

# 川东地区多滑脱层系控制下的构造样式差异及其对石炭系油气勘探的启示

陈友智<sup>1</sup>,冯许魁<sup>2</sup>,朱亚东<sup>1</sup>,师政<sup>3</sup>,肖东<sup>1</sup>,陶俊<sup>4</sup>,郭海洋<sup>1</sup>,  
周跃宗<sup>1</sup>,王征<sup>1</sup>,王兰英<sup>1</sup>,陈娜<sup>1</sup>,陈颖<sup>5</sup>

(1. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司西南物探研究院, 四川成都 610213; 2. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司, 河北涿州 072750; 3. 贵州理工学院资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550000; 4. 中国石油测井有限公司, 重庆 400000; 5. 中国石油西南油气田公司开发事业部, 四川成都 610000)

**摘要:**川东地区石炭系储层厚度较薄,增加了地层-岩性油气藏的勘探难度,亟需重新厘清滑脱层分布与区域构造样式之间的耦合关系,以期对构造型油气藏的勘探提供新的思路。基于川东地区地震反射资料,结合钻井、测井资料以及区域地质研究成果,从构造几何学的角度分析了滑脱层对构造样式的控制作用,并深入探讨了分层构造变形模式下石炭系圈闭的形成过程。研究表明:①川东大池干-大天池构造带三叠系滑脱层较薄,而志留系和寒武系滑脱层较厚,以志留系为界呈现明显的分层变形特征,其下发育向东倾斜的逆断层和褶皱,其上则发育断展褶皱。②在大池干-大天池构造带分层变形构造体系下,志留系上覆的断展褶皱前翼底部发育陡倾断层,同时缓倾断层沿滑脱层向前扩展,共同控制石炭系断背斜圈闭的形成。③川东滑脱层的差异分布与构造样式具有空间耦合关系,其中大池干-大天池构造带分层变形体系内与断展褶皱相关的石炭系圈闭,是该区油气勘探的重要潜在目标。

**关键词:**断层相关褶皱;滑脱层;构造样式;石炭系;川东地区

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

## Structural style differences under the control of multiple detachment layers and their implications for the Carboniferous hydrocarbon exploration in the eastern Sichuan Basin

CHEN Youzhi<sup>1</sup>, FENG Xukui<sup>2</sup>, ZHU Yadong<sup>1</sup>, SHI Zheng<sup>3</sup>, XIAO Dong<sup>1</sup>, TAO Jun<sup>4</sup>, GUO Haiyang<sup>1</sup>, ZHOU Yuezhong<sup>1</sup>,  
WANG Zheng<sup>1</sup>, WANG Lanying<sup>1</sup>, CHEN Na<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>5</sup>

(1. Southwest Geophysical Company, BGP Inc., CNPC, Chengdu, Sichuan 610213, China; 2. BGP Inc., CNPC, Zhuozhou, Hebei 072750, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550000, China; 4. China National Logging Corporation, Chongqing 400000, China; 5. Petroleum Development Division, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610000, China)

**Abstract:** The Carboniferous reservoirs in the eastern Sichuan Basin are generally thin, rendering the exploration of stratigraphic-lithologic hydrocarbon accumulations therein more challenging. Therefore, there is an urgent need to determine the coupling relationship between the distribution of detachment layers and regional structural styles, aiming to provide a novel philosophy for the structural trap exploration. Using seismic reflection data, drilling and log data, and the research results of regional geology, we analyze the controlling effects of detachment layers on structural styles in the eastern Sichuan Basin from the perspective of structural geometry. Furthermore, the formation process of the Carboniferous traps under the layered structural deformation pattern is investigated in depth. The research results reveal that the Dachigan-Datianchi area in the eastern Sichuan Basin exhibits thin Triassic but thick Silurian and Cambrian

收稿日期:2025-04-07;修回日期:2025-06-09。

第一作者简介:陈友智(1982—),男,博士、高级工程师,构造地质学。E-mail: cugchenyz@126.com。

通信作者简介:师政(1986—),男,博士、副教授,石油地质学。E-mail: shizheng1986@126.com。

基金项目:中国石油东方地球物理公司油气勘探新领域综合研究项目;贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2024]一般513);贵州理工学院高层次人才引进项目(2023GCC081)。

detachment layers. The deformation exhibits distinct stratification bounded by the Silurian: below it, east-dipping reverse faults and folds occur, while fault-propagation folds dominate above. Under this layered deformation system, fault-propagation folds overlying the Silurian strata exhibit steeply dipping faults at the base of their forelimbs, while their gently dipping faults extend forward along detachment layers. These faults jointly control the formation of the Carboniferous faulted anticline traps. Across the eastern Sichuan Basin, the differential distribution of detachment layers is coupled with structural styles. Notably, the Carboniferous traps associated with fault-propagation folds within the layered deformation system of the Dachigang-Datianchi tectonic zone serve as key potential targets for hydrocarbon exploration in the region.

**Key words:** fault-related fold, detachment layer, structural style, Carboniferous, eastern Sichuan Basin

引用格式:陈友智,冯许魁,朱亚东,等. 川东地区多滑脱层系控制下的构造样式差异及其对石炭系油气勘探的启示[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 96-107. DOI: 10. 11743/ogg20260107.

CHEN Youzhi, FENG Xukui, ZHU Yadong, et al. Structural style differences under the control of multiple detachment layers and their implications for the Carboniferous hydrocarbon exploration in the eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 96-107. DOI: 10. 11743/ogg20260107.

川东地区褶皱类型及其成因机制研究存在多种学术观点。在褶皱类型方面,前人主要提出滑脱褶皱<sup>[1]</sup>、断弯褶皱<sup>[2]</sup>、断展褶皱<sup>[3]</sup>和分层滑脱变形断弯-断展复合褶皱<sup>[4]</sup>。根据成因机理研究认为,该地区褶皱为江南-雪峰山基底拆离推覆而成<sup>[5]</sup>,或因先存正断层反转所致<sup>[6]</sup>,或受地层之间能干性差异控制<sup>[7]</sup>。这些研究大多忽略了平面上滑脱层厚度与岩性变化对构造样式的影响。

全球典型褶皱冲断带的地层序列通常发育多套滑脱层<sup>[8-10]</sup>。研究表明,构造变形过程中主滑脱层的转换<sup>[11]</sup>或多套滑脱层之间的构造层叠加效应<sup>[12]</sup>,都会显著增加构造样式的复杂性<sup>[13-17]</sup>。部分研究人员注意到川东地区滑脱层与构造样式之间的关系<sup>[18]</sup>,认为三叠系膏盐岩、志留系泥页岩以及寒武系膏盐岩所分隔的不同构造层之间的变形样式存在明显差异,但未进行分区和分带探讨。关圣浩<sup>[19]</sup>认为川东地区以寒武系膏盐岩层为主要滑脱层,志留系泥页岩次之,三叠系膏盐岩层则表现为被动变形特征,其中三叠系滑脱层之上发育滑脱褶皱,之下形成挤压型断层相关褶皱,但并未对断层相关褶皱的几何要素进行深入解析。

川东地区石炭系白云岩储层具有优越的物性条件和较高的油气钻遇率,是该区的主力产层。经历近50年(自1977年以来)的勘探开发,勘探重点已从构造型油气藏逐步转向地层-岩性油气藏<sup>[20]</sup>。然而,由于石炭系储层较薄<sup>[21]</sup>,其尖灭线和储层物性评价存在一定的难度,给地层-岩性圈闭的划定带来了挑战。在此背景下,通过深化区域构造认识来寻求石炭系构造型油气藏勘探的新突破具有重要的现实意义。本文依据断层相关褶皱几何学原理,结合地表地质以及钻井资料,探索了

川东地区褶皱带滑脱层分布与构造样式之间的关系,对该区主体构造带石炭系油气勘探具有重要的指导意义。

## 1 地质背景

新元古代青白口纪,川东地区发育小型裂谷,其东侧与鄂西海槽及湘桂黔裂陷相邻,经历了罗迪尼亚超大陆汇聚与裂解,沉积了含大量火山物质的梵净山群与板溪群等<sup>[22-23]</sup>。南华纪,川东地区继承了早期伸展构造背景,表现为克拉通内裂陷沉积环境,发育冰期-间冰期交替的碎屑岩沉积序列,其中包含大量泥页岩层系。值得注意的是,这套地层在湘黔桂地区构成了重要的区域性滑脱层<sup>[24]</sup>。震旦纪,区域伸展作用逐渐减弱,川东及周缘地区广泛发育海相碎屑岩与碳酸盐岩沉积<sup>[23]</sup>。灯影期末一中奥陶世,盆地进入克拉通内拗陷演化阶段<sup>[25]</sup>,川东地区发育寒武系高台组膏盐岩层系,成为区内下部重要的滑脱层系。晚奥陶世-志留纪,受加里东运动的影响,扬子地块周缘大规模隆升,前陆盆地发生挠曲并在川东形成龙马溪组陆内凹槽,沉积的厚层泥页岩构成了区内的中间滑脱层系<sup>[26]</sup>。泥盆纪-石炭纪末,盆地经历区域性隆升,川东地区沉积了石炭系黄龙组白云岩和灰岩,该套地层发育大量溶蚀孔洞,成为区内重要的天然气产层。中二叠世-中三叠世为克拉通陆内裂陷演化阶段<sup>[27]</sup>,发育二叠系-下三叠统礁滩相储集体,以及嘉陵江组-雷口坡组蒸发岩层系,形成区内上部滑脱层系。晚三叠世-侏罗纪,受龙门山、米仓山和大巴山冲断作用影响,进入前陆盆地演化阶段<sup>[28]</sup>。燕山期,在雪峰陆内造山系统作用下,遭受北西-南东向强

烈挤压应力作用,在湘鄂西—川东地区形成侏罗山式褶皱<sup>[7]</sup>。至喜马拉雅期,川东地区整体抬升并遭受剥蚀<sup>[29]</sup>(图1)。

## 2 断层相关褶皱地震反射识别

地震剖面上能识别出的断层相关褶皱通常包括断弯褶皱、断展褶皱和断层滑脱褶皱。①断弯褶皱表现为断坡上褶皱断距无明显变化;褶皱后翼和顶部较平缓,前翼陡峭。在膝折带等厚理论中,后翼倾角一般小于 $30^\circ$ ,当后翼倾角大于 $40^\circ$ 时,则更适用于固定褶皱轴面理论(图2a)。②断展褶皱表现为褶皱不对称,前翼更陡且窄;断层向上断距逐渐减小(图2b)。③断层滑脱褶皱表现为褶皱核部增厚,没有明显的逆冲坡;断层滑动终止端为褶皱向下结束处<sup>[30]</sup>(图2c)。

本次研究识别的地震反射同相轴主要有震旦系灯影组底界、寒武系底界、中寒武统洗象池组底界(即高台组滑脱层顶界)、上奥陶统底界、中二叠统底界、上二叠统底界、下三叠统飞仙关组四段(飞四段)底界、上三叠统须家河组底界和侏罗系大安寨段底界等。由于石炭系厚度较小,常介于 $10 \sim 40$  m,局部存在剥蚀尖灭<sup>[31]</sup>,故中二叠统底界与石炭系合并为一个同相轴。以川东地区WT1井进行标记,各层位同相轴特征如下:①震旦系灯影组底界( $Z_2dn^1$ )位于两弱波峰之间的

波谷底界附近,波谷为标层相位;②寒武系筇竹寺组底界( $C_1q$ )由两个强相位组成,后相位为标层相位;③中寒武统高台组顶界( $C_2g$ )为一连续的强波峰反射;④上奥陶统临湘组底界( $O_3l$ )由两个强相位组成,以前相位为标层相位;⑤中二叠统梁山组底界( $P_2l$ )为两个中—强波峰之间的波谷反射;⑥上二叠统龙潭组底界( $P_3l$ )为双强相位,后相位为标层相位;⑦下三叠统飞仙关组四段底界( $T_3f^4$ )由两个强相位组成,前相位能量较强,后相位为标层相位;⑧上三叠统须家河组底界( $T_3x^1$ )为单个强相位连续波峰反射;⑨侏罗系大安寨段底界( $J_1dn$ )由两个强相位组成,后相位为标层相位(图3)。

## 3 滑脱层分布与构造样式

### 3.1 滑脱层厚度分布

通过地震同相轴追踪并结合钻井资料约束,识别出现今四川盆地主要滑脱层系的厚度分布具有以下特征:①寒武系高台组沉积时期,盆地西高东低<sup>[32]</sup>,东部发育膏盐岩层系,以华蓥山构造带为界,厚度存在显著差异,向东逐渐增厚,最大厚度大于 $1\ 000$  m(图4a)。②志留系厚度分布受控于龙马溪组盆内洼槽展布,洼槽内最大厚度达 $1\ 400$  m。在川东地区,大天池构造带和七里峡构造带之间的志留系厚度存在突变,向西至

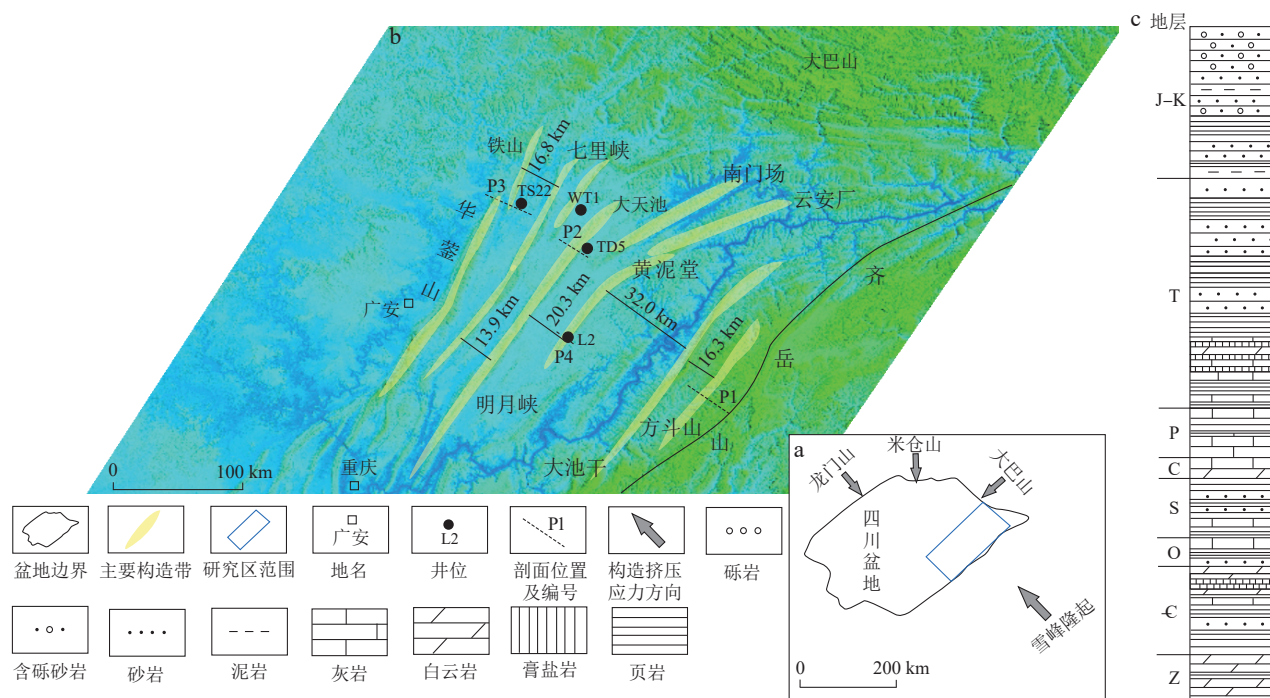


图1 川东地区主要构造带分布及地层柱状图

Fig. 1 Distribution map of major tectonic zones and stratigraphic column of the eastern Sichuan Basin

a. 川东地区大地构造位置; b. 构造带及褶皱波长分布; c. 典型地层柱状图(据文献[28]修改)



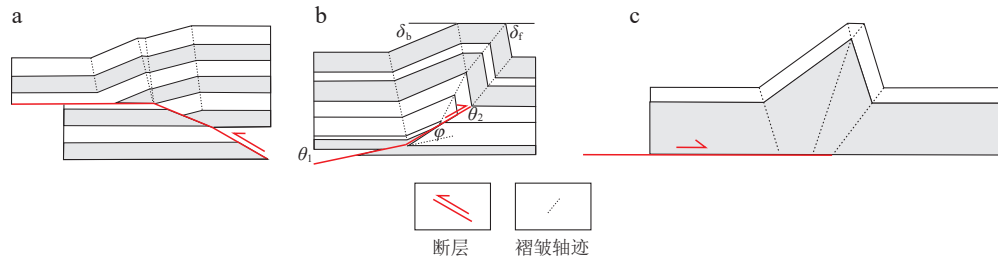


图2 断层相关褶皱的几何特征示意图(据文献[30]修改)

Fig. 2 Diagrams showing the geometrical characteristics of fault-related folds (modified after reference [30])

a. 断弯褶皱; b. 断展褶皱; c. 断层滑脱褶皱

$\delta_f$  前翼倾角;  $\delta_b$  后翼倾角;  $\theta_1$  断层缓倾段倾角;  $\theta_2$  断层陡倾段倾角;  $\varphi$  断层陡、缓倾段倾角差

(白色和灰色代表不同岩层,灰色代表软地层。)

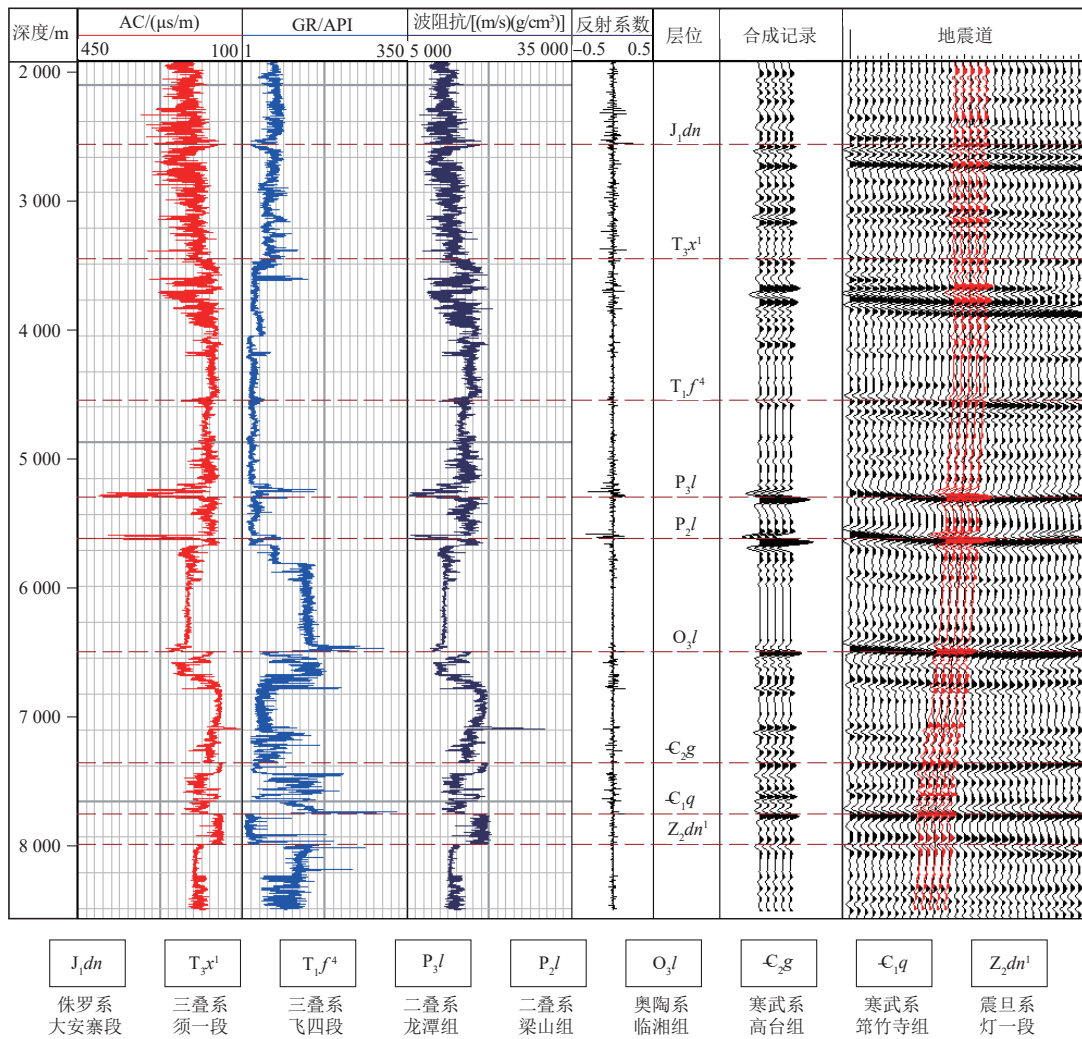


图3 川东地区WT1井地震合成记录综合图

Fig. 3 Synthetic seismogram and associated logging curves of well WT1 in the eastern Sichuan Basin

(图中红色虚线为地震数据与测井数据以及层位的对比辅助线。)

川中古隆起逐渐尖灭(图4b)。③三叠系嘉陵江组-雷口坡组膏盐岩层系厚度受三叠纪泸州-开江古隆起的影响,在开江地区厚度较小,向东、西两侧增大,最厚可达1 600 m(图4c,d)。

### 3.2 构造样式

雪峰陆内造山构造应力由鄂西—渝东地区向四川盆地传递,其构造样式的转变在齐岳山构造带至方斗



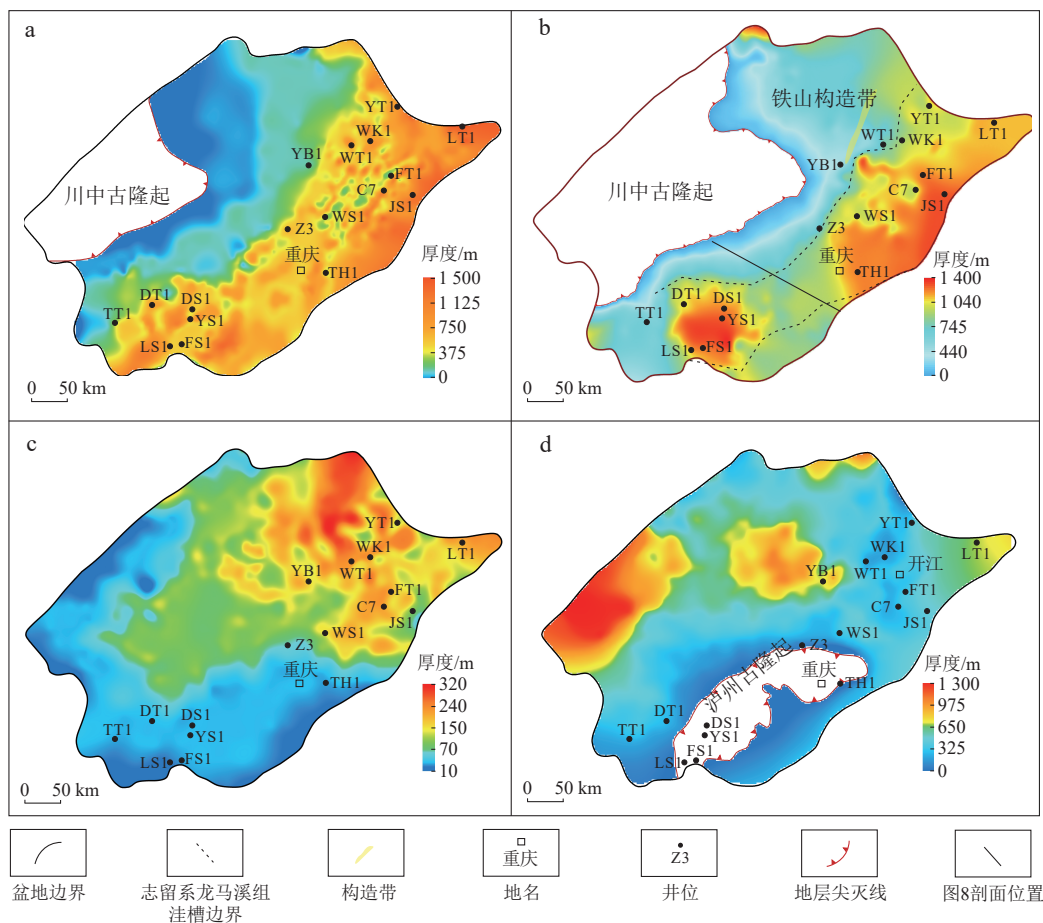


图4 四川盆地主要滑脱层系地层厚度分布

Fig. 4 Maps showing the thicknesses of major detachment layers in the Sichuan Basin

a. 高台组; b. 志留系; c. 嘉陵江组; d. 雷口坡组

山构造带之间的线束三维地震剖面P1上得到清晰展现(图5a),主要特征表现为:①深部滑脱层转换。志留系之下发育坡坪式逆断层系统实现滑脱层转换。齐岳山构造带附近主滑脱层位于南华系,向西至南华系裂陷区外缘,断层坡发育于震旦系灯影组—寒武系强硬岩层,至寒武系高台组塑性层转为断层坪形式滑动;向上断层坡发育于奥陶系灰岩层,最终以低角度断坪消失于志留系泥岩中。这一转换过程实现了盆外南华系向盆内寒武系—志留系滑脱层的过渡<sup>[24,33]</sup>。雪峰陆内造山构造应力向西传递,褶皱渐次形成,寒武系滑脱层内应存在低倾角断层或顺层断层。②断展褶皱造成地层增厚。方斗山构造带寒武系洗象池组—奥陶系和志留系均显示地层增厚,为逆断层的地层增厚效应。两者内部均存在断展褶皱,断层缓倾段向前有限突破,形成图5a所示的构造形态。③三叠系膏盐岩起到滑脱作用。飞仙关组四段底界之上,三叠系嘉陵江组—雷口坡组膏盐岩系发生滑动,形成与须家河组及上覆地层不协调的局部褶皱。受限于地震资料的分辨率,

早期研究人员认为方斗山构造带整体为一断展褶皱<sup>[34]</sup>,断层缓倾部分在寒武系高台组膏盐岩内滑脱。从现今地震剖面分析来看(图4b),在进行单一断展褶皱模型解释时,最大断距并未出现在底部寒武系附近,不符合断展褶皱由下至上断距逐渐减小的原则<sup>[30]</sup>。

三维地震剖面P2揭示出大天池断层相关褶皱的3个特征。①地表地质图显示SE翼70°陡倾角和NW翼25°缓倾角的不对称褶皱,未见断层出露,符合断展褶皱几何学特征(图6a)。②最大断距出现在中二叠统底界,奥陶系—中二叠统底显示明显的地层增厚(图5b)。③利用断展褶皱几何关系图解,断展褶皱缓倾断层倾角为14°,缓倾与陡倾断层之间的夹角为22°,陡倾断层倾角应为36°(图6c)。如果断展褶皱陡倾部分贯穿中二叠统底界—高台组,断层倾角必然大于36°。因此,以志留系为界,上、下两部分分层变形较为合理(图5b)。上变形层中存在石炭系—中二叠统断背斜,埋深仅3~4 km(图5b)。

三维地震剖面P3反映出铁山构造带断层相关褶

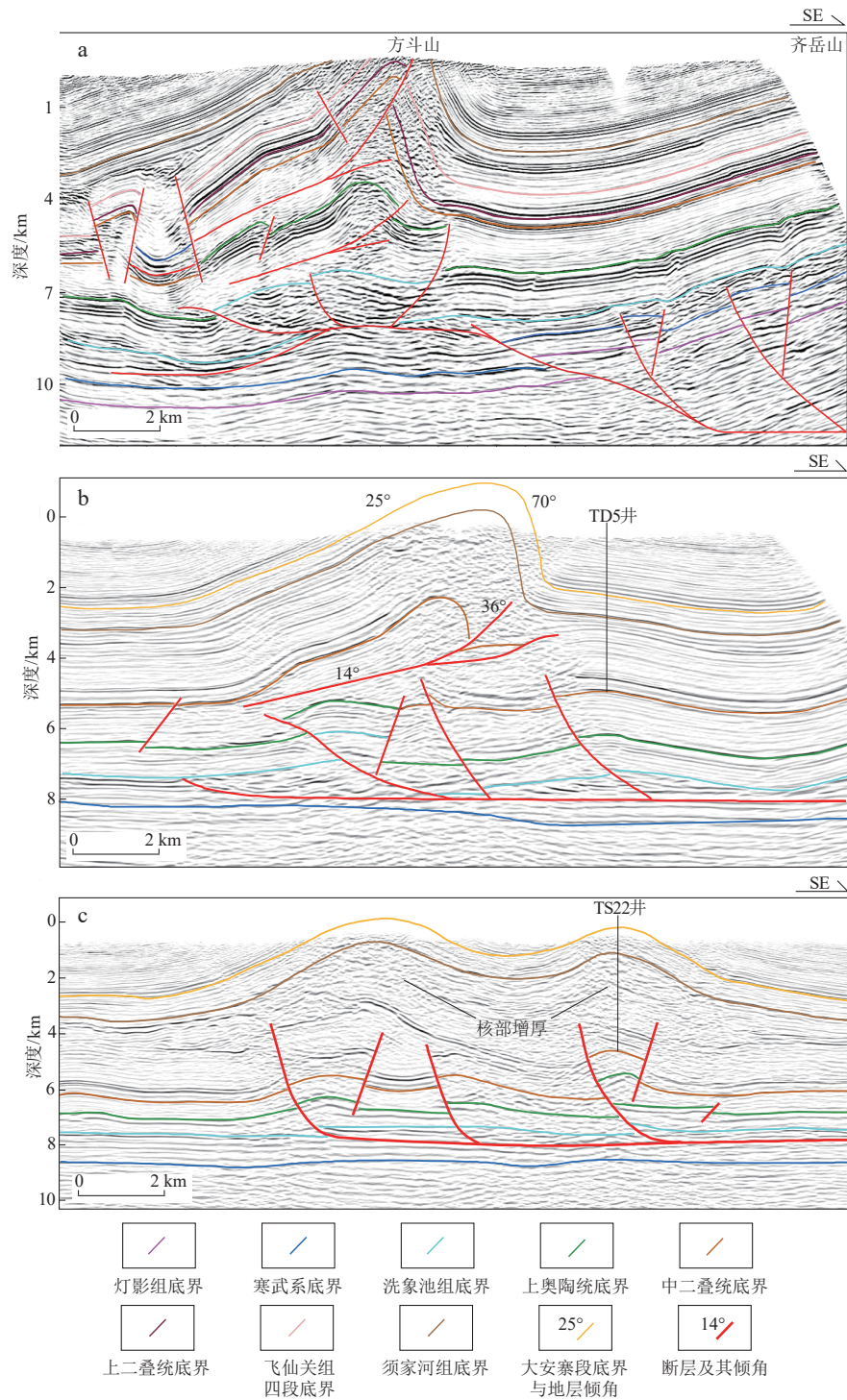


图 5 四川盆地东部地震解释剖面(剖面位置见图 1b)

Fig. 5 Geological interpretations of seismic profiles in the eastern Sichuan Basin (see Fig. 1a for the profile locations)

a. 过齐岳山-方斗山构造带剖面 P1; b. 过大天池构造带剖面 P2; c. 过铁山构造带剖面 P3

皱的 3 个特征。①地表地质图显示 SE 翼与 NW 翼近乎对称,与断层滑脱褶皱几何形态接近(图 6b)。②剖面中 SE 倾向断层下部寒武系断距大,向上消失于三叠系塑性层中,发育 NW 倾向的反向断层。③须家河组之下的雷口坡组-嘉陵江组塑性层在褶皱核部增厚。铁

山构造带位于志留纪深水洼槽之外(图 4b),地层序列中的砂岩层多,志留系整体厚度小,不支持大规模滑动构造的形成。因此,该区构造以三叠系塑性层为界,分为上、下两套构造系统,下部以逆冲构造为主,上部则以滑脱褶皱为主(图 5c)。



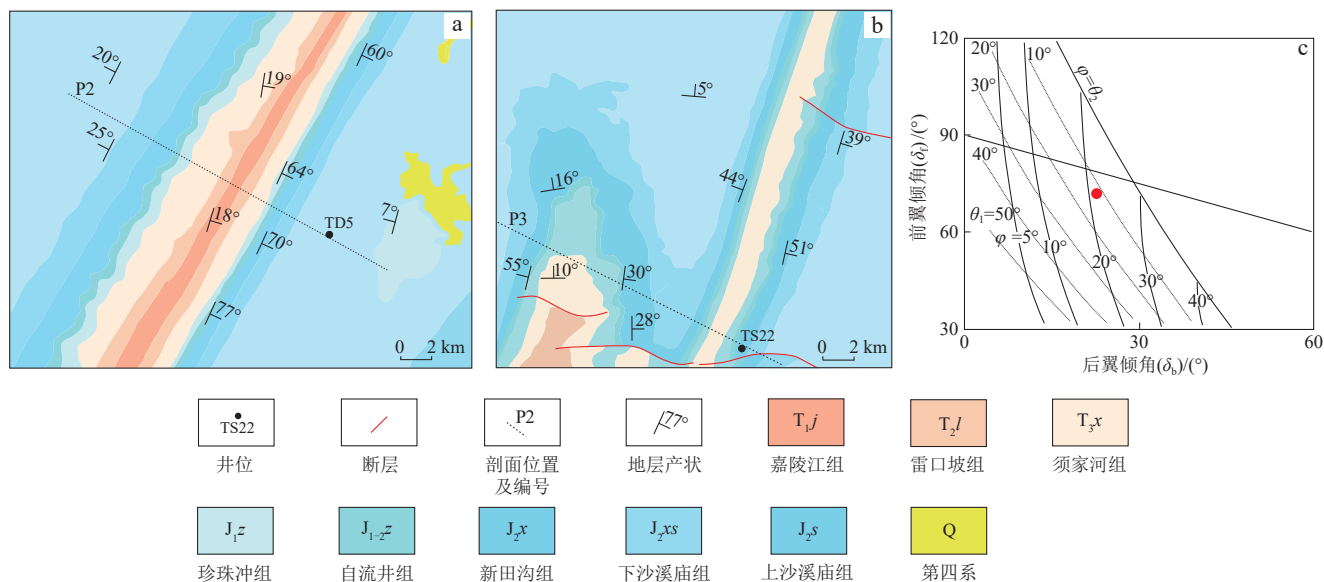


图6 川东地区地震测线地表地质图与断层滑脱褶皱几何关系图版(地质图据文献[35]修改)

Fig. 6 Maps showing the surface geology and the geometric relationships among seismic lines in the eastern Sichuan Basin (geological maps modified after reference [35])

a. 剖面P2; b. 剖面P3; c. 剖面P2断层褶皱几何关系图版, 红点代表地表褶皱前、后翼产状的投影点, 图版据文献[27]修改

$\theta_1$ : 断层缓倾段倾角;  $\theta_2$ : 断层陡倾段倾角;  $\varphi$ : 断层陡、缓倾段倾角差

## 4 讨论

### 4.1 川东地区构造变形样式

关于川东地区褶皱与断层构造关系的研究存在多种学术观点。在数值模拟研究中, 学者们常采用简化模型, 将研究区褶皱处理为两翼对称的滑脱褶皱<sup>[1]</sup>。基于面积平衡法的滑脱层埋深计算表明, 该区域存在以寒武系膏盐岩为滑脱面的两种构造类型: 断层滑脱褶皱和坡坪式断弯褶皱<sup>[2]</sup>。然而受地震资料分辨率限制, 上部“坪”区断层难以准确识别<sup>[2]</sup>, 且地表地层产状表现为前翼陡峭(近直立)而后翼缓倾, 这与典型断弯褶皱的几何形态存在明显差异。张冰等<sup>[3]</sup>依据地震剖面和野外露头地质信息, 利用断层相关褶皱几何学关系推算出川东地区方斗山构造带发育断展褶皱。杨庚等<sup>[4]</sup>认为川东明月峡构造带存在分层构造变形, 深部以前寒武系泥页岩为滑脱面, 发育断弯褶皱, 断层向西逆冲, 浅部以志留系为滑脱层向东逆冲, 浅部形成二叠系-石炭系断夹块。川东地区隔挡式构造形成的原因之一为四川盆地内部新元古代为分散的小型裂谷, 与鄂西海槽和湘黔桂南华系大型裂陷相比, 缺少以前寒武系为连续滑脱面的条件<sup>[23-24]</sup>。当盖层为滑脱层时, 上覆压力小, 易形成隔挡式构造<sup>[7]</sup>。川东地区震旦纪继承南华纪伸展格局<sup>[36]</sup>, 泥页岩分布较为分散, 因此杨庚等提出的构造

模式仅适用于川东裂陷槽发育区。这表明川东分层变形构造主要受显生宙盖层中滑脱层控制<sup>[7, 19, 37]</sup>。

事实上, 当地层序列中存在多套滑脱层时, 常出现分层变形, 如准噶尔盆地南部的独山子背斜、吐谷鲁背斜和呼西背斜等<sup>[38-40]</sup>。当深部断层向前滑移遇阻时, 常在浅部形成反向逆断层, 造成分层变形<sup>[38, 41]</sup>。因此, 川东地区具备盖层多滑脱层系控制下、通过分层变形形成断展褶皱的全部地质条件。

### 4.2 川东地区滑脱层对构造的控制

#### 4.2.1 剖面上

川东地区构造带自西向东不同段的滑脱层厚度与岩性存在显著差异, 导致断层相关褶皱类型及垂向上构造组合样式呈现明显变化。方斗山构造带3套滑脱层厚度均较大, 志留系之上发育双重断展褶皱, 志留系之下发育坡坪式逆冲。大池干-大天池构造带三叠系滑脱层较薄, 志留系和寒武系滑脱层厚度适中, 志留系之上发育断展褶皱, 之下发育向东倾的逆断层及牵引褶皱。七里峡-铁山构造带三叠系滑脱层较厚, 志留系急剧减薄, 寒武系滑脱层较薄, 三叠系膏盐岩层系滑动形成滑脱褶皱, 其下方发育向东倾的逆断层及反向断层(图7)。

在川东南地区也存在相似的情况。部分学者对川东南低缓构造研究认为, 其主滑脱层为寒武系膏盐岩,



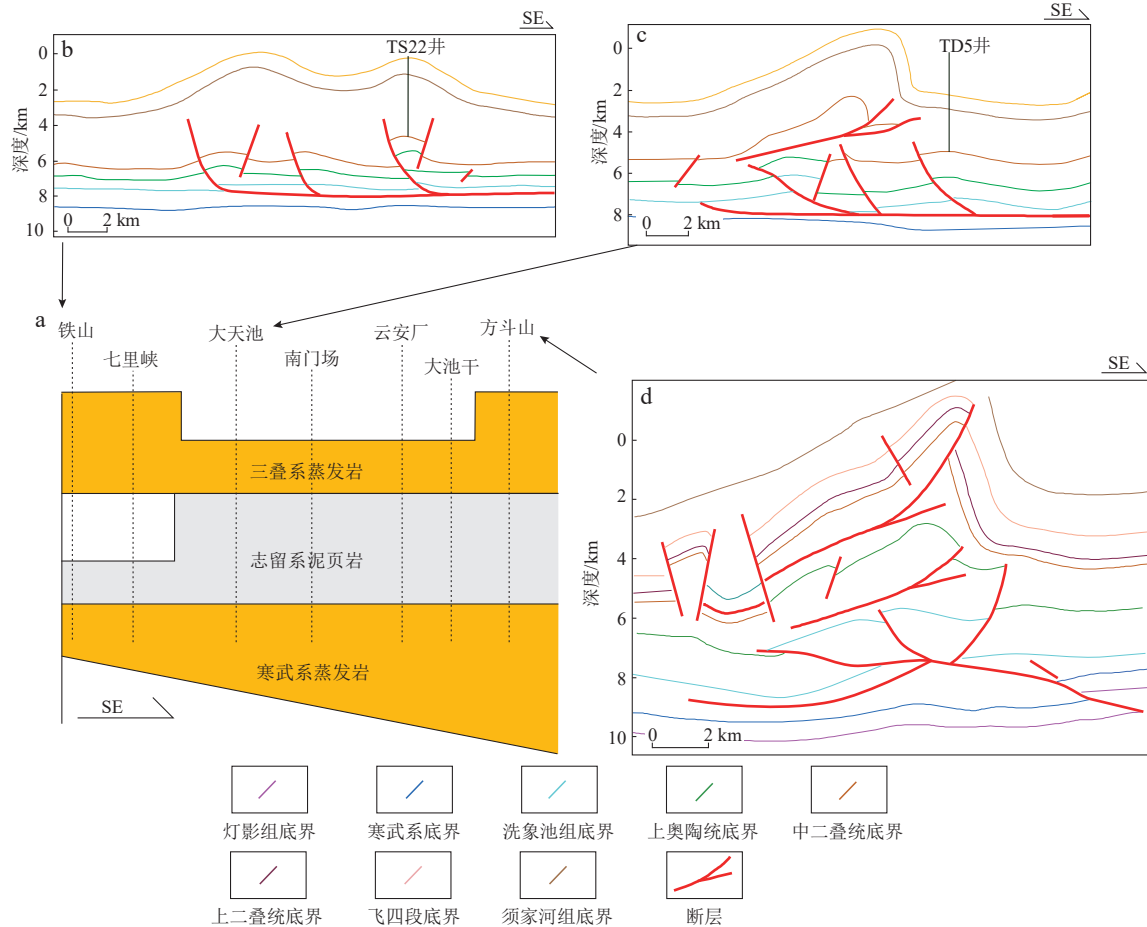


图 7 川东地区滑脱层对构造的控制模式示意图

Fig. 7 Diagrams showing the control model of detachment layers over structures in the eastern Sichuan Basin

a. 滑脱层厚度分布示意图; b. 铁山构造带; c. 大天池构造带; d. 方斗山构造带

向西至华蓥山构造带大致分为 3 段。①东段以褶皱作用为主,局部发育由顶至底的单一断层相关褶皱,未发生分层变形;②中段寒武系内部发育双重构造,局部断层以坡坪式结构向上延伸至志留系,并在志留系之上形成滑脱褶皱或断弯褶皱;③西段较窄,主要表现为由顶至底的单一断层相关褶皱<sup>[33]</sup>(图 8)。川东南地区寒武系高台组膏盐岩整体较厚,而中部志留系龙马溪组台内槽中泥页岩滑脱层较厚,东、西两侧减薄,受泸州

古隆起的影响,三叠系滑脱层厚度整体较薄(图 4)。总体上,三叠系膏盐岩层系并非滑脱褶皱的主要控制因素,而龙马溪组台内槽的发育区与奥陶系-志留系坡坪式断层形成区高度吻合(图 8)。

#### 4.2.2 平面上

滑脱层在垂向上控制断层相关褶皱组合样式,同时也在横向上控制构造带的分布。Boit 认为褶皱波长

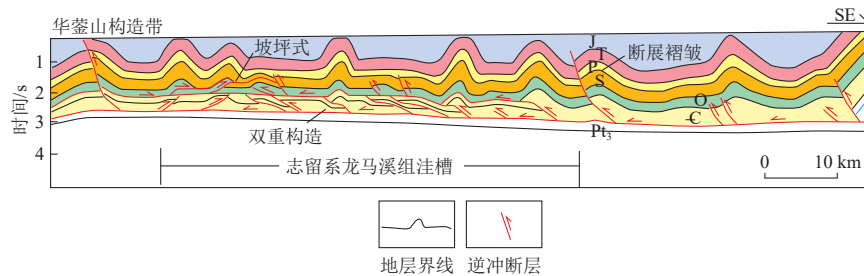


图 8 川东南地区区域构造格架(据文献[33]修改)

Fig. 8 Map showing the regional tectonic framework of the southeastern Sichuan Basin (modified after reference [33])

(剖面位置见图 4b.)

与挤压力的大小及应变速率无关,而取决于强硬岩层与软弱岩层的黏度比及强硬岩层的厚度<sup>[42]</sup>。当强硬岩层上、下的软弱岩层黏度不一样时,Boit纵弯褶皱主波长理论公式修正为:

$$\lambda = 2\pi d (\eta_f / 6\eta_m)^{1/3} \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为强硬岩层褶皱波长,m; $d$ 为强硬岩层厚度,m; $\eta_f$ 为强硬岩层黏度,Pa·s; $\eta_m$ 为软弱岩层等效黏度,Pa·s。此时 $\eta_m$ 为<sup>[43]</sup>:

$$\eta_m = (\eta_{m1}h_{m1} + \eta_{m2}h_{m2}) / (h_{m1} + h_{m2}) \quad (2)$$

式中: $\eta_{m1}$ 和 $\eta_{m2}$ 分别为上、下软弱岩层黏度,Pa·s; $h_{m1}$ 和 $h_{m2}$ 分别为上、下软弱岩层厚度,m。

寒武系膏盐岩层黏度约为 $100.0 \times 10^{12}$  Pa·s<sup>[44]</sup>,志留系泥页岩黏度约为 $10.0 \times 10^{12}$  Pa·s<sup>[45]</sup>。川东大池干构造带和黄泥堂构造带之间的寒武系膏盐岩与志留系泥页岩厚度分别取值400 m<sup>[32]</sup>和1 200 m(图4b), $\eta_m$ 约为 $32.5 \times 10^{12}$  Pa·s。强硬岩层厚度取值1 500 m(图4a),强硬岩层碳酸盐岩黏度 $\eta_f$ 为 $(1\ 000.0 \sim 10\ 000.0) \times 10^{12}$  Pa·s<sup>[45]</sup>。计算褶皱主波长在16.0~35.0 km,实测的黄泥堂构造带与大池干构造带间距约32.0 km<sup>[46]</sup>(图1a)。大天池-云安厂构造带的寒武系膏盐岩与志留系泥页岩厚度分别取值200 m<sup>[32]</sup>和1 200 m(图4b), $\eta_m$ 约为 $23.0 \times 10^{12}$  Pa·s。该区寒武系高台组之上洗象池组-奥陶系强硬岩层厚度取值1 000 m(图5b),计算出褶皱主波长在12.0~26.0 km,实测的大天池构造带与云安厂构造带间距为20.3 km,处于理论计算范围内。

向西至七里峡-铁山构造带,志留系滑脱作用消失,主要滑脱层转变为寒武系和三叠系膏盐岩层,黏度取值为 $100.0 \times 10^{12}$  Pa·s,强硬岩层黏度取值为 $(1\ 000.0 \sim 10\ 000.0) \times 10^{12}$  Pa·s,强硬岩层厚度为2 500 m(图5c),计算主波长值最大可达40.0 km。然而实际测量表明,大天池构造带与七里峡构造带及七里峡构造带与铁山构造带之间的间距仅分别为13.9 km和16.8 km<sup>[46]</sup>(图1a),明显小于理论值。造成该现象的原因可能是由东向西,寒武系厚层膏盐岩层转变为薄层膏盐岩与泥岩、灰岩互层<sup>[47]</sup>,软弱层等效黏度增加,导致褶皱波长减小。这一现象充分说明滑脱层对川东地区褶皱波长及构造带间距具有显著控制作用(图9)。

#### 4.3 石炭系构造圈闭形成与滑脱层的关联性

断展褶皱前翼突破形式可分为3种基本类型,即顶部突破、中部突破和底部突破<sup>[48]</sup>。断展褶皱前翼突破形式对圈闭的形成较为重要。当断层从前翼顶部或中部突破时,可能导致溢出点位置过高,不利于有效构

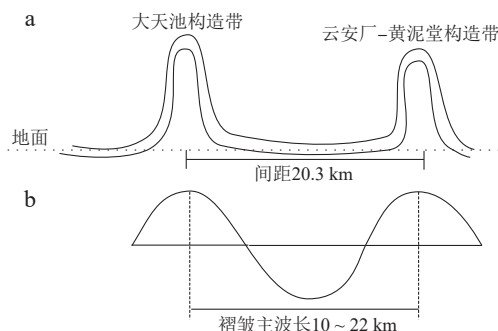


图9 川东地区构造带间距与褶皱主波长类比图

Fig. 9 Comparative diagrams of tectonic zone spacing and dominant fold wavelengths in the eastern Sichuan Basin

a. 构造带间距; b. 两波峰之间波长

造圈闭的形成。川东高陡构造前翼倾角陡(图1中的剖面P4),通过实际钻井和测井资料分析,可判断该断展褶皱前翼的突破形式。例如,黄泥堂构造带南端L2井在褶皱前翼底部观察到伽马值和声波时差突然增高,同时深、浅侧向电阻率显著降低,这些特征指示了断层破碎带的存在(图10)。此外,志留系之上断展褶皱缓倾断层主要发育于塑性层中,向前突破相对容易(图5b,图11b),并可能向上切割石炭系,形成有效圈闭(图11c)。

研究显示,在寒武系高台组膏盐岩与志留系泥页岩厚度适中、三叠系膏盐岩较薄的构造带内,志留系滑脱层之上更易发育大型断展褶皱。此类褶皱通常具有高陡特征,为石炭系构造圈闭的形成提供了充足空间(图5b)。而当三叠系膏盐岩较厚时,断展褶皱陡倾断层更易向上扩展,成为切割石炭系的主控断层,而缓倾断层向前突破受限,无法形成有效的石炭系圈闭(图5a)。若志留系泥页岩较薄,则无法形成分层变形,不能产生类似的构造圈闭(图5c)。

## 5 结论

1) 滑脱层控制川东地区构造样式。大池干-大天池构造带三叠系滑脱层较薄,志留系和寒武系滑脱层较厚,以志留系为界发育分层变形,之上发育断展褶皱,之下发育向东倾逆断层和牵引褶皱。

2) 滑脱层控制分层变形模式下石炭系构造圈闭的形成。大池干-大天池构造带志留系之上断展褶皱陡倾断层于前翼底部突破,缓倾断层在滑脱层中向前扩展形成石炭系断背斜圈闭。东侧方斗山构造带三叠系膏盐岩层厚度大,主要为陡倾断层向上扩展,缓倾断层向前突破受限,未能形成此类构造圈闭。西侧的七

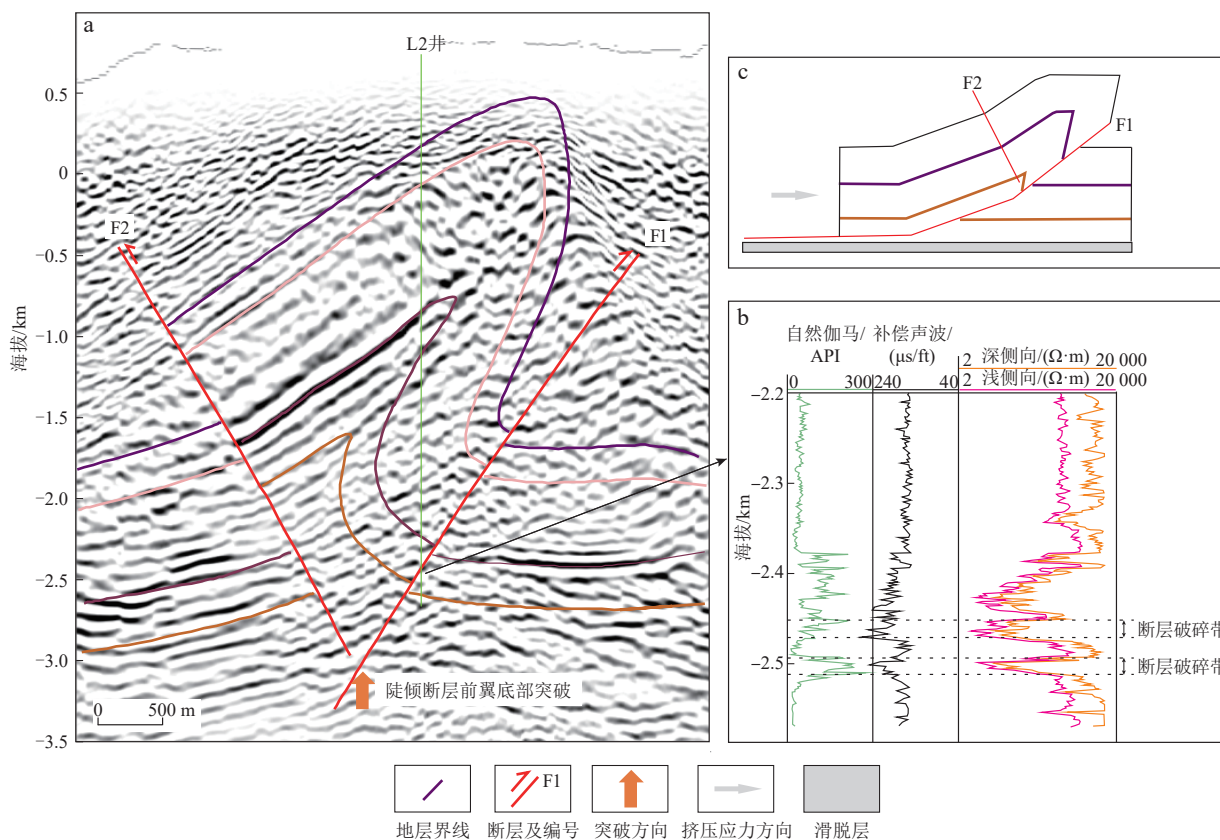


图10 川东地区断展褶皱陡倾断层前翼底部突破地震剖面解释图

Fig. 10 Seismic interpretation of steep fault breakthrough at the base of the forelimb of a fault-propagation fold in the eastern Sichuan Basin

a. 地震剖面解释; b. L2井断层测井显示; c. 断展褶皱示意图(其他地层界线参考图5)

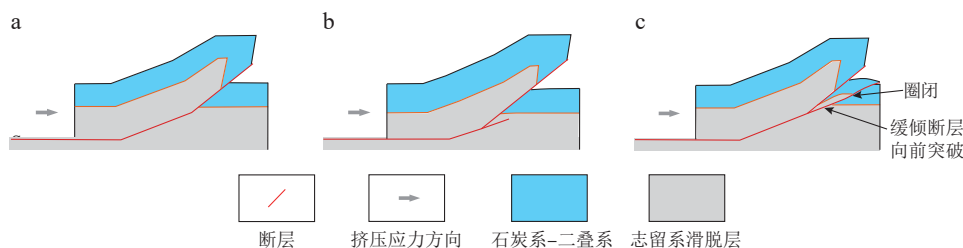


图11 川东地区石炭系断展褶皱圈闭形成过程示意图

Fig. 11 Schematic diagrams showing the formation process of a Carboniferous fault-propagation fold trap in the eastern Sichuan Basin

a. 初始挤压断层形成陡、缓段; b. 断层缓倾段开始向前突破; c. 断层缓倾段继续发育形成石炭系圈闭(地层界线参考图5)

里峡-铁山构造带志留系急剧减薄,不发育分层变形相关的石炭系圈闭。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘玉萍, 张洁, 尹宏伟, 等. 面积平衡法与川东大池干推覆带区域滑脱面预测[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(4): 410-417.

LIU Yuping, ZHANG Jie, YIN Hongwei, et al. The regional detachment of Dachigan thrust belt, eastern Sichuan: Results from geological section restoration based on area-depth technique [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(4): 410-417.

- [3] 张冰, 颜丹平, 宋鸿林, 等. 断展褶皱要素对隐伏滑脱层深度及几何样式的约束: 数学分析及其在重庆地区薄皮构造中的应用[J]. 现代地质, 2008, 22(5): 779-786.
- ZHANG Bing, YAN Danping, SONG Honglin, et al. Constraints the depth and geometry of the subsurface detachment fault from parameters of propagation anticline: geometrical model and it's applied to thin-skinned thrust in Chongqing area, South China [J]. Geoscience, 2008, 22(5): 779-786.
- [4] 杨庚, 陈竹新, 王晓波. 川东明月峡双重楔形构造叠加模式[J]. 地质论评, 2021, 67(4): 901-917.



- YANG Geng, CHEN Zhuxin, WANG Xiaobo. Double wedged-shaped structures of the Mingyuexia anticline in eastern Sichuan thrust belt, South China[J]. *Geological Review*, 2021, 67(4): 901-917.
- [5] 丁道桂, 郭彤楼, 翟常博, 等. 鄂西-渝东区膝折构造[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(3): 205-210.
- DING Daogui, GUO Tonglou, ZHAI Changbo, et al. Kink structure in the west Hubei and east Chongqing[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(3): 205-210.
- [6] 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.
- [7] 张必龙, 朱光, JIANG Dazhi, 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): 701-711.
- ZHANG Bilong, ZHU Guang, JIANG Dazhi, et al. Numerical modeling and formation mechanism of the eastern Sichuan Jura-type folds[J]. *Geological Review*, 2009, 55(5): 701-711.
- [8] MCCLAY K R. Thrust tectonics and hydrocarbon systems[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2004.
- [9] WATKINS H, BOND C E, BUTLER R W H. Identifying multiple detachment horizons and an evolving thrust history through cross-section restoration and appraisal in the Moine Thrust Belt, NW Scotland[J]. *Journal of Structural Geology*, 2014, 66: 1-10.
- [10] WOLFE F D, SHAW J H, ASTORGA G, et al. Structural styles of imbricate systems involving multiple detachments: An example from the Subandean fold-thrust belt, southern Bolivia[J]. *Journal of Structural Geology*, 2022, 165: 104742.
- [11] MCCLAY K R, COWARD M P. The Moine Thrust Zone: An overview[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1981, 9(1): 241-260.
- [12] YAO Yuan, CHEN Jie, LI Tao, et al. Interaction between shallow and deep structures: Forward-modeling kinematics sequence of a fold-and-thrust belt with double detachment[J]. *Journal of Structural Geology*, 2024, 186: 105200.
- [13] LI Chuanxin, HE Dengfa, SUN Yanpeng, et al. Structural characteristic and origin of intra-continental fold belt in the eastern Sichuan Basin, South China Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 111: 206-221.
- [14] 吴航, 邱楠生, 常健, 等. 川东多套滑脱层褶皱构造带形成物理模拟[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 784-797.
- WU Hang, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Physical simulation on development of multilayer detachment fold belt in eastern Sichuan[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 784-797.
- [15] GU Zhidong, WANG Xin, NUNNS A, et al. Structural styles and evolution of a thin-skinned fold-and-thrust belt with multiple detachments in the eastern Sichuan Basin, South China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 142: 104191.
- [16] 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.
- [17] XU Wenqiao, YIN Hongwei, ZHAO Shengxian, et al. Influence of multiple detachments on structural vergence and evolution of the thin-skinned fold-and-thrust belt in the eastern Sichuan Basin: Insights from numerical modeling[J]. *Journal of Structural Geology*, 2024, 180: 105068.
- [18] 王志勇, 康南昌, 李明杰, 等. 四川盆地川东地区滑脱构造特征[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(增刊1): 276-286.
- WANG Zhiyong, KANG Nanchang, LI Mingjie, et al. Characteristics of detachment structure in east Sichuan Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S1): 276-286.
- [19] 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.
- [20] 胡明毅, 邓猛, 胡忠贵, 等. 四川盆地石炭系黄龙组储层特征及主控因素分析[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 310-321.
- HU Mingyi, DENG Meng, HU Zhonggui, et al. Reservoir characteristics and main control factors of the Carboniferous Huanglong Formation in Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 310-321.
- [21] 徐国盛, 徐元刚, 刘树根, 等. 四川盆地石炭系四中心耦合天然气成藏过程[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(4): 369-377.
- XU Guosheng, XU Yuangang, LIU Shugen, et al. Allegiance of four centers and pool-forming process of Carboniferous in Sichuan Basin of China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(4): 369-377.
- [22] 汪正江. 黔东南地区新元古代裂谷盆地演化及地层划分对比研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- WANG Zhengjiang. Neoproterozoic rift basin evolution and its stratigraphic division and correlation in eastern Guizhou[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [23] 冯许魁, 陈友智, 臧殿光, 等. 四川盆地东缘寒武系盐下油气勘探领域探讨[J]. *地质论评*, 2024, 70(3): 1061-1070.
- FENG Xukui, CHEN Youzhi, ZANG Dianguang, et al. Study on the structural inheritance of Dengying Formation in Sichuan Basin[J]. *Geological Review*, 2024, 70(3): 1061-1070.
- [24] 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.
- [25] 何骁, 郑马嘉, 刘勇, 等. 四川盆地“槽-隆”控制下的寒武系筇竹寺组页岩储层特征及其差异性成因[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 420-439.
- HE Xiao, ZHENG Majia, LIU Yong, et al. Characteristics and differential origin of Qiongzhusi Formation shale reservoirs under the “aulacogen-uplift” tectonic setting, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 420-439.
- [26] 胡宗全, 王倩茹, 申宝剑, 等. 四川盆地地下古生界五峰组-龙马溪组海相页岩气储层孔隙分类及特征[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(3): 705-718.
- HU Zongquan, WANG Qianru, SHEN Baojian, et al. Classification and characteristics of pores in marine shale gas reservoirs in the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi formations,

- Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(3): 705–718.
- [27] 牟月, 谭秀成, 罗冰, 等. 川东地区中二叠统茅口组二段上亚段台缘带沉积演化特征及勘探潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(1): 211–229.
- MU Yue, TAN Xiucheng, LUO Bing, et al. Sedimentary evolution and hydrocarbon exploration potential of platform-margin zones in the upper sub-member of the 2nd member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(1): 211–229.
- [28] 魏国齐, 贾东, 王良书, 等. 四川盆地构造特征与油气[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- WEI Guoqi, JIA Dong, WANG Liangshu, et al. The tectonic characteristics and oil-gas distribution in the Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [29] 邓大飞. 雪峰隆起北缘海相古油气巨量富集的陆内构造研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- DENG Dafei. Study on the intracontinental structure of the enrichment of marine paleo-reservoirs in the northern margin of Jiangnan-Xuefeng uplift, southern China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [30] SHAW J H, CONNORS C, SUPPE J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005.
- [31] 杨威, 李德江, 魏国齐, 等. 四川盆地东部上石炭统黄龙组规模储层形成主控因素与发育模式[J]. *天然气工业*, 2024, 44(2): 40–51.
- YANG Wei, LI Dejiang, WEI Guoqi, et al. Formation controlling factors and development patterns of large-scale reservoirs in Carboniferous Huanglong Formation of eastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(2): 40–51.
- [32] 江青春, 李建忠, 汪泽成, 等. 四川盆地东部地区寒武系膏盐岩厚度定量预测及其油气地质意义[J]. *天然气工业*, 2022, 42(5): 34–46.
- JIANG Qingchun, LI Jianzhong, WANG Zecheng, et al. Quantitative thickness prediction of Cambrian gypsum-salt rocks in eastern Sichuan Basin and its petroleum significance[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(5): 34–46.
- [33] LI Jianhua, DONG Shuwen, CAWOOD P A, et al. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 490: 170–179.
- [34] 张朝坤. 川东地区方斗山构造特征及形成演化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- ZHANG Zhaokun. Structural characteristics and formation and evolution of Fangdoushan in eastern Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [35] 四川省局石油普查大队. 四川盆地达县幅H-48-12 1/20万地质图、矿产图[DS]. 北京: 全国地质资料馆, 1960.
- Sichuan Provincial Bureau Petroleum Census Brigade. Geological and mineral map of H-48-12 1/200000 in Daxian, Sichuan Basin [DS]. Beijing: National Geological Data Museum, 1960.
- [36] 陈友智, 杨晓, 吴建学, 等. 四川盆地新元古代构造属性及其油气地质意义[J]. *地球科学*, 2024, 49(6): 2058–2070.
- CHEN Youzhi, YANG Xiao, WU Jianxue, et al. Neoproterozoic tectonic attributes and their petroleum geological significance in Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2024, 49(6): 2058–2070.
- [37] 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.
- [38] 桂杨梅. 准噶尔盆地沙湾凹陷南部山前构造样式及控藏作用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- YANG Guimei. Structural characteristics and its impacts on hydrocarbon accumulation of piedmont zone in the southern Shawan Depression, Junggar Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [39] 王彦君. 准噶尔盆地多期构造控藏作用及深层油气勘探[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- WANG Yanjun. Controlling of multiple-phase tectonics on petroleum accumulation in the Junggar Basin-Implications for deep-seated petroleum exploration[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [40] 宋永, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 52–68.
- SONG Yong, TANG Yong, HE Wenjun, et al. New fields, new types and exploration potentials of oil-gas exploration in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 52–68.
- [41] HANSMAN R J, RING U. Jabal Hafit anticline (UAE and Oman) formed by décollement folding followed by trishear fault-propagation folding [J]. *Journal of Structural Geology*, 2018, 117: 168–185.
- [42] 朱志澄, 曾佐勋, 樊光明. 构造地质学[M]. 3版. 北京: 中国地质大学出版社, 2008.
- ZHU Zhicheng, ZENG Zuoxun, FAN Guangming. Structural geology [M]. 3rd ed. Beijing: China University of Geosciences Press, 2008.
- [43] JOHNSON A M, FLETCHER R C. Folding of viscous layers: Mechanical analysis and interpretation of structures in deformed rock[M]. New York: Cambridge University Press, 1994.
- [44] FANG Chao, LI Shiyuan, ZHAO Qing, et al. Influence of mechanical characteristics of deep composite salt-gypsum layers on safe drilling of directional wells: A case study of Palaeogene in the Kuqa Piedmont structure, Tarim Basin, China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1130805.
- [45] MAKHNENKO R Y, PODLADCHIKOV Y Y. Experimental poroviscoelasticity of common sedimentary rocks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(9): 7586–7603.
- [46] 何文刚, 周建勋. 川东南马尾状褶皱带特征与形成机制的物理模拟[J]. *地球科学*, 2018, 43(6): 2133–2148.
- HE Wengang, ZHOU Jianxun. Analogue modeling of feature and formation mechanism of horsetail-shaped fold belt in southeast Sichuan Basin, South China [J]. *Earth Science*, 2018, 43(6): 2133–2148.
- [47] 王纪焯, 胡忠贵, 李世临, 等. 川东地区中寒武统高台组蒸发岩特征和沉积模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(3): 784–799.
- WANG Jixuan, HU Zhonggui, LI Shilin, et al. Evaporite characteristics and sedimentary model of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(3): 784–799.
- [48] SUPPE J, MEDWEDEFF D A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding [J]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 1990, 83(3): 409–454.