

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.109



川东多套滑脱层褶皱构造带形成物理模拟

吴航^{1,2}, 邱楠生^{1,2*}, 常健^{1,2}, 张纪新^{1,2}, 王晔^{1,2}

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

摘要: 川东地区发育典型的“侏罗山式”褶皱构造带, 以北东走向的齐岳山断裂为界, 南东侧为隔槽式褶皱, 北西侧为隔挡式褶皱。中生代川东地区经历了自南东向北西的陆内递进变形, 受多套滑脱层(基底拆离面、下寒武统页岩、志留系泥页岩和三叠系膏盐)的共同控制。但是, 关于川东褶皱带的形成机制及其整体和分段形成时间仍存在较大争议。应用构造物理模拟方法, 再现了川东“侏罗山式”褶皱带的形成过程, 并分析了先存断裂及其倾向对川东褶皱构造变形的影响。模拟结果表明, 川东褶皱带是齐岳山断裂、华蓥山断裂、志留系滑脱层和基底拆离面组成的阶梯状体系在构造挤压下发生断层相关褶皱作用的结果。基底拆离面(深度约 16 km)控制隔槽式褶皱的发育, 志留系页岩主要控制隔挡式褶皱的形成。中生代(165~75 Ma)川东地区的构造缩短率约为 32%。齐岳山断裂是隔槽式褶皱向隔挡式褶皱过渡的重要枢纽, 是先存高角度断裂浅部向北西迁移后的产物。华蓥山断裂的倾向控制着隔挡式褶皱的波长, 当倾向较陡时(45°)更有利于发育典型的隔挡式褶皱。

关键词: 川东褶皱带; 形成机制; 构造物理模拟; 齐岳山断裂; 华蓥山断裂; 构造地质。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2019)03-0784-14

收稿日期: 2018-09-20

Physical Simulation on Development of Multilayer Detachment Fold Belt in Eastern Sichuan

Wu Hang^{1,2}, Qiu Nansheng^{1,2*}, Chang Jian^{1,2}, Zhang Jixin^{1,2}, Wang Ye^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Research Center for Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: Jura-type folds are well-developed in the eastern Sichuan fold-thrust belt, which are separated into two areas with different structural styles by the northeast-trending Qiyueshan fault, ejective folds to the northwest and trough-like folds to the southeast. The tectonic deformation of the Mesozoic intra-continental structural belt is progressive from southeast to northwest and controlled by multiple detachment layers which are the basement decollement horizon, lower-Cambrian shale, Silurian shale and Triassic gypsum-rock, respectively. However, there is still much controversy about the formation mechanism of the eastern Sichuan fold belt and its overall and segmentation formation time. Based on tectonic physical simulation, we reproduced the formation of the Jura-type folds in eastern Sichuan and analyzed the influence of pre-existing fault and fault dips on the tectonic deformation of the eastern Sichuan fold belt. The simulation results show that the eastern Sichuan fold belt is the product of fault-related folding caused by tectonic extrusion in the step system composed of Qiyueshan fault, Huayingshan fault, basement decollement horizon and Silurian detachment layer. The basement decollement horizon (depth of ~16 km) results in trough-like folds, while the Silurian shale leads to ejective folds. The structural shortening rate of Mesozoic (about 165–75 Ma) in eastern

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41690133); 国家科技重大专项(No.2016ZX05007-003); 北京市领军人才项目(No.Z171100001117163)。
作者简介: 吴航(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事油区构造解析和盆地温压场方面的研究。ORCID:0000-0001-8625-6979。

E-mail: wh_geology@sina.com

* 通讯作者: 邱楠生, ORCID:0000-0001-8092-0410, E-mail: qiunsh@cup.edu.cn

引用格式: 吴航, 邱楠生, 常健, 等, 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.

Sichuan is about 32%. The Qiyueshan fault is an important hinge for the transition from trough-like folds to ejective folds, and is the product of migration of the shallow part of this high-angle fault to the northwest. The steep-dipping Huayingshan fault determines the wavelength of folds, favoring the development of typical ejective folds.

Key words: eastern Sichuan fold belt; formation mechanism; structural physical simulation; Qiyueshan fault; Huayingshan fault; structural geology.

0 引言

川东构造带是我国页岩气勘探的热点地区(戴方尧等,2017;林俊峰等,2017),其位于四川盆地与雪峰隆起之间,是扬子板块西部的重要板内变形带,构造上表现为走向北北东—北东的“侏罗山式”弧形褶皱带(胡召齐等,2009;张必龙等,2009)(图1)。“侏罗山式”褶皱是典型的薄皮构造,变形特征为基底不卷入变形、盖层与基底由滑脱层分隔产生构造不协调。根据盖层发育的背斜和向斜变形强度不同,可将其分为背斜紧闭向斜宽缓的隔挡式褶皱和背斜宽缓向斜紧闭的隔槽式褶皱。

滑脱褶皱的构造形态(包括对称性、波长、幅宽比等)受上覆地层的厚度、滑脱层厚度、岩石力学性质、应变速率等多种因素的控制(Dogliani and Prosser,1997;Costa and Vendeville,2002;Koyi and Cotton,2004),其中滑脱层的深度是最主要的控制因素(Costa and Vendeville,2002;Mitra,2003;Massoli *et al.*,2006;周建勋等,2009;张小琼等,2013,2015)。川东地区发育多套区域滑脱层,前人对川东褶皱带形成过程中滑脱层的作用已达成共识,一般认为隔槽式褶皱的主控滑脱层是基底内部拆离面(冯向阳等,2003;丁道桂等,2007;张小琼等,2015),而隔挡式褶皱的主控滑脱层是下寒武统或志留系的页岩或泥岩(Yan *et al.*,2003;冯常茂等,2008)。但是,对于川东褶皱带的形成机制及其整体和分段形成时间仍存在较大争议。主要的成因模型包括:(1)基底断层模型,即基底断层逆冲活动形成隔槽式褶皱(张文佑等,1978);(2)箱型褶皱模型,隔槽式褶皱和隔挡式褶皱分别是箱型褶皱遭受不同程度剥蚀的结果(刘尚忠,1995);(3)构造反转模型,隔挡式褶皱是早期伸展断层形成的滚动背斜后期反转的结果(李忠权等,2002);(4)断弯褶皱模型,川东褶皱带是受台阶状断层和基底滑脱层控制的断弯褶皱,隔槽式褶皱是隔挡式褶皱持续演变的产物(颜丹平等,2000;Yan *et al.*,2003;冯常茂等,2008;Yan *et al.*,2009);(5)断展—纵弯褶皱模型,

即隔挡式褶皱是纵弯作用形成的膝折褶皱带,而隔槽式褶皱是基底拆离断层控制的盖层构造变形(丁道桂等,2005,2007)。对于隔挡式和隔槽式褶皱的形成时间可以概括为2大类观点:(1)两者同时形成,同属于纵弯褶皱,是箱型褶皱模型的代表(刘尚忠,1995);(2)两者不同时期形成,包括断弯褶皱和断展—纵弯褶皱2种作用模式(颜丹平等,2000;Yan *et al.*,2003,2009;冯常茂等,2008)。

上述争议的核心在于隔槽式褶皱向隔挡式褶皱的转换机制尚不明确,前人虽然对川东褶皱带的形成过程进行了大量的模拟实验,但都很大程度地简化或理想化了模型设置(刘重庆等,2013;解国爱等,2013;张小琼等,2013,2015),这不可避免地存在一系列问题。首先,实验者尝试使用阶梯状的底板(解国爱等,2013)或刚性块体(刘重庆等,2013;张小琼等,2015)来实现隔槽式褶皱向隔挡式褶皱的转换,虽然模拟实验中一般会使用刚性块体模拟基底,但从地质剖面上看,隔挡褶皱区的基底明显深于隔槽褶皱区(图1c),显然设置的模型与地质实际不符;其次,模拟结果中隔槽褶皱区的变形特征较为相似,但隔挡褶皱区的褶皱形态和变形程度(刘重庆等,2013;解国爱等,2013)与实际相差较大;再次,一些模型中虽然设置了先存的齐岳山断裂(张小琼等,2015),但并未考虑华蓥山断裂,而低温热年代学数据显示出华蓥山背斜比相邻的蒲包山背斜更早形成(Richardson *et al.*,2008;王平等,2012),模拟结果中未能印证这一现象;最后,模型仅考虑了1~2套滑脱层,而川东褶皱带至少发育3~4套主要的滑脱层,这导致最终的褶皱变形较为简单,没有完全模拟出川东地区复杂的褶皱变形和各构造层之间的构造不协调(刘重庆等,2013;解国爱等,2013;张小琼等,2013,2015)。

本文在前人研究成果的基础上,通过构造物理模拟实验,设置4套主要的区域滑脱层(基底拆离面、下寒武统页岩、志留系页岩和三叠系膏盐岩),再现了川东“侏罗山式”褶皱的形成过程,并探讨了先存断裂和断层倾角对川东褶皱带构造变形的影响。

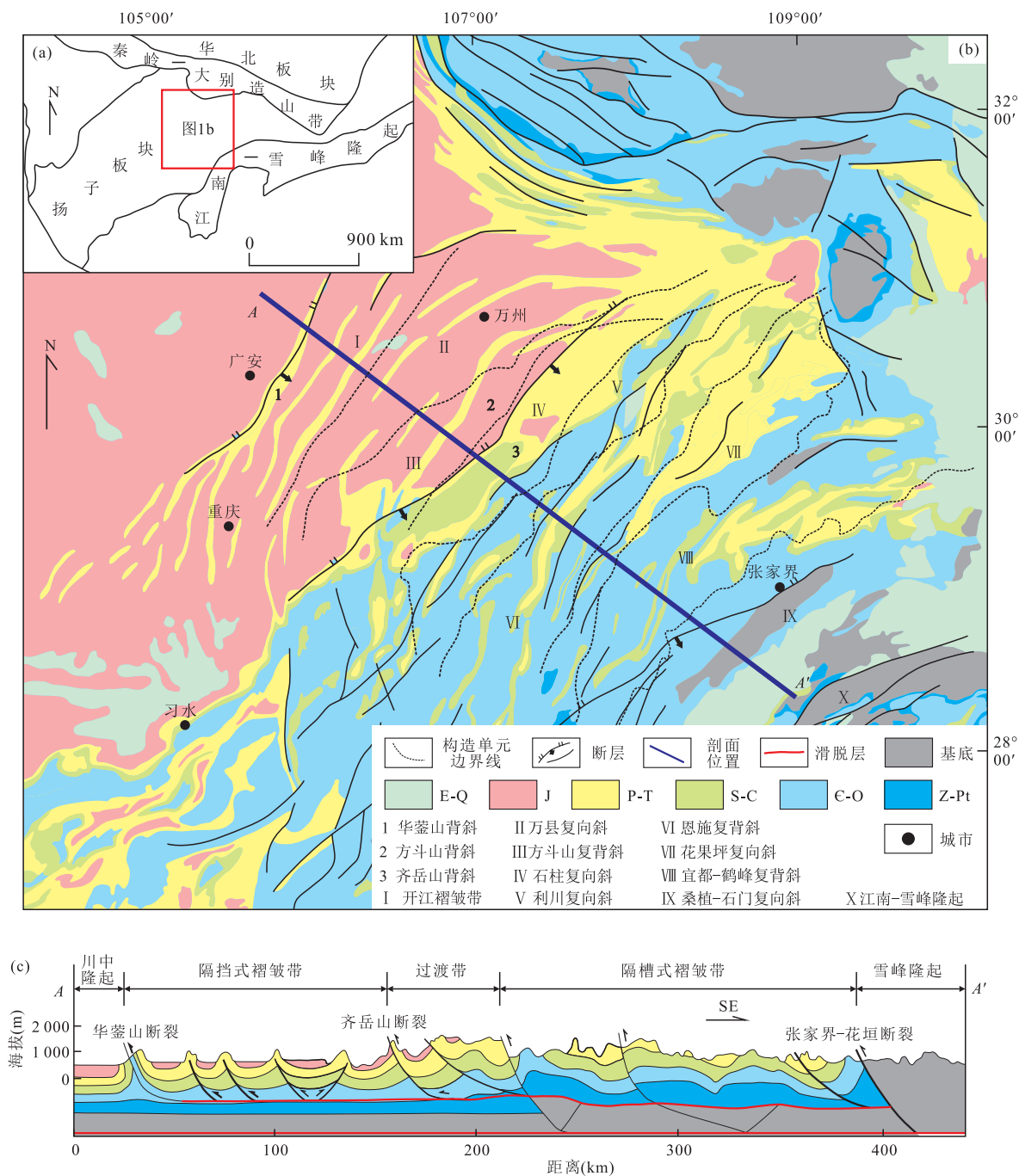


图 1 川东地区构造地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the eastern Sichuan

a.研究区的大地构造位置;b.川东地区构造纲要简图,修改自颜丹平等(2000)、梅廉夫等(2010)和 Li *et al.*(2015);c.典型剖面图,平面位置如图 b 所示,修改自胡召齐等(2009)和王平等(2013)

1 地质背景

川东褶皱带位于扬子地块中部(图 1a),南东与江南—雪峰隆起以张家界—花垣断裂为界,北西以华蓥山断裂为界与川中隆起分隔,构造上表现为走向北北东—北东、向北西凸出的弧形褶皱带,构造带

宽约 400 km,长约 600 km,由一系列被断层切割的复背斜和复向斜相间组成(图 1b).川东地区的构造演化主要经历了 4 个阶段:印支期以前弱褶皱阶段、印支期褶皱雏形阶段、燕山期褶皱活跃阶段、喜马拉雅期褶皱定型阶段(邹玉涛等,2015).燕山期华南板块内部发生了大规模的由南东向北西的推覆作用,

川东地区发育系列递进扩展逆冲推覆构造,是“侏罗山式”褶皱的主要形成时期(郭旭升等,2014)。

北东走向的齐岳山断裂将川东褶皱带划分为隔槽式的湘鄂西断褶带和隔挡式的川东断褶带。其中,隔槽式褶皱带宽约220 km,自南东向北西由桑植—石门复向斜、宜都—鹤峰复背斜、花果坪复向斜、恩施复背斜和利川复向斜等构造带组成,背斜主要出露下古生界,向斜出露上古生界,新元古界基底部分卷入,由南东向北西褶皱强度逐渐减小,地表高程为700~1500 m;隔挡式褶皱带宽约170 km,从南东向北西由石柱复向斜、方斗山复背斜、万县复向斜和开江褶皱带组成,背斜主要出露三叠系,向斜主要出露侏罗系,高程为500~1000 m(图1c)。

川东褶皱带的断裂与褶皱相比,发育程度不高,只发育3条倾向南东的区域性断裂,分别是走向北东东—北东的张家界—花垣断裂、走向北东的齐岳山断裂和走向北东的华蓥山断裂(图1b)。张家界—花垣断裂上盘构造以北东—北东东走向为主,发育复杂的挤压逆冲构造;齐岳山断裂上盘为隔槽式褶皱向隔挡式褶皱的过渡带,地震波速度在断层两侧存在突变性差异(梅廉夫等,2010),它是一条活动较早的断裂带(贾小乐,2016);华蓥山断裂全长逾400 km,其上盘为隔挡式褶皱带,是川中隆起与川东断褶带的分界断层(梅廉夫等,2010),贾小乐(2016)的研究表明该断层自加里东期已经开始活动,也是一条先存断裂。此外,区内也发育一些次级断裂,走向以北东为主,喜山期川东褶皱带南部由于受到印度板块挤压的影响,形成一些走向近南北的断裂。

川东地区发育震旦系至第四系逾万米的地层,其中震旦系到中三叠统为海相碳酸盐岩地层,上三叠统到第三系为陆相碎屑岩地层,受加里东运动的影响,川东地区缺失上志留统、泥盆系和石炭系(图2)。川东褶皱带发育4套主要滑脱层,分别是基底拆离层、下寒武统滑脱层、志留系滑脱层和三叠系滑脱层。前人的地球物理探测(丁道桂等,2005,2007)和数值模拟实验(张小琼等,2013,2015)表明,隔槽褶皱带拆离面深度为7~8 km(变形基底厚度为3~4 km),加之现今7~8 km的剥蚀厚度,基底拆离面的初始深度为14~16 km。下寒武统滑脱层主要为下寒武统牛蹄塘组页岩和中下寒武统高台组、龙王庙组膏盐岩(解国爱等,2013;贾小乐,2016),厚500~1000 m,志留系厚层泥页岩,最大厚度约

1500 m,包括韩家店组泥岩、小河坝组泥岩夹粉砂岩和龙马溪组页岩;受沉积环境的影响,由隔挡褶皱带向隔槽褶皱带砂质含量明显增多(刘树根等,2011),滑脱作用逐渐减弱,在隔槽褶皱带多卷入变形(解国爱等,2013)。三叠统滑脱层主要包括嘉陵江组膏盐岩、泥岩和雷口坡组页岩,厚300~900 m(图2)。

2 实验材料和模型设计

2.1 实验材料

本文采用微玻璃珠模拟岩层。微玻璃珠的粘聚力几乎为零,内摩擦角约为 25° ,密度为 1300 kg/m^3 。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),适合模拟地层褶皱作用(解国爱等,2013)。硅树脂在低应变速率下具有牛顿流体性质,是模拟滑脱层的常用材料。本实验使用200万分量子的硅树脂模拟滑脱层,其在室温下粘度为 $1.2\times 10^4\text{ Pa}\cdot\text{s}$,密度为 0.95 g/cm^3 。使用50~70目的微玻璃珠铺设在硅树脂之上,用于模拟沉积地层,并将染色的石英砂铺设于微玻璃珠层间作为标志层。

2.2 模型设计

模拟实验在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室进行。根据物理模拟实验相似性原则,实验模型初始长125 cm,宽20 cm,高4.6 cm(图3)。模型长度相似因子为 2.5×10^{-6} ,即1 cm模拟地质原型的4 km,粘度相似因子为 $10^{-16}\sim 10^{-17}$,计算出时间相似因子为 $8\times 10^{-11}\sim 8\times 10^{-12}$,即模拟1 h相当于地质时间的1.4~14 Ma。根据川东褶皱带地层厚度及岩性特征(图2),模型中铺设了前震旦系—侏罗系,并设置4套滑脱层,自下而上依次为基底拆离层、下寒武统滑脱层、志留系滑脱层和三叠系滑脱层,具体参数见表1。底部硅树脂上覆材料厚4.0 cm,模拟基底拆离面地质深度为16 km。将表面光滑的硬纸板(摩擦系数约为0.1,厚度为0.5 mm)预设于模型中,模拟先存的华蓥山断裂和齐岳山断裂,其中华蓥山断裂滑脱于寒武系滑脱层,齐岳山断裂滑脱于基底拆离面。由于隔槽褶皱带的志留系砂质含量增高,并强烈卷入褶皱变形,没有起到明显的滑脱作用,因此该层只在齐岳山断裂左侧(北西侧)铺设(图3)。



图 2 川东地区综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the eastern Sichuan

修改自 Li et al.(2015)和曹环宇等(2016)

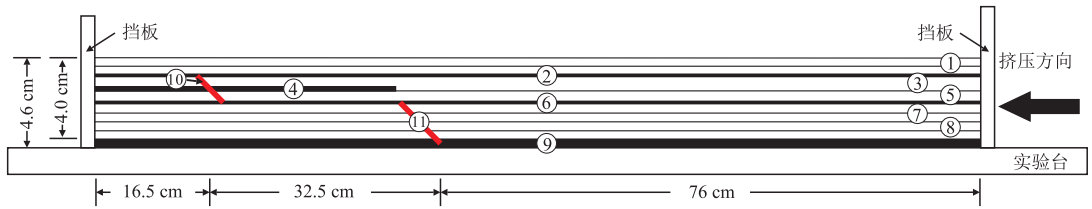


图 3 模拟实验模型示意图

Fig.3 Sketch showing the experiment apparatus

分层参数详见表 1

表 1 实验模型的分层参数

Table 1 Layer parameters of experiment apparatus

序号	地层/断层	厚度(cm)	材料
①	J-T ₃	0.75	玻璃珠
②	T _{1j}	0.25	硅树脂
③	P-S	0.50	玻璃珠
④	S ₁	0.25	硅树脂
⑤	Є ₂₋₃	0.50	玻璃珠
⑥	Є _{1q}	0.25	硅树脂
⑦	Z	0.30	玻璃珠
⑧	基底	1.20	玻璃珠
⑨	拆离面	0.60	硅树脂
⑩	华蓥山断裂		硬纸板
⑪	齐岳山断裂		硬纸板

注:据解国爱等(2013)和张小琼等(2013)修改.

表 2 模拟实验变量参数

Table 2 Variable parameters for each simulation experiment

模型参数	缩短量 (%)	挤压速率 (mm/min)	齐岳山断裂倾角 (°)	华蓥山断裂倾角 (°)
实验 1	30	0.4	无	45
实验 2	30	0.4	45	45
实验 3	30	0.4	35	45
实验 4	30	0.4	45	35

在分层厚度和先存断层位置保持不变的基础上,为探讨先存断裂和断层倾角对川东褶皱带变形的影响,笔者共设置了 4 组对比实验,各实验的变量参数见表 2.

实验 1 中未设置齐岳山断裂,对比实验 2 探讨齐岳山断裂在隔槽式褶皱向隔挡式褶皱转换中的作用;实验 3 减小了齐岳山断裂的倾角,与实验 2 对比研究先存齐岳山断裂的倾角对川东地区褶皱发育特征的影响;实验 4 减小了华蓥山断裂的倾角,与实验 2 对比研究先存华蓥山断裂的倾角对隔挡式褶皱发育特征的影响.需要指出的是,前人采用的挤压速率

一般为 0.3 mm/min(刘重庆等,2013)和 0.6 mm/min(解国爱等,2013),本次研究选用的挤压速率为 0.4 mm/min.

3 实验结果

3.1 实验 1

实验 1 只预设了华蓥山先存断裂(图 4a).实验初始,右侧挡板向左侧运动,模型地层发生纵弯褶皱作用,在挤压端形成箱状褶皱(图 4b).随着挤压的持续进行,挤压端地层持续抬升,在挤压方向上形成新的箱状背斜,由滑脱层分隔的各构造层开始表现出构造不协调的现象,三叠系滑脱层之上的上部构造层开始发育一些小型断展褶皱(图 4c).持续挤压使挤压端背斜越来越紧闭,形成复杂的冲起构造,上部构造层的断展褶皱作用继续向左传递,下寒武统滑脱层和三叠系滑脱层之间的中部构造层开始发育小型箱状背斜,寒武统滑脱层与基底拆离面之间的下部构造层仍比较平整(图 4e).缩短率大于 20%之后,模型中部开始形成箱状背斜,由于挤压端隆起幅度越来越高,浅部地层逐渐向固定挡板方向滑动,上部构造层中的断滑褶皱和断展褶皱的轴面主要倾向挤压端,构造变形明显较中部、下部构造层强烈.缩短率达到 30%时,在 2 个主要箱状背斜之间又发育了 1 个背斜,同时隔挡区开始形成相对紧闭的褶皱,华蓥山断层复活,但逆冲位移较小(图 4h).

总体上,实验 1 的最终构造变形可划分出高隆区、隔槽区、过渡区和隔挡区 4 个主要构造区.上部构造层发育的断层主要倾向挤压端,并且倾角较小.中部和下部构造层发育一些倾向固定端的断层.隔槽区由 2 个宽缓的复背斜组成,隔挡区仅发育 2 个背斜(表 3).由于实验 1 未设置齐岳山断裂,过渡区深部发育的断层较缓,倾角小于 30°,控制隔槽区整体变形的滑脱层为基底拆离面,隔挡区变形的主控

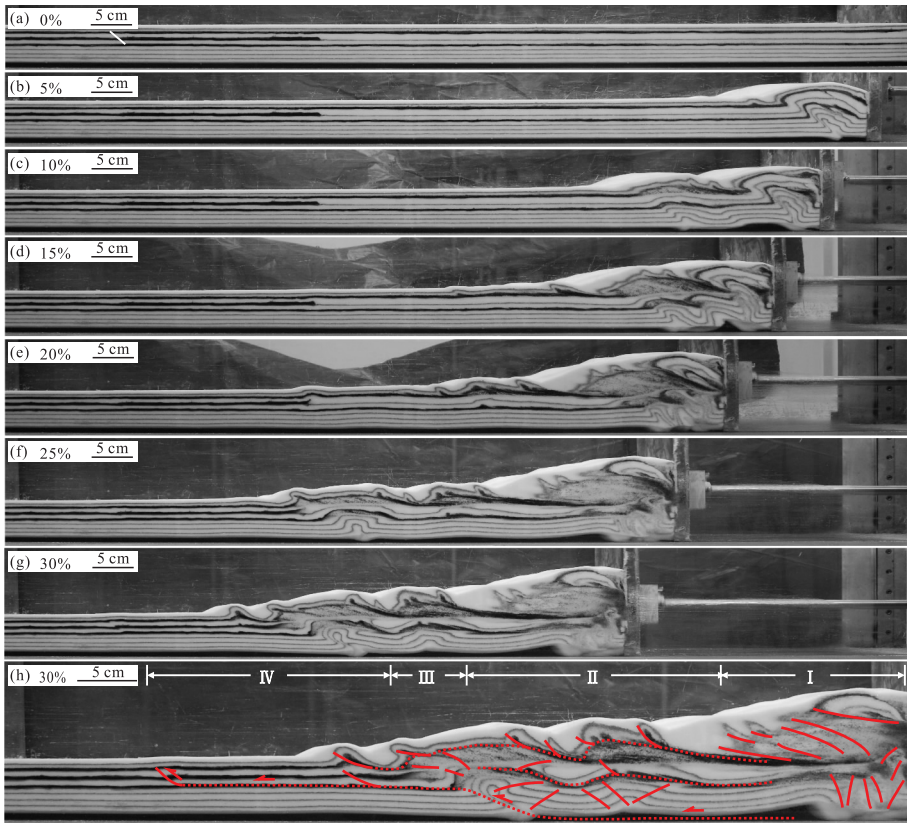


图 4 实验 1 变形过程与构造解释

Fig.4 Deformation process and tectonic interpretation of Experiment 1

a~h 分别代表缩短率为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 的变形结果和 30% 时对应的构造解释, a 中白线为预设断层; I、II、III 和 IV 分别代表高隆区、隔槽区、过渡区和隔挡区; 虚线代表发生滑脱作用的部位; 箭头指示主控滑脱层

表 3 模拟实验褶皱变形特征

Table 3 The fold deformation characteristics of each simulation experiment

实验	褶皱数量		波长(从右至左, cm)						波幅(从右至左, cm)									
	隔槽区	隔挡区	隔槽区			隔挡区			隔槽区			隔挡区						
1	2	2	13.9	24.2	7.0			2.9			3.9	3.1	1.9				0.3	
2	2	5	26.5	30.9	5.0	4.3	3.4	3.6	5.6		3.4	3.4	1.1	1.1	0.8	1.1	1.4	
3	3	5	11.6	11.0	24.9	3.6	5.5	6.0	6.5	7.8	3.3	2.0	3.4	2.4	1.6	1.6	1.0	1.3
4	3	5	12.1	10.9	26.1	6.0	6.4	4.3	5.6	5.7	4.6	3.1	3.2	1.3	1.3	0.3	0.8	0.6

滑脱层为下寒武统滑脱层, 隆起幅度沿挤压方向依次减小, 模型顶部坡度从高隆区到过渡区整体变化不大, 稳定在 5° 左右。

3.2 实验 2

与实验 1 比较, 实验 2 增设了齐岳山先存断裂(图 5a)。实验初始, 变形与实验 1 基本相同, 均在挤压端形成一个箱状背斜(图 5b)。差异从缩短率达到 10% 时开始出现, 新形成的背斜两翼并不对称, 倾向固定挡板的断层先发育, 此时齐岳山断裂已经开始活动(图 5c)。随着挤压的持续进行, 齐岳山断裂继续活动并形成反冲断层, 上部构造层发育少量滑脱褶

皱并向固定端方向传递(图 5d)。模型收缩 20% 时, 齐岳山断裂上盘发育典型的断弯褶皱, 隔挡区开始形成滑脱褶皱, 齐岳山断裂右侧发育新的倾向挤压端的断层(图 5e)。受齐岳山断裂的阻隔, 隔挡区下部构造层未发生明显褶皱, 上盘地层沿齐岳山断裂冲起并向固定端方向运动, 志留系滑脱层之上的地层开始逐渐褶皱变形, 华蓥山断裂开始活动(图 5f)。最终, 隔挡区发育多个背斜紧闭的断展褶皱, 形成典型的隔挡式褶皱, 背斜斜面以倾向挤压端为主(图 5g)。

总体上, 实验 2 整体构造变形与实际地质剖面(图 1c)相似度最高, 很好地呈现了川东“侏罗山式”

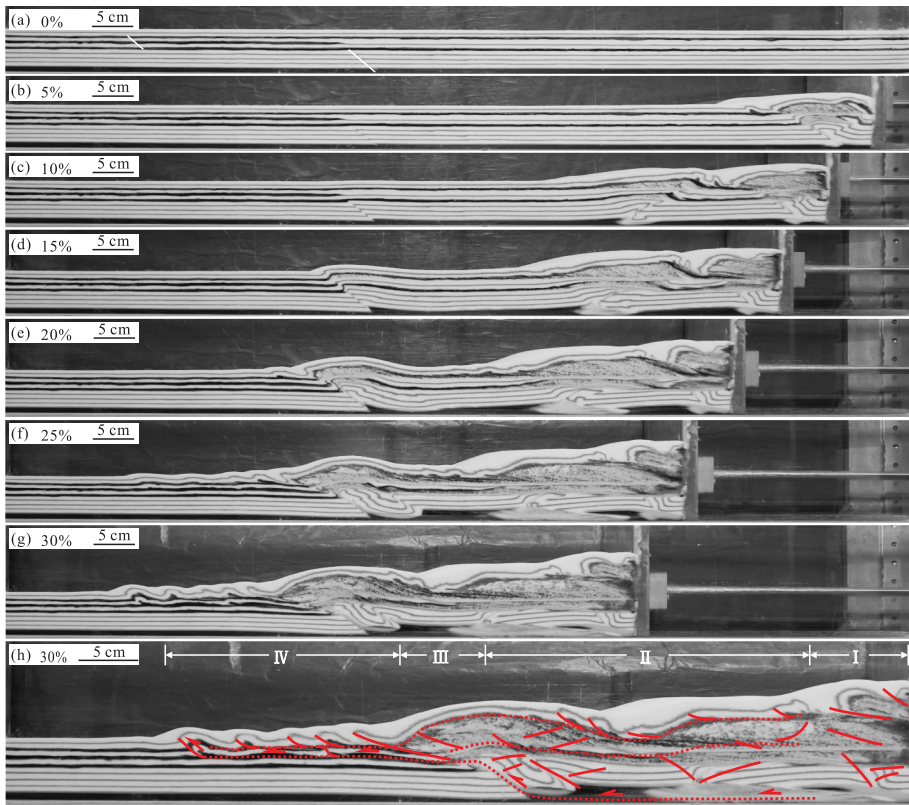


图 5 实验 2 变形过程与构造解释

Fig.5 Deformation process and tectonic interpretation of Experiment 2

a~h 分别代表缩短率为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 的变形结果和 30% 时对应的构造解释, a 中白线为预设断层; I、II、III 和 IV 分别代表高隆区、隔槽区、过渡区和隔挡区; 虚线代表发生滑脱作用的部位; 箭头指示主控滑脱层

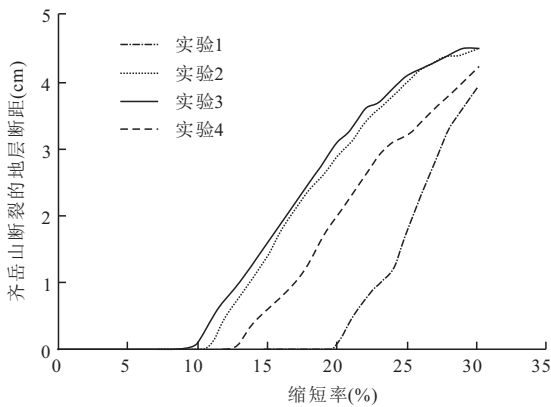


图 6 模型缩短率与齐岳山断裂地层断距关系

Fig. 6 Relations of shortening versus displacement of Qiyueshan fault for experiments

褶皱带的形成过程. 与实验 1 相比, 由于预设的齐岳山断裂活动较早(图 6), 实验 2 变形更快地向左侧传播, 说明齐岳山先存断裂对应变传递的重要作用. 高隆区隆起幅度和范围减小, 隔槽区发育 2 个波长更大的宽缓复背斜(图 5h). 过渡区齐岳山断裂上盘发育的断背斜隆起幅度更高, 接近 3.4 cm(表 3), 齐

岳山断裂浅部被动地脱离了深部向模型左侧搬运, 倾角也相应地变小. 齐岳山断裂作为枢纽串联了两侧不同深度的滑脱层, 上盘发育断弯褶皱作用并将深部隔槽区变形传递到隔挡区浅部, 控制隔槽区整体变形的滑脱层为基底拆离面, 隔挡区变形的主控滑脱层为志留系滑脱层. 隔槽区和隔挡区的顶面坡度均小于 4°.

3.3 实验 3

本次实验将齐岳山先存断裂的倾角调整为 35°. 实验 3 的变形过程(图 7)与实验 2(图 5)大体相同, 如齐岳山断裂(图 6)和华蓥山断裂开始活动的时间. 但是, 实验 3 隔槽区的下部构造层几乎没有卷入褶皱变形, 受底部硅树脂增厚的影响而整体抬升, 这并不符合实际情况. 中部构造层发育一些小型冲起构造, 上部构造层发育 3 个宽缓的复背斜. 受三叠系滑脱层的影响, 上部构造层发育多个滑脱褶皱, 顶面变形比较复杂. 受齐岳山断裂倾角较缓的影响, 齐岳山断裂活动速率更快, 上盘背斜隆起幅度更大, 整体坡度比实验 2 略微平缓(表 3). 隔槽区褶皱变形的主控

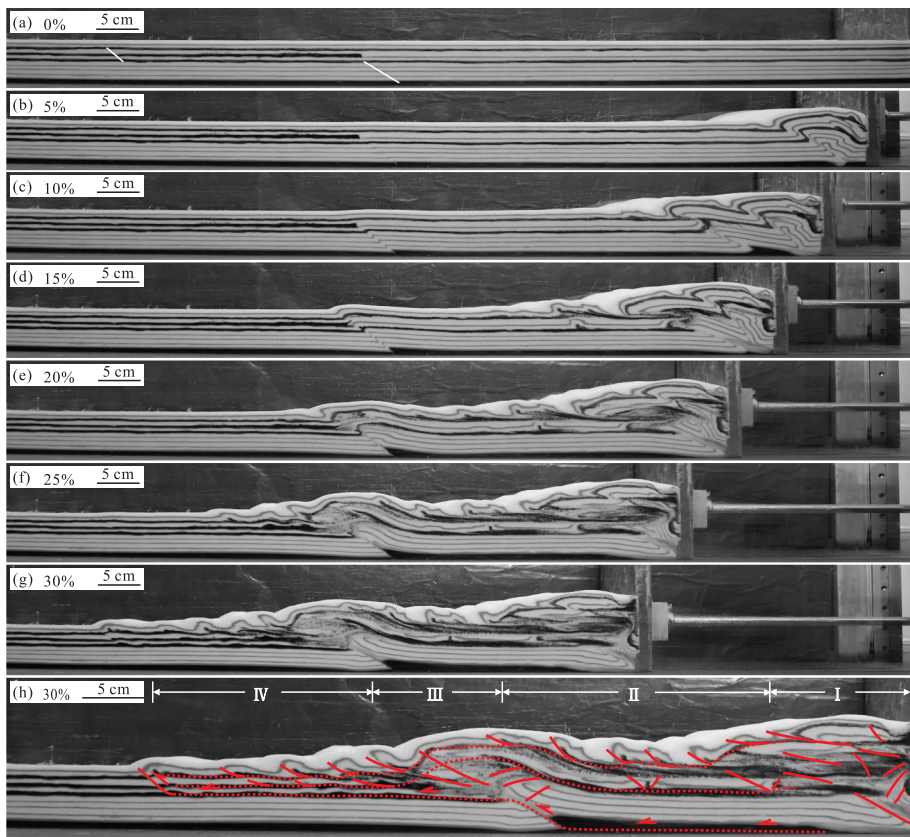


图 7 实验 3 变形过程与构造解释

Fig.7 Deformation process and tectonic interpretation of Experiment 3

a~h 分别代表缩短率为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 的变形结果和 30% 时对应的构造解释, a 中白线为预设断层; I、II、III 和 IV 分别代表高隆区、隔槽区、过渡区和隔挡区; 虚线代表发生滑脱作用的部位; 箭头指示主控滑脱层

滑脱层仍然为基底拆离面, 但隔挡区的主控滑脱层转换为下寒武统滑脱层, 因此隔挡式褶皱的波长和波幅明显增大、背斜紧闭度不高(表 3)。

3.4 实验 4

将华蓥山先存断裂的倾角减小到 35° , 与实验 2 构成对比实验. 实验 4 齐岳山断裂活动时期稍晚(图 8d), 高隆区的隆起幅度略高于实验 2, 但齐岳山断裂背斜的隆起幅度两者大致相同(图 8g). 实验 4 隔槽区构造变形与实验 3 基本相同, 可能是较缓的华蓥山断裂一定程度上促进了应变横向的传递. 实验 4 与实验 2 模拟结果的最大区别体现在隔挡区, 虽然 2 次实验在隔挡区均形成了 5 个断展褶皱, 但实验 4 的褶皱波长明显较大, 比较宽缓(表 3), 并不是典型的隔挡式褶皱(图 8h)。

4 讨论

本次研究设置了更为接近实际地质情况的实验模型, 铺设了 4 套主要滑脱层、预设了齐岳山断裂和

华蓥山断裂, 很好地再现了川东褶皱带的形成过程和总体形态特征. 在此基础上, 本文分别讨论川东褶皱带的形成机制、川东褶皱带中生代缩短率、齐岳山断裂和华蓥山断裂倾角对川东褶皱形态的影响。

4.1 川东褶皱带形成机制

实验 2 很好地呈现了川东“侏罗山式”褶皱带的构造形态和形成过程, 各个构造带的相对位置及宽度、隔挡褶皱带褶皱数量及形态(图 5h)与地质剖面(图 1c)非常吻合. 川东褶皱带发育多套滑脱层, 这更有利于上覆地层发生褶皱作用而不是断裂作用, 这与伊朗的扎格罗斯褶皱带类似, 那里也同样发育 2 条主要的基底断层, 分别是 Mountain Front 断层和 Surmeh 断层(Yamato *et al.*, 2011). 先存的齐岳山断裂和华蓥山断裂受构造挤压而发生继承性活动, 这对川东“侏罗山式”褶皱的发育起着至关重要的作用. 齐岳山断裂是隔槽向隔挡过渡的重要枢纽, 隔槽式褶皱带的主控滑脱层为基底拆离面, 变形特征表现为大型箱状背斜与浅层滑脱褶皱的叠合, 由于受齐岳山断裂活动的影响, 隔槽区基底整体隆升, 使隔

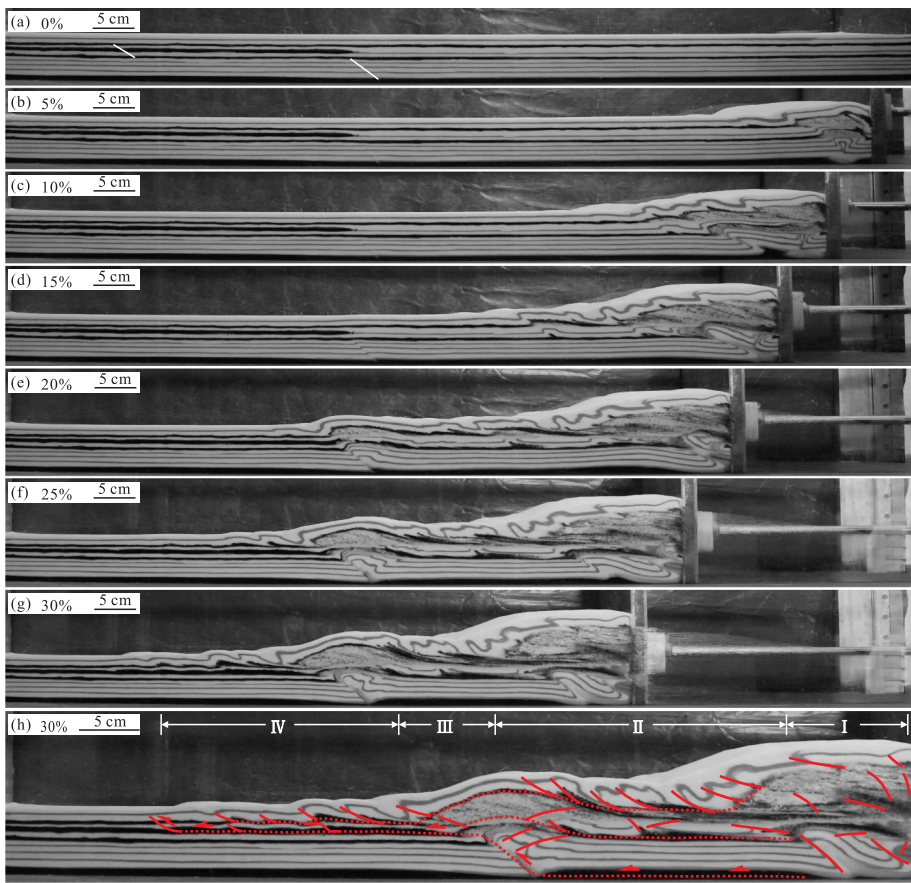


图 8 实验 4 变形过程与构造解释

Fig.8 Deformation process and tectonic interpretation of Experiment 4

a~h 分别代表缩短率为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 的变形结果和 30% 时对应的构造解释, a 中白线为预设断层; I、II、III 和 IV 分别代表高隆区、隔槽区、过渡区和隔挡区; 虚线代表发生滑脱作用的部位; 箭头指示主控滑脱层

槽区下寒武统滑脱层与隔挡区志留系滑脱层深度近于持平, 齐岳山断裂上盘发生断弯褶皱作用, 将隔槽区应变传递到隔挡区浅部, 并串联了基底拆离面与隔挡区志留系滑脱层, 造成隔挡式褶皱带的主控滑脱层为志留系滑脱层, 上覆地层以断展—断褶皱为主, 隔槽式褶皱发育早于隔挡式褶皱. 过渡带由浅部迁移的缓断层和深切基底并向上冲出地表的陡断层组成, 这与张小琼等(2015)的认识基本一致.

前人为解释川东褶皱带的成因共提出了基底断层模型(张文佑等, 1978)、箱型褶皱模型(刘尚忠, 1995)、构造反转模型(李忠权等, 2002)、断弯褶皱模型(颜丹平等, 2000; Yan *et al.*, 2003; 冯常茂等, 2008; Yan *et al.*, 2009)和断展—纵弯褶皱模型(丁道桂等, 2005, 2007)5 种理想模型. 本文模拟实验表明, 川东褶皱带的形成机制是陡倾角的齐岳山断裂和华蓥山断裂与志留系滑脱层和基底拆离面组成的阶梯状体系受挤压发生的断层相关褶皱作用, 成因模式介于断弯褶皱模型和断展—纵弯褶皱模型之

间. 川东地区最新的地震剖面解释结果, 如 Li *et al.* (2015)认为隔挡区志留系滑脱层可能并未发生过大规模的滑脱作用, 与本文模拟结果不完全一致, 这说明隔挡式褶皱的主控滑脱层仍值得深入探讨, 可以进一步结合野外构造观测统计方法. 此外, 构造物理模拟实验不能记录每个玻璃珠的运移路径, 难以详细描述隔挡区每个褶皱的各个构造层具体发生的断层相关褶皱作用类型, 因此本文仅限于大致描述. 为了解决这个问题, 可以在后续研究中加入离散元数值模拟方法.

4.2 缩短量和缩短率

大量低温热年代学数据表明, 川东褶皱带主要形成时代为 165~75 Ma(梅廉夫等, 2010; 李双建等, 2011; 王平等, 2012; 石红才和施小斌, 2014). 梅廉夫等(2010)通过平衡剖面的分析, 认为川东褶皱带在侏罗纪末—早白垩世缩短 78.2 km, 其中齐岳山南东侧缩短 35.2 km, 齐岳山北西侧缩短 43.0 km, 平衡剖面恢复时通常计算的缩短率比真实

值小 10%~20%。本次模拟的地质年代参考为 165~75 Ma, 在均匀收缩的前提下, 95 Ma 应该对应于实验 2 中整个模型缩短 21.2% 时的模拟结果, 选取此时华蓥山断裂到张家界—花垣断裂之间的部分(即川东褶皱带), 计算得到此时该部分的缩短率为 18.9%, 其中齐岳山南东侧缩短约 36.4 km, 齐岳山北西侧缩短约 46.8 km, 与梅廉夫等(2010)的计算结果相近, 说明本次模拟实验的结果与前人平衡剖面研究取得的认识基本吻合。在此基础上, 可计算在 75 Ma 时, 即实验结束时川东褶皱带的缩短率约为 32%, 总缩短量约为 140 km, 齐岳山南东侧缩短约 72.5 km, 齐岳山北西侧缩短约 67.5 km。通过模拟实验也可以计算出各构造变形区的隆起幅度, 进而计算地层剥蚀量, 由于模拟实验本身是对地质模型的简化处理, 因此计算剥蚀量的绝对值没有实际意义, 但是实验结果中体现的各构造区相对隆起幅度和隆起时间可以为低温热年代学样品(如裂变径迹)分析提供构造参考。通过低温热年代学方法与模拟实验(物理模拟和数值模拟)的结合, 定量解析盆地构造演化过程, 是一个值得深入研究的方向。

4.3 先存断裂倾角的影响

模拟实验 3 说明较缓的齐岳山断裂(35°)也可以形成隔槽—隔挡式褶皱, 这与张小琼等(2015)的数值模拟结果一致, 但是这并不符合川东褶皱带变形特征, 主要表现在: (1) 实验 3 隔槽区下部构造层基本不卷入褶皱变形, 与实际不符; (2) 地震反射剖面资料显示, 齐岳山断裂是一条深切入基底的高倾角断层(胡建平等, 2005), 张小琼等(2015)也推测齐岳山断裂发生多期继承性活动, 导致高角度断层浅部向西推进后变缓, 在活动晚期才切穿到达地表, 实验 2 再现了这一过程, 印证了这种推测。实验 4 表明华蓥山断裂的倾角并不影响隔槽—隔挡式褶皱的形成, 但是对隔挡式褶皱的发育特征具有重要控制作用。当华蓥山断裂倾角较陡时, 隔挡区发育典型的背斜紧闭的隔挡式褶皱(图 5h)。当华蓥山断裂倾角较缓时, 隔挡区的褶皱波长较大, 并不是典型的隔挡式褶皱(图 8h)。因此, 川东“侏罗山式”褶皱带是陡倾角的齐岳山断裂和陡倾角的华蓥山断裂与志留系滑脱层和基底拆离面组成的阶梯状体系共同作用的产物。

5 结论

(1) 川东褶皱带的形成机制是齐岳山断裂、华蓥山断裂、志留系滑脱层和基底拆离面组成的阶梯状

体系受构造挤压发生的断层相关褶皱作用。

(2) 隔槽式褶皱带的主控滑脱层是基底拆离面(深度约 16 km), 整体表现为大型箱状背斜与浅层断展褶皱的叠合, 隔挡式褶皱带的主控滑脱层是志留系滑脱层, 以断展—断滑褶皱为主。

(3) 中生代(165~75 Ma)川东褶皱带经历了自南东向北西的递进变形, 挤压缩短率约为 32%, 总缩短量约为 140 km, 齐岳山南东侧缩短约 72.5 km, 齐岳山北西侧缩短约 67.5 km。

(4) 齐岳山断裂是隔槽向隔挡过渡的重要枢纽, 是早期高角度断裂活化后浅部向北西迁移后倾角变缓的产物。华蓥山断裂的倾角控制着齐岳山北西侧褶皱的波长, 陡倾角有利于发育典型的背斜紧闭、向斜宽缓的隔挡式褶皱。

致谢: 苏浩、张俊锋、史帅雨在构造物理模拟实验中给予了热心帮助, 在此谨致衷心谢意。

References

- Cao, H. Y., Zhu, C. Q., Qiu, N. S., 2016. Maximum Paleotemperature of Main Paleozoic Argillutite in the Eastern Sichuan Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(3): 1017—1029 (in Chinese with English abstract).
- 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. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(01\)00169-9](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(01)00169-9)
- Dai, F. Y., Hao, F., Hu, H. Y., et al., 2017. Occurrence Mechanism and Key Controlling Factors of Wufeng-Longmaxi Shale Gas, Eastern Sichuan Basin. *Earth Science*, 42(7): 1185—1194 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.096>
- Ding, D. G., Guo, T. L., Zhai, C. B., et al., 2005. Kink Structure in the West Hubei and East Chongqing. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(3): 205—210 (in Chinese with English abstract).
- Ding, D. G., Liu, G. X., Lü, J. X., et al., 2007. Progressive Deformation of Middle Paleozoic Marine Basins in the Yangtze Plate, China. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1178—1188 (in Chinese with English abstract).
- Dogliani, C., Prosser, G., 1997. Fold Uplift versus Regional Subsidence and Sedimentation Rate. *Marine and Petroleum Geology*, 14(2): 179—190. [https://doi.org/10.1016/s0264-8172\(96\)00065-7](https://doi.org/10.1016/s0264-8172(96)00065-7)
- Feng, C. M., Liu, J., Song, L. J., 2008. Formation Mechanism of the Tectonic Deformation Belt and the Prognosis of

- Favorable Oil and Gas Exploration Areas in the Middle and Upper Yangtze Valley. *Acta Geoscientia Sinica*, 29 (2): 199–204 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. Y., Meng, X. G., Shao, Z. G., et al., 2003. A Preliminary Discussion on Features and Dynamics of Sequence Deformation in South China and Neighboring Areas. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(2): 115–120 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. S., Hu, D. F., Wen, Z. D., et al., 2014. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity in Marine Shale Gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and Its Periphery: A Case Study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba Area. *Geology in China*, 41(3): 893–901 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J. P., Zhao, J. L., Wang, W. B., et al., 2005. Relation of Deep Geophysics Fields and Rupture Construct in Yangtze Gorges Chongqing Reservoir Area. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27(3): 49–54 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. Q., Zhu, G., Liu, G. S., et al., 2009. The Folding Time of the Eastern Sichuan Jura-Type Fold Belt: Evidence from Unconformity. *Geological Review*, 55(1): 32–42 (in Chinese with English abstract).
- Jia, X. L., 2016. Structural Geometry and Kinematics of Southeast Sichuan Basin: Insights into Tectonic Relationship with the Western Segment of Xuefeng Mountain Orogenic Belt (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese).
- Konstantinovskaya, E. A., Rodriguez, D., Kirkwood, D., et al., 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. <https://doi.org/10.2113/gscpgbull.57.1.34>
- Koyi, H. A., Cotton, J., 2004. Experimental Insights on the Geometry and Kinematics of Fold-and-Thrust Belts above Weak, Viscous Evaporitic Décollement: A Discussion. *Journal of Structural Geology*, 26(11): 2139–2141. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.04.001>
- Li, C. X., He, D. F., Sun, Y. P., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.07.027>
- Li, S. J., Li, J. M., Zhou, Y., et al., 2011. Fission Track Evidence for Mesozoic-Cenozoic Uplifting in the Southeastern Margin of Sichuan Basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2): 225–233 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Ran, L. H., Chen, G. S., et al., 2002. Genetic Geologic Model and Gas-Bearing Analysis of High and Steep Structures in East Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(6): 605–609 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Q., Zhou, J. X., Lang, J., 2013. Study on Restrictive Factor of Fold-Thrust Belt Formation with Multiple Décollements: Taking Eastern Sichuan-Xuefeng Tectonic Belt as an Example. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(2): 45–55 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., Ma, W. X., Luba, J., et al., 2011. Characteristics of the Shale Gas Reservoir Rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2239–2252 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. Z., 1995. My Opinion of Structural Pattern of Thin-Skinned Structure in East Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 15(4): 264–267 (in Chinese with English abstract).
- Lin, J. F., Hu, H. Y., Li, Q., 2017. Geochemical Characteristics and Implications of Shale Gas in Jiaoshiba, Eastern Sichuan, China. *Earth Science*, 42(7): 1124–1133 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.091>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.11.002>
- Mei, L. F., Liu, Z. Q., Tang, J. G., et al., 2010. Mesozoic Intra-Continental Progress Deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan Provinces of China: Evidence from Apatite Fission Track and Balanced Cross-Section. *Earth Science*, 35(2): 161–174 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.017>
- Mitra, S., 2003. A Unified Kinematic Model for the Evolution of Detachment Folds. *Journal of Structural Geology*, 25(10): 1659–1673. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(02\)00198-0](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(02)00198-0)
- Richardson, N. J., Densmore, A. L., Seward, D., et al., 2008. Extraordinary Denudation in the Sichuan Basin: Insights from Low-Temperature Thermochronology Adjacent to the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 113(B4): 1–23. <https://doi.org/10.1029/2006jb004739>
- Shi, H. C., Shi, X. B., 2014. Exhumation Process of Middle-Upper Yangtze since Cretaceous and Its Tectonic Sig-

- nificance; Low-Temperature Thermochronology Constraints. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(8): 2608—2619 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Liu, S. F., Gao, T. J., et al., 2012. Cretaceous Transportation of Eastern Sichuan Arcuate Fold Belt in Three Dimensions; Insights from AFT Analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 1662—1673 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Liu, S. F., Zheng, H. B., et al., 2013. Late-Orogenic Accurate Fold-Thrust Belts in Northern Yangtze Area; Structural Characteristics and Basin Evolution. *Journal of Palaeogeography*, 15(6): 819—838 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. A., Jia, D., Zhang, Q. L., et al., 2013. Physical Modeling of the Jura-Type Folds in Eastern Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 87(6): 773—788 (in Chinese with English abstract).
- Yamato, P., Kaus, B. J. P., Mouthereau, F., et al., 2011. Dynamic Constraints on the Crustal-Scale Rheology of the Zagros Fold Belt, Iran. *Geology*, 39(9): 815—818. <https://doi.org/10.1130/g32136.1>
- Yan, D. P., Wang, X. W., Liu, Y. Y., 2000. Analysis of Fold Style and Its Formation Mechanism in the Area of Boundary among Sichuan, Hubei and Hunan. *Geoscience*, 14(1): 37—43 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. P., Zhang, B., Zhou, M. F., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.11.005>
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2003. Origin and Tectonic Significance of a Mesozoic Multi-Layer Overthrust System within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361(3-4): 239—254. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(02\)00646-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(02)00646-7)
- Zhang, B. L., Zhu, G., Hu, S. Q., et al., 2009. Numerical Modeling and Formation Mechanism of the Eastern Sichuan Jura-Type Folds. *Geological Review*, 55(5): 701—711 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. Y., Ye, H., Zhong, J. Y., 1978. Fault Blocks and Plates. *Scientia Sinica Terrae*, (2): 195—211 (in Chinese).
- Zhang, X. Q., Shan, Y. H., Ni, Y. J., et al., 2015. Numerical Modeling of the Mesozoic East Sichuan Fold Belt: A Two-Stage Tectonic Model. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(6): 1022—1032 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Q., Shan, Y. H., Nie, G. J., et al., 2013. Numerical Modeling of the Mesozoic East Sichuan Fold Belt: Influence of Detachment Depth on the Fold Pattern in the Platform Cover. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 622—632 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. X., Lang, J., Liu, C. Q., 2009. Influence of Viscosity of Ductile Substrate on Deformational Features of Fold-Thrust Belts: Insight from Physical Modeling. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 392—398 (in Chinese with English abstract).
- Zou, Y. T., Duan, J. B., Zhao, Y. J., et al., 2015. Tectonic Characteristics and Evolution of the High and Steep Fault Folding Belt in East Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2046—2052 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹环宇, 朱传庆, 邱楠生, 2016. 川东地区古生界主要泥页岩最高古温度特征. *地球物理学报*, 59(3): 1017—1029.
- 戴方尧, 郝芳, 胡海燕, 等, 2017. 川东焦石坝五峰—龙马溪组页岩气赋存机理及其主控因素. *地球科学*, 42(7): 1185—1194. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.096>
- 丁道桂, 郭彤楼, 翟常博, 等, 2005. 鄂西—渝东区膝折构造. *石油实验地质*, 27(3): 205—210.
- 丁道桂, 刘光祥, 吕俊祥, 等, 2007. 扬子板块海相中古生界盆地的递进变形改造. *地质通报*, 26(9): 1178—1188.
- 冯常茂, 刘进, 宋立军, 2008. 中上扬子地区构造变形带成因机制及有利油气勘探区域预测. *地球学报*, 29(2): 199—204.
- 冯向阳, 孟宪刚, 邵兆刚, 等, 2003. 华南及邻区有序变形及其动力学初探. *地球学报*, 24(2): 115—120.
- 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等, 2014. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例. *中国地质*, 41(3): 893—901.
- 胡建平, 赵军龙, 汪文秉, 等, 2005. 三峡重庆库区深部地球物理特征与断裂构造. *地球科学与环境学报*, 27(3): 49—54.
- 胡齐乔, 朱光, 刘国生, 等, 2009. 川东“侏罗山式”褶皱带形成时代: 不整合面的证据. *地质论评*, 55(1): 32—42.
- 贾小乐, 2016. 川东南构造几何学与运动学特征及其与雪峰山西段的构造关系探讨(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 李双建, 李建明, 周雁, 等, 2011. 四川盆地东南缘中生代构造隆升的裂变径迹证据. *岩石矿物学杂志*, 30(2): 225—233.
- 李忠权, 冉隆辉, 陈更生, 等, 2002. 川东高陡构造成因地质模式与含气性分析. *成都理工学院学报*, 29(6): 605—609.
- 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.
- 刘尚忠, 1995. 川东薄皮构造模式之我见. *四川地质学报*, 15

- (4):264—267.
- 刘树根,马文辛,Luba Jansa,等,2011.四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征.岩石学报,27(8):2239—2252.
- 林俊峰,胡海燕,黎祺,2017.川东焦石坝地区页岩气特征及其意义.地球科学,42(7):1124—1133.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.091>
- 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,等,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.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.017>
- 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.
- 王平,刘少峰,郜瑭珺,等,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.
- 王平,刘少峰,郑洪波,等,2013.扬子北缘晚造山阶段弧形构造特征与盆地演化.古地理学报,15(6):819—838.
- 解国爱,贾东,张庆龙,等,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.
- 颜丹平,汪新文,刘友元,2000.川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析.现代地质,14(1):37—43.
- 张必龙,朱光,胡召齐,等,2009.川东“侏罗山式”褶皱的数值模拟及成因探讨.地质论评,55(5):701—711.
- 张文佑,叶洪,钟嘉猷,1978.“断块”与“板块”.中国科学,(2):195—211.
- 张小琼,单业华,倪永进,等,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.
- 张小琼,单业华,聂冠军,等,2013.中生代川东褶皱带的数值模拟:滑脱带深度对地台盖层褶皱型式的影响.大地构造与成矿学,37(4):622—632.
- 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.
- 邹玉涛,段金宝,赵艳军,等,2015.川东高陡断褶带构造特征及其演化.地质学报,89(11):2046—2052.