

## 焦石坝地区中、古生界构造特征及其页岩气地质意义

余晓宇<sup>1,2</sup>, 陈洁<sup>1,2</sup>, 张士万<sup>3</sup>, 舒志国<sup>3</sup>, 郁飞<sup>3</sup>, 李冬冬<sup>1,2</sup>, 龚晓星<sup>4</sup>

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100; 3. 中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223; 4. 成都理工大学 能源学院 四川 成都 610059)

**摘要:**通过二维、三维地震剖面解释和运用平衡剖面技术观点,对焦石坝地区基底结构、中、古生界构造特征及其构造演化进行了研究。研究表明,该区存在着基底卷入和盖层滑脱2种构造类型。基底卷入型有背冲背斜、对冲向斜、叠瓦逆冲、正花状扭动和多字形扭动5种构造样式。盖层滑脱型有断展或断弯、断滑、叠瓦逆冲、叠瓦反冲、冲断楔5种构造样式和组合。燕山早、中期是该区的2个主要构造变形期,在燕山早期,中、古生界与基底及其内幕之间近水平向西拆离滑脱推覆,形成了侏罗山阻挡式背-向斜交替褶皱。方斗山断裂与大天池背斜之间的焦石坝地区为挤压宽缓复向斜背景;在燕山中期,受东邻隔槽带中、深层基底拆离向西强烈冲断作用,焦石坝地区形成了仰冲-逆冲-掩冲构造格局,经历基底叠瓦冲断-盖层滑脱-左行压扭3个变形幕,形成了焦石坝双层背冲背斜及翼部的断褶皱。石门断褶皱具有多层滑脱褶皱特征,乌江断褶皱具有滑脱与左行压扭的性质。构造变形性质与类型、龙马溪组-五峰组滑脱程度、层滑作用产生的构造缝是形成大型页岩气田重要的构造影响因素。

**关键词:**双层背冲;多层滑脱;基底拆离;阻挡式褶皱;页岩气;焦石坝背斜及周缘;四川盆地

**中图分类号:**TE121.1

**文献标识码:**A

## Tectonic characteristics and their shale gas geological significance of the Mesozoic-Paleozoic in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin

She Xiaoyu<sup>1,2</sup>, Chen Jie<sup>1,2</sup>, Zhang Shiwan<sup>3</sup>, Shu Zhiguo<sup>3</sup>, Yu Fei<sup>3</sup>, Li Dongdong<sup>1,2</sup>, Gong Xiaoxing<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430223, China; 4. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Through 2D and 3D seismic interpretation and application of balanced cross section technique, basement structure, and tectonic characteristics and its evolution of the Mesozoic-Paleozoic of Jiaoshiba area, the Sichuan Basin are analyzed in this study. The results show that there are two types of structures in the study area. The first type is basement-involved structure, which is characterized by five structural patterns and assemblages, including back thrust anticlines, ramp syncline, imbricate thrusting, positive flower wrench and “多”-shaped wrench. The other type is cap detachment structure, which is characterized by five structural patterns and assemblages, including fault-propagation or fault-bend, fault-slipping, imbricate thrusting, imbricate ramp and thrust wedge. Additionally, the Early and Middle Yanshanian period are two major tectonic deformation periods. During the Early Yanshanian period, the nearly horizontal westwards detachment and decollement-nappe structures occurred along the interface between the Mesozoic-Paleozoic and the basement and the interfaces within the basement, resulting in the anticline-syncline alternating Zhuluoshan fold. The Jiaoshiba area between Fangdoushan fault and Datianchi anticline is within a broad compressional synclinorium structural background. During the Middle Yanshanian period, the detachment of the middle-deep burial basement in the eastern trough-like fold belt caused intensive westward thrusting, and then led to the formation of the tectonic framework of obduction-thrust-overthrust in the Jiaoshiba area. The double-layer back-thrusting anticline and faulted fold belt in the flanks were formed in Jiaoshiba area after three deformation episodes, including basement-involved imbricate thrusting-cap rock decollement-left-lateral transpression. Furthermore, Shimen faulted fold belt is characterized by multi-layer detachment folding structure and Wujiang fault-fold belt is characterized by detachment and left-lateral transpression structure. The tectonic

收稿日期:2016-06-23;修订日期:2016-11-03。

第一作者简介:余晓宇(1963—),男,博士、副教授,矿产普查与勘探。E-mail:shexiaoyu2000@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年基金(41402098)。

deformation properties and types, decollement degree of the Longmaxi and Wufeng Formations, and layer-slipping structural fractures are the major tectonic factors controlling the shale gas play.

**Key words:** double-layer back thrusting, multi-layer decollement, basement detachment, ejective folding, shale gas, Jiaoshiba anticline and its periphery, Sichuan Basin

关于北美的页岩气分布,许多学者在研究原型沉积盆地相关的板块构造位置基础上,认为与后期逆冲褶皱断裂带有关,控制了页岩层分布和保存条件<sup>[1-2]</sup>,提出了阿巴拉契亚断褶带中滑脱页岩层变形(尤其是富含有机质)对页岩气聚集作用观点<sup>[3]</sup>。随着涪陵焦石坝页岩气勘探重大发现<sup>[4]</sup>,该区的构造成因及其对页岩气田的控制作用一直存在争议。一般认为,川东地区中、古生界构造变形源于江南-雪峰陆内基底拆离造山动力学机制<sup>[5-7]</sup>,侧向推挤造成块体沿着基底内深浅不同层次水平拆离滑脱面滑移推覆<sup>[8]</sup>,讨论其变形时间及变形方式和规律,提出了扬子板内递进变形模式与构造划分方案<sup>[9]</sup>。但是,以往由于地震资料欠缺,涪陵焦石坝地区并未进行系统构造研究,在构造单元划分和构造形成期次的认识上存在着一定的难度和片面性。此次笔者通过对该区二维、三维地震连片解剖和中古生界构造图的编制,根据构造变形变位规律,研究构造演化及其构造形成机制,探讨焦石坝地区大型页岩气田形成的构造条件。

## 1 构造背景

川东地区形成的侏罗山式褶皱,以齐岳山断褶带为界,以东至张家界-花垣断褶带为隔槽式,以西至华蓥山断褶带为隔挡式褶皱,研究区处于齐岳山山前根部,隔挡式褶皱带后缘,具有过渡变化的特点。

涪陵及焦石坝地区位于四川盆地 NE 向弧形展布的川东褶皱带东南部,齐岳山断裂以西,为万县复向斜内的宽缓箱状背斜。焦石坝背斜形态完整,上、下构造层形态基本一致,东西两翼受大耳山西、石门-山窝、天台场、吊水岩、梓里场等两组北东向和近南北向逆断层夹持围限,南翼被 NW 向展布的乌江断层切割,与方斗山断褶带以断隆、断凹相隔(图 1)。

## 2 基底结构与滑脱层系

研究区基底结构属于江南-雪峰构造域西部,由

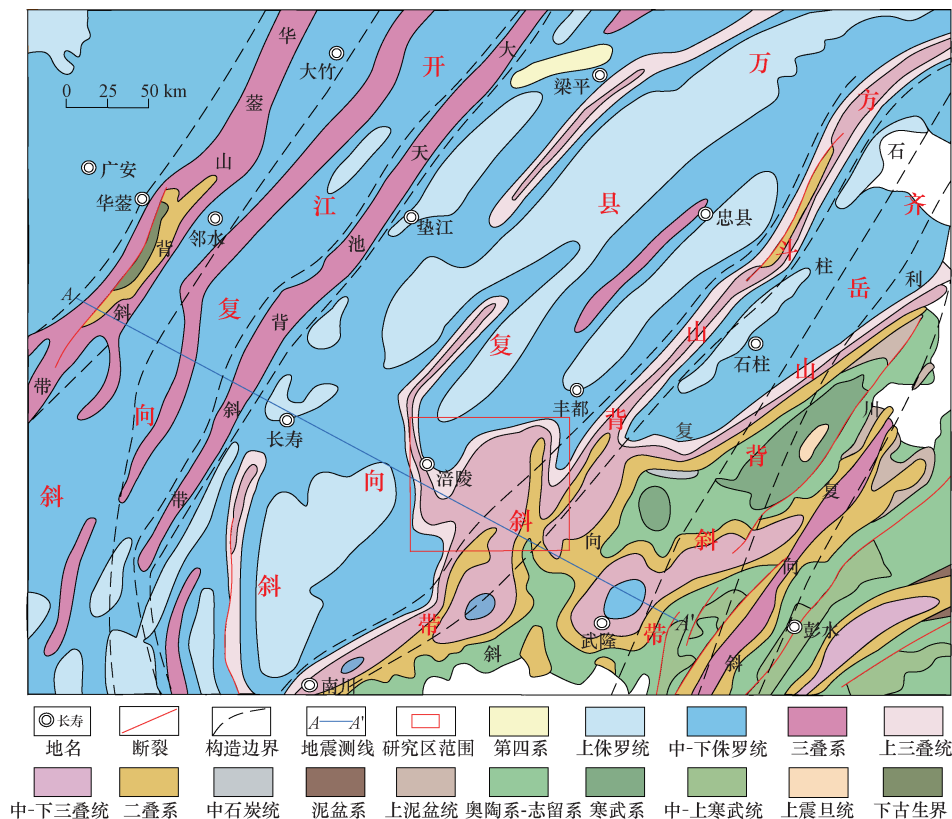


Fig. 1 Geological map of Jiaoshiba and its periphery

太古代—古元古代中、深无序变质岩系构成的结晶基底和中、新元古代浅变质岩系褶皱基底构成,具有3层基底结构、被2套基底拆离剪切带分割<sup>[10]</sup>,根据近年研究成果和地球物理资料揭示,从SE向NW,江南—雪峰造山带—齐岳山褶皱带—华蓥山构造带,基底内幕的剪切拆离面由深—中—浅梯级过渡。地震剖面揭示,在焦石坝至西北地区为新元古代浅褶皱基底与沉积层系之间的剪切滑脱推覆,滑脱变形强度向NW递减,属于“薄皮构造”性质,并受到逆冲断层改造,主要滑脱层系有4套(图2)。

## 2.1 前震旦系板溪群与震旦系南沱组之间滑脱层(I)

前震旦系板溪群与震旦系南沱组之间滑脱层(I)为新元古代板溪群褶皱基底与沉积盖层底部之间的滑脱层系,地震剖面揭示,时深转换滑脱层系埋深约在6~8 km,为齐岳山至华蓥山中、古生界隔挡式背向斜褶皱底板的主要区域拆离滑脱层系。

## 2.2 震旦系陡山沱组下段滑脱层(II)

陡山沱组以粉砂质页岩、炭质页岩为主,厚度在64~103 m,与基底面共同构成了沉积盖层底部的软弱滑脱层系。地震剖面揭示(图3),由齐岳山至华蓥山,背斜底部地震反射往往平行或宽缓褶皱,时深转换滑脱层系埋深约在3.0~5.5 km,由东向西逐渐变深,大耳山西断裂及以东,方斗山背斜带、大天池背斜带、华蓥山背斜带的形成都与该滑脱层和基底顶部之间共同拆离滑脱有关。

## 2.3 奥陶系顶部—志留系底部滑脱层(III)

上奥陶统五峰组岩性以黑色炭质页岩、硅质页岩为主,下志留统龙马溪组岩性以灰绿色砂质水云母页岩、灰黑色炭质水云母页岩为主,滑脱层厚度约为190 m,地震剖面揭示,时深转换滑脱层埋深约在2~2.5 km,焦石坝背斜翼部、石门山窝构造带、乌江构造带北段均有分布。

## 2.4 下三叠统飞仙关组—上二叠统长兴组滑脱层(IV)

下三叠统为膏、盐层与泥岩薄互层、上二叠统发育煤系地层,具有累计厚度大、单层薄的特点,由于埋藏浅,上覆地层多以叠瓦逆冲为主,其规模不大,为次要滑脱层系。4套滑脱层系有如下特点:①由新元古代褶皱基底剪切拆离,导致震旦系陡山沱组与下覆基底面强烈区域水平滑脱而形成断滑褶皱,在方斗山以西、华蓥山以东产生了侏罗山隔挡式背—向斜交替,背—向斜主体上受到平缓底板的滑脱程度控制,背斜底部滑脱强度较

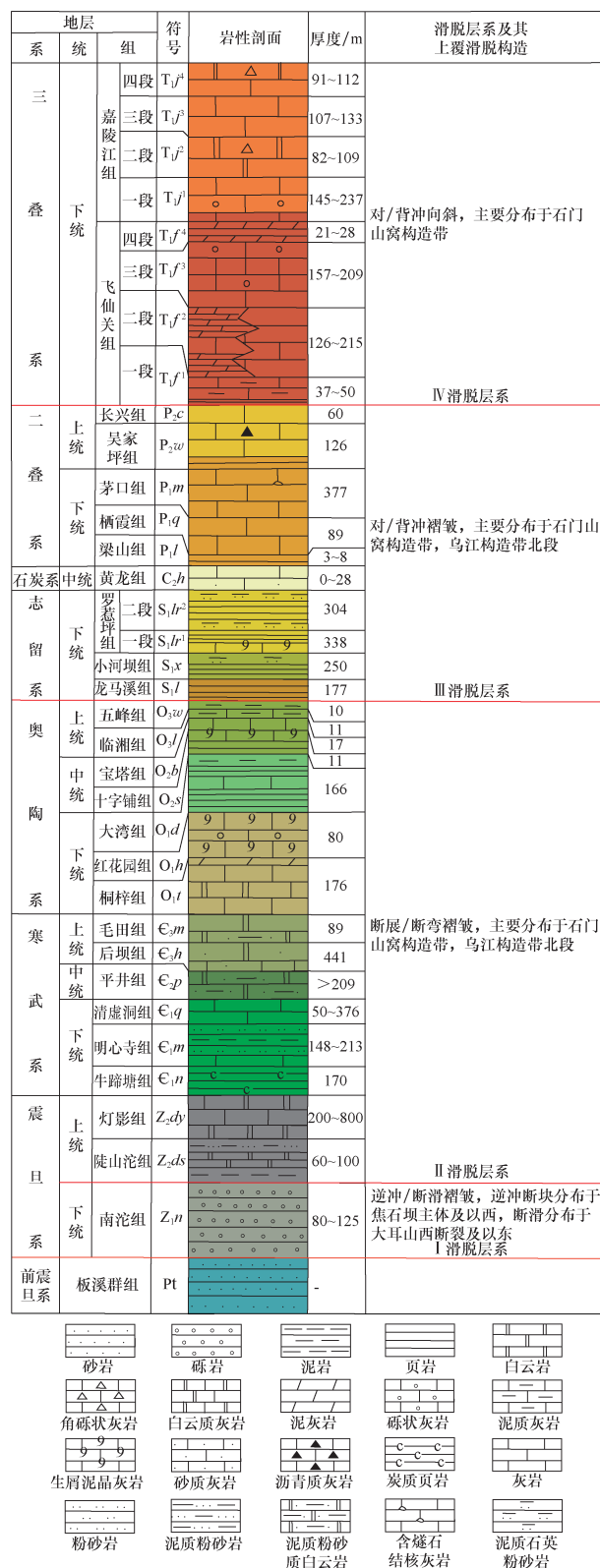


图2 焦石坝地区地层综合柱状图及主要滑脱层

Fig. 2 Stratigraphic column and main decollement systems in Jiaoshiba area

大,而宽缓的向斜则滑脱距离则相对较小,滑脱距离的差异也导致了弧形背向斜带规律性的展布,为该区最重要的区域滑脱层。②陡山沱组表现为下覆位移中协调滑脱层,主要分布于背斜翼部,上覆形成了丰富的双重、断展褶皱样式,改变了同轴背斜形态,并使向斜

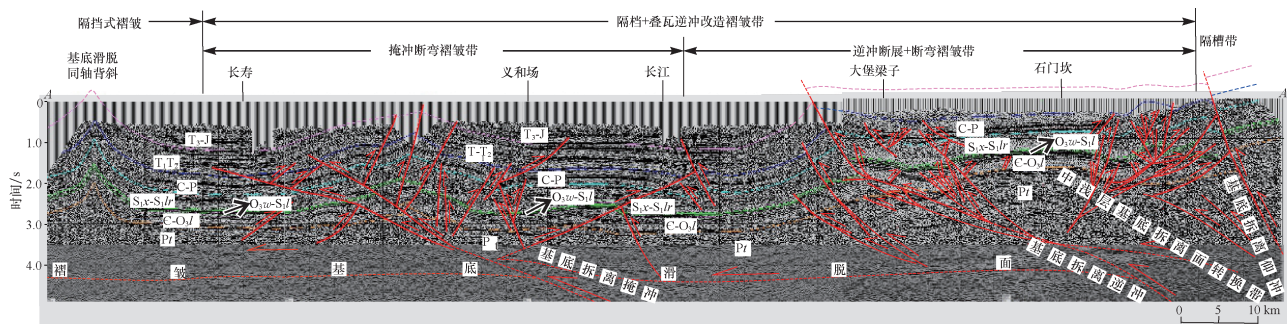


图3 焦石坝地区A—A'测线构造格架解释(测线位置见图1)

Fig. 3 Structure framework interpretation of Line A—A' in Jiaoshiba area (location of the line is shown in Fig. 1)

带复杂化。③奥陶系顶部—志留系底部滑脱层集中在石门断褶带、乌江背斜带北段与梓里场背斜带复合区,焦石坝背斜东西两翼也见有轻微滑移。由于该层系为页岩气主要产层,滑脱程度、形态、方式,对页岩气富集与贫化显得尤为重要。④飞仙关组—长兴组滑脱层主要集中在石门断褶带、乌江背斜带北段与梓里场背斜带复合区顶部,地震剖面揭示为多层系低角度叠瓦冲断,向上形成盲逆冲出露地表,为本区的次级滑脱层系。

### 3 构造格局与构造样式

#### 3.1 构造格局与构造划分

变形构造单元划分的基本原则主要从所处的大地构造位置、基底卷入程度(厚、薄皮构造)及其层次、构造变形期次、断裂与褶皱样式及组合关系、成因关系、断裂及褶皱规模等方面考虑。

区域地震剖面揭示(图3),由大耳山西断裂至华蓥山背斜带,具有侏罗山隔挡式褶皱受基底叠瓦逆冲断裂改造为仰冲—逆冲—掩冲构造组合的特征。大耳山西断裂及方斗山褶皱带为高角度冲断强烈褶皱区,在涪陵焦石坝地区为逆冲断展和反冲断展、断弯褶皱,义和场—长寿地区则为低角度断弯褶皱,在华蓥山地区为典型的隔挡式褶皱,区域上由东向西,具有隔槽式—隔挡改造式—隔挡式构造格架特征,表现出基底剪切拆离—断裂逆冲与盖层多层滑脱推覆的特点,以及变形强度逐渐减弱的规律。

结合地质平面图揭示(图1),方斗山断褶带以西—华蓥山断裂带以东的隔挡区有两组构造线,一组为NE向平行直线性展布,属于侏罗山式盖层推覆褶皱,另一组为N、S两段弧形构造线,为挤压应力增强由远至近的强烈逆冲改造。构造形成可以认为两期构造变形叠加,第一期为侏罗山式褶皱形成,为东高西低同轴背斜与宽缓向斜交替,焦石坝主体为向斜,形成了基底滑脱纵弯褶皱背—向斜格局;第二期为中—浅地壳剪切拆离基底卷入叠瓦逆冲,焦石坝背斜受叠瓦冲断夹持,强烈挤压在向斜基础上挤压为背冲箱形背斜(图4)。

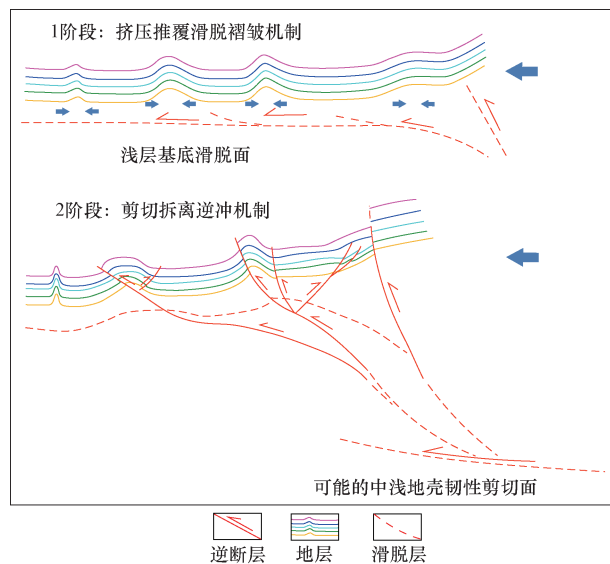


图4 川东隔挡式褶皱形成模式

Fig. 4 Formation pattern of the ejective fold in the eastern Sichuan Basin

涪陵及其焦石坝地区处于侏罗山式隔挡区后缘,具有基底冲断改造带及沉积盖层滑脱变形特征。依据构造变形性质、类型、强度的不同,将焦石坝中、古生界变形构造单元划分为焦石坝对背冲褶皱区(I)、乌江逆冲褶皱带(II)、梓里场逆—掩冲褶皱区(III),可进一步划分为9个次级构造单元(图5)。

#### 3.2 构造样式

将沉积盖层的变形是否受基底卷入作为构造类型划分的主要标志,研究区可划分为基底卷入型和盖层滑脱型两种类型,并且根据构造变形力学性质、应力传递方式和几何样式进一步细分。

研究区基底深浅变质岩之间存在着水平或相对低角度滑脱拆离和高角度冲断褶皱两种方式,这是由于持续挤压盖层整体滑脱推覆和基底拆离逆冲改造叠合的结果。在此基础上,沉积盖层多层滑脱褶皱形成了焦石坝背斜主体断滑、断展、断弯褶皱及其组合和复合构造样式;就构造成因而言,由于受江南—雪峰隆起区持续造山挤压的影响,研究区表现为受挤压(扭)和左

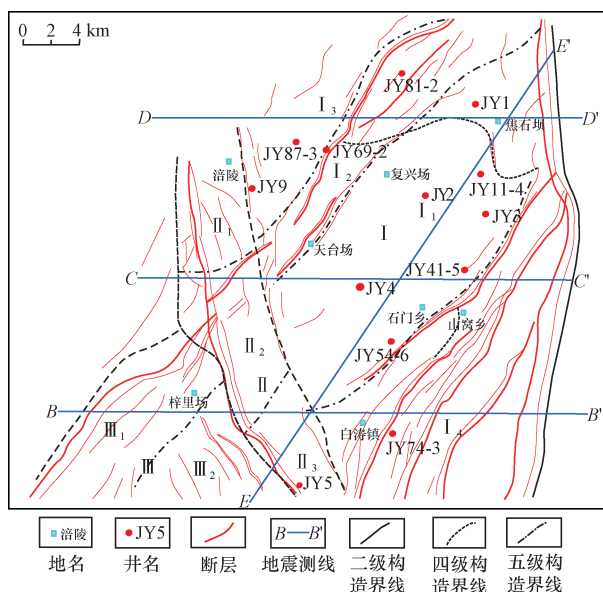


图5 焦石坝地区古生界构造划分

Fig. 5 Structure units of the Paleozoic in Jiaoshiba area

I. 焦石坝对背冲褶皱区; I<sub>1</sub>. 焦石坝背冲背斜褶皱带; I<sub>2</sub>. 复兴场西对冲向斜褶皱带; I<sub>3</sub>. 涪陵反冲断展背斜褶皱带; I<sub>4</sub>. 石门叠瓦反冲断展背斜褶皱带; II. 乌江逆冲褶皱带; II<sub>1</sub>. 北段断展褶皱背向斜带; II<sub>2</sub>. 中段断展-断弯叠加褶皱背斜带; II<sub>3</sub>. 焦页5井区扭动褶皱背斜带; III. 梓里场逆-掩冲褶皱区; III<sub>1</sub>. 梓里场断展褶皱背斜带; III<sub>2</sub>. 梓里场南断展褶皱后缘向斜带

行压扭(走滑)两种应力体制控制,由此可以划分基底卷入和盖层滑脱两大构造类型、挤压与压扭两种变形机制及其10种构造样式(图6)。

### 3.2.1 基底卷入型

基底卷入型表现为侏罗山式褶皱形成后,中-浅地壳剪切拆离基底卷入形成背冲、对冲、叠瓦逆冲、正花状扭动和多字形扭动五种基本构造样式(表1)。

背冲断裂主要控制焦石坝背斜主体,东西两翼尤其明显,由于挤压作用强烈,焦石坝背斜多表现为双层复式背冲的特点,下层消减于基底内幕浅层拆离面中,而上层剪切位于上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩层系中,在临近乌江断层、石门断裂带有较为明显剪切层系的特点,在挤压应力作用下,由早期NW向逆冲形成基底断层后反冲形成背冲。对冲断裂主要控制于吊水崖向斜,多以复式对冲样式出现,总体为与叠瓦逆冲主断裂与共轭对-反冲构造组合,焦石坝背斜西翼浅层基底卷入形成对冲向斜。两条或以上反向逆冲断层向同一的构造单元逆冲,形成共轭背形或对冲绕曲构造。

叠瓦逆冲构造是该区燕山早期形成隔挡式褶皱后,持续挤压致使基底内幕剪切带进一步拆离产生的逆冲构造,由东向西减小的断层组合,而派生出一系列的呈叠瓦状排列不同级次的正、反冲叠瓦冲断构造,涪

陵焦石坝地区尤其发育,至华蓥山褶皱带逐渐减少,平面呈平行弧形展布。

“多”字形扭动褶皱是乌江断裂带的主要类型,其南、北段表现显著,主要由基底-震旦系至奥陶系顶及以上三层扭动构造组合,北段由于受梓里场断裂复合叠加而显得复杂,由于江南雪峰持续造山,挤压应力不断递进的影响,对本区由挤压逐渐转换为左行剪切压扭,造成乌江断裂产生。地震剖面揭示,这种压扭变形作用,还导致焦石坝背斜形成后,受压扭作用而产生花状扭裂构造。

### 3.2.2 盖层滑脱型

该区的断弯褶皱是上覆地层沿着寒武系下段滑脱层和奥陶系顶部-志留系底部滑脱层形成台阶断坡状断层轨迹发育的弯曲褶皱,前翼陡、窄,后翼宽、缓,背斜核部变形强烈形成复杂的内幕次级断褶。而本区断展褶皱逆冲断层向更高层位扩展,在其峰端形成的褶皱,形成于断坡上方的褶皱与断坡同时或近于同时形成,沿断坡从下滑脱层向上逆冲断层滑距逐渐减小,乌江断裂带,梓里场、石门断裂带是主要发育区(表2)。

断滑褶皱是沿奥陶系顶部-志留系底部、震旦系中段、沉积盖层与基底平行层面的滑脱面或逆冲断层的断坪之上断层褶皱,控制滑脱背斜的逆断层只有断坪而无断坡,为一些两翼基本对称的宽缓背斜,滑脱褶皱通常具有底部发育软弱层、褶皱核部地层加厚的特征。工区存在多个滑脱层系,多见断滑褶皱,主要发育在大耳山西断层、石门断层、乌江断层北段,而基底与沉积盖层的滑脱作用则是形成区域性的隔挡式断滑褶皱,主要形成期为燕山早、中期。后期持续强烈挤压改造,与其他褶皱形式的叠加与复合,使得早期褶皱形迹复杂化,但在应力较弱地区,褶皱形式还是能很好的保存下来。

叠瓦反冲断块多以奥陶系顶部-志留系底部和下三叠统飞仙关组-上二叠统长兴组滑脱层滑脱推覆与强烈逆冲,推覆体上盘锋端地层向上抬升,伴生反向叠瓦逆冲调节,主要发育在石门断褶构造带背斜顶部。在挤压应力作用下,铲式逆断层沿同一滑脱断面底部前展或后延形成叠瓦扇,主要发育在乌江断褶带、梓里场断褶带上部,两种构造主要形成期较晚。

叠瓦冲断楔表现为逆冲断层呈前展式依次冲断、楔入对冲断层下降盘,形成楔状冲断体。石门断层、乌江断层北段沉积盖层下部,大耳山西冲断层前部也发育有该种类型构造。

研究区基底卷入与盖层滑脱造成了较为复杂的构造组合与复合,反映了在江南-雪峰造山运动的相同区域应力环境下的两个不同期次,其局部构造应力强

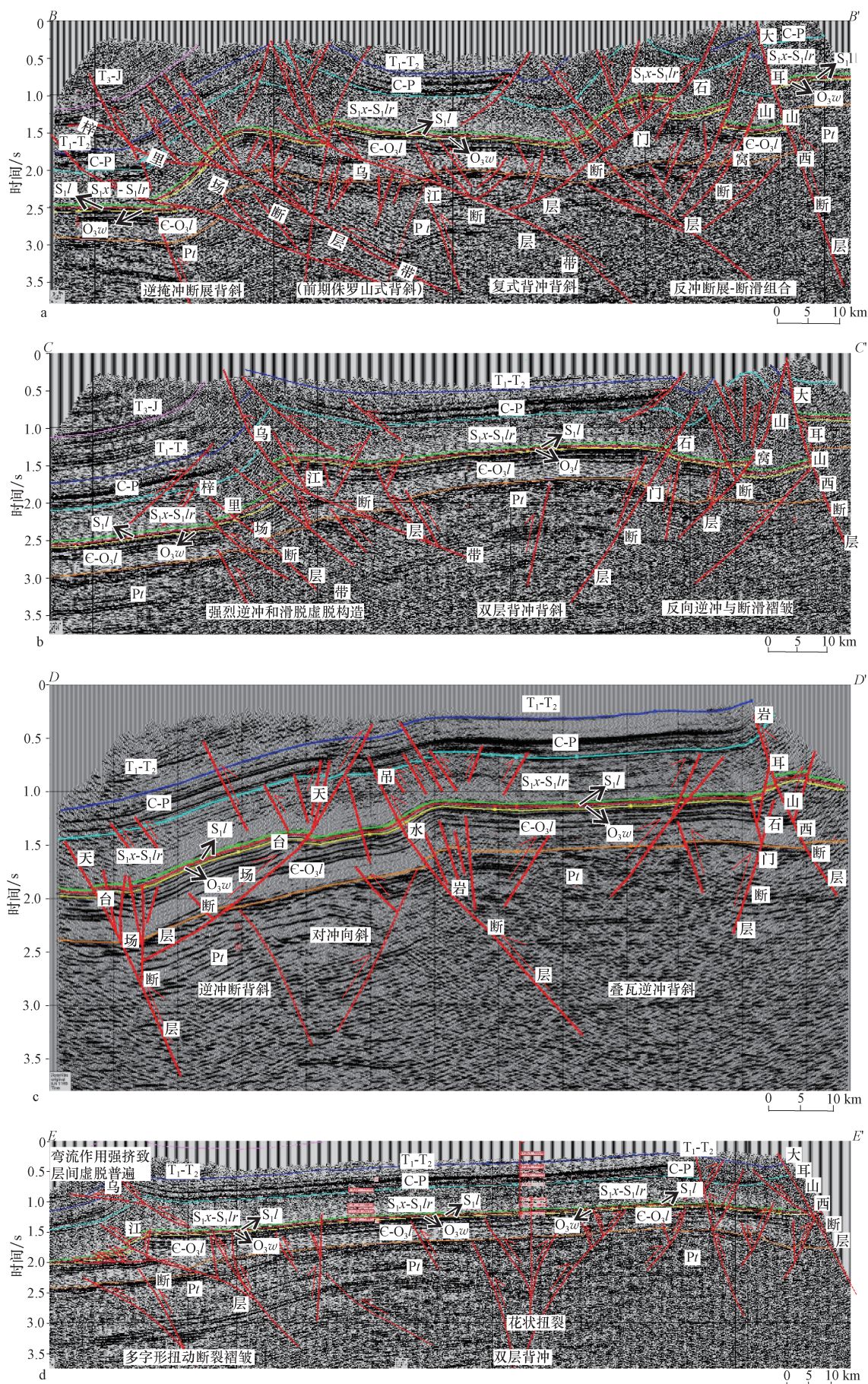


图6 焦石坝地区地震剖面构造解释(测线位置见图5)

Fig. 6 Structure interpretation of seismic profiles in Jiaoshiba area (location of the lines is shown in Fig. 5)

表 1 焦石坝地区构造分类(基底卷入)

Table 1 Structure classification in Jiaoshiba area (basement-involved)

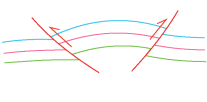
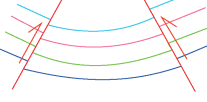
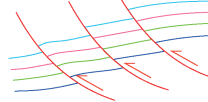
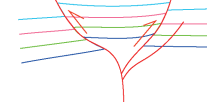
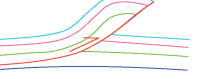
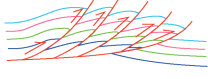
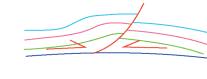
| 类型     | 基底卷入                                                                              |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 构造样式   | 背冲背斜                                                                              | 对冲向斜                                                                              | 叠瓦逆冲构造                                                                            | 花状扭动                                                                               | 多字型扭动                                                                               |
| 构造模式   |  |  |  |  |  |
| 基底卷入程度 | 基底内幕                                                                              | 盖层与基底浅层                                                                           | 浅地壳剪切拆离                                                                           | 基底内幕                                                                               | 基底内幕                                                                                |
| 主要形成期  | 燕山中期1、2幕                                                                          | 燕山早中期幕2                                                                           | 燕山早中期幕1                                                                           | 燕山早中期幕3                                                                            | 燕山早中期幕3                                                                             |
| 典型构造   | 焦石坝背斜主体                                                                           | 吊水崖向斜                                                                             | 焦石坝及周缘深大断层组合                                                                      | 焦石坝南北段间                                                                            | 乌江断层北段                                                                              |
| 成因机制   | 挤压应力作用下,两条或以上反向逆冲断层向统一构造单元逆冲,形成的共轭背形或对冲绕曲构造,由层后期反冲形成背冲早期向NW逆冲基底断                  | 持续挤压中后期背斜左翼浅层基底卷入对冲,形成向斜                                                          | 一组产状相近的逆断层沿同一方向逆冲,呈叠瓦状堆叠排列,江南雪峰挤压造山由SE向NW递进变形基底深浅卷入形成分割2、3级构造的逆冲断裂组合              | 持续挤压晚期强烈挤压应力改变至该区左旋扭动,使焦石坝产生轻微扭裂花状构造                                               | 持续挤压晚期强烈挤压应力改变使该区左旋扭动,产生乌江断层并剪切多字型扭动                                                |

表 2 焦石坝地区构造分类(盖层滑脱)

Table 2 Structure classification in Jiaoshiba area (cap rock decollement)

| 构造类型   | 盖层滑脱                                                                                |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 构造样式   | 逆掩冲断展或断弯                                                                            | 叠瓦反冲断块                                                                              | 逆冲叠瓦断块                                                                              | 断滑褶皱                                                                                 | 叠瓦冲断楔                                                                                 |
| 构造模式   |  |  |  |  |  |
| 盖层滑脱层系 | Ⅱ, Ⅲ滑脱层                                                                             | Ⅲ, V滑脱层                                                                             | Ⅲ, V滑脱层                                                                             | I, Ⅱ滑脱层                                                                              | I, Ⅱ滑脱层                                                                               |
| 主要形成期  | 燕山中期3幕                                                                              | 燕山中期3幕                                                                              | 燕山中期3幕                                                                              | 燕山中期                                                                                 | 燕山中期3幕                                                                                |
| 典型构造   | 乌江断裂带,梓里场、石门断裂带均存在                                                                  | 石门构造带                                                                               | 乌江断裂带,梓里场断裂                                                                         | 大耳山断层、石门断层、乌江断层北段                                                                    | 石门断层、乌江断层北段                                                                           |
| 成因机制   | 逆冲断层能滑动弯曲,在断坡处造成地层的弯曲褶皱                                                             | 滑脱推覆断层强烈逆冲,推覆体上盘锋端地层向上抬升,伴生反向逆冲调节断层                                                 | 挤压应力作用下,一组产状相近的铲式逆断层沿底部同一滑脱断面前展或后延形成的一组叠瓦扇                                          | 挤压应力作用下,沿滑脱层褶皱形成背斜,挤压持续情况下上覆可形成逆冲断层                                                  | 逆冲断层呈前展式依次冲断、楔入对冲断层下降盘,形成的楔状冲断体                                                       |

度、性质的改变,产生的不同构造形式的叠加效应,也揭示了该区构造变形特征和变形过程,石门断褶带、乌江断褶带、梓里场褶皱带内幕均揭示出这一特点。同时,本区的构造组合也反映了焦石坝主体与周缘断褶带之间的成因关系。

4 构造形成与演化

4.1 构造演化

关于川东地区构造演化,众多学者进行深入研究,邹玉涛等<sup>[11]</sup>认为在海西期处于拉张构造环境,印支期进入压性构造环境,而燕山期进入推覆作用阶段;丁道桂等<sup>[12]</sup>认为褶皱变形时间为早白垩世末,强

调向扬子板内递进变形时限过程;胡召齐等<sup>[13]</sup>认为川东-湘鄂西褶皱变形发生在晚侏罗世末至早白垩世初。

地震剖面揭示,三叠系和侏罗系中主要为平行反射组,在大耳山西断褶带和梓里场断褶带顶部,上侏罗统反射层减薄或上超,而侏罗系沉积后为高陡剥蚀山地地形,因此,可以基本判定该区的主要断褶产生和形成期为晚侏罗世末和早白垩世。通过构造演化图编制(图7),涪陵地区及以西,第一次为晚侏罗世末隔挡式褶皱形成期,同轴对称背斜带成排、成带展布;第二次为早白垩世基底卷入逆冲断裂,使早期同轴背斜切割并西倾偏转改造。由此,根据断裂褶皱叠合改造的先后次序,判定为燕山早期为侏罗山隔挡式形

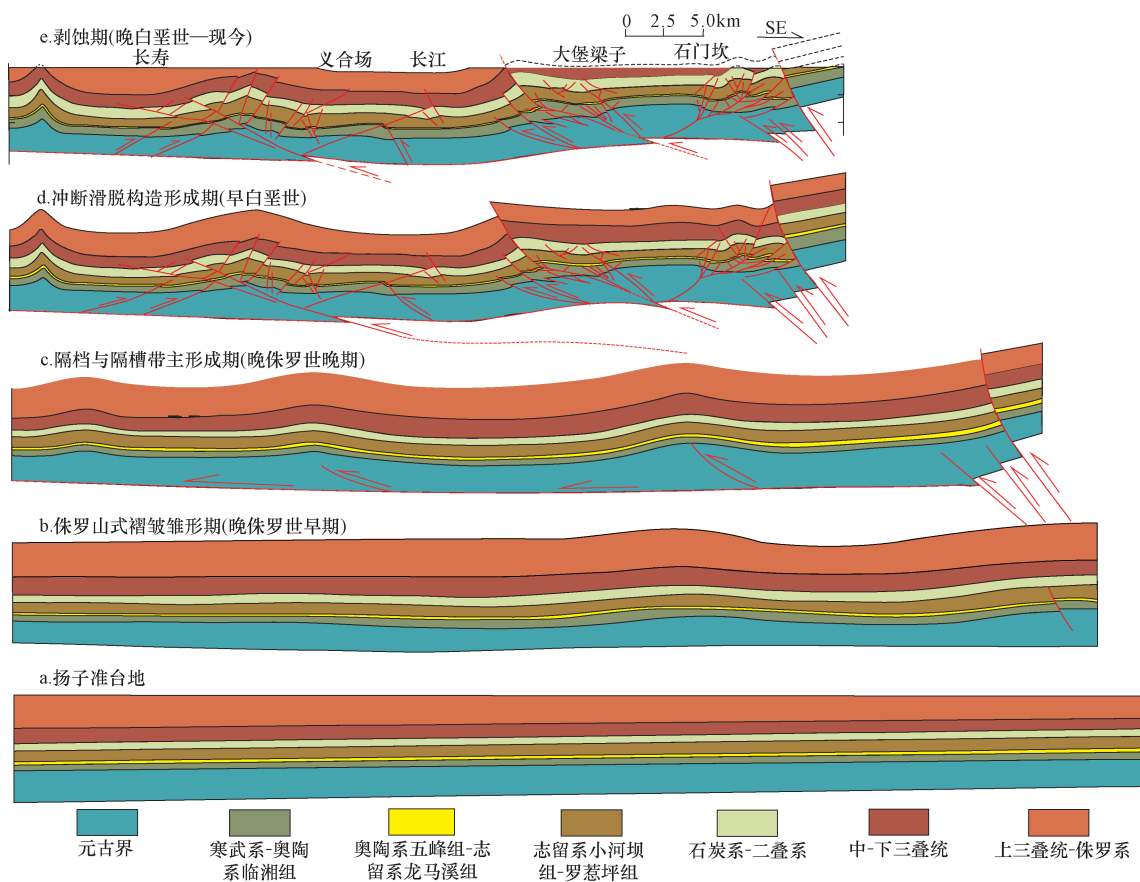


图7 齐岳山—华蓥山构造演化剖面

Fig. 7 Tectonic evolution profile of Qiyueshan - Huayingshan

成期和燕山中期为盖层冲断—滑脱褶皱期,燕山中期可进一步划分由叠瓦冲断—盖层滑脱推覆—左行压扭断褶三幕构造变形幕,而燕山晚期—喜马拉雅期为剥蚀期。

加里东运动期,川中、东及其本区表现为寒武系、奥陶系、志留系为连续沉积,加里东末期扬子板块与华夏板块对接,扬子板块抬升遭受剥蚀,缺失了泥盆系和下石炭统。海西运动期,中石炭统海水自东向西侵入本区接受海相地层沉积,云南运动整体抬升使石炭系中统剥蚀殆尽。下二叠统发育开阔海台地相沉积,海西运动造成顶部出现沉积间断,下三叠统在研究区厚度稳定,为开阔海台地相沉积。本区处于克拉通拗陷及其斜坡背景,以升降运动为主。

印支运动期,古特提斯洋关闭,扬子板块受周缘挤压与碰撞,使江南—雪峰板内基底拆离,板内褶皱变形区波及梵净山—武陵山—大磨山。自此,本区处于受SE—NW方向挤压构造环境控制,而此时研究区褶皱变形甚微。

燕山运动早期,江南—雪峰造山运动的侧向推挤使基底由深至浅多层从SE向NW滑移,产生完整的侏罗山式褶皱带<sup>[11]</sup>。至川东地区及本区,由于浅层褶皱基底与震旦系强烈水平滑脱推覆,形成了方斗山—华蓥山成排弧形展布的背—向交替的隔挡式褶皱。此

时,涪陵及焦石坝地区处于其后缘根部宽缓向斜,并具有高陡隔槽式向隔挡式过渡的特点。

燕山运动中期,随着板内造山运动的水平推挤增强,川东地区盖层与褶皱基底拆离由SE至NW形成仰冲—逆冲—掩冲叠瓦冲断,致使盖层中多滑脱层系滑脱推覆,产生焦石坝背斜,并在其东西两翼形成断展、断滑、断弯等多种断褶及其复合构造。由于持续挤压作用逆冲逐渐增强,加之,本区处于主挤压应力南侧,左行剪切压扭致使焦石坝南翼乌江断褶带形成,北翼高陡南倾的特征,焦石坝背斜基本定型。

燕山运动晚期至喜马拉雅期,受太平洋板块和印度板块对欧亚板块先后双重作用,研究区位于川西类前陆盆地前缘隆起后缘,而研究区东侧江南雪峰造山带张家界—花垣断裂以西沉积了上白垩统,此时处于伸展构造环境,但本区始终处于挤压构造环境,其构造变形甚微,以缓慢隆升或稳定环境,表现为剥蚀阶段,为构造定型期。

#### 4.2 焦石坝背斜成因分析

根据解剖主干地震剖面和编制构造演化剖面,燕山早、中期是焦石坝背斜及周缘夹持断褶带主要形成期并基本定型,燕山运动晚期至今,该区处于稳定的剥蚀阶段,其成因与形成过程如下(图8)。

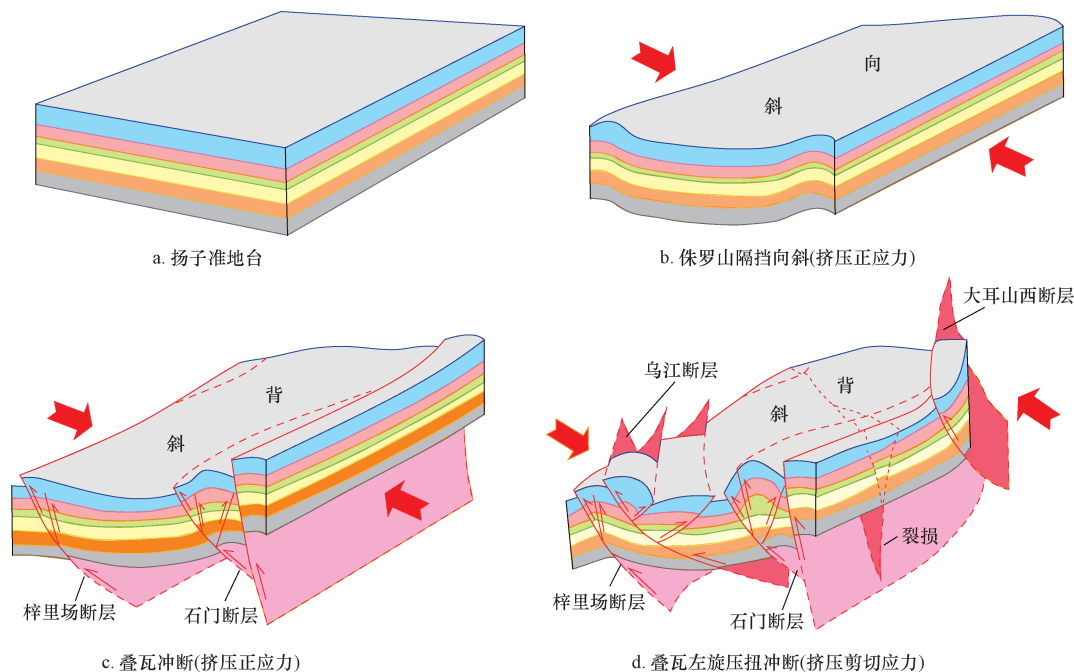


图8 焦石坝地区主要构造变形阶段模式

Fig. 8 Diagram showing the structural patterns of the main tectonic deformation stages in Jiaoshiba area

本区在侏罗山隔挡式褶皱形成的初期为大耳山西断层、梓里场-吊水岩断层夹持的宽缓向斜,随着叠瓦逆冲断层强烈挤压和反冲断层作用形成焦石坝背冲背斜,后强烈的左旋压扭改造为由大耳山西、乌江、梓里场、吊水崖周缘断层夹持的背斜地块。背斜中北段,也可能是扭裂容易产生的地带。

大耳山西断层为基底卷入仰冲断层,属于方斗山断褶带,为隔挡式与隔槽式分界带。地震剖面揭示,齐岳山隔槽带中层基底拆离面向隔挡带浅层基底拆离面过渡产生的卷入程度大的仰冲断层,具有挤压、压扭和滑脱多重性质,其形成时间早结束时间晚。梓里场断层为浅层基底拆离卷入逆冲断层,具有挤压断展褶皱变形特点,主要形成期为基底卷入叠瓦逆冲期。石门、山窝断层、乌江与梓里场断层构造复合区为反冲的断滑和断弯褶皱构成组合,具有盖层多层滑脱推覆的特征。

乌江断层特征各段变形有所不同,具有挤压和压扭双重性质,南段表现为多字形压扭的特点,而北段则表现为断展及盲冲构造挤压构造特征,同时也表现出滑脱构造性质,其形成时间晚于上述断褶带形成期。

## 5 页岩气地质意义

通过构造变形特征、形成机制、裂缝预测与构造变形相互关系研究,结合焦石坝页岩气地质成果<sup>[14-17]</sup>,认为构造对页岩气富集起到了至关重要的控制作用,页岩气地质意义主要体现两个方面。

1) 断裂、褶皱变形性质与强度对页岩气富集与保

存的控制作用。①燕山早期侏罗山隔挡式褶皱造就了宽缓的复向斜,燕山中期在此基础上叠瓦逆冲-背冲形成背斜,为焦石坝地区中古生界五峰组-龙马溪组页岩气田提供了优越的构造背景条件。②龙马溪-五峰组泥页岩层产生强烈滑脱构造的地区,其上覆逆冲断裂发育,不利于页岩气成藏与保存。③在焦石坝背斜主体由压扭褶皱变形形成的低序级裂隙,主要发育在五峰组-龙马溪组及以下地层,改善了储集空间,有利于页岩气富集成藏,而乌江断裂带由于具有强烈多字形压扭断裂褶皱贯穿中、古生界,则页岩气保存条件较差。

2) 纵弯褶皱中的层滑作用及其产生的各种类型的构造缝对页岩气富集与保存产生了重要的影响并具有双重作用。①在五峰组-龙马溪组软弱层滑形成的顺层裂缝中,背斜或断背斜翼部或曲率大部位的弯滑顺层剪切缝及分布在背斜翼部软弱层中剪切斜交缝,改善了储集层系横向孔渗性而有利于页岩气富集。②在强烈变形中地层增厚的地区和滑脱构造发育区,产生的弯流虚脱缝和滑脱剪切缝,会导致页岩气逸散。石门断裂带两侧、乌江断裂带、焦石坝背斜西南翼,钻井泥浆漏失,可能与虚脱现象有关。③本区发育的垂直裂缝因其所在构造变形强度的不同,具有保存或逸散对应关系。

## 6 结论

1) 通过地震剖面解释,完整地揭示了侏罗山隔挡

式同轴褶皱受三组叠瓦冲断改造,形成基底卷入型与盖层滑脱型褶皱为主要构造类型,变形层由下至上、由老到新,变形程度和规模也逐次递减。

2) 陡山沱组、龙马溪组—五峰组、飞仙关组—长兴组滑脱导致挤压褶皱变形,集中于乌江断褶带、石门断褶带和大耳山西断褶带北部,而焦石坝背斜变形相对较弱,燕山早、中期是本区主要的构造变形期。

3) 本区燕山早期形成的侏罗山隔挡式背、向斜区,在燕山中期改造较弱的背斜、断背斜和斜坡有利于页岩气保存。龙马溪组—五峰组页岩目的层是重要的滑脱层系,其滑脱程度、滑脱方式及上覆滑脱褶皱类型、性质、褶皱样式是页岩气聚集与逸散的重要因素。焦石坝双层背冲的上层翼部轻微滑脱与背斜东高西低特征是构成两翼页岩气富集与贫化的重要原因。

### 参 考 文 献

- [1] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend Arch-Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405–436.
- [2] Bowker, K A. Barnett Shale Gas Production, Fort Worth Basin: Issues and Discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523–533.
- [3] Engelder T, Lash G G, Uzcátegui R S. Joint sets that enhance production from middle and Upper Devonian Gas Shales of the Appalachian Basin [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(7): 857–889.
- [4] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示 [J]. 石油与天然气地质, 2015(1): 1–6.  
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration [J]. Oil & Gas Geology, 2015, (1): 1–6.
- [5] 丁道桂, 潘文蕾, 彭金宁, 等. 扬子板块中、古生代盆地的改造变形 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 597–606.  
Ding Daogui, Pan Wenlei, Peng Jinning, et al. Transformation and deformation of the Meso-Paleozoic basins in the Yangtze Plate [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 597–606.
- [6] 丁道桂, 刘光祥. 扬子板内递进变形——南方构造问题之二 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 238–252.  
Ding Daogui, Liu Guangxiang. Progressive deformation in Yangtze Plate—Series 2 of the Southern structure studies [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 238–252.
- [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] 丁道桂, 刘光祥, 吕俊祥, 等. 扬子板块海相中、古生界盆地的递进变形改造 [J]. 地质通报, 2007, 16(9): 1178–1188.  
Ding Daogui, Liu Guangxiang, Lü Junxiang, et al. Progressive deformation of Middle Paleozoic marine basins in the Yangtze plate, China [J]. 2007, 16(9): 1178–1188.
- [9] Yan P D, Zhou M F, Song H L, 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.
- [10] 余晓宇, 丁小辉, 梁斌, 等. 中扬子区东缘中、古生界对冲构造体系形成与演化 [J]. 地质科学, 2012, 47(2): 333–346.  
She Xiaoyu, Ding Xiaohui, Liang Bin, et al. Formation and evolution of ramp structural system of Mesozoic and Paleozoic in the eastern edge of middle Yangtze region [J]. Chinese Journal of Geology, 2012, 47(2): 333–346.
- [11] 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 川东高陡断褶带构造特征及其演化 [J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2043–2049.  
Zou Yutao, Duan Jinbao, Zhao Yanjun, et al. Tectonic characteristics and evolution of the high and steep fault folding belt in East Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(11): 2043–2049.
- [12] 丁道桂, 郭彤楼, 胡明霞, 等. 论江南—雪峰基底拆离式构造——南方构造问题之一 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 120–132.  
Ding Daogui, Guo Tonglou, Hu Mingxia, et al. Basement decoupling structure in Jiangnan-Xuefeng—series 1 of the Southern structure studies [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 120–132.
- [13] 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 Shaoqi, 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.
- [14] 魏志红. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩气的晚期逸散 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 659–665.  
Wei Zhihong. Late fugitive emission of shale gas from Wufeng-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 659–665.
- [15] 周雁, 袁玉松, 邱登峰. 泥页岩构造裂缝形成演化模式——以四川盆地东部泥页岩为例 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 828–834.  
Zhou Yan, Yuan Yusong, Qiu Dengfeng. A discussion on formation and evolutionary pattern of shale structural fracture: A case study of shale in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 828–834.
- [16] 朱彤, 王烽, 俞凌杰, 等. 四川盆地页岩气富集控制因素及类型 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 399–407.  
Zhu Tong, Wang Feng, Yu Lingjie, et al. Controlling factors and types of shale gas enrichment in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 399–407.
- [17] 聂海宽, 张金川, 包书景, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统—下志留统页岩气聚集条件 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 336–345.  
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. Shale gas accumulation conditions of the Upper Ordovician—Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 336–345.

(编辑 张亚雄)