



## 《大地构造与成矿学》网络首发论文

- 题目: 湘鄂西褶皱带逆冲推覆的构造物理模拟  
作者: 龙康杰, 邱楠生, 腾格尔, 冯乾乾, 黄永辉, 吴健泽  
DOI: 10.16539/j.ddgzyckx.2025.00.043  
收稿日期: 2025-03-26  
网络首发日期: 2025-08-08  
引用格式: 龙康杰, 邱楠生, 腾格尔, 冯乾乾, 黄永辉, 吴健泽. 湘鄂西褶皱带逆冲推覆的构造物理模拟[J/OL]. 大地构造与成矿学.  
<https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2025.00.043>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.16539/j.ddgzyckx.2025.00.043

# 湘鄂西褶皱带逆冲推覆的构造物理模拟

龙康杰<sup>1,2</sup>, 邱楠生<sup>1,3\*</sup>, 腾格尔<sup>4\*</sup>, 冯乾乾<sup>3</sup>, 黄永辉<sup>1</sup>, 吴健泽<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京), 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 大庆油田有限责任公司成都勘探开发研究院, 四川 成都 610000; 3. 中国石油大学(北京) 碳中和示范性能源学院, 北京 102249; 4. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083)

**摘要:** 逆冲推覆带主要分布于前陆盆地和克拉通盆地边缘, 明确其构造演化的主控因素对理解盆地演化及指导油气勘探具有重要意义。以湘鄂西逆冲褶皱带为例, 自中生代以来, 该地区经历了由南东向北西方向的陆内递进变形, 燕山期的构造变形奠定了现今的构造格局, 其变形过程受到多套滑脱层及黄陵古隆起的共同控制。尽管许多学者对邻近的川东薄皮褶皱带的构造变形过程、形成时间和机制进行了广泛研究, 并取得了一定认识, 但对于湘鄂西厚皮褶皱带的变形过程、形成机制以及古隆起周缘是否存在白垩系前陆盆地沉积尚不明确。本文基于构造模拟实验分析了逆冲推覆带构造变形特征的主控因素, 结果表明, 滑脱层数量和先存古隆起形态是逆冲推覆带构造变形的关键控制因素。通过模拟褶皱的变形程度(包括幅度与长度)来表征应变的难易程度, 发现随着先存古隆起形态角度的减小, 应力在古隆起处的横向传递增强, 促使应变更易发生, 有利于断展褶皱的发育和逆冲褶皱的冲起; 同时, 随着滑脱层数量的增加, 纵弯褶皱作用显著增强, 应力得以更好地传递。当应力传递至古隆起时, 可形成背斜褶皱, 导致古隆起上覆地层增厚, 并引发前陆盆地变形, 从而形成白垩系盆地沉积。在秦岭-大别造山带与雪峰山陆内变形系统的双向挤压作用下, 黄陵古隆起周缘发生了前陆盆地变形, 造成了中-新生代差异性抬升。湘鄂西逆冲褶皱带的形成机制可归结为三叠系和寒武系滑脱层与低角度黄陵古隆起共同组成的阶梯状逆冲推覆带, 在挤压作用下发生的柔流褶皱作用。

**关键词:** 逆冲推覆带; 构造变形; 先存古隆起形态; 湘鄂西褶皱带; 物理模拟

中图分类号: P542 文献标志码: A

## 0 引言

逆冲推覆带是由逆冲断层及其上盘推覆体或逆冲席共同组成的构造带, 广泛分布于主动大陆边缘和克拉通挤压盆地边缘(Michal et al., 2005)。构造物理模拟作为构造地质学运动学研究的重要组成部分, 是解析逆冲推覆带力学特征的常用且有效手段。该方法通过匹配研究区的地质模型与力学参数, 正演逆冲推覆带的形成过程, 并分析其构造变形特征与形成机制(冯乾乾等, 2024)。众多国内外学者借助构造物理模拟实验(多为挤压系统), 揭示了逆冲褶皱-冲断带中多种潜在的变形控制因素, 包括滑脱层、应变速率、基底性质以及古隆起等(Costa and Vendeville, 2002; 周建勋等, 2009; 何文刚和周建勋, 2018; 吴航等, 2019; 贾金峰, 2023)。构造物理模拟能够对复杂的地质条件进行一定程度的简化, 从而大致揭示逆冲推覆带的构造变形过程。在研究逆冲褶皱带构造变形主控因素的过程中, 大多数学者对滑脱层开展了大量深入的研究, 而古隆起对逆冲褶皱带构造变形的影响则较少被探讨。目前, 关于挤压背景下含塑性层沉积盆地构造演化的古隆起及其幅度已有部分研究(Wang et al., 2016; Long et

---

收稿日期: 2025-03-26; 改回日期: 2025-04-30

项目资助: 国家自然科学基金地质联合基金项目(U2244208)、国家自然科学基金青年项目(42302138)和国家重点研发计划(2021YFB1507405)联合资助。

第一作者简介: 龙康杰(1999-), 硕士, 地质资源与地质工程专业。E-mail: longkangjie1upc@163.com

通信作者: 邱楠生(1968-), 博士, 教授, 研究方向为沉积盆地温压场重建与地热资源评价。E-mail: qiuunsh@cup.edu.cn

腾格尔(1967-), 博士, 高级工程师, 研究方向为地球化学及油气地质研究。E-mail: tenggeer@mail.cgs.gov.cn

al., 2021; 胡建宁等, 2023; 马德龙等, 2023), 但该因素对逆冲褶皱带构造变形的具体意义仍需进一步详细探讨。

许多学者对逆冲褶皱带的构造变形演化进行了深入研究。有学者指出, 单一滑脱层的深度及其盖层性质是主要控制因素, 并探讨了基底滑脱层在构造演化中的作用, 但也提到其他滑脱层的发育与分布特征(解国爱等, 2013)。部分学者则认为滑脱层的数量、深度、应变速率以及脆性层为主要控制因素, 当滑脱层较深时, 易形成大量紧密排列组合的隔槽式逆冲褶皱(刘重庆等, 2013; 张小琼等, 2015)。此外, 也有学者通过二维和三维物理模拟研究滑脱层结构变化对构造样式的控制作用, 提出厚的脆性层更有利于形成隔槽式逆冲褶皱, 而薄的脆性层则倾向于形成隔挡式逆冲褶皱, 且韧性层越薄越有利于隔槽式逆冲褶皱的发育(何文刚, 2018; 马文凯, 2021)。同时, 部分学者通过分析薄层、中层及厚层滑脱层的特性, 进一步探讨其在构造变形中的作用(莫涛等, 2024)。

少量学者普遍认为, 古隆起的存在对构造变形的发生具有促进作用, 并对逆冲推覆带的形成起到控制作用(Wang et al., 2016; 胡建宁等, 2023; 马德龙等, 2023)。随着古隆起幅度( $4.6^{\circ}\sim 5.7^{\circ}$ )的增加, 其对变形传播的影响逐渐增强(Long et al., 2021)。在湘鄂西逆冲褶皱带中, 黄陵古隆起以及中-下寒武统和中-下三叠统两套滑脱层对该地区构造演化起到了主导性的控制作用(Yan et al., 2009; Dong et al., 2015; 李英强等, 2020; Li et al., 2021; Liu et al., 2021)。然而, 在湘鄂西逆冲褶皱带的研究中, 较少将古隆起形态作为主控因素进行探讨。本文通过角度约束了古隆起的形态, 并在剖面物理模拟实验中设置了不同形态的古隆起, 包括高角度( $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )、中角度( $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ )和低角度( $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ )。前人对古隆起幅度( $4.6^{\circ}\sim 5.7^{\circ}$ )的研究在本文中归类为低角度范围, 但更高角度古隆起对构造变形的影响仍不明确。本研究中“先存古隆起形态”的设置以湘鄂西逆冲褶皱带发育的黄陵背斜为自然原型, 该背斜呈不对称椭圆状, 倾角约为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ (低角度)。模型形态与黄陵背斜的几何特征相似(王军等, 2010; Liu et al., 2015; 邓铭哲, 2018)。此外, 在黄陵古隆起周缘出露了一定规模的白垩系前陆盆地沉积(王德良等, 2018; 刘晓峰等, 2021; Long et al., 2025), 该盆地的形成可能受到古隆起的影响。然而, 这种影响是否导致湘鄂西褶皱带中-新生代差异性抬升(Long et al., 2025), 仍需进一步深入研究。

因此, 基于对前人研究成果的总结, 将滑脱层数量和古隆起形态(包括 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 为高角度、 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 为中角度以及 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 为低角度)作为逆冲推覆带的主要控制因素, 重点探讨滑脱层的数量及先存古隆起形态对逆冲褶皱带构造演化的影响, 并进一步分析其形成机制。

## 1 地质背景

湘鄂西逆冲褶皱带位于川东“侏罗山式”薄皮构造带与江南-雪峰山推覆带之间, 是中生代多套滑脱层主控的陆内逆冲推覆构造带。该逆冲褶皱带宽约 220 km, 走向 NEE-NE 向, 呈弧形展布, 由多个背斜与向斜相间排列构成“隔槽式”厚皮逆冲推覆带, 包括齐岳山复背斜带、利川复向斜带、建始复背斜带、花果坪复向斜带、宜都-鹤峰背斜带以及桑植-石门复向斜带等 6 个主要次级构造单元(图 1a)。湘鄂西逆冲褶皱带自晋宁运动之后经历了复杂的区域性构造活动, 在燕山期持续受到挤压变形, 这一阶段的构造变形奠定了现今的地形地貌格局。具体而言, 在晚古生代至三叠纪期间, 该区域处于伸展聚敛旋回阶段, 表现为统一的陆壳块体; 自印支运动之后, 开始转变为汇聚挤压的过程。在燕山期, 古太平洋板块俯冲于欧亚板块之下, 华南及南海北部与东海地块发生斜向碰撞和剪切造山作用, 使中国南方遭受了 SE-NW 方向的强烈挤压及岩浆活动等构造改造。湘鄂西逆冲褶皱带受秦岭-大别造山带与雪峰山陆内变形系统的双向挤压, 最终形成了现今的构造格局(Yan et al., 2003; 汤良杰等, 2007; 何登发等, 2011; Long et al., 2025)。

在逆冲褶皱的形成过程中, 滑脱层发挥了关键的控制作用。湘鄂西逆冲褶皱带主要发育了三套滑脱层(图 2), 分别为基底拆离层、中-下寒武统膏盐岩滑脱层以及中-下三叠统膏盐岩滑脱层(Yan et al., 2009; Dong et al., 2015; 李英强等, 2020; Li et al., 2021; Liu et al., 2021)。前人的地球物理研究成果表明, 中扬子地区的拆离面深度约为 7~8 km, 代表了中-新元古界绿片岩相与中-古元古界角闪岩相之间的转换界面, 而基底拆离面的初始深度为 14~16 km(约有 7~8 km 的剥蚀厚度)(丁道桂等, 2005; 张小琼等, 2015; Dong et al., 2015)。中-下寒武统滑脱层主要由牛蹄塘组页岩和高台组、龙王庙组膏盐岩组成, 厚度约为 500~1000 m; 中-下三叠统滑脱层主要包括嘉陵江组膏盐岩、泥岩以及雷口坡组页岩, 厚度约为 300~900 m(图 2)。关于黄陵古隆起的形成时间及其构造抬升过程, 许多学者通

过热年代学方法开展了研究(刘海军等, 2009; 沈传波等, 2009; 梅廉夫等, 2010; Xu et al., 2010; 施小斌等, 2013)。研究表明, 黄陵背斜形成于挤压应力场, 数据表明其快速抬升阶段跨越了早燕山期和晚燕山期。然而, 在进入晚燕山期伸展应力环境后(Li et al., 2014; Ji et al., 2014), 黄陵背斜的挤压应力已不复存在, 此时仅能反映岩体抬升的时间, 而非黄陵背斜的形成时间(王平等, 2012; 石红才和施小斌, 2014)。结合区域地层剥蚀特征及不整合面分布情况, 黄陵隆起在晚三叠世开始发育形成(Massoli et al., 2006; 邓铭哲, 2018)。因此, 本文将黄陵背斜设定为先存古隆起。

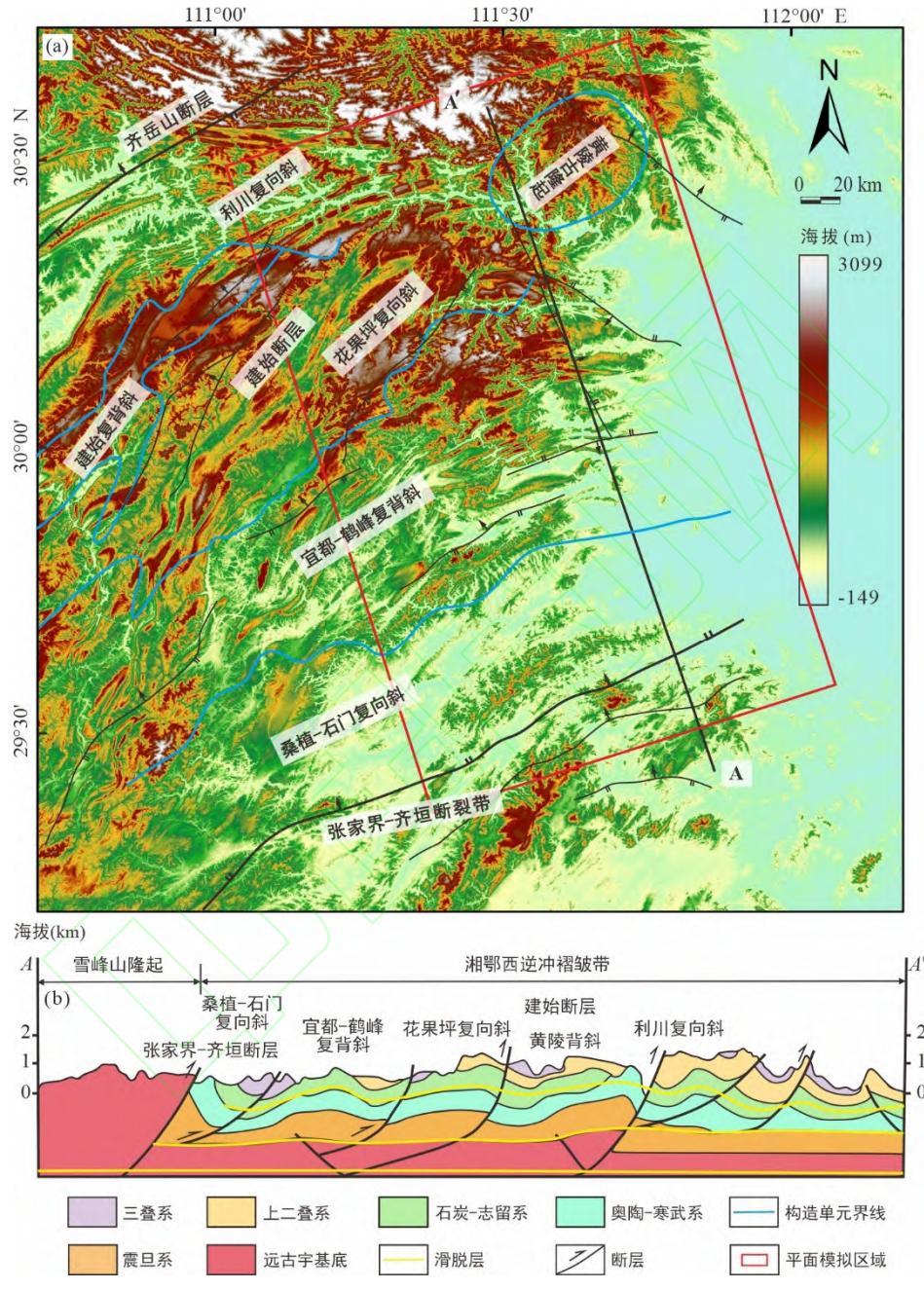


图 1 湘鄂西逆冲褶皱带地质简图(据冯乾乾等, 2024 修改)

Fig.1 Geological map of the western Hunan-Hubei thrust fold belt

平衡剖面恢复结果表明, 湘鄂西逆冲褶皱带整体缩短了约 110 km, 缩短速率为 1~2 mm/yr(Li et al., 2015; He et al., 2018)。通常情况下, 构造物理模拟中的平衡剖面恢复存在 10%~20% 的误差, 因此将剖面缩短量控制在 25%~30% 范围内。研究表明, 湘鄂西逆冲褶皱带的滑脱层主要分布于中-下三叠统膏盐岩和中-下寒武统膏盐岩滑脱层, 仅

在极少数地区发育志留系泥页岩滑脱层(Yan et al., 2009; Dong et al., 2015; 李英强等, 2020; Li et al., 2021; Liu et al., 2021)。基于此, 本次构造物理实验模拟中最多铺设两层滑脱层。选取湘鄂西逆冲褶皱带 SSE-NNW 方向的剖面 A-A'(图 1)开展了构造物理模拟实验, 剖面长度约为 360 km, 正演燕山期湘鄂西逆冲褶皱带在 SE-NW 方向挤压作用下剖面 A-A'的构造变形过程。

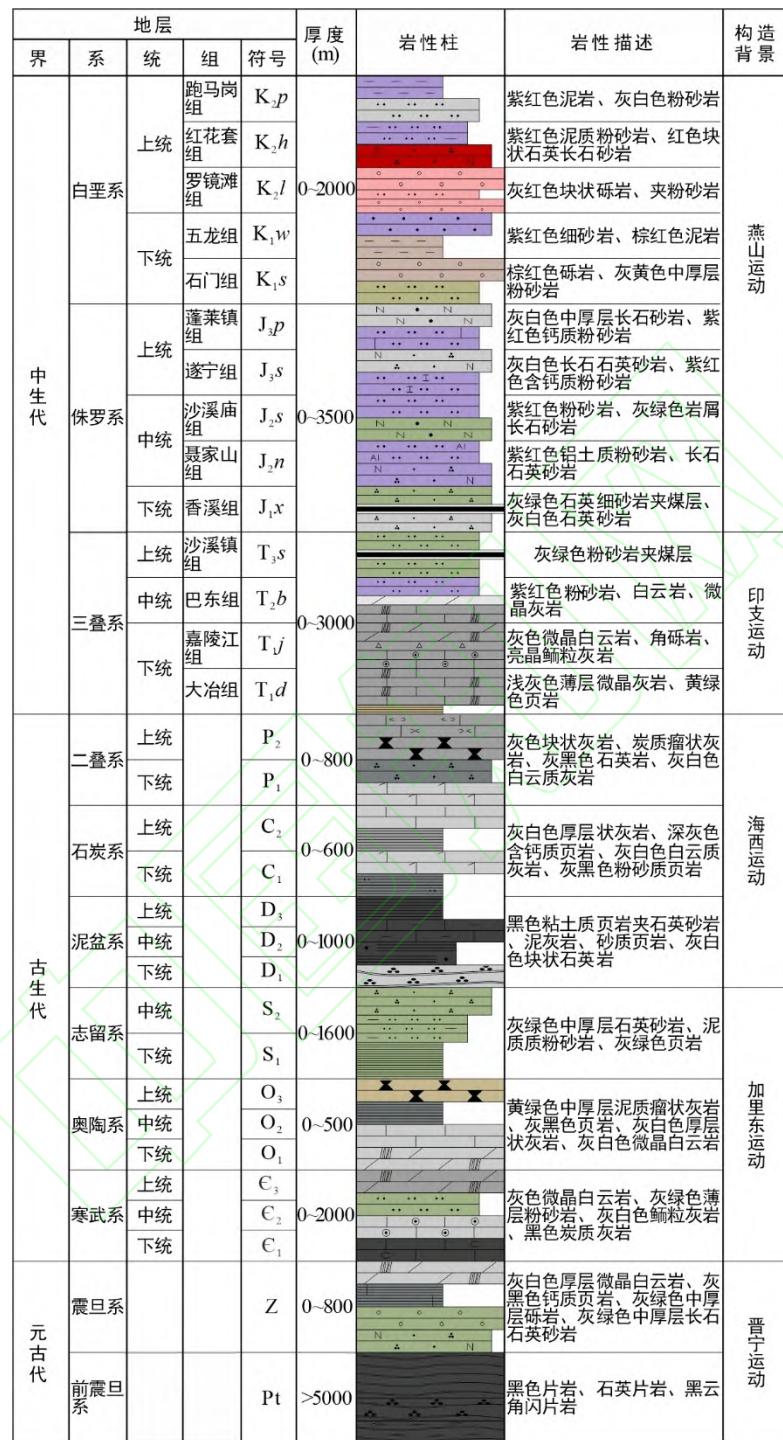


图 2 湘鄂西逆冲褶皱带综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the western Hunan-Hubei thrust fold belt

## 2 实验相似条件及模型设计

## 2.1 实验相似条件

剖面模拟在长 110 cm、宽 20 cm 的矩形砂箱中进行, 平面模拟则在长 80 cm、宽 40 cm 的砂箱中开展, 长度相似因子均为  $2.5 \times 10^{-6}$ , 即 1 cm 对应实际地质地形长度的 4 km。研究区滑脱层的厚度均未超过 1000 m, 依据长度相似比原则, 构造物理模拟实验中的滑脱层厚度将小于 3 mm, 本文设定滑脱层厚度为 2 mm。实验采用分子量为 200 万的硅树脂模拟滑脱层, 该材料在低应变速率下表现出牛顿流体特性, 是模拟蒸发岩或页岩等塑性变形的理想材料。其室温下的黏度为  $1.2 \times 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 密度为  $0.95 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。同时, 实验选用粒径为  $180\text{--}250 \mu\text{m}$  的微玻璃珠颗粒模拟脆性地层, 玻璃珠的粘聚力接近于零, 内摩擦角约为  $25^\circ$ , 密度为  $1480 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 其力学性质介于石英砂和硅树脂之间, 兼具脆性和韧性(Massoli et al., 2006; Konstantinovskaya et al., 2009; 吴航等, 2019; Feng et al., 2023; 冯乾乾等, 2024)。早白垩世至晚白垩世末(140~70 Ma)的挤压速率为  $1.8 \text{ cm}/\text{h}$ , 模型与实际地层的重力相似比为 1, 模型与实际地层的粘聚力比  $c^*$  和应力比  $\sigma^*$  分别为  $2.48 \times 10^{-6}$  和  $3.97 \times 10^{-6}$ , 处于同一数量级, 满足动力学相似条件(Feng et al., 2023; 冯乾乾等, 2024)。本研究所有模型在构造物理模拟中的挤压速率均设定为  $0.4 \text{ mm}/\text{min}$ , 构造物理模型的具体参数详见表 1, 相似比参数如表 2 所示。

表 1 实验模型分层参数

Table 1 Layer parameters of experiment apparatus

分层	地层	厚度(cm)	密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	黏度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
①②	K	2.5	1480	0
V1	T(滑脱层)	0.2	1000	$1 \times 10^4$
③④	$\text{C}_{2-3}\text{-P}$	1.8	1480	0
V2	$\text{C}_1$ (滑脱层)	0.2	1000	$1 \times 10^4$
⑤⑥⑦	Base-Z	1.9	1480	0
Vb	Base(滑脱层)	0.7	1000	$1 \times 10^4$

表 2 实验模型参数相似比

Table 2 Scaling parameters between models and nature

参数	模型	实际地层	相似比(*)
脆性层密度 $\rho_b$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.48	2.6	$\rho_b^* = 0.57$
塑性层密度 $\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.94	2.2	$\rho_d^* = 0.43$
脆性层内摩擦系数 $\mu$	0.7	0.6~0.85	$\mu^* = 0.55\text{--}1.17$
重力加速度 $g$ ( $\text{m}/\text{s}^2$ )	9.81	9.81	$g^* = 1$
脆性层粘聚力 $c$ ( $\text{Pa}$ )	99	$4 \times 10^7$	$c^* = 2.48 \times 10^{-6}$
塑性层黏度 $\eta$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	$1 \times 10^4$	$5 \times 10^{20}$	$\eta^* = 2 \times 10^{-17}$
长度 $l$ (cm)	1	$4 \times 10^5$	$l^* = 2.5 \times 10^{-6}$
应力 $\sigma$ (Pa)	101.61	$2.56 \times 10^7$	$\sigma^* = 3.97 \times 10^{-6}$
应变速率 $\varepsilon$ (/s)	$9.52 \times 10^{-4}$	$2.03 \times 10^{-14}$	$\varepsilon^* = 4.69 \times 10^{10}$
挤压速率 $v$ (cm/h)	2.4	$2.05 \times 10^{-5}$ (0.18 cm/yr)	$v^* = 1.17 \times 10^5$

注:  $\rho_b$  表示从基底到侏罗纪脆性覆盖层的密度;  $\rho_d$  表示塑性地层的密度;  $\mu$  表示脆性地层的内摩擦系数;  $c$  表示脆性地层的粘聚力;  $g$  表示重力加速度;  $\eta$  表示塑性地层的黏度;  $l$  表示长度;  $\sigma$  表示应力( $\sigma = \rho_b g h_b + \rho_d g h_{dl}$ , 其中  $h_b$  和  $h_{dl}$  分别表示从基底到侏罗纪脆性和塑性地层的厚度);  $t$  表示时间;  $\varepsilon$  表示应变速率( $\varepsilon = v/h_{d2}$ , 其中  $h_{d2}$  表示基底塑性层厚度)。

## 2.2 剖面模型设计

在保持分层厚度和先存古隆起位置不变的前提下, 为研究先存古隆起形态及滑脱层数量对逆冲推覆带构造变形的影响, 本文设计了 6 组对比实验, 相关变量参数详见表 3。

剖面模型的设置如图 3 所示。实验 A1、B1 和 C2 中, 滑脱层数量设定为 1, 先存古隆起形态分别为高角度( $40^{\circ}\sim60^{\circ}$ )、中角度( $20^{\circ}\sim40^{\circ}$ )和低角度( $10^{\circ}\sim20^{\circ}$ ), 以探讨先存古隆起形态对逆冲推覆带构造变形特征的影响。在实验 B1 和 B2 中, 先存古隆起形态设定为中角度; 而在实验 C1、C2 和 C3 中, 先存古隆起形态设定为低角度, 同时增加滑脱层数量, 以分析滑脱层数量对逆冲推覆带构造变形特征的影响。

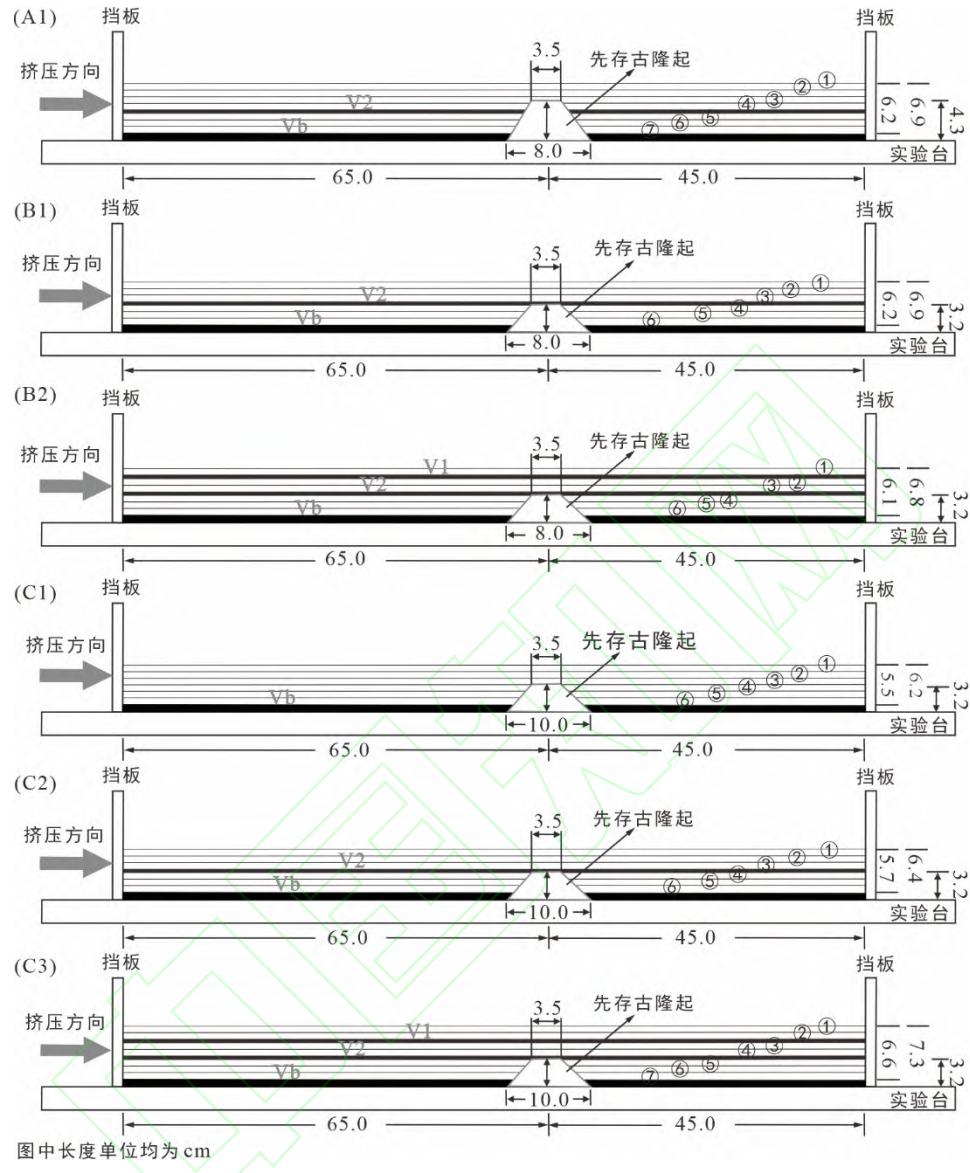


图 3 剖面模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the profile model

表 3 剖面模拟实验变量参数

Table 3 Variable parameters for each profile simulation experiment

模型参数	缩短量(%)	挤压速率(mm/min)	古隆起形态	滑脱层数量
A1	25	0.4	高角度( $40^{\circ}\sim60^{\circ}$ )	1
B1	25	0.4	中角度( $20^{\circ}\sim40^{\circ}$ )	1
B2	25	0.4	中角度( $20^{\circ}\sim40^{\circ}$ )	2
C1	25	0.4	低角度( $10^{\circ}\sim20^{\circ}$ )	0
C2	25	0.4	低角度( $10^{\circ}\sim20^{\circ}$ )	1
C3	25	0.4	低角度( $10^{\circ}\sim20^{\circ}$ )	2

### 2.3 平面模型设计

本次实验的平面模型选取先存古隆起形态为低角度梯形,将其置于距离沙箱左端35 cm的位置,滑脱层数量设置为2层(剖面铺设与C3实验相同)。平面模型的具体设置如图4所示,通过对比平面构造物理模拟结果与实际变形特征,分析其相似性。

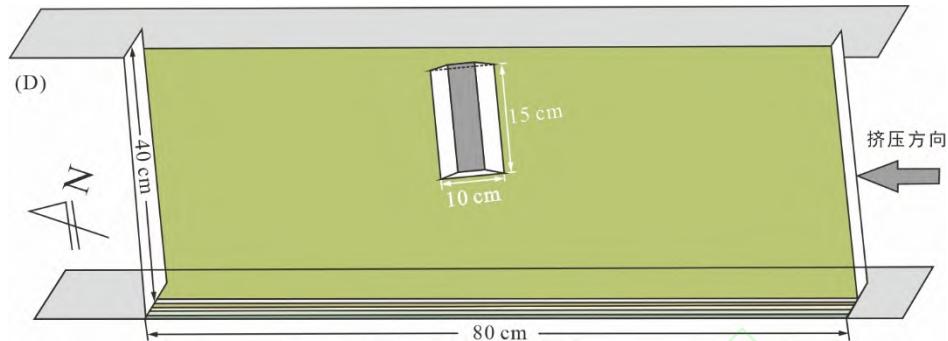


图4 平面模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of the planar model

## 3 实验结果

### 3.1 剖面模拟结果

#### 3.1.1 实验A1、B1和B2

实验A1预设先存古隆起形态为高角度,滑脱层数量为1(图5a)。实验初始阶段,左侧挡板向右侧移动,以纵弯褶皱作用为主导,在挤压端形成由基底断层F<sub>3</sub>主控的箱状对称背斜褶皱,滑脱层下部构造层发生变形,但基底滑脱层未出现明显变形(图5b)。随着地层持续抬升,在挤压方向上形成了由基底断层F<sub>4</sub>主控的新箱状背斜褶皱,滑脱层分隔的各构造层开始表现出构造不协调特征,滑脱层上下构造层逐渐发育出若干小型褶皱(图5c)。随后,在持续挤压过程中,挤压端的背斜和向斜变形进一步加剧,未形成新的褶皱,而滑脱层之上的构造层发育了大量小断层(图5d)。之后,挤压端的背斜褶皱变得更加紧闭,形成了复杂的冲起构造,靠近古隆起处出现了由基底断层F<sub>10</sub>主控的新箱状背斜褶皱,但新背斜褶皱滑脱层之下的构造层变形程度较弱(图5e)。当缩短量达到25%时,共形成了3个箱状背斜,其中前2个背斜为断控滑脱褶皱,古隆起上未发育明显褶皱,同时共发育了11条断层(图5f)。

与实验A1相比,实验B1将先存古隆起形态设定为中角度,滑脱层数量保持不变(图6a)。实验初始阶段,变形过程与实验A1基本一致,在挤压端均形成一个由基底断层F<sub>2</sub>主导的箱状对称背斜(图6b)。当缩短量达到10%时开始出现差异,新形成的背斜褶皱共有两个,其中大褶皱受基底断层F<sub>5</sub>控制,中间褶皱规模较小,且该滑脱层下部构造层未发生明显变形(图6c)。随着挤压作用的持续进行,先存古隆起开始活动并形成主控逆冲基底断层F<sub>8</sub>,由于挤压作用,规模较小的背斜褶皱合并到右侧的大背斜褶皱中(图6d)。随后,在持续挤压过程中,背斜和向斜褶皱的变形进一步加剧,未发育新的背斜,同时在古隆起上部构造层形成了由基底断层F<sub>8</sub>控制的典型断弯褶皱,古隆起活动逐渐增强(图6e)。持续挤压导致古隆起上盘地层冲起并向固定端方向运动,从而形成一个新的小背斜褶皱,但由于受到古隆起的阻隔,小褶皱下部构造层未发生变形。最终,形成了4个箱状背斜褶皱,前3个背斜为断控滑脱褶皱,共发育10条断层(图6f)。

与实验B1相比,实验B2中先存古隆起的形态保持不变,但滑脱层的数量增加至两层(图7a)。实验初始状态与之前相同(图7b)。当缩短量达到10%时开始出现差异,新形成的背斜褶皱变为单一构造,该褶皱主要受基底断层F<sub>3</sub>控制(图7c)。当缩短量达到15%时,形成了一个新的小背斜,同时先存古隆起开始活动并产生由基底断层F<sub>9</sub>主导的逆冲断层,且小背斜滑脱层之下的构造层未发生明显变形(图7d)。随着挤压作用的持续进行,古隆起上形成了逆冲背斜,其上部构造层发育出典型的断弯褶皱,而与其相邻的小背斜褶皱未发生显著变化(图7e)。当缩短量达到25%时,结果与实验B1相似(图7f)。

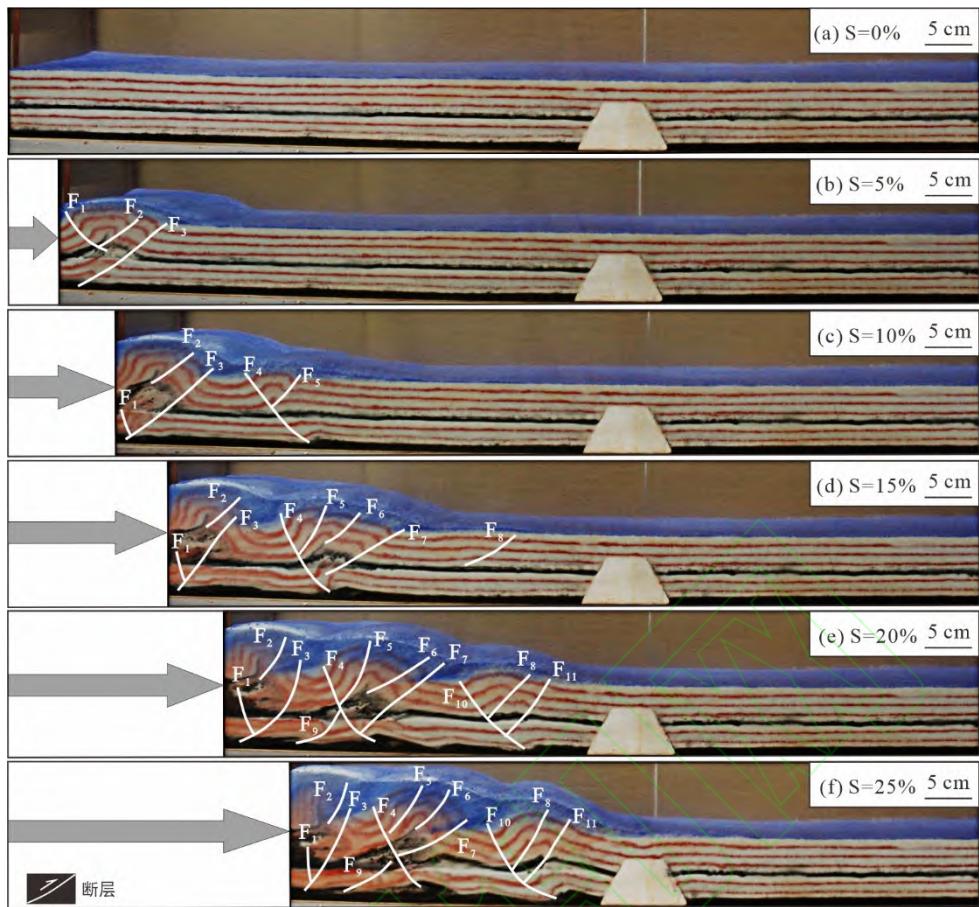


图 5 试验 A 模拟结果

Fig.5 Results of physical model A1

### 3.1.2 实验 C1、C2 和 C3

实验 C1 预设先存古隆起形态为低角度, 未设置滑脱层(图 8a)。实验初始阶段, 左侧挡板向右侧移动, 地层以纵弯褶皱作用为主, 在挤压端形成由基底断层  $F_2$  主导的典型箱状对称背斜褶皱(图 8b)。随后, 地层继续抬升, 在挤压方向上形成由基底断层  $F_5$  控制的新箱状对称背斜褶皱(图 8c)。随着挤压的持续, 背斜和向斜的褶皱变形进一步加剧, 同时形成由基底断层  $F_{10}$  控制的新对称背斜褶皱(图 8d)。在持续挤压过程中, 挤压端背斜逐渐变得更加紧闭, 背斜褶皱内部发育出多条复杂的逆冲断层, 并在靠近古隆起处形成逆冲断层  $F_{11}$ (图 8e)。当缩短量达到 25%时, 共形成 4 个箱状背斜褶皱, 发育了 11 条断层。基底滑脱层均发生轻微变形, 但靠近古隆起的背斜褶皱未能越过古隆起, 其右侧未形成新的褶皱(图 8f)。

与实验 C1 相比, 实验 C2 保持了先存古隆起形态不变, 滑脱层数量设置为 1 层(图 9a)。当缩短量达到 10%时, 其变形过程与实验 C1 基本一致, 在挤压端均形成了两个由基底断层  $F_2$  和  $F_5$  主控的箱状对称背斜褶皱, 且滑脱层之下的构造层均发生变形(图 9b, c)。从缩短量达到 15%时开始出现差异: 在滑脱层之上的构造层中形成一个小规模褶皱, 同时先存古隆起开始活动, 但未形成明显的逆冲断层(图 9d)。随后, 随着挤压持续进行, 先存古隆起形成了由基底断层  $F_{10}$  主控的断弯背斜褶皱, 而先前的小规模褶皱几乎未发生进一步变形(图 9e)。之后, 持续的挤压作用使古隆起上盘地层冲起并向固定端方向运移, 形成了一个新的小背斜褶皱; 但由于受到古隆起的阻隔, 右侧下部构造层未出现明显褶皱, 而在古隆起右侧开始发育新的断层  $F_{11}$ 。最终, 形成了 4 个箱状背斜褶皱, 共发育 11 条断层(图 9f)。

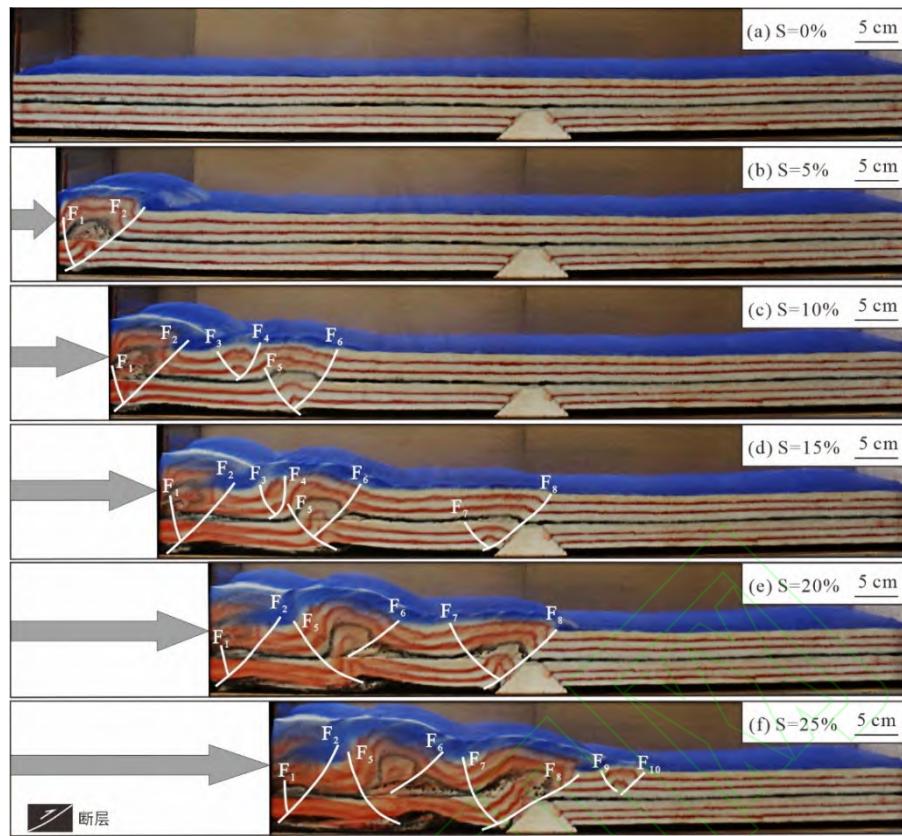


图 6 试验 B1 模拟结果

Fig.6 Results of physical model B1

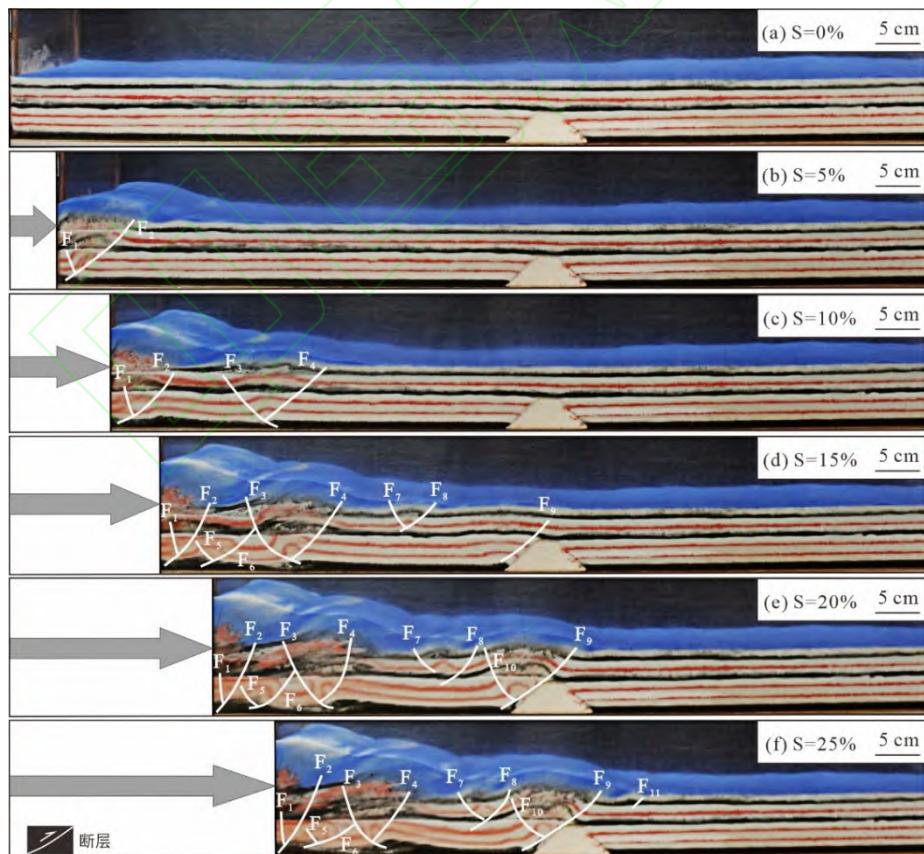


图 7 试验 B2 模拟结果

Fig.7 Results of physical model B2

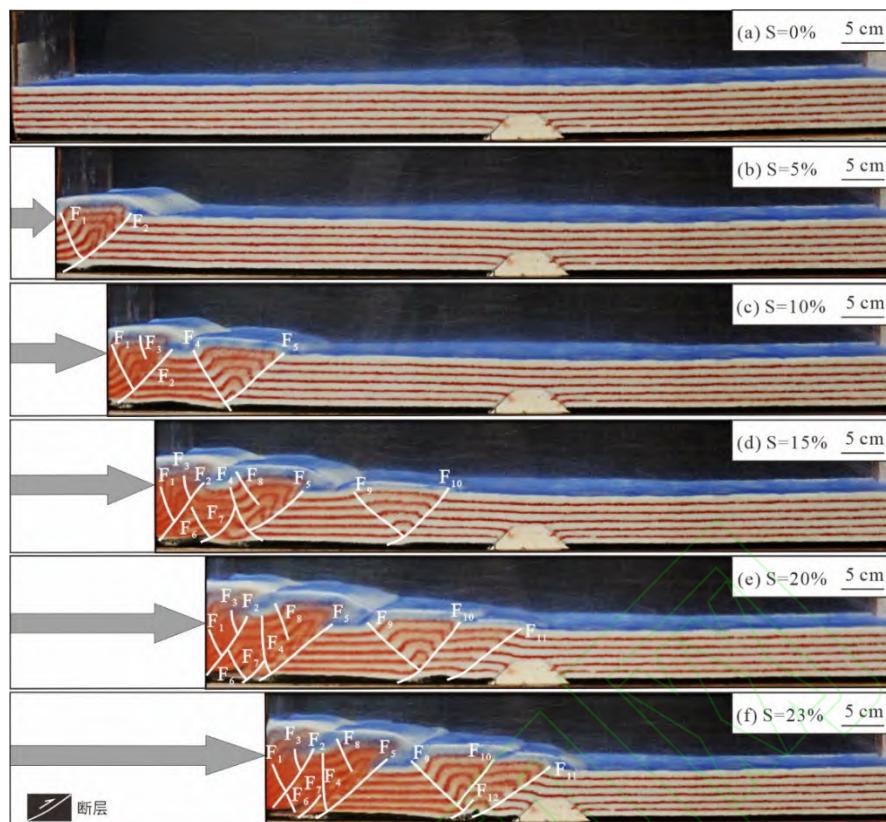


图 8 试验 C1 模拟结果

Fig.8 Results of physical model C1

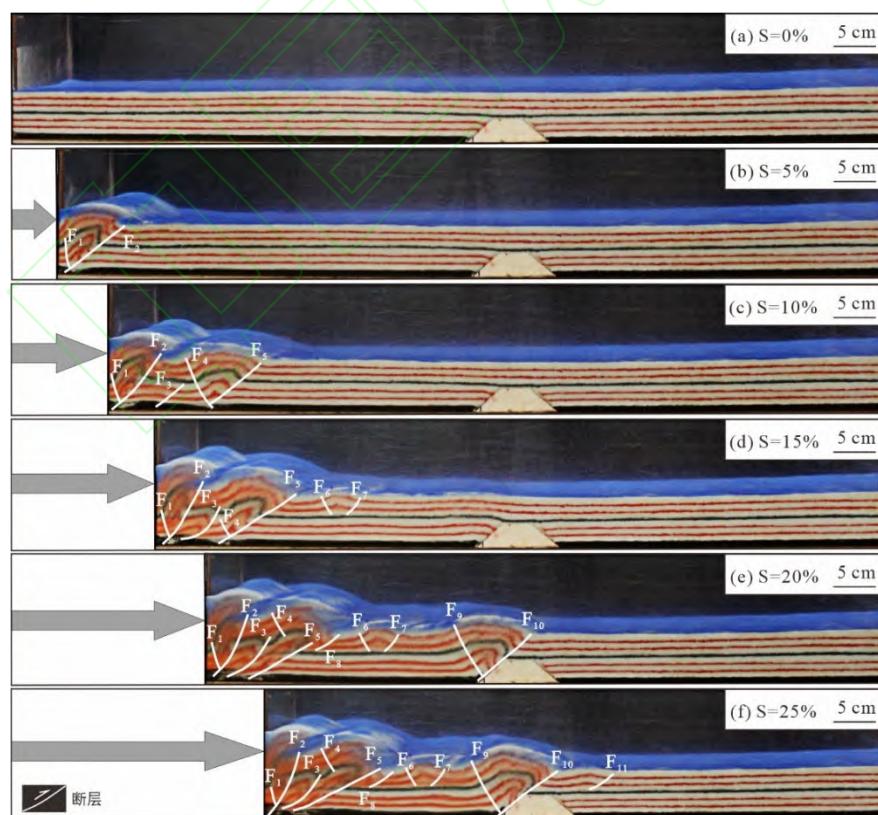


图 9 试验 C2 模拟结果

Fig.9 Results of physical model C2

与实验 C2 相比, 实验 C3 保持了先存古隆起形态不变, 并设置滑脱层数量为 2 层(图 10a)。当缩短量达到 10% 时, 其变形过程与实验 C2 基本一致, 但在滑脱层之上的构造层中发育了一些断层(图 10b, c)。当缩短量增至 15% 时, 开始形成由基底断层  $F_7$  主控的新背斜褶皱, 不过此时该背斜尚不明显(图 10d)。随着挤压作用的持续进行, 背斜逐渐变得更加紧闭, 形成复杂的冲起构造; 右侧未出现新的背斜褶皱, 而先存古隆起开始活动并发育出基底断层  $F_{10}$ (图 10e)。当缩短量达到 25% 时, 在古隆起处形成了由基底断层  $F_{10}$  主控的新断展背斜褶皱。同时, 持续的挤压作用使古隆起上盘地层发生冲起并向固定端方向运动, 从而形成一条新的小逆断层。最终, 模型中共形成了 4 个箱状背斜褶皱, 并发育了 11 条断层(图 10f)。

### 3.2 平面模拟结果

通过剖面构造物理模拟实验, 发现当先存古隆起形态为低角度且滑脱层为两套时, 模拟效果最佳。本文选取湘鄂西逆冲褶皱带作为研究区, 该区域发育的黄陵古隆起以及中-下寒武统和中-下三叠统两套滑脱层与物理模拟实验模型相对应, 进一步研究其在平面模拟效果与实际地质平面之间的吻合程度, 结果表明平面模拟结果与剖面模拟一致。实验结果(图 11)显示, 其与实际地质剖面(图 1b)中的大部分褶皱构造具有较高的相似性。实验初始阶段, 右侧挡板向左侧移动, 地层以纵弯褶皱作用为主, 在褶皱线 1 右侧形成了雪峰山逆冲推覆带(图 11b)。当缩短量达到 10% 时, 地层持续抬升, 雪峰山逆冲推覆带进一步抬升, 同时褶皱线 2、3 至褶皱线 1 之间形成的桑植-石门复向斜基本定型, 褶皱线 4 至褶皱线 3 之间形成宜都-鹤峰复背斜(图 11c)。当缩短量增至 15% 时, 地层继续挤压变形, 黄陵古隆起开始抬升并发育褶皱, 褶皱线 4 至褶皱线 5 之间形成花果坪复向斜(图 11d)。最终, 当缩短量达到 25% 时, 湘鄂西逆冲褶皱带各构造单元基本成型, 各褶皱带持续变形: 褶皱线 1 右侧形成雪峰山逆冲推覆带, 褶皱线 2 至褶皱线 9 之间形成桑植-石门复向斜, 褶皱线 10 至褶皱线 4 之间形成宜都-鹤峰复背斜, 褶皱线 4 至褶皱线 5 之间形成花果坪复向斜; 在褶皱线 5 附近, 黄陵古隆起抬升并形成褶皱, 同时褶皱线 11 至褶皱线 6 之间形成建始复背斜(图 11f)。

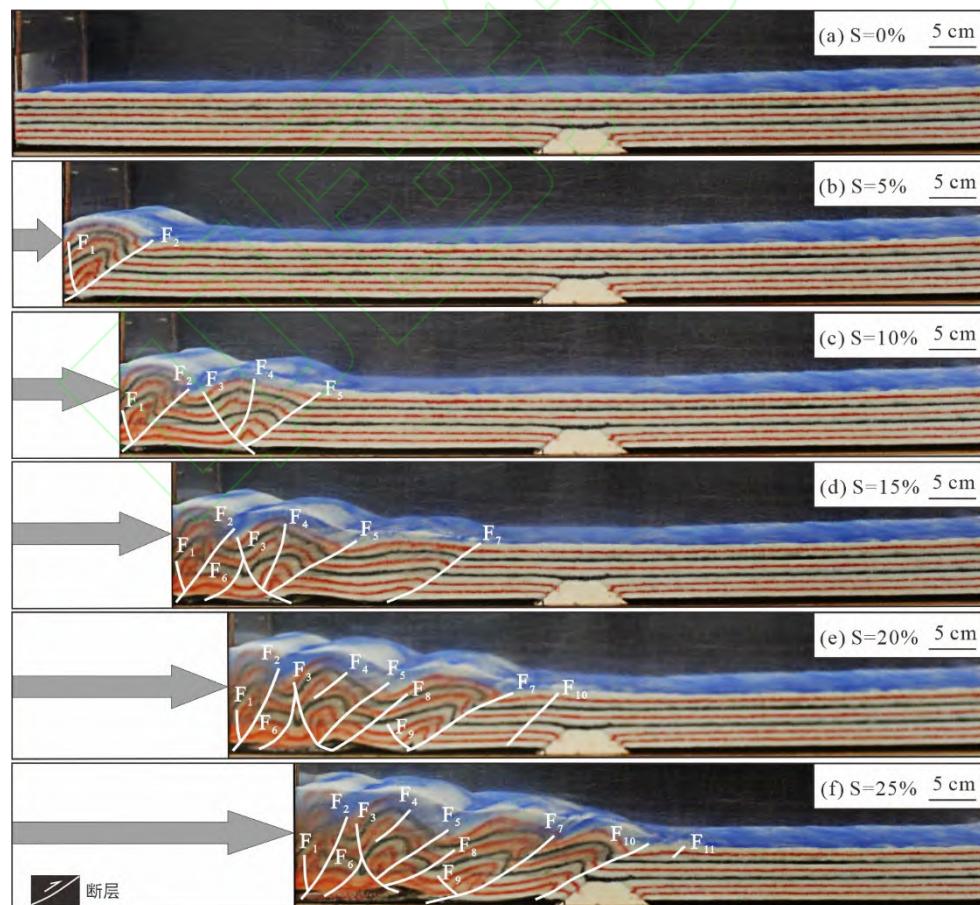


图 10 试验 C3 模拟结果

Fig.10 Results of physical model C3

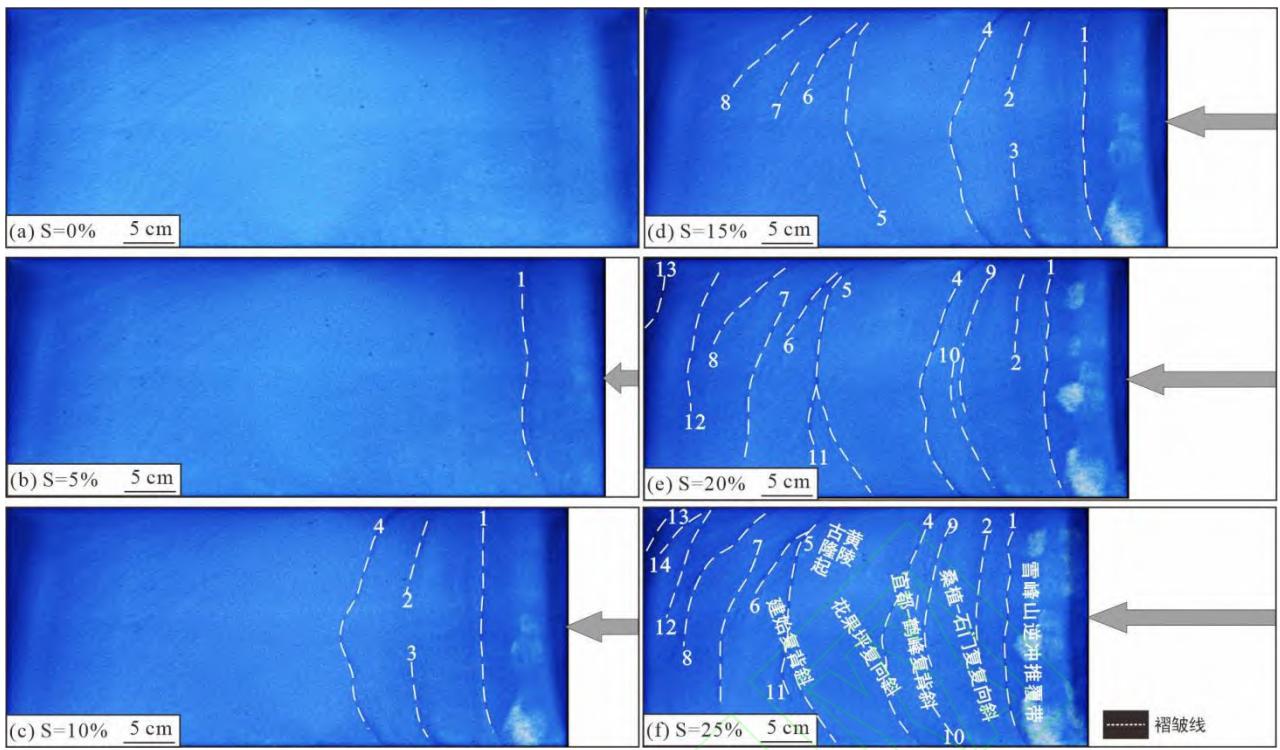


图 11 平面模拟结果

Fig.11 Results of planar physical model

## 4 讨 论

### 4.1 古隆起形态对逆冲推覆带构造变形的影响

前人针对逆冲推覆带构造变形的物理模拟开展了广泛研究,结果表明挤压速率、韧性层厚度比、先存断层、模型初始几何形状、滑脱层数量及其分布特征等均对逆冲推覆带的构造变形具有重要的控制作用(Rossetti et al., 2002; Reiter et al., 2011; Santolaria et al., 2015)。由于实验中影响因素较多,前人在构造物理模拟中更多聚焦于滑脱层和先存断层的影响因素(吴航, 2019; 冯乾乾等, 2024),而古隆起对逆冲褶皱带构造变形的影响却鲜有深入探讨。尽管已有研究涉及挤压背景下含塑性层沉积盆地构造演化的古隆起及其幅度(Wang et al., 2016; Long et al., 2021; 胡建宁等, 2023; 马德龙等, 2023),但该因素对逆冲褶皱带构造变形的具体意义仍需进一步详细分析。为探讨先存古隆起形态对逆冲推覆带构造变形特征的影响,本文将先存古隆起形态分别设定为高角度、中角度和低角度,并设置滑脱层数量为一套。

当将先存古隆起形态设置为高角度进行构造物理模拟时,其模拟结果如图 12a 所示,形成了 3 个箱状背斜和 2 个向斜。通过褶皱抬升的幅度与长度来表征应变的难易程度,由于先存古隆起的角度较高,未能在其上部形成逆冲背斜。推测左侧应力在靠近古隆起时未能有效传递,整个逆冲推覆带褶皱虽表现出较强的抬升幅度,但应力传递距离有限,同时滑脱层的变形程度低于构造层。当将先存古隆起形态设置为中角度时,其模拟结果如图 12b 所示,形成了 4 个箱状背斜和 3 个向斜。在形成第 3 个箱状褶皱后,整个逆冲推覆带褶皱相较于高角度实验的抬升幅度有所减弱,而应力传递距离则有所延长。持续的应力挤压导致地层在古隆起上方冲断并形成新的断褶皱,表明古隆起形态角度的减小有助于应力的传递及逆冲背斜褶皱的形成。当将先存古隆起形态设置为低角度时,模拟结果如图 12c 所示,形成了 4 个箱状背斜和 3 个向斜。整个逆冲推覆带褶皱的抬升幅度和应力传递距离与中角度实验相似,但第 3 个背斜褶皱规模较小。推测主要原因是应力在横向传导过程中受到古隆起的阻挡,导致第 4 个箱状褶皱不断抬升,而第 3 个褶皱因未受古隆起的影响而未发生持续抬升。这表明古隆起角度的减小有利于应力的传导以及背斜褶皱的形成。

总体而言,变形初期以纵弯褶皱作用为主导,随着古隆起形态角度的减小,有利于应力在横向上传递。

当古隆起形态呈现中角度和低角度时, 古隆起上覆的构造层均可形成由基底断层主控的断弯褶皱。以湘鄂西逆冲褶皱带为例, 将古隆起形态为高角度时的模拟结果(图 12a)与该区发育的黄陵古隆起实际地质剖面(图 1b)进行对比, 发现其逆冲背斜褶皱的数量、几何形态及地层抬升幅度均存在不符之处; 而当古隆起形态为中、低角度时的模拟结果(图 12b, c)与实际地质剖面具有一定相似性, 其中前三个背斜分别对应雪峰山隆起逆冲推覆带、宜都-鹤峰背斜以及建始背斜。由此可见, 黄陵古隆起对湘鄂西逆冲褶皱带具有主要控制作用, 但滑脱层的影响尚不明确。

#### 4.2 滑脱层数量对逆冲推覆带构造变形的影响

受滑脱层数量、厚度及挤压速率等因素的综合影响, 逆冲推覆带的构造变形特征表现出显著的横向差异性和纵向分层性(张小琼等, 2015)。在垂向上, 由于滑脱层的存在, 应力在各构造层内的分布与传递呈现出明显的纵向非均质性, 致使被滑脱层分隔的各构造层出现构造变形不协调的现象(裴仰文等, 2022)。学者们围绕滑脱层的流变性质、滑脱层厚度以及挤压速率等因素开展了深入研究, 进一步探讨了逆冲推覆带的构造变形特征(解国爱等, 2013; 邓铭哲, 2018; 张旭亮和何登发, 2018; 吴航, 2019; 林雨等, 2024)。前文研究表明, 先存古隆起形态的角度越低越有利于应力的传递, 且古隆起形态为低角度时的模拟结果较为理想。因此, 本文进一步探讨在古隆起形态为低角度的情况下, 滑脱层数量变化对逆冲推覆带构造变形特征的影响。

在未铺设滑脱层的构造物理模拟中, 其结果如图 12c 所示, 形成了 3 个箱状背斜和 2 个向斜。整个逆冲推覆带褶皱的抬升幅度较高, 但应力传递距离有限。应力在前两个箱状褶皱中作用显著, 而在形成第 3 个箱状背斜后, 推测由于应力在横向传导不足, 导致该背斜的宽度和形态变化较小, 古隆起之上的构造层未能形成背斜褶皱。当增加一套滑脱层进行模拟时, 其结果如图 12d 所示, 形成了 4 个箱状背斜和 3 个向斜。与前一组实验相比, 整个逆冲推覆带褶皱的抬升幅度有所降低, 但应力传递距离变长。在形成第 4 个箱状褶皱后, 第 3 个背斜形态变化不大, 推测主要原因是滑脱层的存在使应力在横向传导时受到古隆起的阻挡, 导致第 4 个箱状褶皱持续抬升, 而第 3 个褶皱因未受古隆起影响而未发生持续变形。继续增加一套滑脱层后, 其模拟结果如图 12e 所示, 形成了 4 个箱状背斜和 3 个向斜。整个逆冲推覆带褶皱的抬升幅度从挤压端向右呈阶梯状递减, 褶皱变形长度进一步加长。

综合以上分析, 无滑脱层和单套滑脱层的模拟效果并不理想, 主要原因在于横向应力传递不足, 导致应力无法有效传递至古隆起位置。然而, 在采用两套滑脱层的情况下, 模拟效果显著改善, 有效地解决了应力在滑脱层作用下向右侧传导的问题, 并在纵向上形成了由基底断层控制的断弯褶皱。以湘鄂西逆冲褶皱带为例, 未铺设滑脱层时的模拟结果(图 12c)与实际地质剖面(图 1b)相比, 其背斜褶皱的数量、几何形态以及地层抬升幅度等方面均存在一定偏差。增加一套滑脱层后的模拟结果(图 12d)较前一组有明显改进, 但与实际地质剖面仍存在一定差异。然而, 当滑脱层设定为中-下寒武统和中-下奥陶统两套滑脱层时, 其模拟结果(图 12e)与实际地质剖面高度吻合。前两个背斜褶皱对应雪峰山隆起逆冲推覆带, 后两个背斜褶皱分别为宜都-鹤峰背斜和建始背斜, 中间的向斜分别为桑植-石门向斜和花果坪向斜。中-下寒武统和中-下奥陶统滑脱层更有利于应力的横向传递, 同时黄陵古隆起的角度恰好促使滑脱层和构造层形成背斜褶皱。

在相同模型(形态为低角度和两套滑脱层)的基础上开展平面构造物理模拟, 平面模拟实验成功再现了燕山期湘鄂西逆冲褶皱带的形成过程, 在几何学特征及地层抬升幅度等方面与实际平面地貌表现出较高的相似性。湘鄂西褶皱带发育的滑脱层主要以中-下寒武统膏盐岩滑脱层和中-下奥陶统膏盐岩滑脱层为主, 这些滑脱层对构造变形起到了关键的控制作用。

#### 4.3 湘鄂西逆冲褶皱带的形成机制

以湘鄂西逆冲褶皱带为例, 其古隆起形态呈低角度特征, 与黄陵古隆起形态相对应。同时, 两套滑脱层也分别对应于湘鄂西逆冲褶皱带发育的中-下寒武统和中-下奥陶统滑脱层。构造物理模拟结果(图 12e)与实际地质剖面(图 1b)相比, 该结果在几何形态、背斜褶皱数量以及各构造层抬升幅度和长度等方面均表现出较高的相似性, 能够较好地恢复燕山期湘鄂西逆冲褶皱带的构造演化过程。湘鄂西逆冲褶皱带中发育有中-下寒武统滑脱层, 在变形过程中有利于上覆地层发生逆冲褶皱作用而非断裂作用。此外, 先存的黄陵古隆起因受到构造挤压而复活, 对湘鄂西逆冲褶皱带的形成和发育起到了至关重要的作用。背斜褶皱带的主控滑脱层为基底滑脱层和中-下寒武统滑脱层, 其变形特征表现为抬升幅度降低、长度增长的大型阶梯状箱状背斜。由于先存黄陵古隆起活动的影响, 古隆起之上的构造层发育了基底断层主控的断弯褶皱, 将逆冲背斜褶皱的应变传递到左侧并形成新

的褶皱,但新褶皱之下的滑脱层未发生明显变形。随着持续的挤压,先存黄陵古隆起的复活导致基底断层向上冲出,并形成逆冲褶皱,这一认识与裴仰文等(2022)的研究结论大致相同。

前人为了阐释褶皱带的形成机制,提出了纵弯褶皱、横弯褶皱、剪切褶皱、柔流褶皱以及膝折褶皱作用等五种模式。本文模拟实验结果表明,湘鄂西逆冲褶皱带的形成机制是低角度的黄陵古隆起与三叠系和寒武系滑脱层共同构成的阶梯状逆冲推覆带在挤压作用下发生的柔流褶皱作用。其力学成因在于塑性层受应力作用发生塑性流动,从而形成轴面倾斜的褶皱,这一认识与吴航等(2019)的研究结论基本一致。同时,在实验挤压过程中,随着应力传递至黄陵古隆起区域,随后形成背斜褶皱,导致古隆起周缘上覆地层增厚,并引发前陆盆地变形,进而促成白垩系盆地的沉积。这一现象与黄陵古隆起周缘的宜昌斜坡、秭归盆地以及雪峰山古隆起周缘出现的白垩系盆地相吻合。在秦岭-大别造山带和雪峰山陆内变形系统的双向挤压作用下,中扬子古隆起周缘发生前陆盆地变形,最终导致中-新生代差异性抬升。然而,构造物理模拟实验无法记录每个玻璃珠的运移路径,并且极大地简化了地质边界条件,难以细致描述湘鄂西每个逆冲褶皱中各构造层具体的断层相关褶皱作用类型。因此,本文仅限于宏观描述,后续研究可通过引入有限元数值模拟实验和离散元数值模拟实验等方法进行更深入的探讨。

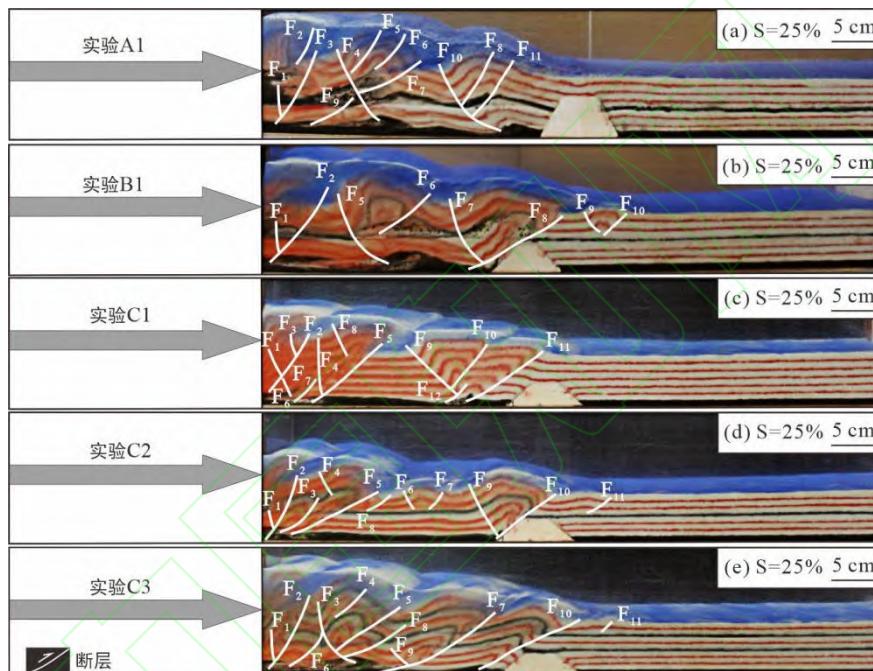


图 12 古隆起形态和滑脱层数量变化模拟结果

Fig.12 Comparison of results of physical model for morphological and detachment layers changes with actual profiles

## 5 结 论

(1) 构造物理模拟结果表明,滑脱层数量与先存古隆起形态是逆冲褶皱带构造变形的主要控制因素。在进行构造物理模拟过程中,随着古隆起形态角度的逐渐减小,应力在古隆起处的横向传递不断增强,这有助于断弯褶皱的发育以及逆冲褶皱的冲起;同时,随着滑脱层数量的增加,纵弯褶皱作用显著增强,应力能够更有效地传递,从而有利于形成阶梯状地层抬升幅度减弱且应力传递距离增长的逆冲推覆带。

(2) 当应力传递至古隆起区域时,能够形成褶皱背斜,导致古隆起上覆地层增厚,并引发前陆盆地变形,从而促进白垩系盆地的沉积作用。湘鄂西逆冲褶皱带中发育的黄陵古隆起以及中-下寒武统和中-下三叠统两套滑脱层,与物理模拟实验模型相对应。在秦岭-大别造山带和雪峰山陆内变形系统的双向挤压作用下,中扬子古隆起周缘发生前陆盆地变形,进而导致中-新生代的差异性抬升。

(3) 湘鄂西逆冲褶皱带的形成机制可归因于三叠系和寒武系滑脱层与低角度黄陵古隆起共同构成的阶梯状逆冲推覆带,在挤压作用下发生的柔流褶皱作用。

**致谢：**感谢两位匿名审稿专家对本文的细致审阅和提出的建设性修改建议，使本文的内容结构更加简明扼要和深入，让作者受益匪浅。

### 参考文献(References):

- 邓铭哲. 2018. 黄陵背斜及邻区构造建模. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 丁道桂, 郭彤楼, 翟常博, 吕俊祥. 2005. 鄂西-渝东区膝折构造. 石油实验地质, 27(3): 205–210.
- 冯乾乾, 邱楠生, 腾格尔, 钟宁宁, 吴航, 龙康杰. 2024. 低温热年代学和构造模拟约束下逆冲推覆带的构造-热演化及剥露历史恢复. 地质学报, 98(11): 3341–3353.
- 何登发, 李德生, 张国伟, 赵路子, 樊春, 鲁人齐, 文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学, 46(3): 589–606.
- 何文刚, 周建勋. 2018. 川东南马尾状褶皱带特征与形成机制的物理模拟. 地球科学, 43(6): 2133–2148.
- 何文刚. 2018. 川东-湘鄂西褶皱-冲断带构造特征及其成因机制研究. 北京: 中国石油大学(北京)博士学位论文.
- 胡建宁, 能源, 姜帅, 李跨越, 侯筱晓, 付永红, 邢向杰. 2023. 克拉苏构造带博孜段古隆起及盐层对盐下冲断带的控制. 东北石油大学学报, 47(4): 57–69.
- 贾金峰. 2023. 褶皱冲断带发育的影响因素研究—基于构造物理模拟. 长春: 吉林大学硕士学位论文.
- 解国爱, 贾东, 张庆龙, 吴晓俊, 沈礼, 吕贊珊, 邹旭. 2013. 川东侏罗山式褶皱构造带的物理模拟研究. 地质学报, 87(6): 773–788.
- 李英强, 何登发, 李双建. 2020. 湘鄂西-渝东褶皱带多重滑脱构造变形特征与构造模型. 地质科学, 55(3): 894–908.
- 林雨, 王俊, 罗亮东, 李德亮, 熊璨, 肖明, 张赛柯, 方瑞泽, 杨代峰. 2024. 渝东南正阳盆地晚白垩世构造-沉积演化. 地质论评, 70(5): 1677–1688.
- 刘海军, 许长海, 周祖冀, R.A.Donelick. 2009. 黄陵隆起形成(165~100 Ma)的碎屑岩磷灰石裂变径迹热年代学约束. 自然科学进展, 19(12): 1326–1332.
- 刘重庆, 周建勋, 郎建. 2013. 多层滑脱条件下褶皱-冲断带形成制约因素研究: 以川东-雪峰构造带为例. 地球科学与环境学报, 35(2): 45–55.
- 刘晓峰, 沈传波, 王家豪. 2021. 中扬子地块宜昌斜坡白垩系陆内挤压盆地的断-坳结构. 地球科学, 46(5): 1677–1691.
- 马德龙, 王宏斌, 张希晨, 何登发, 凡睿, 王彦君, 黄林军, 崔键, 刘文强, 杨秀磊. 2023. 川东北通南巴背斜中新生代构造变形的砂箱构造物理模拟. 地球科学, 48(4): 1307–1320.
- 马文凯. 2021. 川东-湘鄂西褶皱-冲断带构造变形机制的物理模拟研究. 北京: 中国石油大学(北京)硕士学位论文.
- 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 沈传波, 凡元芳. 2010. 湘鄂西-川东中生代陆内递进扩展变形: 来自裂变径迹和平衡剖面的证据. 地球科学, 35(2): 161–174.
- 莫涛, 郭虹兵, 刘恣君, 潘杨勇, 范坤宇, 邓宾. 2024. 软弱膏盐层系滑脱构造变形特征: 以库车前陆盆地砂箱物理模拟为例. 大地构造与成矿学: 1–13.
- 裴仰文, 盛受政, 苗正硕, 牟毅城, 苏楠, 郭伟, 冯犇, 王静, 梁瀚, 谢柳娟. 2022. 多滑脱层构造物理模拟试验及其对川东褶皱带形成演化的指示意义. 中国石油大学学报(自然科学版), 46(2): 38–49.
- 沈传波, 梅廉夫, 刘昭茜, 徐思煌. 2009. 黄陵隆起中-新生代隆升作用的裂变径迹证据. 矿物岩石, 29(2): 54–60.
- 施小斌, 石红才, 杨小秋, 蒋海燕, 龙幼康, 吴保珍. 2013. 江汉盆地当阳向斜区主要不整合面剥蚀厚度的中低温热年代学约束. 地质学报, 87(8): 1076–1088.
- 石红才, 施小斌. 2014. 中、上扬子白垩纪以来的剥蚀过程及构造意义—低温年代学数据约束. 地球物理学报, 57(8): 2608–2619.
- 汤良杰, 郭彤楼, 余一欣, 金文正, 李儒峰, 周雁. 2007. 四川盆地东北部前陆褶皱-冲断带盐相关构造. 地质学报, 81(8): 1048–1056.
- 王德良, 梅廉夫, 刘云生, 吴路路, 闵才政, 罗劲. 2018. 伸展型复合盆山体系下江汉盆地中、新生代幕式沉降与迁移. 地球科学, 43(11): 4180–4192.
- 王军, 褚杨, 林伟, 王清晨. 2010. 黄陵背斜的构造几何形态及其成因探讨. 地质科学, 45(3): 615–625.
- 王平, 刘少峰, 郜瑭珺, 王凯. 2012. 川东弧形带三维构造扩展的 AFT 记录. 地球物理学报, 55(5): 1662–1673.
- 吴航, 邱楠生, 常健, 张纪新, 王晔. 2019. 川东多套滑脱层褶皱构造带形成物理模拟. 地球科学, 44(3): 784–797.
- 吴航. 2019. 川东地区中-新生代构造隆升过程研究. 北京: 中国石油大学(北京)博士学位论文.
- 张小琼, 单业华, 倪永进, 谭志军. 2015. 中生代川东褶皱带的数值模拟: 两阶段的构造演化模型. 大地构造与成矿学, 39(6): 1022–1032.

- 张旭亮, 何登发. 2018. 桑植-石门复向斜的形成与演化. 地质科学, 53(1): 269–288.
- 周建勋, 郎建, 刘重庆. 2009. 韧性基底层黏度对褶皱-冲断带变形特征的影响—来自物理模拟的启示. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 392–398.
- Costa E, Vendeville B C. 2002. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement. *Journal of Structural Geology*, 24(11): 1729–1739.
- Dong S W, Zhang Y Q, Gao R, Su J B, Liu M, Li J H. 2015. A possible buried Paleoproterozoic collisional orogen beneath central South China: Evidence from seismic-reflection profiling. *Precambrian Research*, 264: 1–10.
- Feng Q Q, Qiu N S, Wu H, Koyi H. 2023. Thermo-kinematic constraints on restoration of the eastern Sichuan fold-and-thrust belt, South China. *Tectonics*, 42(9), e2022TC007630.
- He W G, Zhou J X, Yuan K. 2018. Deformation evolution of eastern Sichuan-Xuefeng fold-thrust belt in South China: Insights from analogue modelling. *Journal of Structural Geology*, 109: 74–85.
- Ji W B, Lin W, Faure M, Chu Y, Wu L, Wang F, Wang J, Wang Q C. 2014. Origin and tectonic significance of the Huangling massif within the Yangtze craton, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 59–75.
- Konstantinovskaya E A, Rodriguez D, Kirkwood D, Harris L B, Theriault R. 2009. Effects of basement structure, sedimentation and erosion on thrust wedge geometry: An example from the Quebec Appalachians and analogue models. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 57(1): 34–62.
- Li C X, He D F, Lu G, Wen K, Simon A, Sun Y P. 2021. Multiple thrust detachments and their implications for hydrocarbon accumulation in the northeastern Sichuan Basin, southwestern China. *AAPG Bulletin*, 105(2): 357–390.
- Li C X, He D P, Sun Y F, He J Y, Jiang Z X. 2015. Structural characteristic and origin of intra-continental fold belt in the eastern Sichuan basin, South China Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 206–221.
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134: 98–136.
- Liu S F, Li W P, Wang K, Qian T, Jiang C X. 2015. Late Mesozoic development of the southern Qinling-Dabieshan foreland fold-thrust belt, Central China, and its role in continent-continent collision. *Tectonophysics*, 644: 220–234.
- Liu S G, Yang Y, Deng B, Zhong Y, Wen L, Sun W, Li Z W, Jansa L, Li J X, Song J M, Zhang X H, Peng H L. 2021. Tectonic evolution of the Sichuan basin, southwest China. *Earth-Science Reviews*, 213, 103470.
- Long K J, Feng Q Q, Tenger B, Qiu N S, Yu T Y. 2025. Differences in the Meso-Cenozoic tectonic evolution between the Huangling paleo-uplift and the surrounding areas in the middle Yangtze Block, South China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 99(2): 394–408.
- Long Y, Chen H L, Cheng X G, Deng H D, Lin X B. 2021. Influence of paleo-uplift on structural deformation of salt-bearing fold-and-thrust belt: Insights from physical modeling. *Journal of Structural Geology*, 153, 104445.
- Massoli D, Koyi H A, Barchi M R. 2006. Structural evolution of a fold and thrust belt generated by multiple décollements: Analogue models and natural examples from the Northern Apennines (Italy). *Journal of Structural Geology*, 28(2): 185–199.
- Michal N, Steven S, Rod G. 2005. Thrustbelts: Structural architecture, thermal regimes and petroleum systems. *New York: Cambridge University Press*.
- Reiter K, Kukowski N, Ratschbacher L. 2011. The interaction of two indenters in analogue experiments and implications for curved fold-and-thrust belts. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1–2): 132–146.
- Rossetti F, Faccenna C, Ranalli G. 2002. The influence of backstop dip and convergence velocity in the growth of viscous doubly-vergent orogenic wedges: Insights from thermomechanical laboratory experiments. *Journal of Structural Geology*, 24(5): 953–962.
- Santolaria P, Vendeville B C, Gravellou F, Soto R, Casas-Sainz A. 2015. Double evaporitic décollements: Influence of pinch-out overlapping in experimental thrust wedges. *Journal of Structural Geology*, 76: 35–51.
- Wang C Y, Cheng X G, Chen H L, Ding W W, Lin X B, Wu L, Li K, Shi J, Li Y. 2016. The effect of foreland Palaeo-uplift on deformation mechanism in the Wupoer fold-and-thrust belt, NE Pamir: Constraints from analogue modelling. *Journal of Geodynamics*, 100: 115–129.
- Xu C H, Zhou Z Y, Yuan Y, Guillot F. 2010. Genesis of Daba arcuate structural belt related to adjacent basement upheavals: Constraints from Fission-track and (U-Th)/He thermochronology. *Science China Earth Sciences*, 53(11): 1634–1646.
- Yan D P, Zhang B, Zhou M F, Wei G Q, Song H L, Liu S F. 2009. Constraints on the depth, geometry and kinematics of blind detachment faults provided by fault-propagation folds: An example from the Mesozoic fold belt of South China. *Journal of Structural Geology*, 31(2): 150–162.

Yan D P, Zhou M F, Song H L, Wang X W, Malpas J. 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361(3–4): 239–254.

## A Physical Simulation of Western Hunan-Hubei Fold-and-thrust Belt

LONG Kangjie<sup>1,2</sup>, QIU Nansheng<sup>1,3\*</sup>, TENER<sup>4\*</sup>, FENG Qianqian<sup>3</sup>,  
HUANG Yonghui<sup>1</sup>, Wu Jianze<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Daqing Oilfield Co., Ltd. Chengdu Exploration and Development Research Institute, Chengdu 610000, Sichuan, China; 3. College of Carbon Natural Energy, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Oil and Gas Survey Center of China Geological Survey, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The fold-and-thrust belt is predominantly developed in the foreland basin and along the margins of the Craton basin. Clarifying the primary controlling factors of the structural evolution of the fold-and-thrust belt is crucial for understanding basin evolution and guiding oil and gas exploration. A case study of the western Hunan-Hubei thrust fold belt reveals that the region underwent intra-continental progressive deformation from southeast to northwest. The tectonic deformation during the Yanshanian period established the structural framework of the present western Hunan-Hubei thrust fold belt, with the deformation process being influenced by multiple detachment layers and the Huangling Paleo-uplift. While numerous scholars have conducted extensive research on the tectonic deformation process, formation timing, and mechanisms of the adjacent thin-skinned folds in eastern Sichuan, achieving a certain level of understanding, the deformation process and formation mechanisms of the western Hunan-Hubei thrust fold belt, as well as the subsidence of the Cretaceous foreland basins surrounding the Paleo-uplift, remain unclear. This study examines the main controlling factors of the structural deformation characteristics of the fold-and-thrust belt through physical simulation experiments. The results indicate that the number of detachment layers and the morphology of the pre-existing Paleo-uplift are the primary factors influencing the structural deformation of the fold-and-thrust belt. The degree of deformation (including amplitude and length) of the simulated folds is used to assess the ease of strain. A decreasing angle of the pre-existing Paleo-uplift morphology enhances the lateral transfer of stress at the Paleo-uplift, facilitating strain occurrence and promoting the development of broken-bend folds and the uplift of thrust folds. As the number of detachment layers increases, the buckle folding effect becomes more pronounced, enabling better stress transfer. When stress is transferred to the Paleo-uplift, it can generate folds, leading to the thickening of overlying strata at the Paleo-uplift. The foreland basin deformation around the Paleo-uplift and its surrounding areas is driven by bi-directional compression from the Qinling-Dabie orogenic belt and the Xuefengshan intracontinental deformation system, resulting in differential tectonic uplift during the Meso-Cenozoic era. The formation mechanism of the western Hunan-Hubei thrust fold belt involves flow folding induced by the extrusion of a stepped thrust belt composed of Triassic and Cambrian detachment layers, combined with the low-angle Huangling Paleo-uplift.

**Keywords:** fold-and-thrust belt; tectonic deformation; morphology of pre-existing Paleo-uplift; western Hunan-Hubei fold belt; physical simulation