

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.423>



川东北通南巴背斜中生代构造变形的砂箱构造物理模拟

马德龙^{1,2}, 王宏斌^{1,2}, 张希晨³, 何登发⁴, 凡睿⁵, 王彦君^{1,2}, 黄林军¹, 崔键^{1,2},
刘文强², 杨秀磊^{2,6}

1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州 730020
2. 中国石油油藏描述重点实验室, 甘肃兰州 730020
3. 中石化勘探分公司, 四川成都 610042
4. 中国地质大学能源学院, 北京 100083
5. 中国石油东方地球物理公司物探技术研究中心, 河北涿州 072750
6. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013

摘要: 通南巴背斜位于四川盆地东北部, 紧邻北部米仓山和东北部大巴山两大造山带, 开展通南巴背斜与不同造山带、川东北先存古隆起的时空耦合关系物理模拟研究, 对于约束周缘造山带的构造变形时间和区域构造变形时序具有重要的科学意义, 同时对川东北油气勘探也有指导作用。初始模型中, 设计了北部推板和东北部推板分别代表米仓山和大巴山造山带的活动; 下部硅胶层和上部石英砂层分别代表三叠系底部膏盐岩和上覆砂岩为主的碎屑岩; 随着油气勘探的深入, 川东北古生代隆起被逐渐接受, 在模型底部用橡皮泥预制条带状构造代表古隆起。实验结果表明, 北部推板挤压过程形成的速度场快速传递到橡皮泥(代表先存古隆起)之上的石英砂中, 形成北东向的褶皱和断裂; 东北部推板挤压过程形成的弧形构造带呈北西向展布, 叠加在早期北东向构造上。通过梳理周缘造山带的隆升历史, 并结合本次模拟实验结果, 认为燕山期米仓山构造活动与古生代北东向隆起共同控制通南巴早期北东向构造的形成, 燕山晚期和喜山期大巴山活动形成一系列北西向构造叠加在通南巴早期北东向构造之上, 控制通南巴背斜须家河组北东向和北西向两组断裂—裂缝系统的形成。

关键词: 川东北; 通南巴背斜; 古隆起; 物理模拟; 构造演化; 构造地质学。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2023)04-1307-14

收稿日期: 2022-06-12

Analogue Modeling of Structural Deformation of Tongnanba Anticline in Mesozoic and Cenozoic, NE Sichuan Basin

Ma Delong^{1,2}, Wang Hongbin^{1,2}, Zhang Xichen³, He Dengfa⁴, Fan Rui⁵, Wang Yanjun^{1,2}, Huang Linjun¹,
Cui Jian^{1,2}, Liu Wenqiang², Yang Xiulei^{2,6}

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou 730020, China
2. Key Laboratory of Reservoir Description, PetroChina, Lanzhou 730020, China
3. Exploration Company, SINOPEC, Chengdu 610042, China

基金项目: 中石化勘探分公司项目“通江地区须家河组裂缝发育规律研究”; 中石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目(Nos.2021DJ0201, 2021DJ0301)。

作者简介: 马德龙(1988-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事构造地质与石油地质研究。ORCID:0000-0002-5669-369X。E-mail: zhenmadelong@126.com

引用格式: 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生代构造变形的砂箱构造物理模拟. 地球科学, 48(4):1307-1320.

Citation: Ma Delong, Wang Hongbin, Zhang Xichen, He Dengfa, Fan Rui, Wang Yanjun, Huang Linjun, Cui Jian, Liu Wenqiang, Yang Xiulei, 2023. Analogue Modeling of Structural Deformation of Tongnanba Anticline in Mesozoic and Cenozoic, NE Sichuan Basin. *Earth Science*, 48(4):1307-1320.

4. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

5. Research and Development Center, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou 072750, China

6. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: Tongnanba anticline is located in the Northeast Sichuan basin, which is adjacent to the Micangshan Mountain to the north and Dabashan Mountain to the northeast. Conducting analogue modeling on tectonic relationships between Tongnanba anticline with surrounding mountains and paleo-uplift has important significance for constraining orogenic tectonic deformation time and sequences in the region, and also has importance significance for oil and gas exploration. In the model, shortening from north and northeast represents Micangshan Mountain and Dabashan Mountain, respectively. Lower silicone and upper sand are used to represent salts of Leikoupo Formation in Triassic and upper clastic rocks, respectively. The plasticine in the model acts as uplift developed in Paleozoic in NE Sichuan basin, which is widely accepted. Experiment results show that during compression from north moving wall, velocity vectors rapidly transferred to plasticine, which representing paleo-uplift, to form NE fold and thrust. During compression from northeast moving wall, NW trend arc-shape structures were formed imposing on the earlier formed NE trend structure. Combining with earlier reports on evolution histories, it makes conclusions that the evolution of Tongnanba anticline was controlled by surrounding Micang and Daba orogenic belts to form tectonic superposition of earlier NE trend structures and later NW trend structures. While, the Paleozoic NE trend uplift in NE Sichuan basin also controlled the orientation of Tongnanba anticline.

Key words: NE Sichuan basin; Tongnanba anticline; uplift; analogue modeling; tectonic evolution; structural geology.

0 引言

造山作用及后期复活在沉积盆地内部的响应是地质学研究的重要内容,四川盆地东北部(简称“川东北”)构造位置特殊,紧邻米仓山和大巴山两大造山带,是研究多造山带联合控制的盆山演化研究的理想场所(图 1)。通南巴背斜位于川东北核心部位,地表呈北东向展布,地下发育北东向和北西向两组构造变形叠加(李岩峰,2005;陈龙博,2015)。川东北钻孔和野外露头样品的低温热年代学测试结果揭示了晚白垩世—新生代早期、新生代晚期两期隆升历史(胡迪等,2016;陈龙博等,2017;刘昭茜等,2019)。此外通过对通南巴背斜地震剖面生长地层的识别,有学者认为通南巴背斜在中晚侏罗世还存在一期更早的隆升(陈龙博等,2017)。米仓山样品的裂变径迹和低温热年代学测试结果记录了中晚侏罗世—早白垩世快速构造抬升(许长海等,2010; Yang *et al.*, 2013),新生代晚期(常远等,2010; Tian *et al.*, 2012)两期隆升历史。米仓山内部的沉积学特征和不整合信息则记录了更早的隆升历史,下侏罗统白田坝组底部巨厚砾岩层,可能是米仓山印支期隆升的重要证据(文竹等,2013),还有学者在下三叠统内部识别区域不整合,认为米仓山在早三叠世发生强烈变形(沈中延等,2010)。利用裂变径迹和热史模拟(沈传波等,2007;许长海等,2010)、(U-Th)/He 低温热年代学(许长海等,2010)、磁组构特

征(谢晋强等,2014)和 ESR(程万强和杨坤光,2009)等方法,总体揭示晚侏罗世—早白垩世是南大巴山推覆构造形成的主要时期,在新生代又发生一次明显的隆升事件。

虽然前人对川东北、米仓山和大巴山的隆升期次开展了详细研究,但是三者之间的时空转化以及内在联系鲜有综合研究工作开展。另外,随着盆地油气勘探的深入,人们逐渐认识到川东北在古生代发育隆起,而古隆起对通南巴背斜的形成演化的影响,也尚未开展研究和讨论。

构造物理模拟实验是揭示盆山演化的重要方法,可以重现区域构造演化过程,探讨不同边界条件对构造演化的控制作用。本文通过开展两个方向挤压和先存古隆起共同控制的多边界条件构造物理模拟研究,进一步厘定川东北盆山时空耦合关系,对于约束周缘造山带的构造变形时间、区域构造变形时序具有重要的科学意义。另外,本文揭示的川东北断裂—裂缝系统形成演化规律是油气成藏的关键要素,对于指导川东北油气勘探具有重要的现实意义。

1 区域构造特征

川东北通南巴背斜位于米仓山冲断带和大巴山弧形冲断带的叠合变形区,整体呈现为 NE 转 NNE 向的大型“长条状”背斜,轴长 90~100 km,核

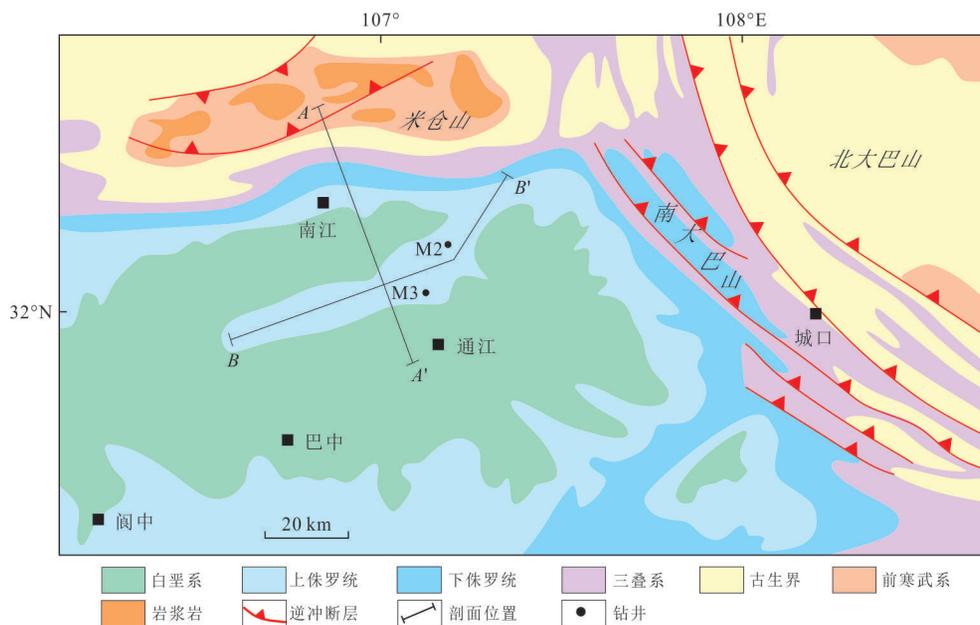


图1 川东北及周缘地质简图(据李智武,2006;文竹等,2013修改)

Fig.1 Geological map of NE Sichuan basin and surrounding areas (modified after Li *et al.*, 2006; Wen *et al.*, 2013)

部出露最老地层为侏罗系上沙溪庙组,向斜出露最新地层为白垩系,其构造走向与米仓山冲断带斜交,角度约为 30° (图1),中新生代经历了多期构造运动(胡迪等,2016;陈龙博等,2017;刘昭茜等,2019).通南巴背斜地下古生界发育较为齐全,仅缺失泥盆系—石炭系(图2).区域构造演化大致经历了震旦纪—奥陶纪的伸展环境,志留纪—泥盆纪的挤压环境以及石炭纪—二叠纪的伸展环境,在中晚三叠世,扬子板块北缘与华北板块发生陆陆碰撞,秦岭洋关闭,川东北地区海水退出,研究区结束了海相碳酸盐台地沉积,进入前陆盆地发育阶段,沉积了巨厚的陆相碎屑岩,并且伴随着多期次的强烈造山运动(何登发等,2011).

米仓山位于扬子板块北缘,由晋宁期基性—酸性侵入杂岩和前寒武纪基底组成(许长海等,2010),中生代以来经历了早三叠世(沈中延等,2010)、早侏罗世(文竹等,2013)、中晚侏罗世—早白垩世(许长海等,2010;Yang *et al.*, 2013)和新生代晚期(常远等,2010;Tian *et al.*, 2012)多期隆升历史;南大巴山位于城口—房县断裂南西,区域上由冲断变形带、冲断褶皱带和前锋褶皱带组成(李岩峰等,2008),中生代以来经历了晚侏罗世—早白垩世和新生代(沈传波等,2007;程万强和杨坤光,2009;许长海等,2010;谢晋强等,2014)两期隆升历史.

米仓山山前发育古生界—侏罗系单斜构造(地

表倾角 $12^\circ\sim 25^\circ$),受前震旦系构造楔控制,并且单斜构造内部还发育双重构造.挤压位移量沿前震旦系滑脱层,经过宽缓向斜构造向东南继续传递形成通南巴背斜(图3).通南巴背斜核部地层被严重剥蚀,从北西向地质结构剖面来看,背斜整体形态保存完整,深部发育一条深大断裂,南翼陡、北翼缓,南翼(前翼)中—上侏罗统中可见翼部旋转生长地层现象,地层倾角从 35° 向上逐渐递减至 19° ,整体上表现出顺时针旋转的形态,并且发育地层上超现象(图3a).从通南巴背斜北东向地质结构大剖面来看,通南巴背斜受前震旦系滑脱层控制整体抬升,三叠系和侏罗系内发育一系列高角度逆冲断层收敛到三叠系底部嘉陵江组滑脱层内(图3b).

2 实验设计

2.1 实验材料

利用中国石油勘探开发研究院西北分院从德国引进的Schulze RST-XS.s环形剪切仪(图4a),对实验材料的力学性质进行测试,石英砂内聚力为75 Pa,内摩擦角为 36.9° ;石英砂—硅粉质量比1:1混合物内聚力为241 Pa、内摩擦角为 39.1° (图4b).实验模型1 cm代表自然界5 km(几何比例相似系数 $\lambda = 2.0 \times 10^{-6}$);实验使用的石英砂密度为 $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,自然界岩石密度常用值为 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,模型和自然界比值约为0.54(Cui *et al.*, 2020);

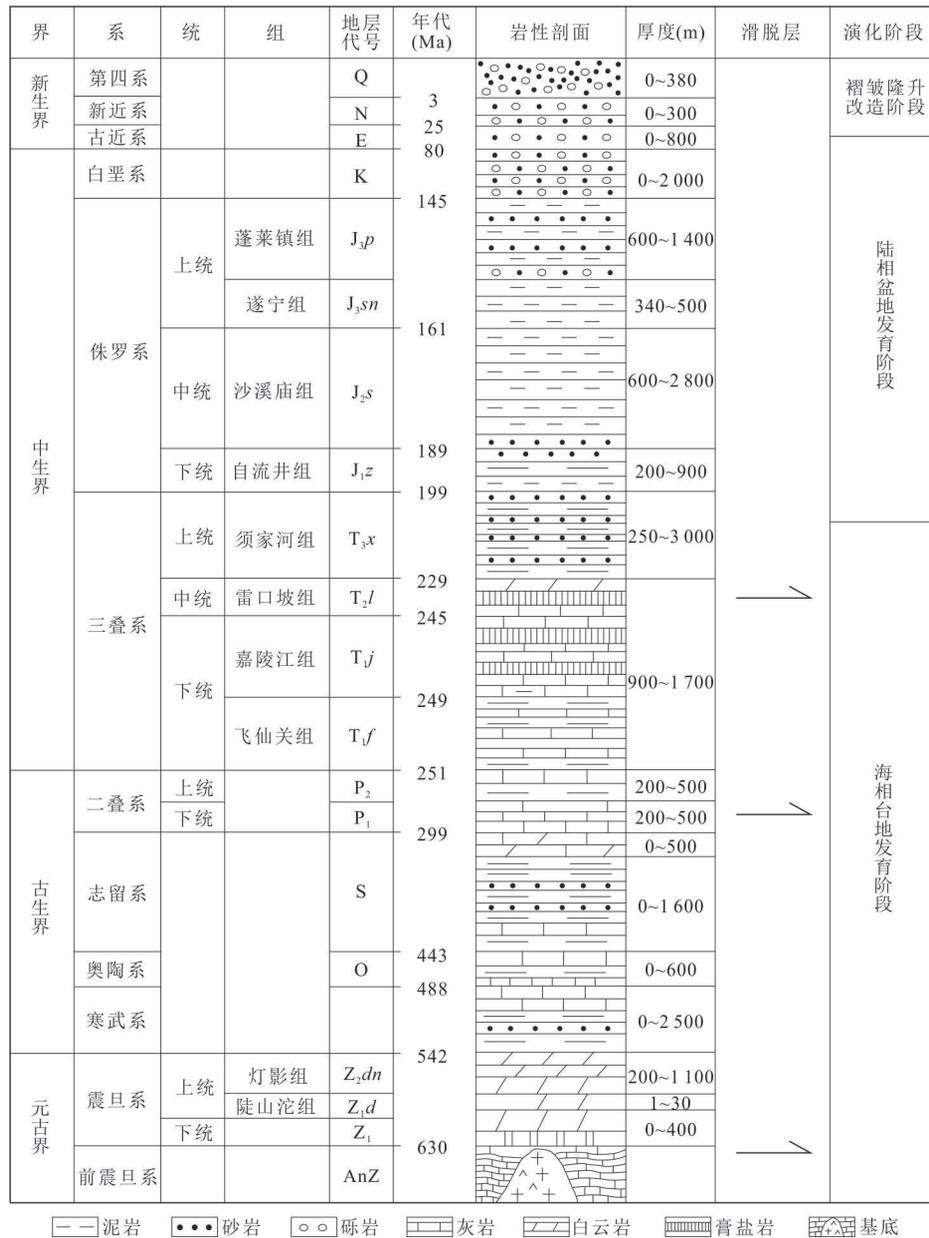


图 2 川东北地层综合柱状图(据李岩峰,2005;陈龙博,2015 修改)

Fig.2 Stratigraphic column of NE Sichuan basin (modified after Li, 2005; Chen, 2015)

用粘度为 $1.2 \times 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的硅胶模拟滑脱层 (Cui *et al.*, 2020). 实验在常重力下进行, 重力加速度比值为 1; 模型和自然界应力比例系数相似比例 $\sigma = \rho \cdot g \cdot \lambda \approx 1.08 \times 10^{-6}$. 具体参数及相似比例系数见表 1.

2.2 初始模型设置

为了探讨四川盆地东北部的形成演化与米仓山和大巴山构造活动的关系, 设置了两个方向挤压的初始实验模型(图 5). 与实际地质条件类似, 北部推板代表米仓山方向的挤压、东北部推板代表大巴山方向的挤压. 结合前人研究成果, 米仓山和南大

巴山前陆冲断带的缩短量均为 30 km 左右(李智武, 2006; 吴磊等, 2011; 文竹等, 2013), 按照本次研究的几何学相似比例系数(表 1), 对应的模型缩短量均为 6 cm. 应变速率比为应力与黏度的比值, 根据本次实验的相似比例系数, 得到的应变速率比值约为 8.3×10^8 . 现今 GPS 观测扬子板块北缘缩短速率 10 mm/a (Wang *et al.*, 2001), 本次实验模型中采用的缩短速率为 1 cm/h, 而应变速率按照速度与长度的比值, 得到的结果为 4.4×10^9 . 两种算法得到的应变速率值在同一个量级内(表 1), 说明本次模型的缩短速率是合理的.

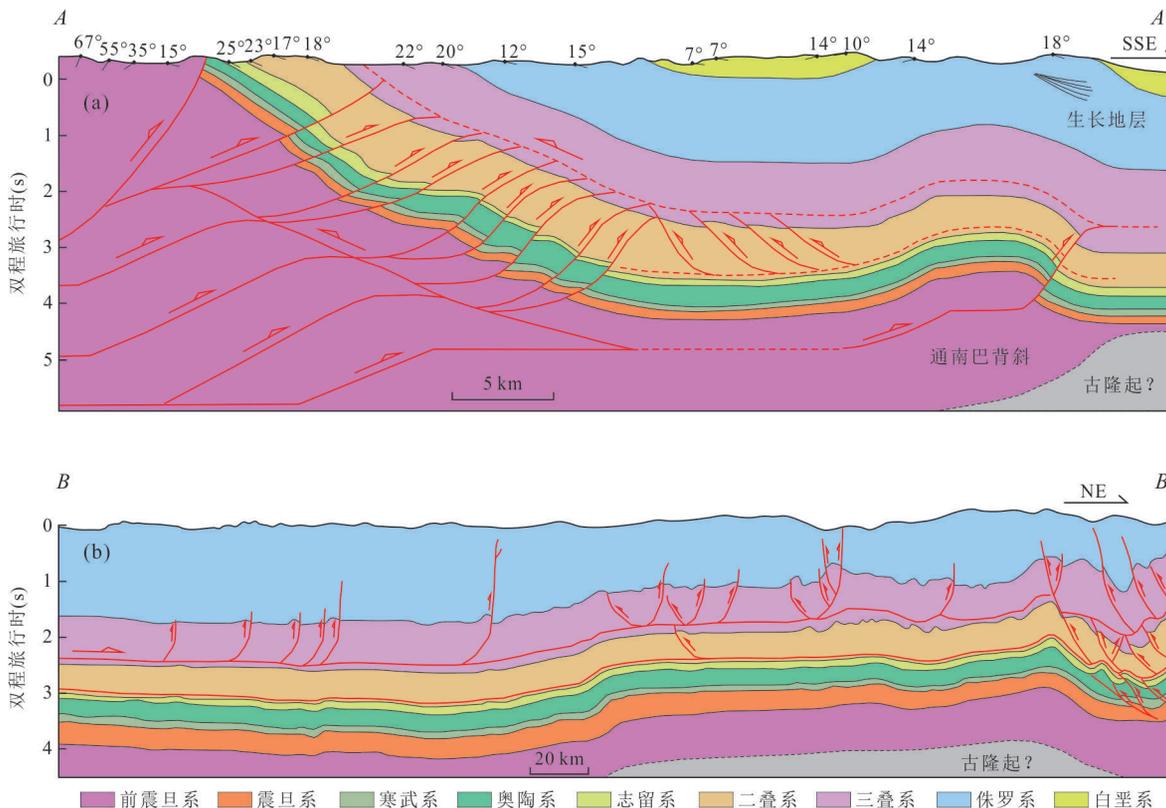


图 3 川东北地区北西向构造大剖面(a)和通南巴背斜北东向地质结构大剖面(b)(据陈龙博, 2015 修改)

Fig.3 Section A-A' (a) and B-B' (b) in NE Sichuan basin (modified after Chen, 2015)

剖面位置见图 1

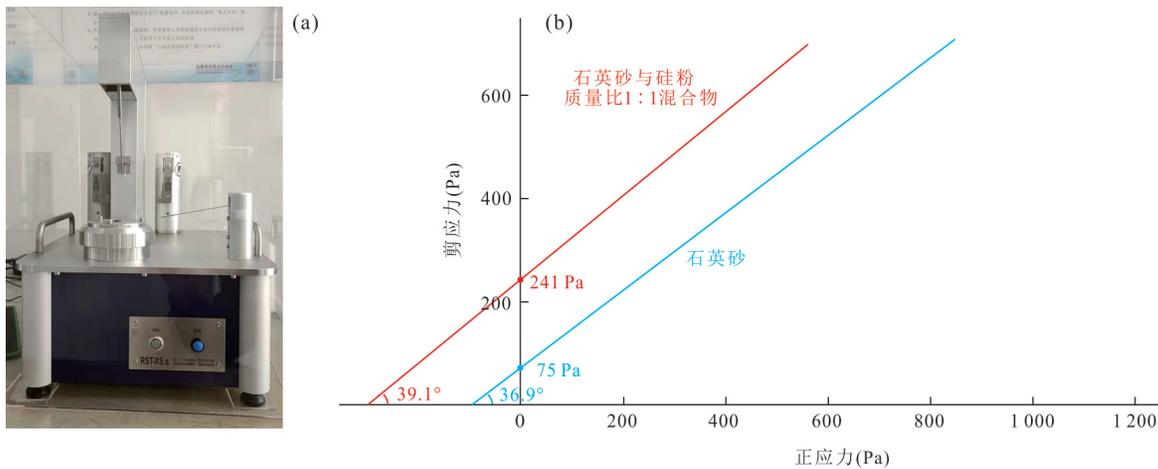


图 4 Schulze RST-XS.s 环形剪切仪(a)和松散颗粒材料测试结果(b)

Fig.4 The apparatus of Ring Shear Tester Schulze RST-XS.s (a); the test data of selected granular material derived from Schulze RST-XS.s (b)

中生代以来,米仓山比大巴山隆升启动时间早,在早三叠世和早侏罗世就有隆升记录(沈中延等, 2010;文竹等, 2013). 裂变径迹和低温热年代学测试结果记录了米仓山和大巴山在晚侏罗世一早白垩世快速构造抬升(程万强和杨坤光, 2009;许长海等, 2010;Lei *et al.*, 2012;Yang *et al.*, 2013;谢晋

强等, 2014). 大巴山在晚新生代有明显的隆升加速过程(程万强和杨坤光, 2009;许长海等, 2010;谢晋强等, 2014). 对构造演化阶段进行了简化,设计了 3 个阶段的实验缩短过程,依次是北部推板单独活动、北部推板和东北部推板同时活动、北部推板停止活动的同时东北部推板继续活动.

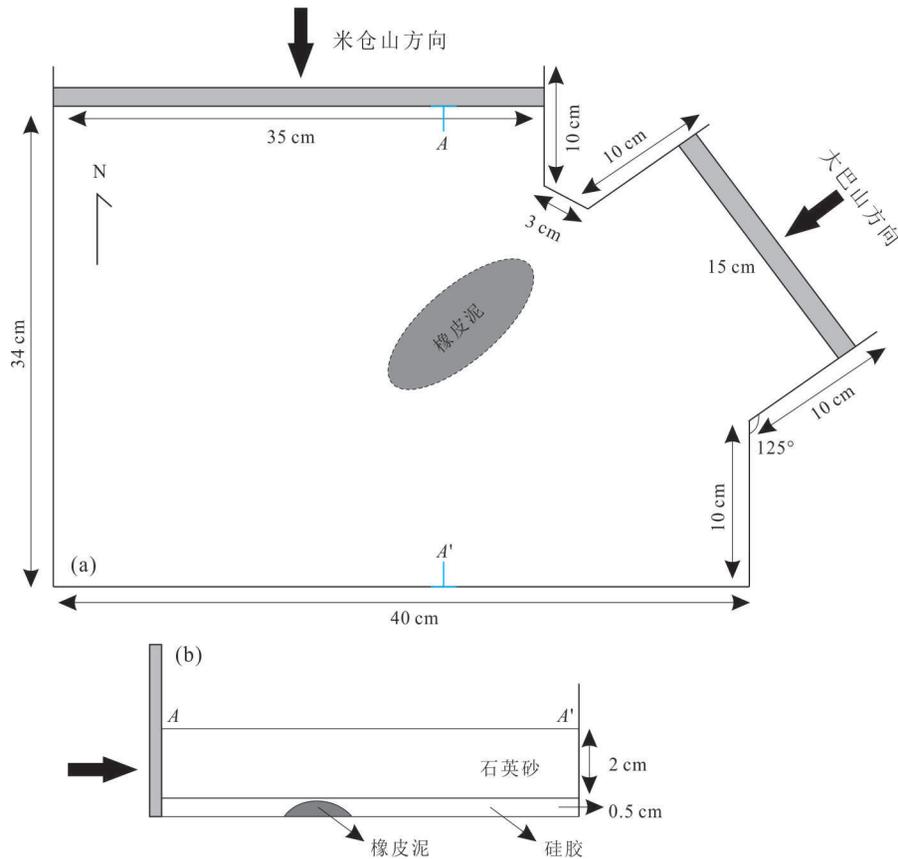


图 5 实验模型平面图(a)和实验模型剖面图(b)

Fig.5 Top view of the model set up (a); the cross section of the model set up (b)

表 1 实验材料物理参数及模型相似比

Table 1 Analogue material properties and scaling ratios of the model

类别	$l(\text{m})$	$g(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$\rho_1(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_2(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\alpha(\text{Pa})$	$\epsilon(\text{s}^{-1})$
模型	1.0×10^{-2}	9.8	1 300	987	1.2×10^4		
自然界	5.0×10^3	9.8	2 400	2 200	1.0×10^{19}	$\alpha^*=\rho^*g^*l^*$	$\epsilon^*=\alpha^*/\mu^*$
模型/自然界	2.0×10^{-6}	1.0	0.54	0.45	1.2×10^{-15}	1.08×10^{-6}	8.3×10^8

注: l : 长度; g : 重力加速度; ρ_1 : 脆性材料的密度; ρ_2 : 塑性材料的密度; μ : 黏度; α : 应力; ϵ : 应变速率; *: 该参数实验模型与自然界的比值

随着川东北深层超深层油气勘探的不断深入, 揭示了川东北前寒武纪—古生代长期发育北东向展布古隆起, 古隆起北部边界位于通江地区(杨跃明等, 2016), 并在印支期最终定型(范慧达, 2018). 本次实验中, 用橡皮泥模拟前中生代古隆起, 高度约为 0.4 cm, 位置和范围见图 4, 用厚度为 0.5 cm 左右的硅胶模拟三叠系雷口坡组膏盐岩滑脱层. 硅胶之上铺设 2 cm 石英砂, 代表三叠系须家河组及上覆陆相碎屑岩.

3 实验结果

实验过程第 1 阶段, 北部推板开始活动, 当缩短

量达到 2 cm 时, 实验模型顶面照片中并没有看到明显的断层(图 6b), 此时速度场在推板前最大、并向南逐渐减小, 具有明显的弧形特征(图 7b). 当缩短量达到 5 cm 时, 在推板以南 4 cm 左右位置发育明显的与推板平行、规模较大近东西向逆冲断层(图 6c, 图 7c). 古隆起上方形成规模较小的逆冲断层(图 6c), 在速度场中表现为北东走向、古隆起控制的速度突变带(图 7c).

实验过程的第 2 阶段, 北部推板持续挤压, 当缩短量达到 6 cm 时, 古隆起上方的逆冲断层规模不断扩大(图 6d); 与此同时东北部推板开始活动, 由于缩短量只有 1 cm, 并未产生明显的逆冲断层(图 6d), 但速度场已经传播到较远的古隆起东段

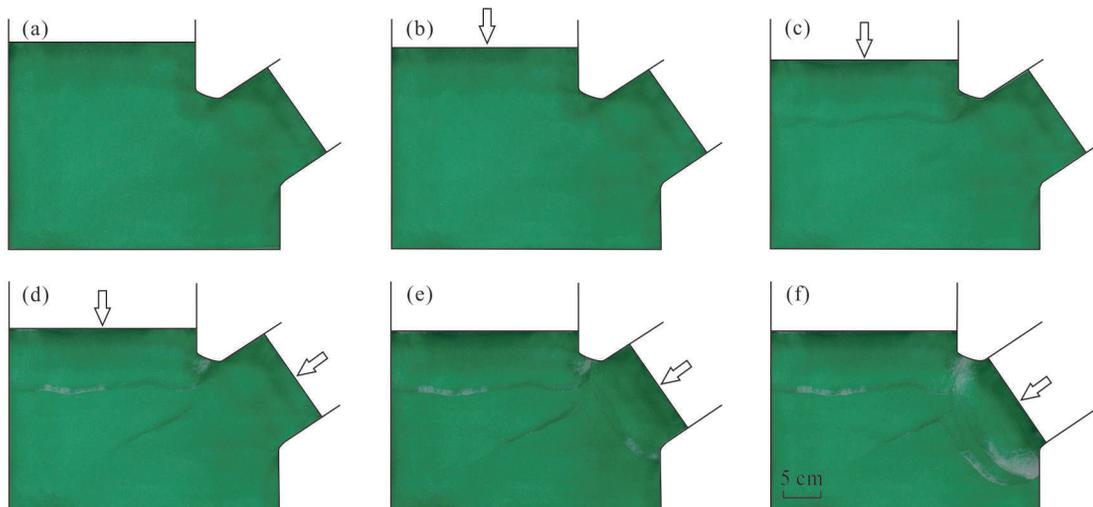


图 6 构造物理模拟实验过程顶面照片

Fig.6 The top views of model results

a. 初始模型; b. 北部缩短 2 cm; c. 北部缩短 5 cm; d. 北部缩短 6 cm, 东北部缩短 1 cm; e. 东北部缩短 4 cm; f. 东北部缩短 6 cm

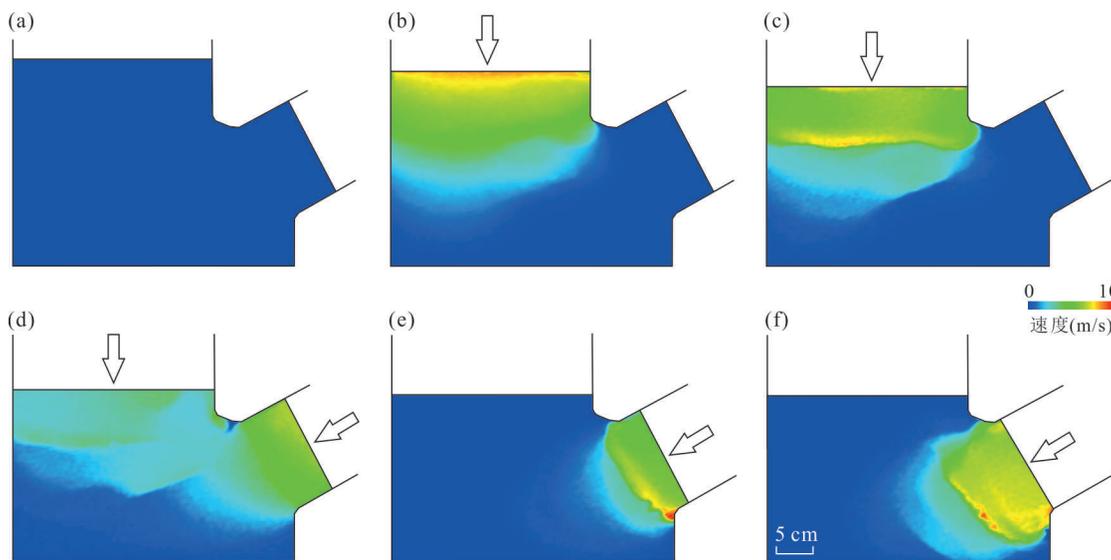


图 7 构造物理模拟实验过程顶面速度场

Fig. 7 The velocity fields of model results

a. 初始模型; b. 北部缩短 2 cm; c. 北部缩短 5 cm; d. 北部缩短 6 cm, 东北部缩短 1 cm; e. 东北部缩短 4 cm; f. 东北部缩短 6 cm

(图 7d).

实验过程的第 3 阶段,北部推板停止活动,东北部推板持续活动,并在推板前方 4 cm 左右位置处形成北西向的弧形逆冲断层,但并未叠加在古隆起上方早期形成的北东向逆冲断层之上(图 6e,图 7e).随着东北方向推板的持续活动,当缩短量达到 6 cm 时,变形继续向西南方向扩展,并叠加在古隆起上方早期形成的北东向逆冲断层之上(图 6f,图 7f).

结合实验模型顶面照片(图 6)和对应的速度场(图 7),对实验模型断裂系统的发育过程进行综合

解释(图 8).北部推板前端首先发育大型逆冲断裂 F_1 ,随后向南远距离传递到橡皮泥之上,形成第 2 条断层 F_2 ,断层 F_1 与 F_2 之间距离较大.而东北部推板前端发育一系列规模较大逆冲断层(F_3 — F_5)以及次级断层,断层之间的距离较小.

实验过程中,每隔 1 h,记录模型顶面所有断层的长度(图 9). F_1 断层在 1~4 h 长度逐渐变长,说明处在断层侧向生长期,4 h 后断层长度基本不变,说明断层停止活动.而 4 h 后, F_2 断层开始活动,表现为断层长度逐渐变长,反映北部推板前端断层具有

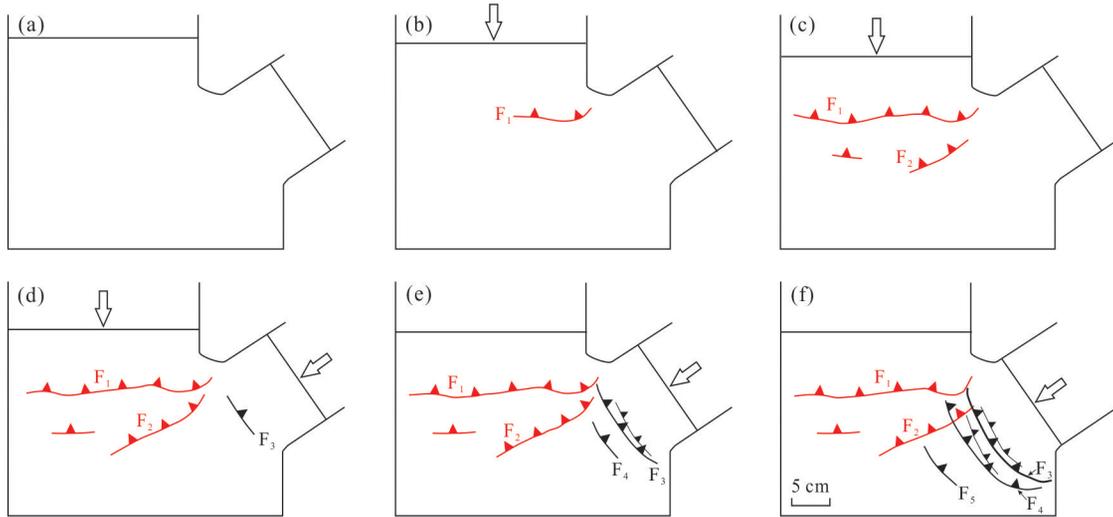


图 8 构造物理模拟实验过程顶面照片构造解译

Fig. 8 The structural interpretation of model results

a. 初始模型; b. 北部缩短 2 cm; c. 北部缩短 5 cm; d. 北部缩短 6 cm, 东北部缩短 1 cm; e. 东北部缩短 4 cm; f. 东北部缩短 6 cm

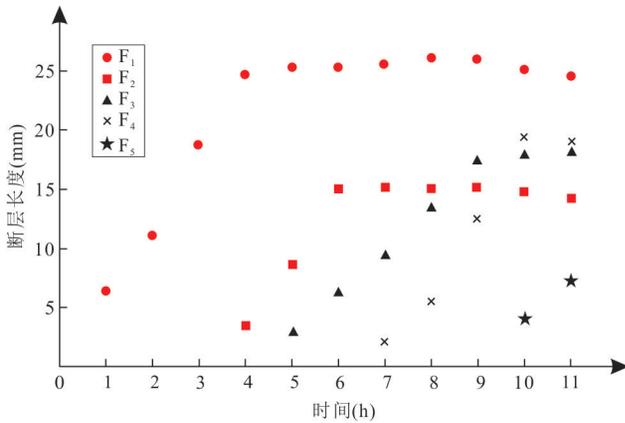


图 9 主要断层长度随时间变化

Fig. 9 The length of main faults during shortening in the model

典型的前展式特征. 东北部推板挤压过程, 主要逆冲断层 F_3 — F_5 也有类似特征, F_3 断层虽然形成时间比 F_4 早, 但两条断层活动时间有交集, 表现为第 7~8 h, F_3 和 F_4 断层同时都在活动.

4 讨论

4.1 盆缘造山事件与通南巴背斜活动

前人围绕川东北盆山体系开展了大量讨论, 利用野外露头、地震资料、沉积充填特征、热年代学等方面的证据, 在周缘造山带活动时间、通南巴地区构造隆升以及成因机制等方面取得了大量成果, 但也存在争议(李岩峰, 2005; 沈传波等, 2007, 2008; 许长海等, 2010; Lei *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2013; 谢晋强等, 2014; 胡迪等, 2016; 陈龙博等, 2017; 刘

昭茜等, 2019).

许长海等(2010)根据裂变径迹和(U-Th)/He 低温热年代学结果, 认为南大巴山弧形带在晚侏罗世—早白垩世(153~100 Ma)形成, 并在约 45 Ma 再次快速隆升. 沈传波等(2007)通过裂变径迹和热史模拟的方法, 厘定南大巴山隆升的起始时间为 120 Ma, 传递到弧形构造带的前缘时间约 72 Ma, 另外在 10~8 Ma 有一次明显的加速隆升事件. 南大巴山磁组构特征也揭示晚侏罗世—早白垩世推覆构造形成期次(谢晋强等, 2014). 还有学者根据 ESR 结果, 认为南大巴山构造主体形成于晚侏罗世—早白垩世(140~120 Ma), 在 40 Ma 才扩展到前陆盆地(程万强和杨坤光, 2009), ESR 年龄指示的石英脉的结晶年龄, 而热液结晶与研究区构造隆升事件的匹配程度需要进一步厘定, 这是造成该方法得到的结果与其他方法差异的主要原因. 前陆冲断带构造变形普遍具有前展式传递规律, 同一构造事件造成的不同构造带隆升时间差异可能达到几十个百万年(沈传波等, 2008), 因此不同学者采样位置的差异、甚至测试条件的不同, 都可能造成测得的年龄结果差异较大. 但总体上揭示晚侏罗世—早白垩世和新生代晚期是南大巴山推覆构造形成的主要时期.

米仓山内部发育下侏罗统白田坝组底部巨厚砾岩层, 可能是米仓山印支期隆升的重要证据(文竹等, 2013), 还有学者在下三叠统内部识别区域不整合, 认为米仓山在早三叠世发生强烈变形(沈中

延等,2010)。因此,米仓山的起始隆升时间可能比大巴山早,所以在实验模型中北部推板先开始活动。裂变径迹和低温热年代学测试结果同样记录了米仓山中晚侏罗世—早白垩世快速构造抬升(许长海等,2010;Lei *et al.*, 2012;Yang *et al.*, 2013),与大巴山隆升时间存在交集,因此在实验过程第5~6 h,设计了北部推板与东北部推板同时活动。米仓山晚新生代以来的活动是有争议的,有学者的裂变径迹和低温热年代学结果指示米仓山只存在中晚侏罗世—早白垩世快速构造抬升(许长海等,2010;Lei *et al.*, 2012),还有学者用相似的方法却得到了不同结果,认为晚新生代还存在一期快速隆升(常远等,2010;Tian *et al.*, 2012),并认为是青藏高原隆升的向东扩展。作者在实验过程中,对晚新生代构造活动进行简化,只设计了东北方向的缩短过程。虽然未设计对比实验,但从实验结果来看,已经得到了与现今地质结构相似的结果,说明实验过程和地质过程具有可对比性。

构造物理模拟实验结果表明,通南巴背斜的形成与米仓山和大巴山造山带的变形传递具有较大关联。实验初期,代表米仓山活动的北部挡板缩短2 cm,古隆起上方石英砂呈现背斜形态,随着北部挡板持续缩短,背斜隆升加剧并向东北和南西两侧延展;而后代表大巴山活动的东北部挡板缩短,背斜形态并未发生明显变化。表明通南巴地区最先受到米仓山活动的影响,产生北东向背斜的主体形态。后期东北部挡板持续活动,褶皱冲断作用不断向西南方向扩展,北西向断裂最终叠加在早期北东向背斜之上。据此推断,大巴山的活动时间可能晚于米仓山,而且大巴山构造活动早期,变形局限于山前,尚未传递至通南巴地区,随着变形持续向西南方向传递,最终波及通南巴地区。因此,通南巴背斜是受米仓山和大巴山共同影响的叠合变形区,先后经历了来自北部和东北部的多期挤压变形,最终形成现今的构造格局,表现为北西向断裂叠加于北东向背斜之上,其中北东向早期构造与米仓山冲断带的活动相关,而北西向晚期构造与大巴山冲断带相关。

本次实验在东北部推板的两侧设置突出部分,分别代表汉南和黄陵两个先存刚性块体(许长海等,2010)。实验过程中,东北部挡板前发育弧形断裂,证明了由南秦岭传导来的挤压应力到达大巴山地区后,很可能受到汉南和黄陵刚性地块的阻挡,

在两者之间形成了向西南突出的弧形构造。因此,汉南和黄陵先存刚性块体可能是大巴山弧形构造带形成的重要因素。实验模型揭示大巴山前陆冲断带发育一系列密集断裂带,断裂带之间的距离比米仓山前陆冲断带大,也可能与汉南和黄陵先存刚性块体有关。

还有研究结果认为,除了米仓山和大巴山造山带的变形传递作用外,通南巴背斜的形成和龙门山、雪峰山造山带的活动也有关联(胡迪等,2016)。而本次实验仅设置了北部和东北部2个方向的挤压缩短,得到的实验结果与实际构造展布特征一致,推测通南巴背斜的形成可能主要与北部米仓山和东北部大巴山有关。另外,现今雪峰山前陆褶皱冲断带的前缘位置距离通南巴背斜也较远,因此雪峰山和龙门山的构造活动对通南巴背斜影响可能比较弱。

4.2 古隆起对通南巴背斜活动的影响

前人对通南巴背斜形成演化与米仓山和大巴山活动关系开展了大量研究和讨论,见本文4.1,而盆内先存古隆起对通南巴背斜演化过程的影响很少有学者讨论。川东北前寒武纪—古生代长期发育古隆起,杨跃明等(2016)认为达州—开江前寒武古隆起北部边界位于通江地区,具有北东向展布的特征;还有学者认为,震旦系古隆起沿宣汉—达州一带分布(赵文智等,2017;李智武等,2019),受控于震旦系—前寒武系通江地区发育北东走向通江—万源断—拗陷(李智武等,2019;李路顺等,2021)。川东北古隆起在印支期定型,形成开江古隆起,发育在寒武系膏盐岩滑脱层之上,是雷口坡组内部的剥蚀型古隆起(范慧达,2018)。本次研究中,用橡皮泥模拟前中生代古隆起,用硅胶模拟三叠系雷口坡组膏盐岩滑脱层。从实验结果可以看出,在挤压过程中,深层的古隆起对浅层速度场具有明显的控制作用(图7c),并在古隆起上覆地层中形成褶皱和逆冲断层(图6c)。从目前的研究现状来看,虽然前中生代古隆起的演化过程和分布范围仍然有争议,但古隆起的发育已经被广泛接受。本次研究认为,通南巴背斜的形成演化既受控于周缘米仓山、大巴山造山活动的影响,还受到前中生代古隆起的影响。

从川东北三叠系构造纲要图中可以看出,北东向构造以褶皱和长度较大的断裂为主,北西向构造以断裂为主(图10),收敛在三叠系底部嘉陵江组滑脱层内,并未断穿三叠系顶部(图3a)。将实验材料

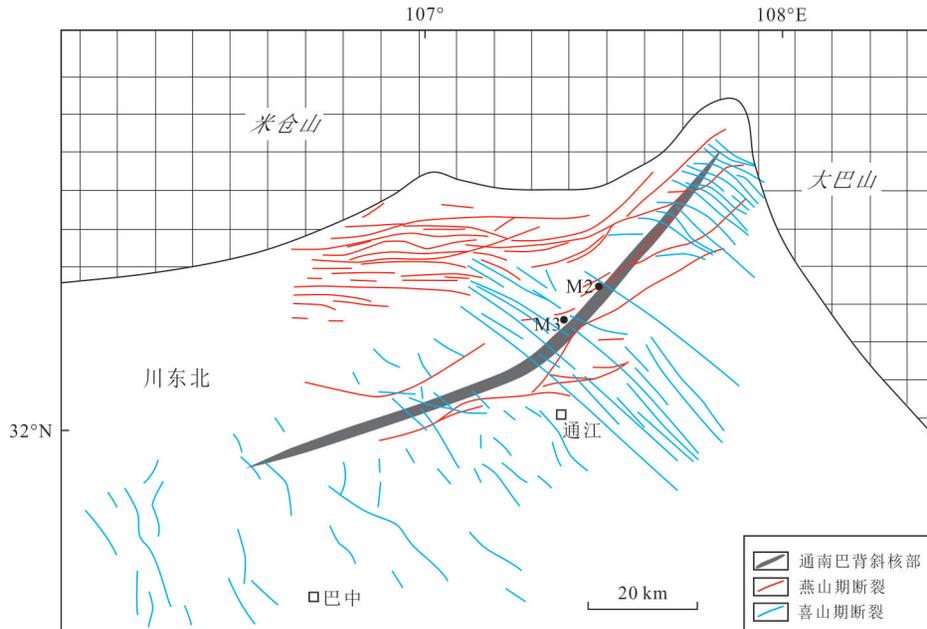


图 10 通南巴背斜及周缘三叠系断裂分布(据刘昭茜等,2019 修改)

Fig.10 The distribution of faults in the Triassic, NE Sichuan basin (modified after Liu *et al.*, 2019)

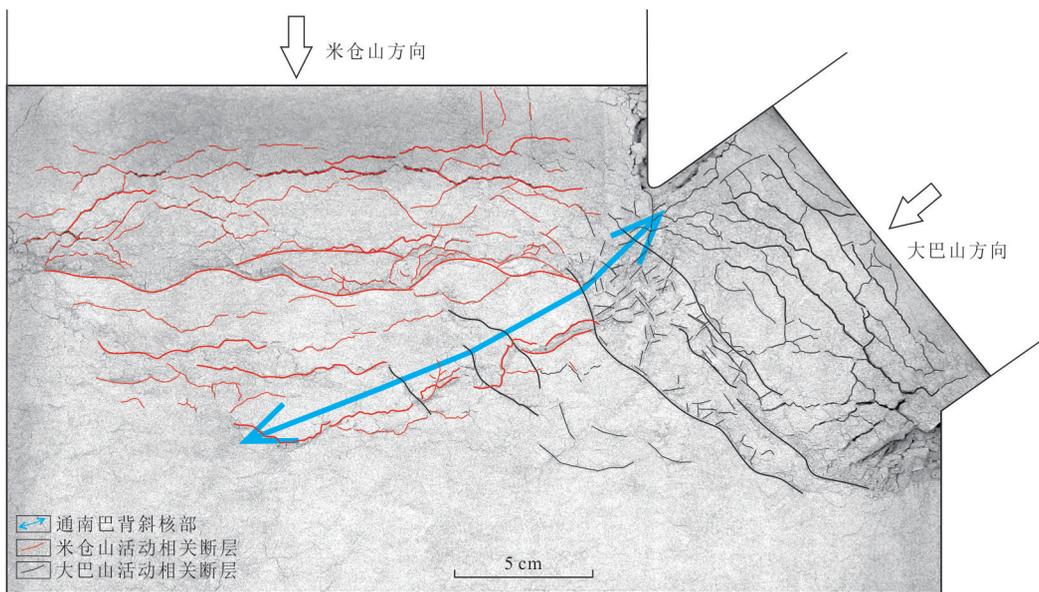


图 11 物理模拟实验结果所揭示的川东北三叠系断裂系统

Fig.11 The fault distribution in the model

石英砂更换成硅粉和石英砂质量比 1:1 混合物,实验方案和初始边界条件同图 5,用来模拟川东北三叠系断裂—裂缝系统展布,实验结果同样揭示北东向和北西向 2 组断裂(图 11),与图 8 展示的结果相比,可以更清晰展示小尺度断裂,与实际构造纲要图揭示的断裂系统展布规律一致(图 10).

4.3 通南巴背斜活动与裂缝发育

通南巴背斜须家河组致密砂岩天然气获得了良好的勘探成效,“断缝体”是成藏的关键(曹环宇

等,2018;黄仁春等,2021),从钻井裂缝统计来看(图 12),主要存在北东走向和北西走向两组裂缝(曹环宇等,2018;杨烁等,2020;苏楠等,2021),和实验结果中断裂走向一致(图 11),北东走向断层—裂缝形成时间早(受控于燕山期米仓山活动),北西走向断层形成时间晚(受控于喜山期大巴山活动).蒋有录等(2020)通过裂缝充填物的成分、切割关系和流体包裹体分析认为,通南巴背斜裂缝发育过程分为 3 期,基本和周缘造山带活动时间相匹配,分别

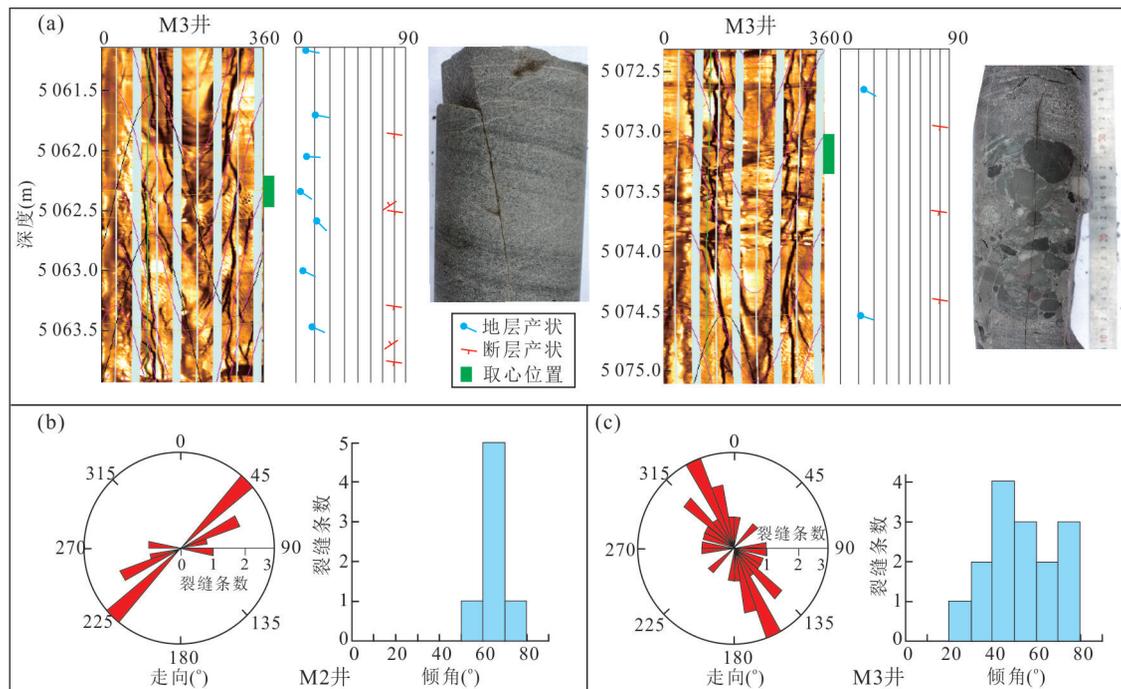


图 12 M3 须家河组井成像测井及岩心(a);M2 井须家河组裂缝玫瑰花图及柱状图(b);M3 井须家河组裂缝玫瑰花图及柱状图(c)

Fig.12 The imaging log and rock samples of Triassic Xujiahe Formation in well M3 (a); the trend-rose diagram and histogram of fractures of Triassic Xujiahe Formation in well M2 (b); the trend-rose diagram and histogram of fractures of Triassic Xujiahe Formation in well M2 (c)

是燕山中期(中侏罗世)的NNW和NWW向共轭构造缝,燕山晚期(白垩纪)的NE向断层、褶皱伴生高角度缝,喜山期(古近纪)的NW和近SN向断层伴生缝,与模拟实验揭示的裂缝分布规律一致(图11)。从实验过程的速度场分布来看,造山活动早期地层整体缩短,区带未发生明显的构造变形(图6b),但速度场可以快速传递到古隆起之上的通南巴地区(图7b),具备形成裂缝的区域应力条件。如果该条件下能够形成裂缝,那么裂缝可能在造山带活动初期就已形成,其动力学机制还是受控于周缘造山带的活动,但形成时间可能早于通南巴背斜区域断裂的形成时间,需要进一步证实。

5 结论

(1)设计了米仓山、大巴山方向缩短和先存古隆起共同控制的多边界条件物理模拟实验模型。米仓山方向缩短时,先存古隆起对浅层地层速度场具有明显的控制作用,并在古隆起上覆地层中形成褶皱和逆冲断层。后期大巴山方向缩短时,发育一系列密集的逆冲断层,但古隆起上覆背斜形态并未发生明显变化。

(2)结合模拟实验结果,认为通南巴地区中生代以来最先受到米仓山活动的影响,产生北东向背斜的主体形态。后期大巴山活动,褶皱冲断作用不断向西南方向扩展,北西向断裂最终叠加在早期北东向背斜之上。川东北深层前中生代古隆起对通南巴背斜发育的位置和形成演化过程具有明显的控制作用。因此,川东北是受米仓山和大巴山共同影响的叠合变形区,加之前中生代古隆起的影响,最终形成现今的构造格局。

References

Cao, H. Y., Wang, W., Liu, M., 2018. Characteristics of Fractures in Xujiahe Formation of Tongnanba Structural Belt, Northeastern Sichuan Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 39(4): 424–429(in Chinese with English abstract).

Chang, Y., Xu, C.H., Reiners, P., et al., 2010. The Exhumation Evolution of the Micang Shan–Hannan Uplift since Cretaceous: Evidence from Apatite (U–Th)/He Dating. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(4): 912–919 (in Chinese with English abstract).

Chen, L.B., 2015. Structural Geometric, Kinematic Features

- and Three-Dimensional Restoration of Tongnanba Anticline(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Chen, L.B., He, D.F., Wang, B., et al., 2017. Dating the Tectonic Deformation since the Middle Triassic for the Tongnanba Anticline in the Northeastern Sichuan Basin and Its Geological Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(3): 433–445(in Chinese with English abstract).
- Cheng, W.Q., Yang, K.G., 2009. Structural Evolution of Dabashan Mountain: Evidence from ESR Dating. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 197–206(in Chinese with English abstract).
- Cui, J., Jia, D., Yin, H.W., et al., 2020. The Influence of a Weak Upper Ductile Detachment on the Longmen Shan Fold-and-Thrust Belt (Eastern Margin of the Tibetan Plateau): Insights from Sandbox Experiments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 198: 104220. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104220>
- Fan, H.D., 2018. Tectonic Evolution and Formation Mechanism of Paleo-Uplift in the Northeastern Sichuan Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- He, D.F., Li, D.S., Zhang, G.W., et al., 2011. Formation and Evolution of Multi-Cycle Superposed Sichuan Basin, China. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 46(3): 589–606(in Chinese with English abstract).
- Hu, D., Shen, C.B., Liu, Z.Y., 2016. Basin Modeling and Thermochronological Constrains on the Burial and Denudational History of the Northeast Sichuan Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(6): 1145–1153(in Chinese with English abstract).
- Huang, R.C., Liu, R.B., Liu, M., et al., 2021. Characteristics and Genesis of Fault-Fracture Reservoirs in the Xujiahe Formation, Tongjiang-Malubei Area, Northeastern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 873–883(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.L., Li, M.Y., Wang, L.J., et al., 2020. Characteristics and Controlling Factors of Tight Sandstone Reservoir Fractures of the Xujiahe Formation in the Bazhong-Tongnanba Area, Northeast Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1525–1537(in Chinese with English abstract).
- Lei, Y. L., Jia, C. Z., Li, B. L., et al., 2012. Meso-Cenozoic Tectonic Events Recorded by Apatite Fission Track in the Northern Longmen-Micang Mountains Region. *Acta Geologica Sinica*, 86(1): 153–165. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2012.00618.x>
- Li, L.S., Wang, Z.C., Xiao, A.C., et al., 2021. Rift System in Northern Yangtze Block during Nanhua Period: Implications from Gravity Anomaly and Sedimentology. *Earth Science*, 46(10): 3496–3508(in Chinese with English abstract).
- Li, Y.F., 2005. Mesozoic-Cenozoic Superimposed Orogeny and Foreland Deformation in the Northeastern Sichuan Basin(Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Li, Y.F., Qu, G.S., Liu, S., et al., 2008. Structural Characters and Mechanism in the Micang Shan and Southern Daba Shan Mountains Front. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 285–292(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.W., 2006. Meso-Cenozoic Evolution of Dabashan Foreland Basin-Thrust Belt, Central China(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.W., Ran, B., Xiao, B., et al., 2019. Sinian to Early Cambrian Uplift-Depression Framework along the Northern Margin of the Sichuan Basin, Central China and Its Implications for Hydrocarbon Exploration. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 59–85(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Luo, K.P., Tang, Y., et al., 2019. Critical Tectonic Periods and the Response of Gas Accumulation in Non-Marine Tight Sandstone Reservoir in Yuanba-Tongnanba Area, Sichuan Basin. *Earth Science*, 44(3): 756–772(in Chinese with English abstract).
- Shen, C.B., Mei, L.F., Tang, J.G., et al., 2008. Geochronology Evidences for Tectonic Deformation of Dabashan Fold-Thrust Belt in Central China. *Atomic Energy Science and Technology*, 42(6): 574–576(in Chinese with English abstract).
- Shen, C.B., Mei, L.F., Xu, Z.P., et al., 2007. Fission Track Thermochronology Evidence for Mesozoic-Cenozoic Uplifting of Daba Mountain, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2901–2910(in Chinese with English abstract).
- Shen, Z.Y., Xiao, A.C., Wang, L., et al., 2010. Unconformity in the Lower Triassic of Micangshan Area, Northern Sichuan Province: Its Discovery and Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1313–1321(in Chinese with English abstract).
- Su, N., Yang, W., Yuan, B.G., et al., 2021. Structural Features and Deformation Mechanism of Transtensional

- Faults in Himalayan Period, Sichuan Basin. *Earth Science*, 46(7): 2362–2378(in Chinese with English abstract).
- Tian, Y. T., Kohn, B. P., Zhu, C. Q., et al., 2012. Post-Orogenic Evolution of the Mesozoic Micang Shan Foreland Basin System, Central China. *Basin Research*, 24(1): 70–90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2011.00516.x>
- Wang, Q., Zhang, P. Z., Freymueller, J. T., et al., 2001. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements. *Science*, 294(5542): 574–577. <https://doi.org/10.1126/science.1063647>
- Wen, Z., He, D.F., Fan, C., et al., 2013. Analysis of the Multi-Detachment Structure in Micangshan Thrust Belt, Northern Sichuan Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 34(3): 282–286(in Chinese with English abstract).
- Wu, L., Qian, J.F., Xiao, A.C., et al., 2011. Structural Analysis of the Micang Shan Basement-Involved Thrust Belt in the Western Edge of the Yangtze Block. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 681–688(in Chinese with English abstract).
- Xie, J.Q., Zhang, G.W., Guo, X.F., et al., 2014. Magnetic Fabrics in Jingzhuba-Shiwo Section of Foreland Fold Belt of the South Dabashan: Constraints on Its Tectonic Evolution. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(4): 1141–1154(in Chinese with English abstract).
- Xu, C.H., Zhou, Z.Y., Chang, Y., et al., 2010. Relationship between the Formation of Dabashan Arc Structural Belt and the Uplift on Both Sides: Constraints of FT and (U-Th)/He Low-Temperature Thermal Age. *Scientia Sinica (Terra)*, 40(12): 1684–1696 (in Chinese).
- Yang, S., Wang, W., Zhang, L., et al., 2020. Control Factors and Distribution of Chlorite-Cemented Facies in the Xujiache Sandstone, Yuanba and Tongnanba Area. *Earth Science*, 45(2): 479–488(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.M., Wen, L., Luo, B., et al., 2016. Sedimentary Tectonic Evolution and Reservoir-Forming Conditions of the Dazhou - Kaijiang Paleo-Uplift, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 36(8): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Ratschbacher, L., Jonckheere, R., et al., 2013. Late-Stage Foreland Growth of China's Largest Orogens (Qinling, Tibet): Evidence from the Hannan-Micang Crystalline Massifs and the Northern Sichuan Basin, Central China. *Lithosphere*, 5(4): 420–437. <https://doi.org/10.1130/l260.1>
- Zhao, W.Z., Wei, G.Q., Yang, W., et al., 2017. Discovery of Wanyuan-Dazhou Intracratonic Rift and Its Exploration Significance in the Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 659–669(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹环宇, 王威, 刘明, 2018. 川东北通南巴构造带须家河组裂缝特征. *新疆石油地质*, 39(4): 424–429.
- 常远, 许长海, Reiners, W.P., 等, 2010. 米仓山—汉南隆起白垩纪以来的剥露作用: 磷灰石(U-Th)/He年龄记录. *地球物理学报*, 53(4): 912–919.
- 陈龙博, 2015. 通南巴背斜构造几何学、运动学特征及三维构造复原(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 陈龙博, 何登发, 王贝, 等, 2017. 川东北地区通南巴背斜中三叠世以来构造变形时间厘定及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 41(3): 433–445.
- 程万强, 杨坤光, 2009. 大巴山构造演化的石英ESR年代学研究. *地学前缘*, 16(3): 197–206.
- 范慧达, 2018. 四川盆地东北部古隆起的构造演化与成因机制(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等, 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. *地质科学*, 46(3): 589–606.
- 胡迪, 沈传波, 刘泽阳, 2016. 川东北地区埋藏—剥露历史分析: 来自盆地模拟和热年代的制约. *大地构造与成矿学*, 40(6): 1145–1153.
- 黄仁春, 刘若冰, 刘明, 等, 2021. 川东北通江—马路背地区须家河组断缝体储层特征及成因. *石油与天然气地质*, 42(4): 873–883.
- 蒋有录, 李明阳, 王良军, 等, 2020. 川东北巴中—通南巴地区须家河组致密砂岩储层裂缝发育特征及控制因素. *地质学报*, 94(5): 1525–1537.
- 李路顺, 汪泽成, 肖安成, 等, 2021. 扬子北缘南华纪裂谷系统: 基于重力异常及沉积学证据. *地球科学*, 46(10): 3496–3508.
- 李岩峰, 2005. 四川盆地东北部中—新生代造山与前陆变形构造叠合关系研究(博士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所.
- 李岩峰, 曲国胜, 刘殊, 等, 2008. 米仓山、南大巴山前缘构造特征及其形成机制. *大地构造与成矿学*, 32(3): 285–292.
- 李智武, 2006. 中—新生代大巴山前陆盆地—冲断带的形成演化(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 李智武, 冉波, 肖斌, 等, 2019. 四川盆地北缘震旦纪—早寒武世隆—坳格局及其油气勘探意义. *地学前缘*, 26(1): 59–85.
- 刘昭茜, 罗开平, 唐永, 等, 2019. 四川盆地元坝—通南巴地区关键构造期构造特征及陆相致密砂岩天然气成藏响

- 应. 地球科学, 44(3): 756—772.
- 沈传波, 梅廉夫, 汤济广, 等, 2008. 大巴山逆冲推覆带构造扩展变形的年代学制约. 原子能科学技术, 42(6): 574—576.
- 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等, 2007. 大巴山中—新生代隆升的裂变径迹证据. 岩石学报, 23(11): 2901—2910.
- 沈中延, 肖安成, 王亮, 等, 2010. 四川北部米仓山地区下三叠统内部不整合面的发现及其意义. 岩石学报, 26(4): 1313—1321.
- 苏楠, 杨威, 苑保国, 等, 2021. 四川盆地喜马拉雅期张扭性断裂构造特征及形成机制. 地球科学, 46(7): 2362—2378.
- 文竹, 何登发, 樊春, 等, 2013. 四川盆地北部米仓山冲断带多层滑脱系统构造分析. 新疆石油地质, 34(3): 282—286.
- 吴磊, 钱俊锋, 肖安成, 等, 2011. 扬子地块西侧米仓山基底卷入式冲断带的结构分析. 岩石学报, 27(3): 681—688.
- 谢晋强, 张国伟, 郭秀峰, 等, 2014. 南大巴山前陆褶皱带荆竹坝: 石窝剖面磁组构特征及其对构造演化的制约. 地球物理学报, 57(4): 1141—1154.
- 许长海, 周祖翼, 常远, 等, 2010. 大巴山弧形构造带形成与两侧隆起的关系: FT 和(U-Th)/He 低温热年代约束. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1684—1696.
- 杨烁, 王威, 张莉, 等, 2020. 元坝—通南巴地区须家河组绿泥石膜胶结相砂岩发育控制因素与分布规律. 地球科学, 45(2): 479—488.
- 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等, 2016. 四川盆地达州—开江古隆起沉积构造演化及油气成藏条件分析. 天然气工业, 36(8): 1—10.
- 赵文智, 魏国齐, 杨威, 等, 2017. 四川盆地万源—达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义. 石油勘探与开发, 44(5): 659—669.