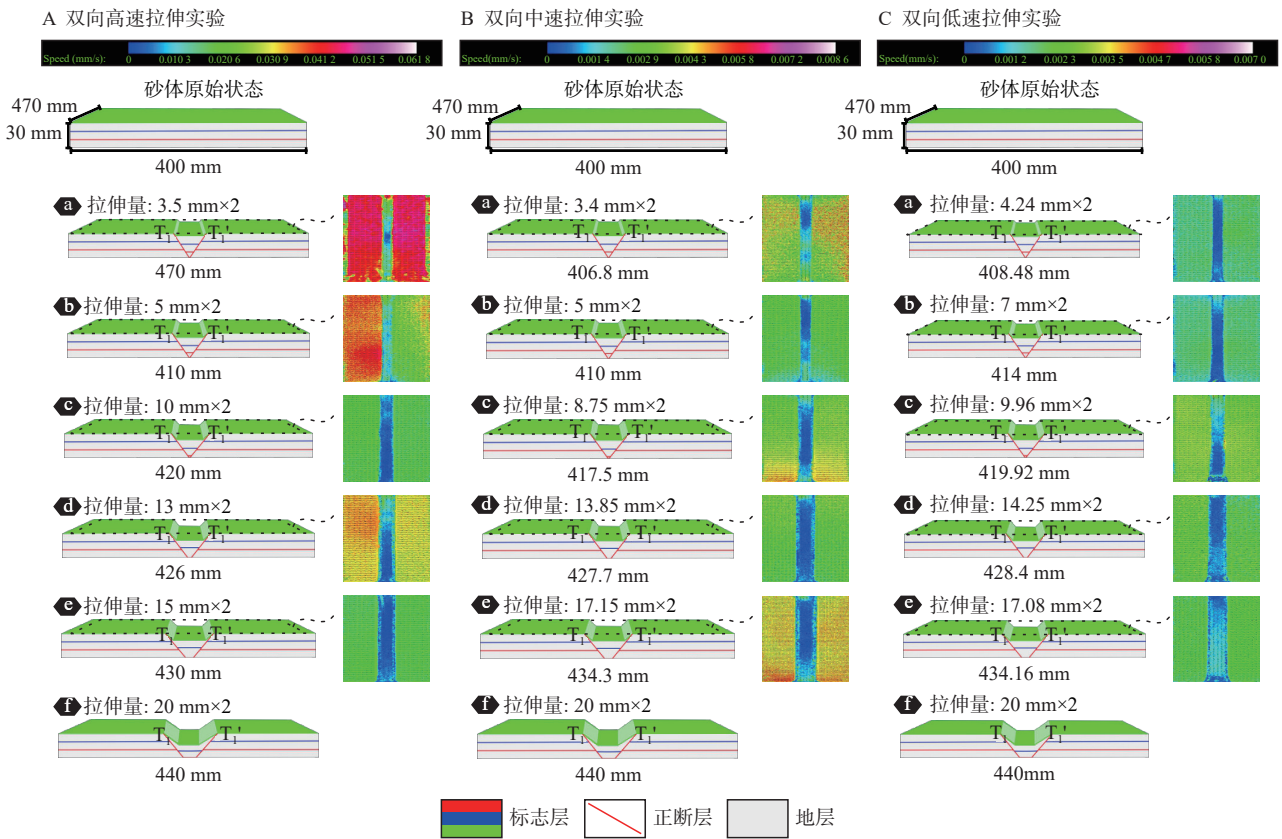


图 3 双向拉伸实验过程图

Fig. 3 The process diagram of the biaxial tensile experiment

向相向、倾角大致相等的正断层 T_1 、 T_1' ；拉伸量达到 $2\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 时， T_1 和 T_1' 持续发育，砂体中间共同盘部分下降，断距均为 4.5 mm ；拉伸量达到 $2\text{ mm} \times 9.96\text{ mm}$ 时， T_1 、 T_1' 持续扩大，断距均为 8 mm ；拉伸量达到 $2\text{ mm} \times 14.2\text{ mm}$ 时， T_1 、 T_1' 持续发育，断距均为 11 mm ；拉伸量达到 $2\text{ mm} \times 17.08\text{ mm}$ 时， T_1 、 T_1' 继续发育扩大，断距均为 12 mm ；拉伸量达到 $2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 时，断层停止发育，此时 T_1 和 T_1' 断距均为 15 mm ，砂体亦呈现为一个典型的地堑。

3 实验分析与讨论

实验过程及其结果表明不同条件下砂体所形成的断层个数及形成时间、砂体粒子运动速度及砂体最终形态均有所不同，为详细认识速度和拉伸方式对伸展构造的影响，分别对不同拉伸速度与不同拉伸方式

下的构造物理模拟实验进行对比分析。

3.1 相同拉伸速度不同拉伸方式对比

相同拉伸速度条件下，不同拉伸方式的模型最终形成的砂体形态差异明显。单向拉伸模型形成了 5 条正断层，其中拉伸侧形成了 4 条断层 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 ，这 4 条断层倾向一致、倾角大致相等，呈阶梯状，与固定侧所形成的断层 T_1' 倾向相向、倾角大致相等，砂体由表面平整的初始形态变形为一个由 5 条正断层共同组成的不对称地堑形态。双向拉伸模型共形成了 2 条正断层 T_1 和 T_1' ，两者倾向相向、倾角大致相等，砂体由表面平整的初始形态变形为一个典型的地堑。通过统计各组模型断层的形成时间(表 1)，对比分析可知，相同拉伸速度下，双向拉伸模型更早形成断层，但断层形成时所对应的拉伸量比单向拉伸模型更长。

表 1 各组模型断层形成时刻

Tab. 1 The fault formation time of each models

断层	单向高速拉伸		单向中速拉伸		单向低速拉伸		双向高速拉伸		双向中速拉伸		双向低速拉伸	
	拉伸量 (mm)	时间 (s)	拉伸量 (mm)	时间 (s)	拉伸量 (mm)	时间 (s)	拉伸量 (mm)	时间 (s)	拉伸量 (mm)	时间 (s)	拉伸量 (mm)	时间 (s)
T_1	6	600	6.32	6320	4.85	9700	7	350	6.8	3400	8.48	8480
T_1'	6	600	6.32	6320	4.85	9700	7	350	6.8	3400	8.48	8480
T_2	15	1500	20	20000	17.15	34300						
T_3	24	2400	26	26000	24.4	48800						
T_4	34	3400	36	36000	34.7	69400						

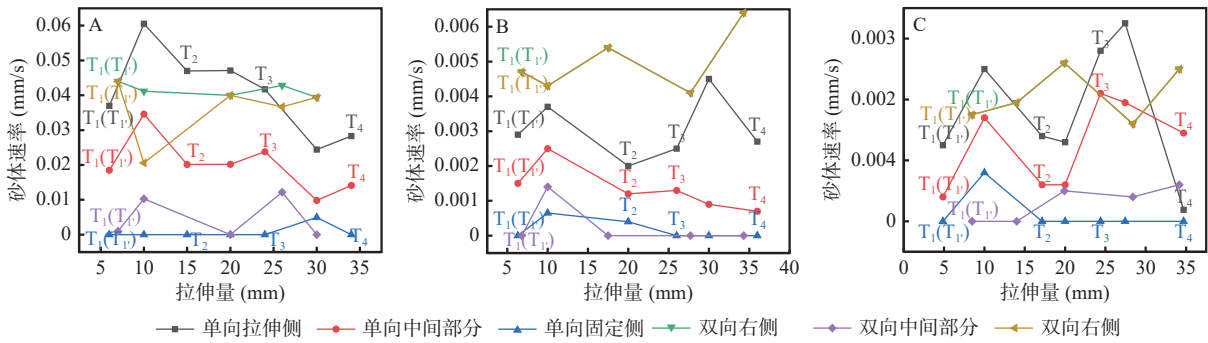
PIV 数据折线图(图 4)表明高速条件下，单向模型拉伸侧砂体速度与双向模型左、右两侧砂体速度相比，其值总是围绕 0.04 mm/s 变化(图 4A)，且双向模型左、右两侧砂体速度变化规律不同，但总体变化趋势一致。中间共同盘主要做垂向运动，水平方向近乎无位移或极小，仅断层面砂体具有一定速度，因此在断层发育过程中，中间部分砂体速度时有时无，未呈现出规律性变化。单向模型固定侧砂体由于未受到拉伸作用，除断层发育时刻，其余时间均无位移；中速模型与高速模型不同的是，单向模型拉伸侧砂体速度值围绕 0.003 mm/s 波动(图 4B)，而双向模型左、右两侧砂体速度值围绕 0.005 mm/s 波动，且左、右两侧速度同步变化，普遍高于相同拉伸量下的单向模型中拉伸侧砂体速度；低速条件下单向模型拉伸侧与双向拉伸模型左、右两侧砂体速度值均围绕 0.002 mm/s 波动(图 4C)，单向模型中间部分砂体速度大小波动较大，

且波动幅度远大于其与拉伸侧砂体速度的差值。在相同拉伸速度条件下，单向模型拉伸侧砂体速度大小差异不大，且中间部分砂体主要做垂向运动，仅在断层面上有一定的速度，而未受拉伸的固定侧全程近乎无速度。

综上所述，不同的拉伸方式对断层发育过程和砂体最终形态均有不同程度的影响。在相同拉伸速度的条件下，双向模型更早形成断层，但断层形成时所对应的拉伸量比单向模型更长，单向模型砂体最终均形成了一个不对称的地堑，而双向模型砂体最终均形成了一个典型的地堑。同时，相同速度的模型受拉伸一侧砂体速度大小差异不大，中间部分砂体主要做垂向运动，仅在断层面上有一定的速度，而未受拉伸的固定侧全程近乎无位移。

3.2 相同拉伸方式不同拉伸速度对比

单向拉伸条件下不同速度的模型均形成 5 条正



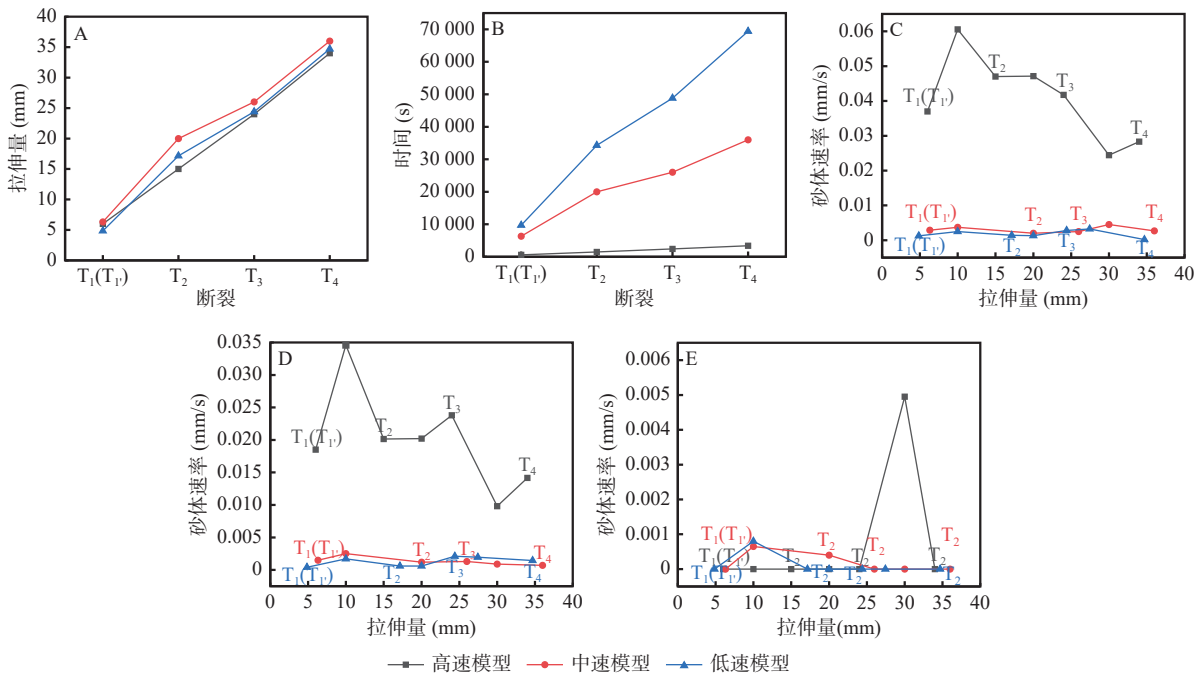
A.高速拉伸模型; B.中速拉伸模型; C.低速拉伸模型

图 4 相同拉伸速度对比分析图

Fig. 4 Comparison analysis diagram of the same tensile speed

断层,其中 4 条断层位于拉伸侧,倾向指向固定侧,倾角相等;另一条断层位于固定侧,其倾向与拉伸侧断层相反,倾角大致相等,且这 3 组模型砂体最终均变形为一个不对称的地堑。单向拉伸实验中各断层形成时刻对比显示(图 5A、图 5B),高速模型中断层形成时间对应拉伸量和断层形成个数呈一定的线性关系,拉伸量每增加约 9 mm 会形成一条新断层。对比

可知,这种线性关系并未在中速和低速模型中出现,如高速模型中 T_1 和 T_1' 断层形成时拉伸量(6 mm)大于低速模型(4.85 mm)但小于中速模型(6.32 mm),但高速模型中的断层 T_2 、 T_3 和 T_4 形成时对应的拉伸量(15 mm、24 mm、34 mm)小于低速模型(17.15 mm、24.4 mm、34.7 mm),更小于中速模型(20 mm、26 mm、36 mm),并未呈现出很好的线性关系。



A~B. 断层形成时刻图; C.拉伸侧砂体; D.中间部分砂体; E.固定侧砂体

图 5 单向拉伸模型对比分析图

Fig. 5 Comparison and analysis diagram of unidirectional tensile model

PIV 监测结果显示:在单向拉伸过程中,高、中、低速模型(图 5C~图 5E)中同一时刻的各砂体速度比值总是在 10 : 1 : 0.5 波动,与其拉伸速度比值一致,

表明拉伸侧的砂体速度大小一定程度上受拉伸速度控制。由于单向拉伸模型固定侧没有受到拉伸作用,固定侧砂体全程近乎无位移,但在断层发育过程中,

由于断层面的不断发育,中间部分砂体速度时有时无,没有明显规律。

双向拉伸实验中,不同拉伸速度的模型均只形成了2条正断层 T_1 和 T_1' , 分别沿拉伸方向对称分布于两侧,断面相向倾斜,倾角相等,共同构成了一个典型的对称地堑。断层形成的时间统计(表1)表明,各组实验中 T_1 和 T_1' 的形成时间及其对应的拉伸量相等,即两者同时形成。在高速模型中 T_1 和 T_1' 形成时对应拉伸量为 7 mm, 时间为 350 s, 相较于中速模型的

6.8 mm、3 400 s 和低速模型的 8.48 mm、4 240 s, 低速模型形成断层时对应的拉伸量最长, 高速拉伸模型次之, 中速拉伸模型最短, 且拉伸速度越大的模型, 形成断层所用时间越短。因此, 相同拉伸方式下, 拉伸速度越大, 砂体形成断层越早。同时, 双向拉伸与单向拉伸相似的是, 高、中、低 3 种速度拉伸模型(图6)中对应部分的砂体速度比值约为 10 : 1 : 0.5, 与拉伸速度比值一致, 这一现象表明拉伸速度在一定程度上决定了受拉伸侧的砂体粒子运动速度大小。

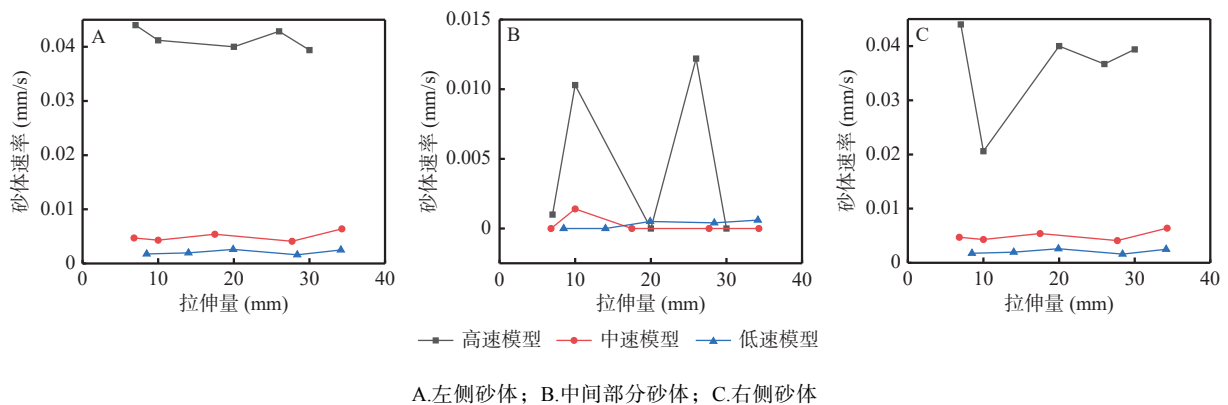


图6 双向拉伸模型对比分析图

Fig. 6 Comparison and analysis diagram of bidirectional tensile model

此外,在拉伸过程中,PIV监测结果(图5、图6)显示,新的断层形成时,模型各部分砂体速度均达到一定高值拐点,即在断层形成前后,砂体速度会发生一定的突变,表明在断层形成前,砂体中的应力达到一定高值,然后应力短时间内快速释放,从而沿薄弱带发生断裂形成断层,这与地壳中应力集中断层突破的特征相似。

因此,在相同拉伸方式下,不同的拉伸速度在一定程度上影响了断层的发育过程,但对模型最终所形成的砂体形态没有影响。不同的拉伸速度决定了模型中受拉伸侧砂体的速度大小,且在断层形成前,砂体速度会达到一定高值拐点,并在断层形成后快速减小。

3.3 伸展构造机制解释的启示

6组实验结果(图2、图3)表明砂体模型最终均形成了一个地堑,无论对称或者不对称,初始形成的2组倾向相向的断层均交汇于砂箱底部牵引布下垂缝隙处,这一现象表明先存的牵引布下垂缝隙对实验过程中初始形成断层的位置具有决定性的作用。而这一牵引布下垂缝隙类似于地壳中先存的一条构造薄

弱带,上覆地层在拉伸作用下优先沿先存构造薄弱带发生断裂变形,并进一步扩张。这一现象进一步反映了地质过程中先存构造往往控制了后期构造发育的初始位置,一定程度上对伸展构造发育位置的解释具有一定的启示作用。

单向拉伸模型最终均形成了一个不对称的地堑,这种构造样式与山西地堑系忻定盆地发育的不对称地堑极为相似,研究表明(白鸾羲, 2021)忻定盆地内恒山一侧发育了一系列的阶梯状隐伏正断层,倾向指向盆地内部,而五台山一侧发育一条断距超4 km的正断层,倾向指向盆地内部,它们共同组成了一个不对称地堑。综合单向拉伸模拟实验过程与忻定盆地构造演化史(孟元库等, 2015; Yan et al., 2020)可知,该构造样式的形成为忻定盆地受喜山运动的远场效应影响,恒山一侧作为相对拉伸侧,受NW向拉伸应力作用,沿早期挤压环境下形成的薄弱带发生断裂,呈阶梯状发育了4条正断层,而五台山一侧作为相对固定侧,同时发育了一条正断层,但其断距等于恒山一侧所有断层断距的总和,这5条断层共同构成了一个不对称地堑。

综上所述,不对称地堑通常发育于一种相对拉伸或差异拉伸的环境中,相对拉伸侧发育多条正断层,并呈阶梯状分布,相对固定侧仅发育一条断距较大的正断层。同时,先存构造往往控制了后期构造发育的初始位置。

4 结论

(1)拉伸速度对砂体的最终形态无显著影响,但对断层的发育过程有一定的影响,而拉伸方式对断层的发育过程和最终形态的影响均较为显著,且断层形成前砂体速度会增大到一定高值,并于断层形成后快速减小。

(2)单向拉伸模型砂体最终均形成一个不对称的地堑,双向拉伸模型砂体最终均形成一个典型的地堑。

(3)不对称地堑通常于相对拉伸或差异拉伸的环境中形成,在相对拉伸侧形成一系列阶梯状正断层,在相对固定侧形成一条断距较大的正断层,且先存构造的位置往往控制了后期构造发育的初始位置。

参考文献(References):

白鸾羲.鄂尔多斯周缘上更新统角度不整合面的时代厘定及其构造意义[D].北京:中国地震局地质研究所,2021.

BAI Luanxi. Timing of angular unconformities in Upper Pleistocene around the Ordos Block and its tectonic significance: case studies in the Hetao Basin and Shanxi Graben system[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 2021.

陈兴鹏.伸展、走滑应力叠加、配比条件下构造变形特征的物理模拟实验研究[D].东营:中国石油大学(华东),2017.

CHEN Xingpeng. Structural Deformation Characteristic Analysis with Superposition and Ratios of Extensional and Strike-Slip Stress: Insights from Physical Analog Experiments[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2017.

陈竹新,雷永良,贾东,等.构造变形物理模拟与构造建模技术及应用[M].北京:科学出版社,2019.

CHEN Zhuxin, LEI Yongliang, JIA Dong, et al. Physical Analog and Structural Modeling Techniques and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2019.

邓宾,赵高平,万元博,等.褶皱冲断带构造砂箱物理模型研究进展[J].大地构造与成矿学,2016,40(03):446-464.

DENG Bin, ZHAO Gaoping, WAN Yuanbo, et al. A Review of Tectonic Sandbox Modeling of Fold-and-thrust Belt[J]. *Geotecton-*

icaet Metallogenia, 2016, 40(03): 446-464.

胡林,李才,金秋月,等.伸展背景下塑性地层对断裂发育特征影响的实验分析[J].地球科学,2021,46(05):1749-1757.

HU Lin, LI Cai, JIN Qiuyue, et al. Experimental Analysis on Influence of Plastic Formation on Characteristics of Fault Development under Extensional Stress[J]. *Earth Science*, 2021, 46(05): 1749-1757.

赖冬.莺歌海盆地底辟构造特征及其油气意义[D].成都:成都理工大学,2019.

LAI Dong. Geometry and kinematics of diapir and its implication in the Yinggehai Basin: insights from analogue experiments [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

罗强,何宇,黄家强,等.川西北前陆扩展砂箱物理模拟及其深层晚期扩展变形特征[J].石油实验地质,2020,42(06):1031-1040.

LUO Qiang, HE Yu, HUANG Jiaqiang, et al. Analogue experiments on the piggyback propagation in northwestern Sichuan and latest propagation in its deep[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(06): 1031-1040.

孟元库,汪新文,李波,等.华北克拉通中部沁水盆地热演化史与山西高原中新代岩石圈构造演化[J].西北地质,2015,48(02):159-168.

MENG Yuanku, WANG Xinwen, LI Bo, et al. Thermal evolution history of Qinshui basin in the central north China Craton and Mesozoic-cenozoic lithospheric tectonic evolution of Shanxi plateau[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(02): 159-168.

潘文华.双滑脱层褶皱-冲断带变形场演化规律的物理模拟研究[D].北京:中国石油大学(北京),2020.

PAN Wenhua. Study on the evolution law of deformation field of fold-thrust belt with double detachments: Insight from analogue modelling[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.

漆家福,吴景富,马兵山,等.南海北部珠江口盆地中段伸展构造模型及其动力学[J].地学前缘,2019,26(02):203-221.

QI Jiafu, WU Jingfu, MA Binshan, et al. The structural model and dynamics concerning middle section, Pearl River Mouth Basin in north margin of South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(02): 203-221.

瞿伟,王运生,徐超,等.渭河盆地构造应力场有限元数值模拟[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(12):1749-1755.

QU Wei, WANG Yunsheng, XU Chao, et al. Tectonic Stress Field of the Weihe Basin Using the Finite Element Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12):

- 1749–1755.
- 谢玉洪. 浅表走滑构造系统砂箱物理模拟研究进展[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(06): 1127–1145.
- XIE Yuhong. A Review on Analogue Modelling of Strike-slip Tectonics[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(06): 1127–1145.
- 赵仕俊, 赵锡奎, 杨少春. 地质构造物理模拟实验模型的相似分析[J]. *西北地质*, 2005, (04): 14–18.
- ZHAO Shijun, ZHAO Xikui, YANG Shaochun. Similar analysis of geological structure physical model[J]. *Northwestern Geology*, 2005, (04): 14–18.
- Ahmad M I, Dubey A K, Toscani G, et al. Kinematic evolution of thrusts wedge and erratic line length balancing: insights from deformed sandbox models[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2014, 103(1): 329–347.
- Asensio E, Khazaradze G, Echeverria A, et al. GPS studies of active deformation in the Pyrenees[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(2): 913–921.
- Deng Bin, Jiang Lei, Zhao Gaoping, et al. Insights into the velocity-dependent geometry and internal strain in accretionary wedges from analogue models[J]. *Geological Magazine*, 2018, 155(5): 1089–1104.
- Deng Bin, Koyi H, Fan Caiwei, et al. Modelling asymmetric deformation along a curved strike-slip basement-fault system[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2021, 110(1): 165–182.
- Erdős Z, Huisman R S, Van der Beek P, et al. Extensional inheritance and surface processes as controlling factors of mountain belt structure[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2014, 119(12): 9042–9061.
- Fan Xiaogen, Jia Dong, Yin Hongwei, et al. Analogue modeling of the northern Longmen Shan thrust belt (eastern margin of the Tibetan plateau) and strain analysis based on Particle Image Velocimetry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 198: 13.
- Hagke C V, Reber J, Philippon M. Cutting-Edge Analogue Modeling Techniques Applied to Study Earth Systems[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 265.
- Hatzfeld D, Molnar P. Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48: RG2005.
- Lohrmann J, Kukowski N, Adam J, et al. The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(10): 1691–1711.
- Reber J E, Cooke M L, Dooley T P. What model material to use? A Review on rock analogs for structural geology and tectonics[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103–107.
- Toscani G, Bonini L, Ahmad M I, et al. Opposite verging chains sharing the same foreland: Kinematics and interactions through analogue models (Central Po Plain, Italy)[J]. *Tectonophysics*, 2014, 633: 268–282.
- Yan D P, Xu Y B, Dong Z B, et al. Fault-related fold styles and progressions in fold-thrust belts: Insights from sandbox modeling[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2016, 121(3): 2087–2111.
- Yan J, Hu J, Gong W, et al. Late Cenozoic magnetostratigraphy of the Yuncheng Basin, central North China Craton and its tectonic implications[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(11): 7415–7428.
- Yu S B, Chen H Y, Kuo L C. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area[J]. *Tectonophysics*, 1997, 274(1–3): 41–59.