文章编号:1673-5005(2022)02-0038-12　　doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.02.004

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

裴仰文[1], 盛受政[1], 苗正硕[1], 牟毅城[1], 苏　楠[2], 郭　伟[2],
冯　犇[1], 王　静[1], 梁　瀚[3], 谢柳娟[4]

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院,北京 100083; 3. 中国石油天然气股份有限公司西南分公司勘探开发研究院,四川成都 610041;
4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,山东青岛 266071)

摘要:通过多滑脱层砂箱模拟试验探讨川东地区 3 套滑脱层对川东褶皱带形成演化过程的控制作用。结果表明:滑脱层纵向配置和变形速率对多套滑脱层发育区的构造变形样式及构造演化具有重要控制作用,深部滑脱层的拆离效果显著强于浅部滑脱层,导致垂向上深部构造层之间的构造变形差异性高于浅部构造层,变形速率减小时,滑脱层的拆离效果明显增加,各构造层的变形样式差异性也随之增强;川东地区 3 套滑脱层对于川东褶皱带的构造变形具有明显的拆离作用,深部的中下寒武统膏盐岩的拆离作用显著强于中浅部的志留系泥岩和中下三叠统膏盐岩,导致川东地区 3 套构造层的变形特征具有很大的差异;川东地区在早期弱挤压变形阶段(变形速率较低)3 套滑脱层拆离作用明显,以发育滑脱褶皱及小型的调节断层为主要构造变形特征,各构造层变形特征产生明显的垂向差异性,在后期强烈挤压变形阶段变形速率快速提升,限制各滑脱层的拆离作用,各构造层以发育高陡逆冲断层和反冲断层为主,变形特征趋于一致。

关键词:川东褶皱带; 多滑脱层; 砂箱模拟试验; 拆离作用; 变形速率

中图分类号:TE 121　　**文献标志码**:A

引用格式:裴仰文,盛受政,苗正硕,等. 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[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(2):38-49.

PEI Yangwen, SHENG Shouzheng, MIAO Zhengshuo, et al. Sandbox physical modelling with multiple detachment layers and its implication on structural evolution of East Sichuan Fold Belt[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2022,46(2):38-49.

Sandbox physical modelling with multiple detachment layers and its implication on structural evolution of East Sichuan Fold Belt

PEI Yangwen[1], SHENG Shouzheng[1], MIAO Zhengshuo[1], MOU Yicheng[1], SU Nan[2],
GUO Wei[2], FENG Ben[1], WANG Jing[1], LIANG Han[3], XIE Liujuan[4]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum (East China)*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development*, *PetroChina*, *Beijing* 100083, *China*;
3. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development*, *PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company*, *Chengdu* 610041, *China*;
4. *Qingdao Institute of Marine Geology*, *China Geological Survey*, *Qingdao* 266071, *China*)

Abstract: In this research, sandbox physical modelling with multiple detachment layers was employed to study the controlling effects of the three detachment layers in east Sichuan Basin. The sandbox results indicate that the setting (including number and vertical distribution) of detachment layers and deformation rate are of great importance in controlling both the de-

收稿日期:2021-11-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41872143);中央高校基本科研业务费专项(19CX02005A)

第一作者:裴仰文(1986-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为含油气盆地分析和油区构造解析。E-mail:peiyangwen@upc.edu.cn。

formation styles and structural evolution. On one hand, the deep detachment layers normally present a higher level of decoupling than the shallow detachment layers, leading to a higher geometric variation in deep section than upper section. On the other hand, the lower deformation rates are, the higher decoupling of the detachment layers becomes, resulting in a higher level of geometric variation between different structural packages. The three detachment layers play a significant role of decoupling in east Sichuan Basin, with a higher level of decoupling by the Lower-Mid Cambrian salt layer in the deep subsurface compared to the Silurian shale and Lower-Mid Triassic salt layer in the shallow subsurface. The structural deformation in east Sichuan Basin is likely geological time-dependent. In the early stage with a weak contraction (low deformation rate), the three detachment layers present a high level of decoupling, resulting in detachment folds and accommodation faults with a significant vertical geometric variation between different structural packages. In the later stage with an intense contraction (high deformation rate), the detachment layers present a limited decoupling, forming high angle thrust faults and back-thrust faults with a higher geometric consistency between different structural packages.

Keywords: Eastern Sichuan Fold Belt; multiple detachment layers; sandbox physical modelling; decoupling; deformation rate

川东高陡构造带位于四川盆地东部,是中国页岩气勘探的热点地区,其构造样式特殊,是扬子板块西部的重要板内变形带,构造上表主体走向为北北东—北东的“侏罗山式”弧形褶皱带[1-3]。川东“侏罗山式”褶皱是典型的薄皮构造,主要变形特点为基底不卷入变形,由一系列变形强度不同的背斜和向斜相间排列而成。刘尚忠[4]最早通过褶皱形态分析认为川东“侏罗山式”褶皱是箱型褶皱遭受不同程度剥蚀的结果。李忠权等[5]建立构造反转模型,认为隔档式褶皱是早期伸展断层形成的断层相关褶皱后期构造反转而成,而颜丹平等[6]则认为川东地区更适用断层转折褶皱模型,川东地区早期形成隔档式褶皱带,受逆冲断层推进和变形强度影响,逐渐演变形成隔槽式褶皱带。在近 10 年的相关研究中,地质学家们普遍发现川东地区滑脱层的存在对川东褶皱带的形成演化具有重要控制作用[7-9]。针对川东褶皱带的形成演化过程,前人也开展大量的物理模拟[7,10]和数值模拟[11]试验,但由于试验模型设置与川东褶皱带吻合度并不高,特别是滑脱层的纵向配置、总体缩短速率等与川东地区实际地质背景并未完全相符,川东地区多套滑脱层对川东褶皱带构造演化的控制作用有待进一步明确。因此笔者在总结前人研究成果的基础上,依据川东地区地层学垂向分布情况,在 4 组构造物理模拟对比试验中设置多套滑脱层及基底滑脱层,并采用不同的构造挤压速率开展模拟试验,通过物理模拟试验结果和地震资料的综合分析,对川东地区多滑脱层控制下的构造演化过程进行研究,为川东地区形成演化理论研究及油气勘探实践提供支撑。

1　川东地区构造背景

四川盆地位于杨子板块北西边缘,是一个经历复杂构造演化过程的叠合盆地,在多期次构造运动的控制下,形成山前坳陷和褶皱冲断构造围限稳定中央隆起区的结构特征[12]。川东地区地处四川盆地东部和雪峰山构造带西侧,北侧为秦岭造山带;构造带宽度约为 400 km,长度约为 600 km,整体上呈北北东—北东向延伸并向北西轻微凸出的宽广弧形构造带(图 1)。川东褶皱带为扬子板块西部重要的板内变形带[1,13-15]。川东褶皱带西侧以华蓥山断裂为界与川中隆起分隔,齐岳山断裂将其划分为西部的川东隔档式褶皱带和东部的湘鄂西隔槽式褶皱带 2 个部分[1-2,12](图 1(b))。

以华蓥山断裂带与齐岳山断裂带分别为西界与东界,川东褶皱带发育一系列背斜带与向斜带相间的隔档式褶皱,背斜带核部抬升并导致侏罗系、三叠系乃至二叠系地层经受强烈剥蚀(图 2,详细地层信息见图 3)。华蓥山背斜是川东褶皱带西缘背斜,其主控断层主体自东向西冲断,深部源自于中下寒武统膏盐岩滑脱层,向上传递过程中断层倾角快速变陡,最终突破至地表,属于元古代基底上覆薄皮断裂。华蓥山断裂带以西为盆地稳定区,整体构造变形较弱。

川东地区发育震旦系至第四系厚度逾万米的地层(图 3),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,地表出露古生界—中生界地层。受加里东运动的影响,川东地区缺失上志留统、泥盆系和石炭系地层。川东褶皱带主要发育 3 套区域性滑脱层,由深至浅依次为中下寒武统膏盐岩、志留系泥岩、中下三叠统膏盐岩(图 3“构造变形特征”一栏中红色箭头标注);以这 3 套区域性滑脱层为界,可将川东地层划分为 3 套构造层:深部寒武系—奥陶

系构造层(以中下寒武统膏盐岩滑脱层为底界),中部石炭系—二叠系构造层(以志留系泥岩滑脱层为底界)和浅部中生界构造层(以中下三叠统膏盐岩滑脱层为底界)。3 套滑脱层能干性弱,其间的 3 套构造层能干性强,由于二者力学性质存在差异,在相同应力环境下,其构造变形方式也存在明显的差异性:膏盐岩、泥岩的构造变形以塑性流变为主要特征,而刚性岩层则主要发生褶皱和断裂变形。据川东典型地震剖面(图 2)可知,3 套滑脱层对于川东褶皱带的构造变形具有明显的拆离作用;在发生构造挤压变形的过程中,膏盐岩、泥岩塑性流变主要控制着上覆地层的构造变形,而对下覆地层构造变形的影响较小,导致川东地区深、中、浅 3 套构造层的变形特征具有显著差异[9,16]。

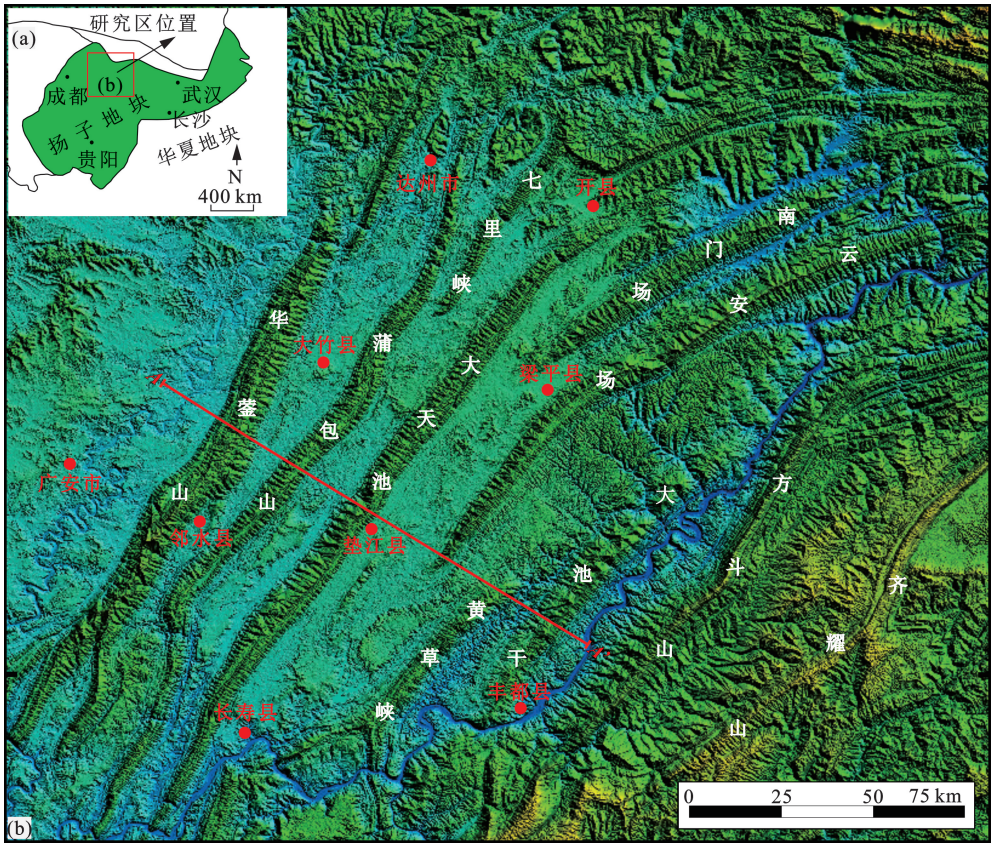

图 1　川东地质构造简图(据文献[12],有修改)

Fig. 1　Structural map of east Sichuan Basin(After citation[12], modified)

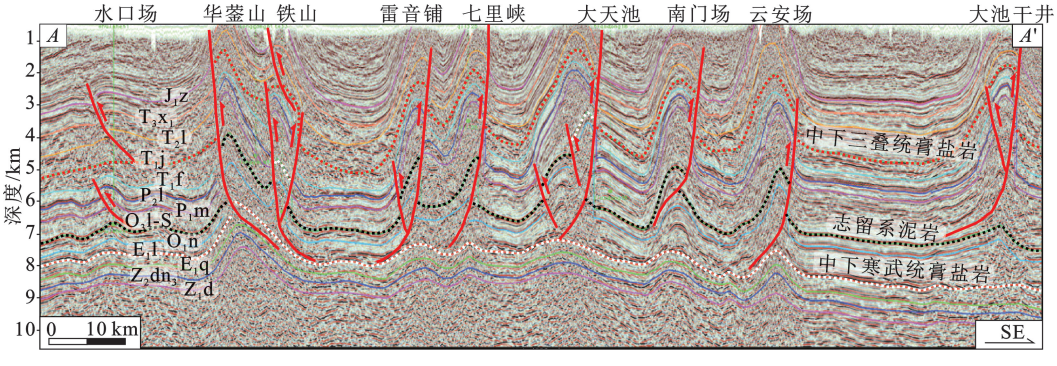

图 2　川东典型剖面(据文献[12],有修改)

Fig. 2　Representative seismic section of east Sichuan Basin(After citation[12], modified)

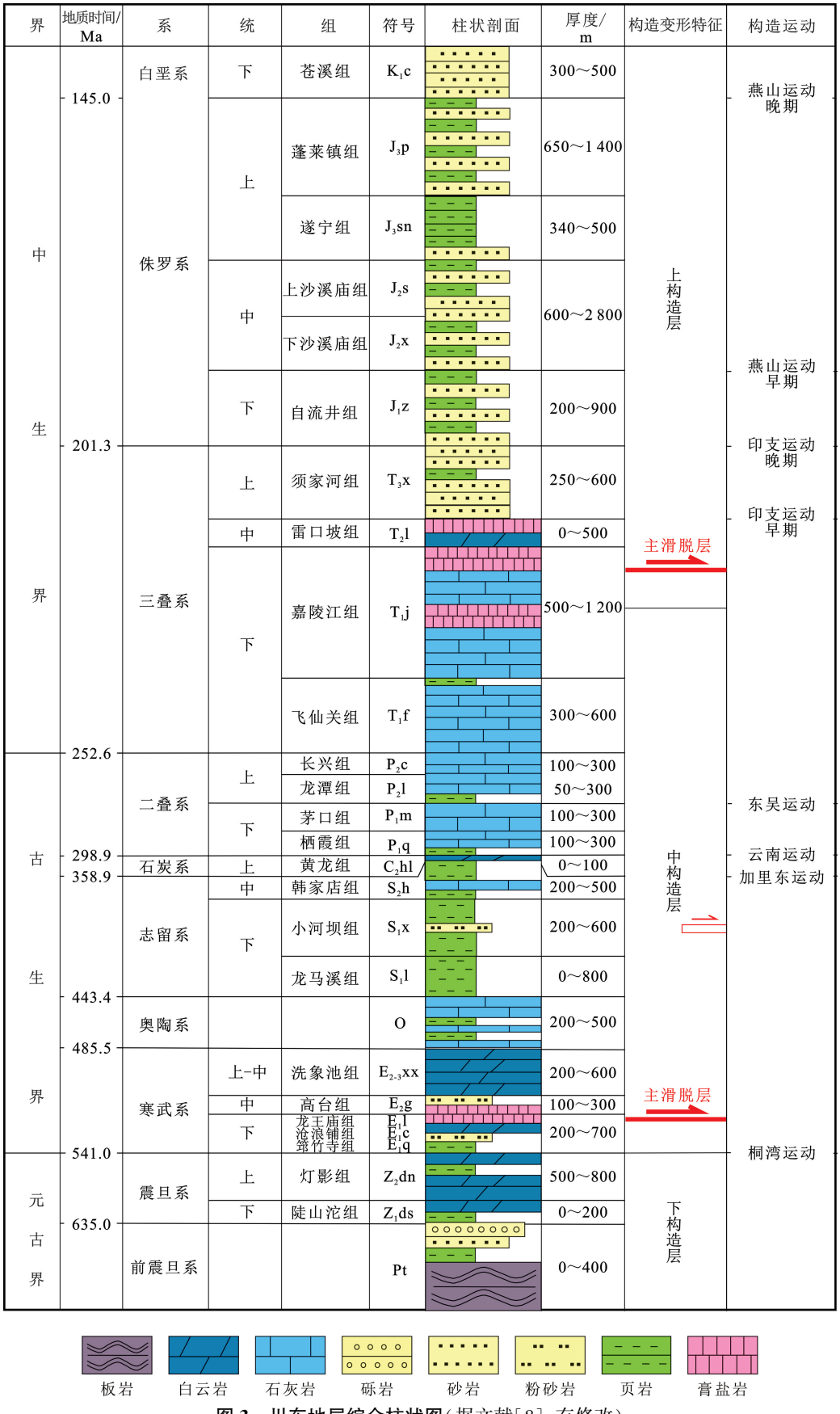

图 3　川东地层综合柱状图(据文献[8],有修改)

Fig. 3　Stratigraphic column of east Sichuan Basin(After citation[8], modified)

2　试验相似条件和模型设计

2.1　试验相似条件

本次试验采用黏聚强度约为 120 Pa 的白色、蓝色石英砂模拟脆性地层,采用黏度约为 1.2×10^4 Pa·s 数量级的硅胶模拟川东地区的区域性滑脱层,试验材料的具体物理参数见表 1。

表 1　试验材料物理参数

Table 1　Parameters of materials used in physical modelling

流变属性	试验材料	密度 ρ/(kg·m^{-3})	黏聚强度 C/Pa	黏度 η/(Pa·s)
脆性层	石英砂	1 300	120	
韧性层	硅胶	929		1.2×10^4

试验采用的石英砂颗粒粒径为 0.2~0.6 μm,密度为 1 300 kg/m^3,内摩擦角约为 31°,其变形遵循 Mohr-Coulomb 破裂准则,与上地壳地层的内摩擦角大致相当[17],是模拟上地壳脆性变形的理想材料[18-19]。人工染色的石英砂物理性质无明显变化,为便于观察和表征构造变形过程,在试验中铺设数层 1~2 mm 厚度的薄层蓝色石英砂作为标志层。硅胶在低应变速率情况下具有牛顿流体性质,因此常被用来模拟上地壳塑性变形[20],本试验采用的硅树脂在常温下黏度为 1.2×10^4 Pa·s,密度为 929 kg/m^3,在试验砂箱变形过程中可起到滑脱作用。

根据物理模拟相似原理[18,21],即模型的尺度与材料的选择满足相似原理的要求,物理模型与地质原型的相似因子如下:

(1)重力相似因子 $g^*=1$,模型和地质原型都在自然重力场中进行,两者相同;

(2)密度相似因子 $\rho^*=0.5$,试验材料的密度约等于地层密度的一半;

(3)黏度相似因子 $\eta^*\approx1.2\times10^{-15}$,实际地层黏度约为 1×10^{19} Pa·s,硅胶的黏度为 1.2×10^4 Pa·s;

(4)长度相似因子 $l^*=10^{-5}$,模型的 1 cm 大致等于地质原型的 1 km。

2.2　模型设计

物理模拟试验模型设计如图 4 所示,砂箱初始长度、宽度和高度分别为 50、26 和 8 cm,底部为水平金属钢板,砂箱左端为固定挡板,右端为电缸驱动的活动挡板,砂箱前后两侧为钢化透明玻璃。为便于直观地观察观察砂箱变形过程,石英砂在纵向上蓝白相间分层铺设(蓝色、白色石英砂物理属性无差别)。砂箱中铺设 3 层 0.5 cm 厚度的硅胶层,用以模拟川东地区中下寒武统膏盐岩、志留系泥岩、中下三叠统膏盐岩 3 套滑脱层(图 4(a)),并将砂箱剖面由深至浅分隔为①、②、③、④号构造层。图 4(b)所示试验模型与图 4(a)相比,仅在底部增设一层厚度约为 5 mm 的硅胶层,用于模拟盖层与基底之间起到拆离作用的滑脱层。

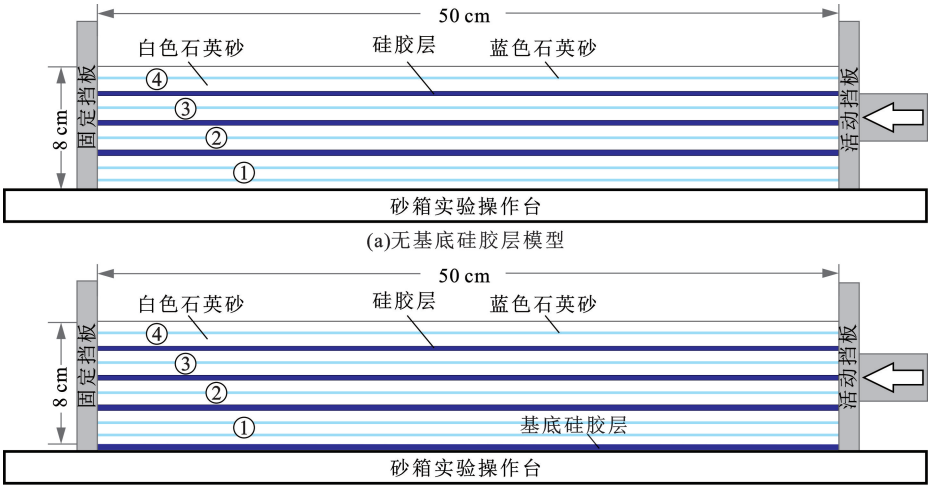

图 4　物理模拟试验砂箱模型设计示意图

Fig. 4　Schematic diagrams of physical modelling settings

本研究中设置 4 组对比试验,试验Ⅰ~Ⅲ采用图 4(a)所示砂箱模型,试验Ⅳ则采用图 4(b)所示砂箱模型,4 组试验累积缩短量和累积缩短率统一设定为 12.5 cm 和 25%。4 组试验中,砂箱左、右两侧分别为固定和活动挡板,右侧活动挡板分别以 0.5、0.05、0.005 和 0.005 mm/s 的速度匀速向左侧移动。试验过程中,置于砂箱前侧透明玻璃外侧的高分辨率相机对不同缩短量阶段(0%、5%、10%、

15%、20%、25%)的砂箱剖面构造特征进行拍摄,动态记录变形介质的构造特征及演化过程。

3　构造物理模拟试验结果及构造变形

3.1　构造物理模拟试验结果

3.1.1　试验Ⅰ

试验Ⅰ累积缩短量为 12.5 cm,累积缩短率为 25%,缩短速率为 0.5 mm/s。当缩短量为 2.5 cm(缩短率为 5%,图 5(b))时,在靠近活动挡板一侧先形成一个箱状背斜,断层 F1 开始发育,持续挤压作用使挤

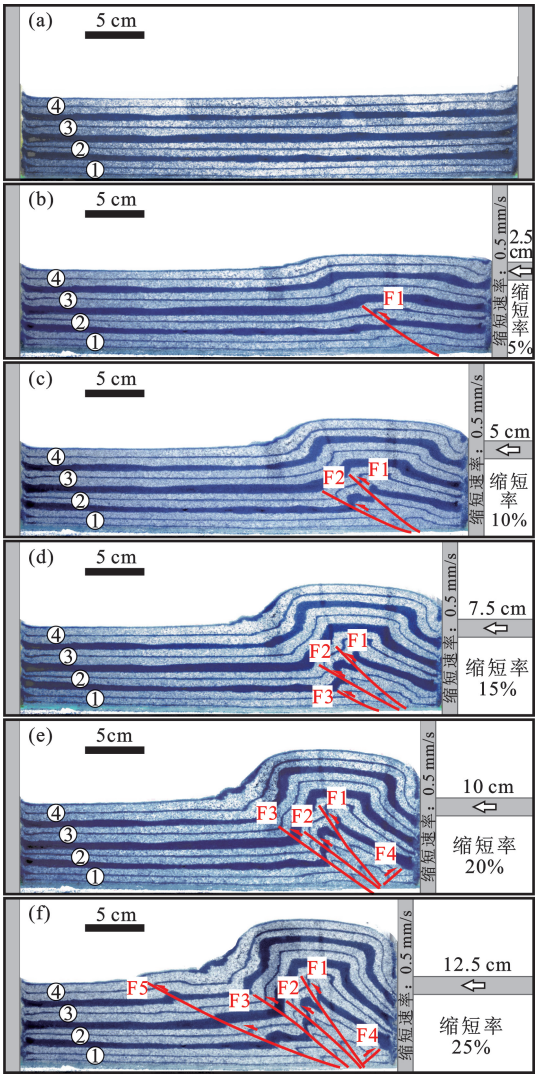

图 5　试验Ⅰ模拟试验结果

Fig. 5　Results of physical model Ⅰ

压端背斜幅度逐渐增大;当构造缩短量分别为 5 cm(缩短率为 10%,图 5(c))、7.5 cm(缩短率为 15%,图 5(d))和 12.5 cm(缩短率为 25%,图 5(f)),新的逆冲断层 F2,F3 和 F5 依次形成,形成一系列叠瓦状逆冲断层,并在缩短量为 10 cm(缩短率为 20%,图 5(e))时在 F1 上盘形成一条小型反冲断层 F4。从图 5(f)可以观察到,新发育的 F5 断层与 F3 断层之间的间距远大于 F1、F2、F3 三者之间的间距,说明在褶皱冲断带中,逆冲断层之间的间距随着挤压量的增加而增大。试验Ⅰ以逆冲断层的发育为主要构造变形特征,并以前展式向左侧的固定挡板一侧传播,在剖面上表现为叠瓦状逆冲推覆断层,早期形成的逆冲断层在新逆冲断层的影响下被动抬升,断层倾角逐渐增加。同时滑脱层拆离效果不明显,试验中由深至浅①~④号构造层呈现出较为相似的构造变形特征。

3.1.2　试验Ⅱ

试验Ⅱ累积缩短量为 12.5 cm,累积缩短率为 25%,缩短速率为 0.05 mm/s。当缩短量为 2.5 cm(缩短率为 5%,图 6(b))时,在靠近活动挡板一侧

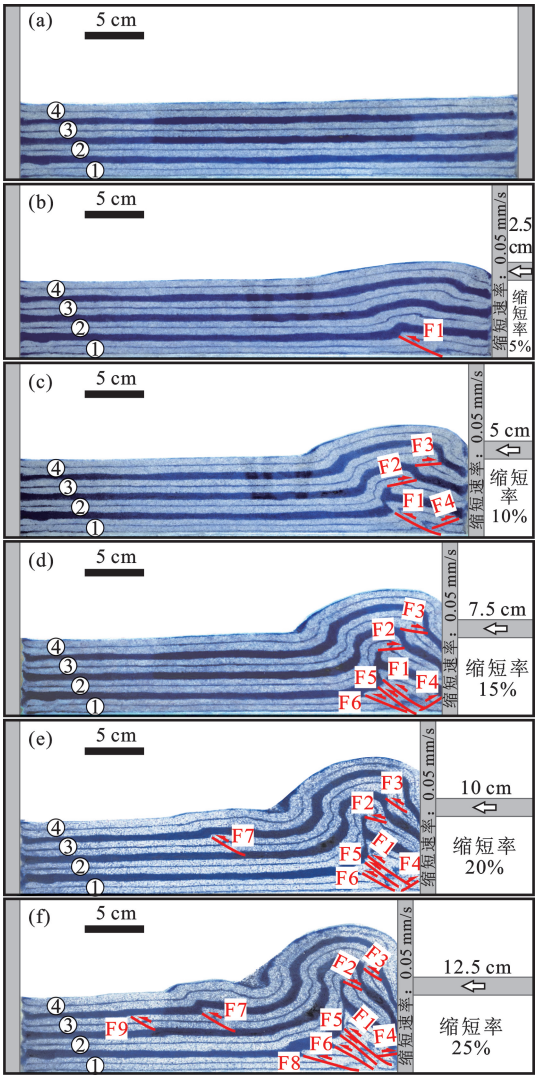

图 6　试验Ⅱ模拟试验结果

Fig. 6　Results of physical model Ⅱ

首先发育一个开阔的扇状背斜,源自基底的逆冲断层 F1 开始发育,但尚未切穿上覆硅胶层。在缩短量为 5 cm(缩短率为 10%,图 6(c))时,F1 断距持续

增大但仍未切穿上覆硅胶层,被 3 套滑脱层分隔的①~③号构造层分别发育小型反冲断层 F4、F2 和 F3。当缩短量为 7.5 cm(缩短率为 15%,图 6(d))时,源自基底的逆冲断层 F5、F6 开始发育,向上终止于硅胶层。当缩短量达到 10 cm(缩短率为 20%,图 6(e))时,在剖面中部④号构造层又发育一宽缓背斜,同时③号构造层中断层 F7 开始发育。从图 6(f)(缩短量达到 12.5 cm,缩短率为 25%)可以观察到,各断层(F1~F9)的发育均只局限在各自所处的构造层中,说明在试验Ⅱ中缩短速率减缓为 0.05 mm/s 时,滑脱层开始呈现出一定的拆离效果,深中浅构造层的变形存在一定的差异,深部构造层(①号构造层)以发育叠瓦逆冲断层为主,而中、浅部构造层(②~④号构造层)构造变形则以褶皱为主、断层为辅。相较于试验Ⅰ的快速压缩(缩短速率为 0.5 mm/s,图 5),试验Ⅱ在缩短速率放缓(0.05 mm/s)的条件下,砂箱中应变更易向固定挡板一侧快速传播。

3.1.3　试验Ⅲ

试验Ⅲ积缩短量为 12.5 cm,累积缩短率为 25%,缩短速率为 0.005 mm/s。与试验Ⅰ和试验Ⅱ相比,试验Ⅲ中砂箱的缩短速率进一步减小,为 0.005 mm/s(图 7)。当缩短量为 5 cm(缩短率为 10%,图 7(b))时,靠近活动挡板一侧褶皱波长变短,深部①号构造层中快速发育逆冲断层 F1、F2 和反冲断层 F5,②和③号构造层分别发育小型反冲断层 F3 和逆冲断层 F4。随着缩短量持续增加(图 7(c)~(e)),褶皱的波幅快速增加,深部①号构造层陆续发育断层 F6 和 F7,早期发育的断层断距也持续增加。从图 7(f)(缩短量达到 12.5 cm,缩短率为 25%)观察到,浅部②~④号构造层的构造变形以褶皱为主、断层为辅;而深部①号构造层则主要以断层发育为主要变形特征。与试验Ⅰ(缩短速率为 0.5 mm/s,图 5)和试验Ⅱ(缩短速率为 0.05 mm/s,图 6)相比,试验Ⅲ中缩短速率进一步减小至 0.005 mm/s 时,硅胶滑脱层的拆离效果进一步增强,①~④号构造层的构造变形呈现出更为明显的不协调现象;深部硅胶滑脱层将主要的断层发育局限在①号构造层中,其拆离效果明显,中部和浅部的滑脱层拆离效果则相对较弱。

3.1.4 试验Ⅳ

试验Ⅳ累积缩短量为 12.5 cm,累积缩短率为 25%,缩短速率为 0.005 mm/s。对比试验Ⅰ~Ⅲ,试验Ⅳ在砂箱底部新增设一套硅胶滑脱层,缩短速率

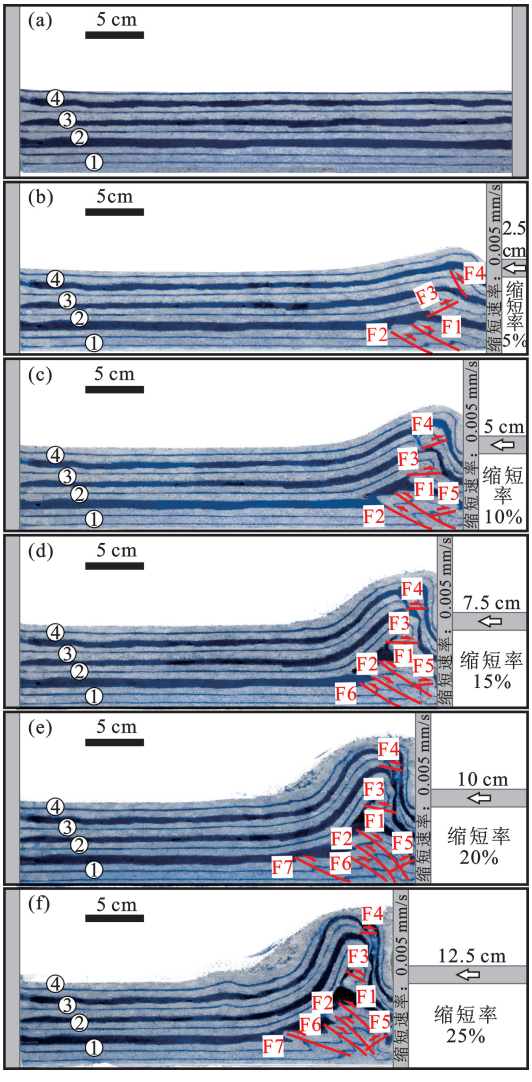

图 7　试验Ⅲ模拟试验结果

Fig. 7　Results of physical model Ⅲ

则与试验Ⅲ相同,仍为 0.005 mm/s(图 8)。在缩短量达到 5 cm 之前(缩短率为 5%,图 8(b);缩短率为 10%,图 8(c)),深部的①和②号构造层在褶皱变形的同时分别发育 F1 和 F2 断层,而浅部的③和④号构造层则以褶皱变形为主。当缩短速率达到 10 cm 之前(缩短率为 15%,图 8(d);缩短率为 20%,图 8(e)),在深部①号滑脱层早期发育的 F1 下盘进一步发育 F3 断层,而在浅表发育断距极为有限的 F4、F5 和 F6 等小型调节断层。当缩短量达到 12.5 cm(缩短率为 12.5%,图 8(f))时,在砂箱靠近固定挡板一侧发育 F7 断层及其上盘的传播褶皱。与试验Ⅲ(图 7)相比,试验Ⅳ受控于砂箱底部滑脱层的拆离作用,构造变形不再局限于活动挡板附近,而是更易于向左侧固定挡板一侧传播,指示砂箱底部滑脱层对应力的横向传递具有重要控制作用;①和②号构造层之间的滑脱层拆离作用更加明显,但浅部 2

套滑脱层的拆离作用较弱。

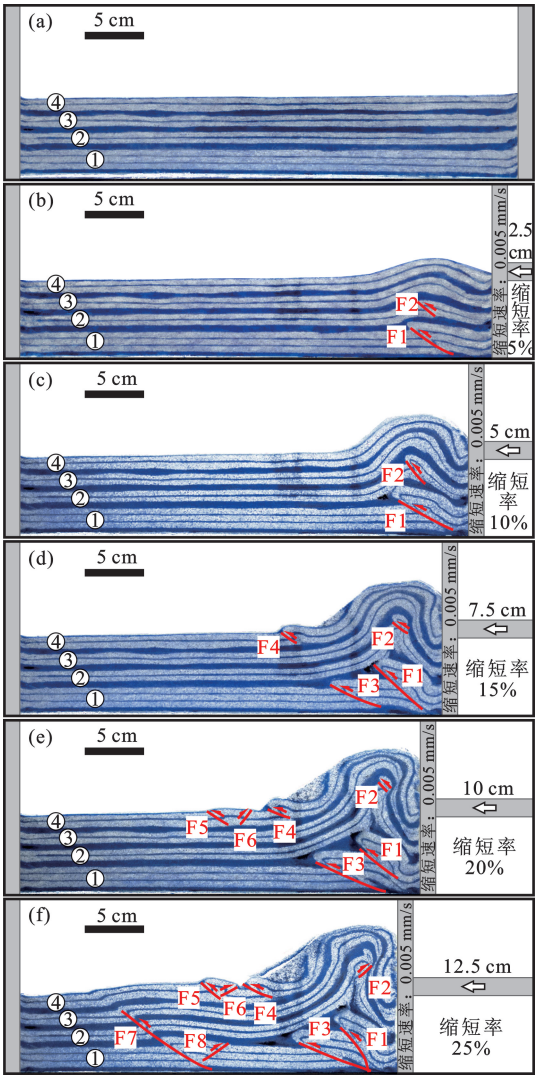

图 8　试验Ⅳ模拟试验结果

Fig. 8　Results of physical model Ⅳ

3.2　多滑脱层控制下的构造变形分析

上文展示 4 组多滑脱层构造物理模拟试验结果,其中试验Ⅰ~Ⅲ的变形介质(即砂层、滑脱层纵向配置)完全一致,但在变形过程中采用不同的缩短速率,分别为 0.5、0.05 和 0.005 mm/s;试验Ⅳ则在与试验Ⅰ~Ⅲ相同变形介质的基础上,在其底部新增一层厚度约为 5 mm 的硅胶滑脱层,缩短速率与试验Ⅲ相同,为 0.005 mm/s。因此通过对比试验Ⅰ~Ⅲ的构造变形过程及试验结果,可分析不同缩短速率对多滑脱层构造变形的控制作用;通过对比试验Ⅲ和试验Ⅳ,可分析滑脱层纵向配置对构造变形的控制作用。

试验Ⅰ(缩短速率为 0.5 mm/s,图 5)各断层的发育并未局限在某一砂层中,特别是 F5 从深部一直向上传播至变形介质顶部,反映在较高的缩短速率下,3 套硅胶滑脱层所起到的拆离作用十分有限,剖面深、中、浅构造层的构造变形具有较高的相似性,未显示出明显差异。与试验Ⅰ相比,试验Ⅱ和试验Ⅲ采用较低的构造缩短速率(分别为 0.05 和 0.005 mm/s)。在试验Ⅱ中(图 6),尽管断层 F1~F9 的发育时间存在先后,但各断层的发育均局限在各自所处的砂层中,未能切割上部或下部的硅胶层,且剖面中发育褶皱的波长:波幅比从深至浅逐步变大,反映缩短速率为 0.05 mm/s 时,硅胶滑脱层已经具有显著的拆离作用,并使得深、中、浅构造层的变形具有明显差异。在试验Ⅲ中(图 7),随着构造缩短速率的进一步减小,除断层 F3 和 F4 外,其余断层的发育均局限在深部硅胶滑脱层之下,说明深部硅胶滑脱层的拆离作用更加显著,而中部和浅部硅胶层的滑脱作用有所减弱。

在缩短量为 25%(即 12.5 cm)时,通过对试验Ⅰ~Ⅳ中由深至浅①~④号构造层缩短量的定量分析,根据各构造层缩短量中断层与褶皱各自的贡献量(%)制作试验Ⅰ~Ⅳ的缩短量贡献率统计图(图 9)。对比分析发现:试验Ⅰ中滑脱层对各构造层的拆离效果不明显(缩短速率为 0.5 mm/s,图 9(a)),断层主要发育在深部构造层(如①、②号构造层),①号构造层中断层与褶皱发育对总缩短量的贡献基本相当(各约为 50%),②号构造层中断层发育对总缩短量的贡献下降至约为 30%;而浅部的③、④号构造层中断层的发育则非常有限,95%以上的缩短量均由褶皱的发育导致;而随着挤压速率的逐渐减小,试验Ⅱ(缩短速率 0.05 mm/s,图 9(b))和试验Ⅲ(缩短速率为 0.005 mm/s,图 9(c))中滑脱层的拆离效果明显增强,深部①号构造层中断层与褶皱对总缩短量的贡献基本相当(褶皱略具优势),中浅部②~④号构造层中褶皱发育对总缩短量的贡献占绝对主导作用(大于 90%),断层活动相对较弱。与试验Ⅲ相比,试验Ⅳ缩短速率依然为 0.005 mm/s,但由于砂箱底部增设一套硅胶滑脱层,导致各构造层之间的变形差异进一步增强,例如②和④号构造层中断层发育对总缩短量的贡献比高于③号构造层(图 9(d))。

前人针对断层相关褶皱进行大量的定量解析研究,发现构造变形的总体缩短量、断层发育规模、褶皱隆升幅度等参数之间存在紧密的联系[22]。图 10 统计分析本研究中试验Ⅰ~Ⅳ地表抬升幅度与构造缩短率之间的对应关系。随着缩短率的增加,4 组试验中地表抬升幅度与缩短率均呈现出线性正相关。然而通过对比发现,缩短速率不同时地表抬升

幅度存在差异,例如当缩短速率较快时(0.5 mm/s,试验Ⅰ),地表抬升幅度最弱;当缩短速率减慢至 0.05 mm/s 时(试验Ⅱ),地表抬升幅度较试验Ⅰ略有增加;当缩短速率进一步减慢至 0.005 mm/s 时(试验Ⅲ和Ⅳ),地表抬升幅度进一步增加。这说明构造变形速率对于多滑脱层发育区构造变形的垂向生长特征也具有重要影响作用,当地层快速缩短时(如 0.5 mm/s,图 5、10),各滑脱层拆离效果不明显,地表抬升幅度较小,构造应变更易于发生横向传播;而当地层以较慢的速率缩短时(如 0.005 mm/s,图 7、10),滑脱层拆离效果显著增强,地表抬升幅度也相应明显增强。

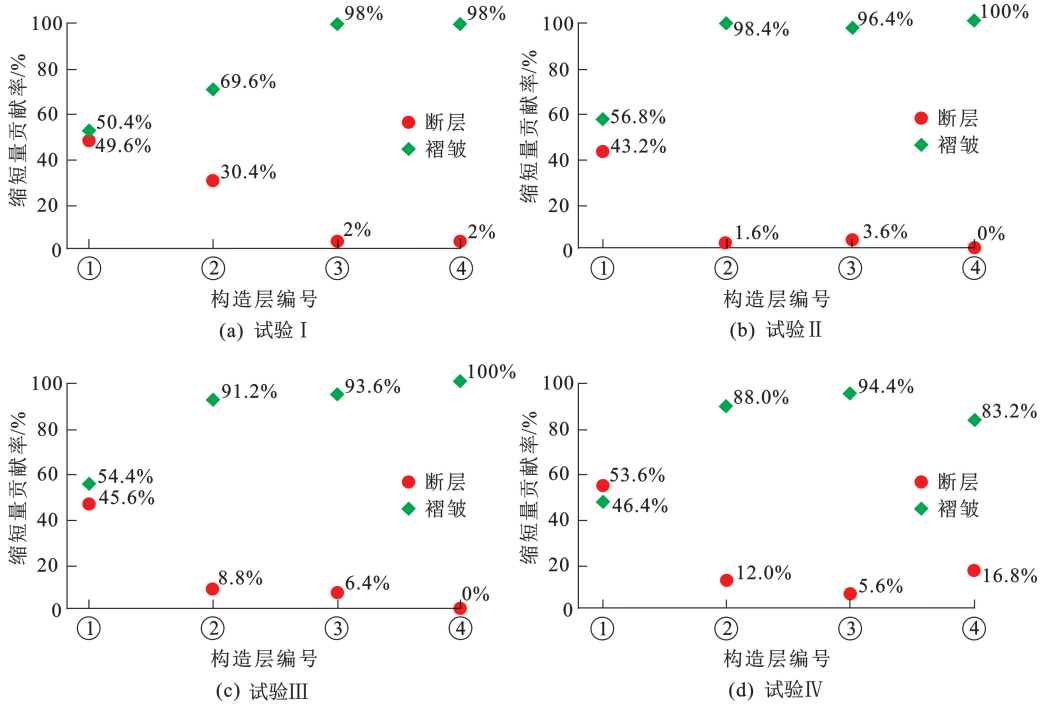

图 9　断层和褶皱对缩短量的贡献率统计(缩短率均为 12.5%)

Fig. 9　Statistics of contribution of faults and folds to overall shortening(shortening ratio: 12.5%)

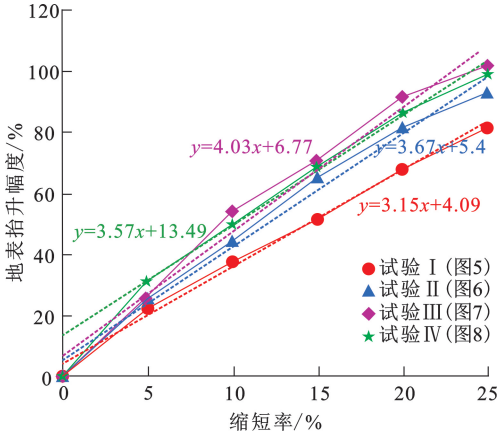

图 10　地层抬升幅度与缩短率的对应关系

Fig. 10　Corresponding relationship between topographic uplift and shortening ratio

4　讨　论

自印支运动以来,四川盆地东部地区经历多期次构造挤压变形,形成现今的川东褶皱带。前人针对川东褶皱带的构造变形过程及形成机制开展一系列的研究[4-6,22-25],尽管取得的认识存在一定的差异,但均认为川东地区 3 套滑脱层(中下寒武统膏盐岩、志留系泥岩、中下三叠统膏盐岩)对于川东地区的构造变形具有重要影响。相关研究表明,受滑脱层数量、厚度及挤压作用强度等因素影响,褶皱带的构造变形特征具有明显横向差异性及纵向分层性[11]。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存在明显的纵向差异性,导致被滑脱层分隔的各构造层表现出构造变形不协调现象。

通过 4 组构造物理模拟试验结果的对比分析发现,当多套滑脱层存在时,深部滑脱层的拆离作用明显强于浅部滑脱层(图 5~8),这与川东地区的多滑脱层控制下的构造变形特征具有较高的吻合度。川东地区发育的主要断裂多数从深部起源于中下寒武统膏盐岩层中(图 2),且川东滑脱构造变形的区域与四川盆地中下寒武统膏盐岩的分布范围也存在较高的吻合度[12],表明中下寒武统膏盐岩是川东褶皱冲断构造变形的关键控制因素。此外尽管中浅部 2

套滑脱层(志留系泥岩和中下三叠统膏盐岩)对川东地区中浅构造层的构造变形也具有一定的影响作用,但这 2 套滑脱层的拆离效果显著弱于深部中下寒武统膏盐岩。

关圣浩[8]发现构造缩短量对川东地区多层滑脱褶皱和断裂发育的控制作用,并认为缩短率小于 20%时发育滑脱褶皱和西倾断层,缩短率大于 20%时发育东倾的逆冲断层,缩短率达到 30%时紧闭背斜核部聚集膏盐岩和泥岩并发育高陡断层。然而该缩短率是对川东地区剖面中挤压构造变形结果的静态表征,而实际上川东褶皱带在印支运动以来的构造演化过程中其变形速率并非是均一的。结合本试验结果分析,构造变形速率对于多滑脱层发育区构造变形的垂向差异性也具有重要控制作用(图 9、10):变形速率减小时,滑脱层的拆离效果明显增强,各构造层变形样式的垂向差异性也随之增强;变形速率增大时,滑脱层的拆离效果逐步减弱,各构造层变形样式的垂向差异性也随之减小。因此在印支运动早期的弱挤压变形阶段,变形速率较低,使得川东地区 3 套滑脱层(特别是中下寒武统膏盐岩)充分发挥其拆离作用,以发育滑脱褶皱及小型的调节断层为主要构造变形特征,各构造层变形特征在垂向上具有显著的差异性;而在后期的强烈挤压变形阶段,变形速率快速提升,一定程度上限制各滑脱层的拆离作用,各构造层以发育高陡逆冲断层和反冲断层为主,变形特征趋于一致。

5　结　论

(1)物理模拟对比试验表明,滑脱层纵向配置和变形速率对多套滑脱层发育区的构造变形样式具有重要控制作用:①当同时发育多套滑脱层时,深部滑脱层的拆离效果显著强于浅部滑脱层,导致垂向上深部构造层之间的构造变形差异性高于浅部构造层;②变形速率减小时,滑脱层的拆离效果明显增强,各构造层的变形样式差异性也随之增强;变形速率增大时,滑脱层的拆离效果逐步减弱,各构造层的变形样式差异性也随之减小。

(2)川东地区主要发育 3 套滑脱层(中下寒武统膏盐岩、志留系泥岩、中下三叠统膏盐岩),将川东地层划分为深部寒武系—奥陶系构造层、中部石炭系—二叠系构造层和浅部中生界构造层 3 套构造层;3 套滑脱层对于川东褶皱带的构造变形具有明显的拆离作用,深部的中下寒武统膏盐岩的拆离作用显著强于中浅部的志留系泥岩和中下三叠统膏盐岩,导致川东地区 3 套构造层的变形特征在垂向上具有显著差异。

(3)川东地区在印支运动以来的构造变形速率存在差异性。印支运动早期弱挤压变形阶段的变形速率较低,川东地区 3 套滑脱层(特别是中下寒武统膏盐岩)拆离作用明显,以发育滑脱褶皱及小型的调节断层为主要构造变形特征,各构造层变形特征产生明显的垂向差异性;后期强烈挤压变形阶段的变形速率快速提升,限制各滑脱层的拆离作用,各构造层以发育高陡逆冲断层和反冲断层为主,变形特征趋于一致。

参考文献:

[1] YAN Danping, ZHOU Meifu, SONG Honglin, et al. Origin and tectonic significance of a mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. Tectonophysics,2003,361(3/4):239-254.

[2] 胡召齐,朱光,刘国生,等. 川东“侏罗山式”褶皱带形成时代:不整合面的证据[J]. 地质论评,2009,55(1):32-42.
HU Zhaoqi, ZHU Guang, LIU Guosheng, et al. The folding time of the eastern Sichuan Jura-type fold belt:evidence from unconformity[J]. Geological Review, 2009, 55(1):32-42.

[3] 冯向阳,孟宪刚,邵兆刚,等. 华南及邻区有序变形及其动力学初探[J]. 地球学报,2003,24(2):115-120.
FENG Xiangyang, MENG Xiangang, SHAO Zhaogang, et al. A preliminary discussion on features and dynamics of sequence deformation in South China and neighboring areas[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(2):115-120.

[4] 刘尚忠. 川东薄皮构造模式之我见[J]. 四川地质学报,1995,15(4):264-267.
LIU Shangzhong. My opinion of structural pattern of thin-skinned structure in east Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 1995,15(4):264-267.

[5] 李忠权,冉隆辉,陈更生,等. 川东高陡构造成因地质模式与含气性分析[J]. 成都理工学院学报,2002,29(6):605-609.
LI Zhongquan, RAN Longhui. CHEN Gengsheng, et al. Genetic geologic model and gas-bearing analysis of high and steep structures in east Sichuan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002,29(6):605-609.

[6] 颜丹平,汪新文,刘友元. 川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析[J]. 现代地质,2000,14(1):37-43.
YAN Danping, WANG Xinwen, LIU Youyuan. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of

boundary among Sichuan, Hubei and Hunan[J]. Geoscience, 2000,14(1):37-43.

[7] 解国爱,贾东,张庆龙,等. 川东侏罗山式褶皱构造带的物理模拟研究[J]. 地质学报,2013,87(6):773-788.
XIE Guoai, JIA Dong, ZHANG Qinglong, et al. Physical modeling of the jura-type folds in eastern Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2013,87(6):773-788.

[8] 关圣浩. 川东多套滑脱层褶皱带构造特征与变形机制[D]. 杭州:浙江大学,2017.
GUAN Shenghao. The structural characteristics and deformation mechanisms of multiple-detachments folds in eastern Sichuan[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[9] 师皓宇,马念杰,马骥. 龙门山断裂带形成过程及其地应力状态模拟[J]. 地球物理学报,2018,61(5):1817-1823.
SHI Haoyu, MA Nianjie, MA Ji. Numerical simulation for the formation process of the longmenshan fault zone and its crustal stress[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018,61(5):1817-1823.

[10] 刘重庆,周建勋,郎建. 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[J]. 地球科学与环境学报,2013,35(2):45-55.
LIU Chongqing, ZHOU Jianxun, LANG Jian, et al. Study on restrictive factor of fold-thrust belt formation with multiple decollements: taking eastern Sichuan-Xuefeng tectonic belt as an example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013,35(2):45-55.

[11] 张小琼,单业华,倪永进,等. 中生代川东褶皱带的数值模拟:两阶段的构造演化模型[J]. 大地构造与成矿学,2015,39(6):1022-1032.
ZHANG Xiaoqiong, SHAN Yehua, NI Yongjin, et al. Numerical modeling of the mesozoic east Sichuan fold belt: a two-stage tectonic model[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015,39(6):1022-1032.

[12] 魏国齐,贾东,杨威,等. 四川盆地构造特征与油气[M]. 北京:科学出版社,2019:205-213.

[13] 汤良杰,郭彤楼,余一欣,等. 四川盆地东北部前陆褶皱—冲断带盐相关构造[J]. 地质学报,2007,81(1):1048-1056.
TANG Liangjie, GUO Tonglou, YU Yixin, et al. Salt-related structures in foreland fold-thrust belt in northeast Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(1):1048-1056.

[14] 张岳桥,施炜,李建华,等. 大巴山前陆弧形构造带形成机理分析[J]. 地质学报,2010,84(9):1300-1315.
ZHANG Yueqiao, SHI Wei, LI Jianhua, et al. Formation mechanism of the babashan foreland arc-shaped structural belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9):1300-1315.

[15] 王瑞瑞,张岳桥,解国爱,等. 大巴山前陆弧形构造的成因:来自砂箱实验的认识[J]. 地质学报,2011,85(9):1409-1419.
WANG Ruirui, ZHANG Yueqiao, XIE Guoai, et al. Genesis of the arc-shaped structure in the dabashan foreland: a view from sandbox experiments[J]. Acta Geologica Sinica, 2011,85(9):1409-1419.

[16] 周建勋,郎建,刘重庆. 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[J]. 西北大学学报(自然科学版),2009,39(3):392-398.
ZHOU Jianxun, LANG Jian, LIU Chongqing. Influence of viscosity of ductile substrate on deformational features of fold-thrust belts: insight from physical modeling[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009,39(3):392-398.

[17] MCCLAY K R. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies[J]. Marine & Petroleum Geology, 1990,7(3):206-233.

[18] HUBBERT M K. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures[J]. Geological Society of America Bulletin, 1937,48(10):1459-1519.

[19] DAHLEN F A, SUPPE J, DAVIS D. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1983, 88(B2):1153-1172.

[20] WEIJERMARS R, SCHMELING H. Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity)[J]. Physics of the Earth & Planetary Interiors, 1986, 43(4):316-330.

[21] GOGUEL J. Gravity, deformation and the Earth's crust[J]. Atlas-News Supplement to Earth-Science Reviews, 1981,3(4):A251-A253.

[22] 张必龙,朱光,胡召齐,等. 川东"侏罗山式"褶皱的数值模拟及成因探讨[J]. 地质论评,2009,55(5):95-105.
ZHANG Bilong, ZHU Guang, HU Zhaoqi, et al. Numerical simulation and genesis of jurassic type fold in eastern Sichuan[J]. Geological Review, 2009,55(5):95-105.

[23] 谷志东,殷积峰,袁苗,等. 四川盆地东部深层盐下震旦系—寒武系天然气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2015,42(2):137-149.
GU Zhidong, YIN Jifeng, YUAN Miao, et al. Accumulation conditions and exploration direction of natural gas in deep subsalt sinian-cambrian system in the eastern Si-

chuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(2):137-149.

[24] 贾东,陈竹新,贾承造,等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 2003,9(3):402-410.
JIA Dong, CHEN Zhuxin, JIA Chengzao, et al. Structural analysis of longmenshan foreland fold-thrust belt and development of western Sichuan Foreland Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2003,9(3): 402-410.

[25] 冯常茂,刘进,宋立军. 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[J]. 地球学报, 2008,29(2):199-204.
FENG Changmao, LIU Jin, SONG Lijun. Formation mechanism of the tectonic deformation belt and the prognosis of favorable oil and gas exploration areas in the middle and upper Yangtze Valley[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008,29(2):199-204.

(编辑　李　娟)