

川东齐岳山断层北部差异构造变形特征

魏峰, 陈孔全, 虞秀松

(长江大学 非常规油气湖北省协同创新中心, 武汉 430100)

摘要: 根据地震资料结合区域地质资料, 对川东齐岳山断层构造几何学和运动学特征及断层演化史进行了分析。齐岳山断层自北往南剖面形态上依次表现为“y”字形、“之”字形和铲形, 地表出露断层倾向从北西变为南东; 断层具有明显的分段式结构, 断层西侧周缘构造样式自北向南由“巫山—吐祥段的隐冲加断滑褶皱”至“吐祥—忠县段的断展加滑脱褶皱”至“忠县—焦石坝段的基底冲断—断展褶皱”至“焦石坝—南川段的冲断褶皱”, 断层东侧周缘则整体表现为冲断构造变形; 齐岳山断层形成于早燕山期, 之后又经历了燕山运动中期的挤压作用与燕山运动晚期的伸展作用, 以断层中段变形程度最强。齐岳山断层差异构造变形导致断层两侧油气保存条件明显不同, 断层周缘二级台阶构造形态呈铲形处为有利油气勘探区。

关键词: 差异构造变形; 构造几何学; 平衡剖面; 盆地构造; 齐岳山断层; 川东

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Differential tectonic deformation in the northern Qiyueshan Fault, eastern Sichuan Basin

WEI Feng, CHEN Kongquan, TUO Xiusong

(Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The geometrical and kinematic characteristics and fault evolution history of the Qiyueshan Fault were analyzed systematically using seismic and geological data. The profile morphology of the Qiyueshan Fault from north to south shows in turn a “Y”, “zigzag” and spade shape. The exposed fault inclination changes from northwest to southeast. The Qiyueshan Fault is characterized by a sectional structure. The structural pattern of the western periphery of the fault, from north to south, changes from “hidden thrust and fault-slip fold of the Wushan-Tuxiang segment” to “fault-spread and slip fold of the Tuxiang-Zhongxian segment”, to “basement thrust-fault-spread fold of the Zhongxian-Jiaoshi segment”, to “thrust fold of the Jiaoshi-Nanchuan segment”. The eastern periphery of the fault is characterized by thrust structural deformation. The Qiyueshan Fault was formed in the Early Yanshanian stage, and then underwent extrusion in the middle Yanshanian Movement and extension in the late Yanshanian Movement. The middle section of the fault is the most deformed. Different structural deformations lead to the obvious difference of oil and gas preservation conditions on both sides of the fault.

Key words: differential tectonic deformation; structural geometry; balanced cross section; basin structure; Qiyueshan Fault; eastern Sichuan Basin

四川盆地及其周缘是我国南方主要的油气勘探区域, 齐岳山断层两侧的油藏存在明显区别。断层西侧已发现储量约 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的建南气田^[1] 和累计产量突破 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的涪陵气田; 断层东侧仅在武隆—道真发现油气显示。齐岳山断层周缘是否还存在潜在可勘探的油气值得进一步探讨。齐岳山周缘烃源岩品质分布稳定, 油气成藏与保存条件密切相关, 主要受差异构造变形影响。

目前对齐岳山断层的构造研究工作集中于齐岳山断层周缘的构造样式, 学者们认为该区域为多岩层层系在纵弯作用下形成区域大尺度膝折构造^[2-3]。前人对齐岳山断层西侧地区的构造特征及构造演化进行过研究, 也对东缘复杂褶皱样式及变形机制进行了解析^[4-9], 但对断层两侧差异构造变形特征进行对比研究; 对齐岳山断层构造演化进行了数值模拟分析, 但没运用平衡剖面技术进行

收稿日期: 2018-09-11; 修订日期: 2019-03-25。

作者简介: 魏峰(1994—), 男, 硕士研究生, 从事非常规油气地质的研究。E-mail: weifeng9405@163.com。

通信作者: 陈孔全(1961—), 男, 教授, 从事页岩气形成机制和资源评价等方面的研究。E-mail: chenq1961@sina.com。

基金项目: 国家科技重大专项“四川盆地及周缘页岩气富集规律与重点目标评价”(2017ZX05035001) 和中国石化科技部项目“中扬子西部下组合油气成藏演化与突破方向”(P16042) 资助。

构造演化研究^[10]。因此齐岳山断层北部周缘构造演化过程及差异构造变形值得进一步系统分析。本文以地震剖面解释为基础,运用断层相关褶皱理论和平衡剖面原理,深入分析断层两侧的差异变形构造特征以及差异变形规律,以期为该区的油气勘探奠定基础。

1 区域地质背景

研究区北起巫山,南至南川(图1)。齐岳山断裂地表自北向南产状多变,涪陵以南由众多雁列小断层组成。以该断裂带为界,其北西侧为川东典型隔档式褶皱,而南东侧褶皱样式以隔槽式为主,同时也发育有不少非典型隔槽式的复杂褶皱^[11]。齐岳山断层还是燕山运动晚期负反转正断层发育的分界,断层东南侧发育少量负反转正断层,而北西侧则不发育正断层^[12]。研究区内受多期构造应力作用的影响,主要发育北东向断裂,局部发育北北东向和近南北向断裂。

据钻井资料显示,研究区自老而新发育前震旦系至侏罗系,缺失泥盆系、石炭系^[13]。该区域发生多期构造运动,其中早燕山运动时期齐岳山断层周

缘区域略微起伏,中燕山运动导致该区域基本定型,晚燕山运动时期与喜马拉雅运动时期则主要是遭受地层剥蚀。由地层接触关系可知,晚侏罗世之前,除寒武系基底外,各地层间均为整合或平行不整合接触关系,表明晚侏罗世之前区内地壳以升降运动为主^[14-15]。

2 断层特征

2.1 结构特征

齐岳山断裂空间上间断延伸呈现“S”型展布,整体上表现为分段式结构。以焦石坝为界,其北段为连续大断层,南段的次级分支断裂表现为雁列式结构。根据剖面上齐岳山断层结构特征及平面上轴迹,将其分为巫山—吐祥、吐祥—忠县、忠县—焦石坝、焦石坝—南川4段(图2,表1)。

2.1.1 巫山—吐祥段

图2A-A'显示,齐岳山断层与次级断层组合样式呈反“y”字形^[16],发育冲断至隐冲—滑脱褶皱特征,发生强烈冲断及断褶作用。同时受对冲作用影响,该地区褶皱紧闭,发育大型反冲断层,沿志留系滑脱形成倾向北西的断展褶皱。平面上齐岳山断

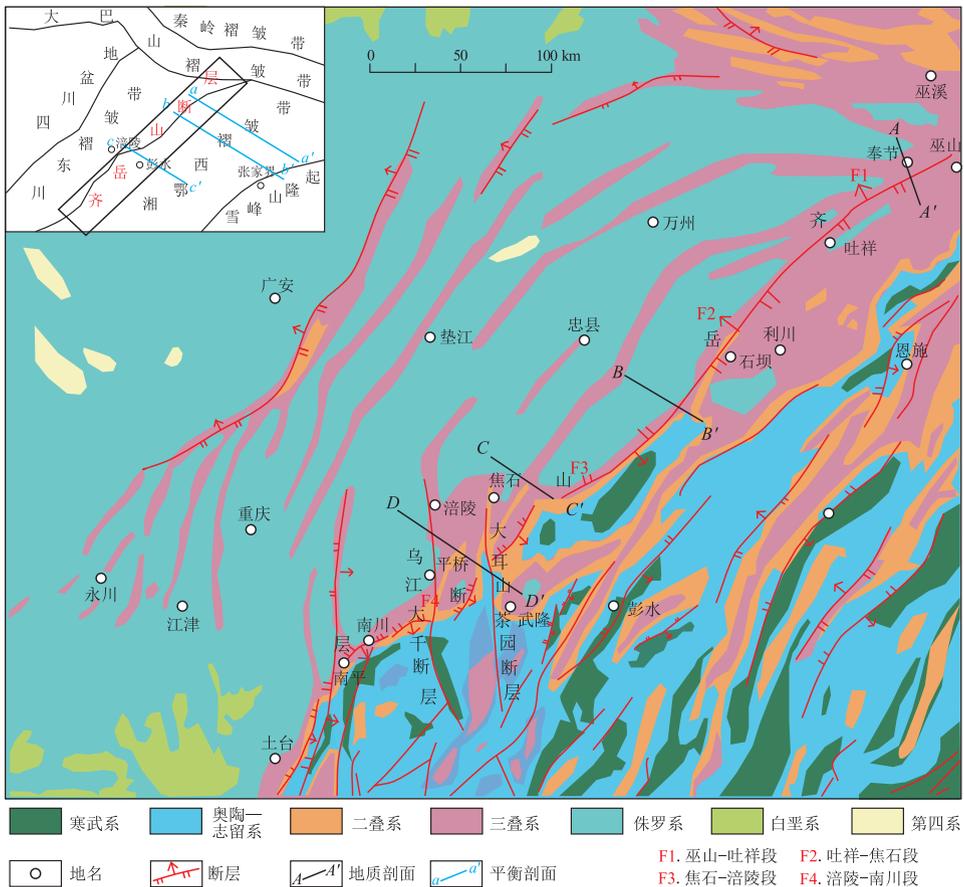


图1 四川盆地东缘区域地质

Fig.1 Geological map of the eastern margin of Sichuan Basin

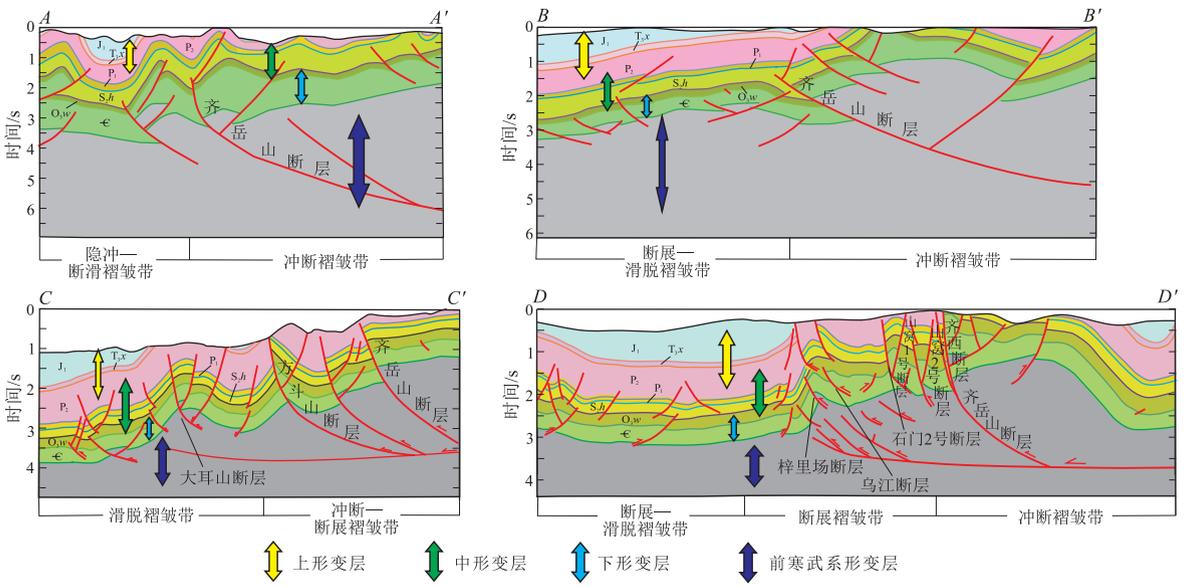


图 2 川东齐岳山断裂地震剖面解释

地质剖面位置见图 1。

Fig.2 Seismic profile interpretation of Qiyueshan Fault, eastern Sichuan Basin

表 1 川东齐岳山断裂北部断层构造分段差异变形特征

Table 1 Deformation characteristics of segments in the northern Qiyueshan Fault, eastern Sichuan Basin

| 分段 | 断层倾向 | 断层两侧 | 出露地层 | 构造样式 | 变形方式 | 构造形态 |
|--------|------|------|------------------|---------------------|-------------|------------------|
| 巫山—吐祥 | 北西 | 东侧 | T | 断展褶皱、冲起构造 | 冲断 | 西侧紧闭向斜、东侧宽缓背斜 |
| | | 西侧 | T, J | 断滑褶皱、对冲构造 | 冲断、滑脱 | 西侧紧闭背斜、东侧宽缓向斜 |
| 吐祥—忠县 | 南东 | 东侧 | Є, O, S, P, T | 断展褶皱、冲断构造 | 冲断 | 西侧宽缓背斜、东侧紧闭向斜 |
| | | 东侧 | J | 断滑褶皱、背冲构造 | 断展或断滑、滑脱 | 西侧宽缓向斜、东侧紧闭背斜 |
| 忠县—焦石坝 | 南东 | 东侧 | P | 冲断构造、冲起构造 | | 西侧紧闭背斜、东侧宽缓向斜 |
| | | 西侧 | P, T, J | 冲断构造、断展褶皱、冲起构造、扭动构造 | 冲断、隐冲+断滑、滑脱 | 西侧宽缓向斜、东侧紧闭背斜 |
| 焦石坝—南川 | 南东 | 东侧 | Є, O, S, P, T, J | 断滑褶皱、冲起构造 | 冲断 | 西侧宽缓向斜、东侧紧闭背斜 |
| | | 西侧 | P, J | 断展褶皱、冲起构造、背冲构造、对冲构造 | 冲断、断展、滑脱 | 西侧紧闭背斜、东侧宽缓向斜、断块 |

层呈向北西方向凸起的小角度弧形,整体走向北东,同时川东弧形构造北端收敛于断层西侧。

该段齐岳山断层西侧受雪峰与大巴山的构造联合作用,发育宽缓向斜和紧闭背斜,褶皱形态较完整,向斜核部地层平缓翼部陡立;褶皱向巫山收敛,其走向由北东向变为近东西向。断层东侧主要受江南造山带作用,形成宽缓背斜和紧闭向斜,同时其北端受神农架—黄陵隆起的阻挡,褶皱消失于秭归向斜与神农架隆起之间。由于强烈剥蚀作用,出露地层以三叠系为主,侏罗系仅在两侧向斜核部出露。

2.1.2 吐祥—忠县段

图 2B-B'剖面上显示齐岳山断层为多条同倾向、近平行逆冲断层,呈“之”字形,区域构造变形为冲断至断展—滑脱褶皱特征,中部可见断展褶皱

特征。因反冲作用,断层西侧寒武系发育大量中小型断层,形成系列较宽缓的断夹块、反冲构造。平面上,断层形似一条直线,北端与巫山—吐祥段呈小角度相接。

与巫山—吐祥段相比,该段断层两侧构造形态类似,西侧靠近吐祥处褶皱呈收敛式聚集,东侧褶皱靠近吐祥呈发散式聚集;出露地层在西侧可见侏罗系,东侧可见三叠系,靠近齐岳山处为寒武系。

2.1.3 忠县—焦石坝段

图 2C-C'上显示齐岳山断层为高陡冲断构造,呈铲形,底端消失于基底滑脱断层之上。区域构造变形为冲断至断展—滑脱褶皱特征,中部可见冲起构造,发育多条断至三叠系的大型断层,并形成系列紧闭褶皱和断块。平面上,断层呈朝南东方向凸起的弧形。

与吐祥—忠县段相比,该段断层西侧受近南北向与北东向力的构造叠合,发育断展褶皱。向斜核部地层平缓,仅少数断层穿越寒武系基底。断层东侧晚期近东西向挤压叠加于早期北东向褶皱形成叠加构造,形成宽缓背斜与紧闭向斜。该段区域出露地层以三叠系—寒武系为主,侏罗系仅在西侧向斜出露。

2.1.4 焦石坝—南川段

图 2D-D' 显示齐岳山断层呈铲形,断层冲出地表。区域构造变形为基底冲断—断展褶皱—滑脱褶皱特征,发生强烈冲断以及断褶作用,以冲断构造、断展背斜和冲起构造为主。

与忠县—焦石坝段相比,该段断层周缘发育近南北向构造,在背斜转折处发育密集的小型断层。断层西侧受强烈冲断作用发育高陡构造、对冲构造,由于冲断褶皱作用,发育系列紧闭褶皱和断块。齐岳山断层所处的背斜带发育少数冲破地表的断层,其西侧褶皱走向多为南北向,东侧褶皱走向多为北北东向,有少量南北向褶皱。该段出露地层以三叠系为主,可见寒武系。

自北东向南西,齐岳山断层西侧褶皱密度由密集变稀疏,至涪陵密度再次变大,整体似“马尾”状分布。其褶皱方向在吐祥、焦石坝与南川三镇附近明显变化,由近东西向—北东向—北北东—近南北向。断层多发育于三叠系以下地层,仅在焦石坝附近少量冲出地表。其构造样式由基底冲断—隐冲+断滑褶皱至断展+滑脱褶皱至基底冲断—断展褶皱至冲断褶皱。断层自北部发育反冲、冲起构造,于焦石坝附近发育大量中小型断层,形成对冲、反冲与冲起构造,断层密度由稀疏变密集再变稀疏。齐岳山断层东侧褶皱密度以吐祥、焦石坝为界分为两段,巫山—吐祥段褶皱由稀疏变密集成收敛式雁列状分布,吐祥—焦石坝段褶皱呈分散状密集分布在齐岳山断层以东的各个区域。其褶皱方向的分布以焦石坝为界,巫山—焦石坝为北东向,焦石坝—南川为近南北向。断层多发育于二叠系以下地层,在南川附近发育大量冲出地表的北东向与近南北向中小型断层。其构造样式为冲断褶皱,断层自北向南发育反冲构造,于南川附近发育雁列式冲断构造。

2.2 运动学特征

平衡剖面技术是分析断层形成演化的重要手段。本文运用平衡剖面反演模拟理论与 2D Move 平衡剖面软件,对横切齐岳山断层的 3 条剖面进行了分析。以剖面 bb' 为例(图 3),并利用层长守恒

原理,计算了各剖面齐岳山断层周缘利川复向斜与齐岳山复背斜 2 个构造单元各时期区域伸缩率(表 2)。若一条地质剖面 2 个构造单元地区地层变形前剖面长度 L_0 ,变形后剖面长度 L_1 ,则伸缩量 $\Delta L = L_1 - L_0$,伸缩率(%) = $\Delta L / L_0$,其中正值表示剖面处于伸展变形状态,反之则处于压缩变形状态^[17]。

根据区域地层的接触关系以及年代学资料可知,印支期末至早燕山期,受雪峰造山运动影响,湘鄂西地区自南东向北西发育前展式递进变形,利川、石柱与万县复向斜及齐岳山、方斗山复背斜形成。早燕山期末,经历了强烈基底逆冲后,齐岳山断层基本定型。其中中段分为三支,北支冲出地表倾向南东;中支消亡于二叠系倾向北西;南支为低角度逆冲断层倾向南东。南段剖面内多为高角度逆冲断层,发育高陡构造。

晚侏罗世末期,受燕山运动影响,北段挤压作用强烈,断裂带基底收缩,剖面伸缩率为 -9.71%;中段受强烈挤压作用,断层并未活动,保持了早期断层形态,剖面伸缩率为 -10.10%;南段齐岳山复背斜与万川复向斜形成,多发育小型断层,断裂带基底持续挤压,剖面伸缩率为 -8.29%。

晚白垩世末期,受晚燕山运动影响,北段遭受伸展作用,构造活动不明显,剖面伸缩率为 2.16%;中段以弱伸展变形为主,剖面伸缩率为 0.71%;南段剖面稳定沉积,剖面伸缩率为 1.55%。喜马拉雅期三段断层活动性弱,剖面仅地表受剥蚀作用影响,剖面无明显变化。

根据完成的平衡剖面显示,早燕山运动时期齐岳山断层整体定型。中燕山运动时期,中段因为川东地区无明显阻碍作用,而北段受黄陵隆起和大巴山构造带的限制作用,因此断层中段挤压作用最为强烈;齐岳山断层北段次之,受影响最小的为断层南段。晚燕山运动时期,齐岳山以东湘鄂西整体处于伸展环境,其中因中燕山运动挤压作用影响,中段伸缩率最小,其次为南段,伸缩率最大的为北段。

由此可知齐岳山断层是一条形成于早燕山运动时期的古断裂。

3 差异变形特征

齐岳山断层两侧结构存在差异性,平面上断层沿其走向具有分段差异变形特征。齐岳山断层巫山—吐祥段自南东向北西基底逆冲,断裂两盘褶皱产状出现明显改变,其下盘发育对冲构造,上盘发育系列断展褶皱。吐祥—焦石坝段断层上盘形成

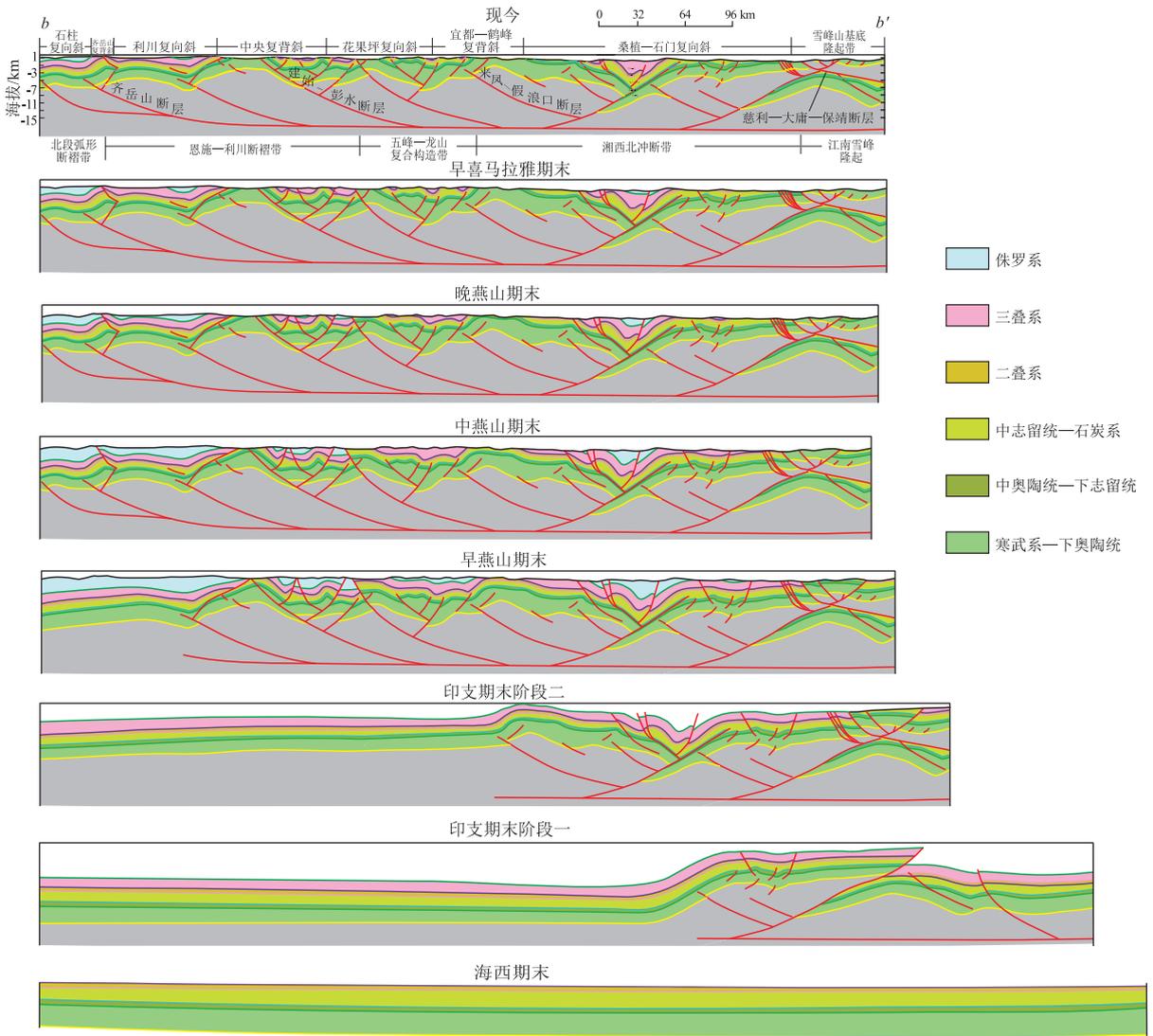


图 3 川东—湘鄂西地区测线 bb' 构造演化平衡剖面位置见图 1。

Fig.3 Tectonic evolution along line bb' in the eastern Sichuan and western Hunan

表 2 川东地区齐岳山复背斜与利川复向斜地区平衡剖面伸缩量
Table 2 Equilibrium section expansion of the Qiyueshan anticline and Lichuan syncline area, eastern Sichuan Basin

| 测线名称 | 时期 | 变形前剖面长度 L_0 /km | 变形后剖面长度 L_1 /km | 伸缩量 ΔL /km | 伸缩率/% |
|-------------|------|-------------------|-------------------|--------------------|---------|
| aa' 巫山—吐祥段 | 中燕山期 | 86.58 | 78.17 | -8.41 | -9.71% |
| | 晚燕山期 | 78.17 | 79.86 | 1.69 | 2.16% |
| bb' 吐祥—焦石坝段 | 中燕山期 | 91.05 | 81.85 | -9.20 | -10.10% |
| | 晚燕山期 | 81.85 | 82.43 | 0.58 | 0.71% |
| cc' 焦石坝—南川段 | 中燕山期 | 66.23 | 60.74 | -5.49 | -8.29% |
| | 晚燕山期 | 60.74 | 61.68 | 0.94 | 1.55% |

断弯褶皱,下盘形成断滑褶皱。焦石坝—南川段断层上盘形成断滑褶皱,下盘形成断展褶皱。该构造形变特征归因于断层南段受南川—遵义断层近南北向的左行走滑作用,导致齐岳山断层周缘自北向南构造样式逐渐复杂,构造强度逐渐增强,断层构

造形态由反“y”字形—“之”字形—铲形转变。

剖面上断层结构、滑脱层上下岩层具有分层差异变形特征。研究区内构造变形主要与基底滑脱层、中下寒武统膏泥盐、下志留统泥岩以及三叠系嘉陵江组膏盐4套区域滑脱层有关^[18-20]。根据形

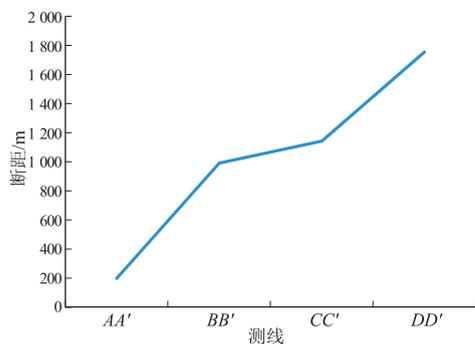


图4 川东地区齐岳山北部断层各段寒武系断距变化

Fig.4 Variation of Cambrian fault intervals in the northern Qiyueshan Fault, eastern Sichuan Basin

变特征,纵向上分为前寒武形变层、下形变层、中形变层和上形变层4套构造形变层。其中前寒武形变层构造变形强烈,齐岳山断层发生强烈冲断作用;下形变层以滑脱作用为主,发生系列断展作用;中形变层褶皱变形较强烈,除少量断层断穿志留系,大多数断层以下志留统为底界,向上多消失于下三叠统滑脱层之中,断层数量多,构造变形强度亦强于下形变层;上形变层构造运动简单,仅受地层剥蚀影响。断层受前上寒武统含膏盐岩层系的控制,膏岩层以上发育基底卷入逆冲断层,主要表现为寒武系断距的变化(图4),且变化趋势一致,自北向南断距变大。前寒武形变层内部自北向南发育坡坪式—断坪式—坡坪式盲冲断层,其中基底构造由基底内部韧性滑脱层控制发育基底逆冲断层;下构造层由下寒武统滑脱层控制发育断层转折褶皱,断层传播褶皱等;中构造层受到下伏构造层的影响,变形较深部构造层弱,主要受下志留统龙马溪组泥页岩层控制形成逆冲断层;而上构造层则是受下三叠统嘉陵江组膏盐层的影响形成了隔挡式褶皱。

4 油气地质意义

作为盆山分界,齐岳山断层周缘地区为页岩气有利富集带,其两侧油气保存具有明显差异。已有勘探显示油气主要位于齐岳山西侧向盆一侧的正向构造单元中,已建立建南气田和涪陵气田,且在平桥、丁山、林滩场及长宁发现具有商业开采价值的大规模页岩气显示。盆外地区如彭水、武隆尚未发现气田,但也具有较好油气显示。由于向斜内含气层位比盆内一侧抬升,构造断层破坏性弱,页岩气相对保存条件较好,因此断层东侧分布的向斜构造也具有一定页岩气勘探潜力。

通过对典型气田中构造差异与油气保存关系

分析,探索齐岳山断层周缘页岩气勘探潜力。如图2所示,齐岳山断层南段涪陵气田位于盆内一侧二级构造台阶处,其龙马溪组烃源岩地层平缓埋深约2800 m,同时涪陵气田内无大型断层发育,小断层起良好的输导作用而非破坏作用;而东侧的盆外地区由于地层抬升剥蚀严重,导致烃源岩地层暴露地表,仅在武隆等向斜内残留时具有一定的埋深,同时由于大型断层主要发育于背斜周缘,向斜内构造保存条件稍好,存在油气显示。断层中段西侧为石柱复向斜,区域面积大、地层平缓,向斜内龙马溪组烃源岩地层埋深约4000~6000 m,虽然尚未形成正向构造,但区内断层规模较小,断层对油气保存的破坏性较小,在其局部高点处发现了建南气田,值得进一步探索。而断层东侧地层剥蚀较南段严重,志留系大面积出露,向斜发育大型基底逆冲断层冲破烃源岩地层,目前尚无油气显示。断层北段西侧构造变形强,位于大巴山向南挤压对冲带,且存在多条基底逆冲断层冲破烃源岩层,目前也无油气显示;其东侧为核部三叠系出露复向斜,内部构造变形弱,其上覆膏岩盖层未被断层破坏,龙马溪组烃源岩地层平缓,埋深与涪陵气田类似,埋深适中,约-300~-3000 m,该区域值得探索。因此,根据龙马溪组烃源岩地层埋深、周缘断层分布及上覆盖层的受破坏情况分析可知,齐岳山断层中段西侧复向斜地区及断层北段东侧复向斜地区具有油气勘探价值。

5 结论

(1) 齐岳山断层周缘区域构造形态差异明显,断层西侧多为紧闭背斜与宽缓向斜,东侧多为紧闭向斜与宽缓背斜。断层北段呈反“y”字形,地表出露倾向北西;中段呈“之”字形,南段呈铲形,两段地表倾向均为南东。褶皱走向以北东向为主,在涪陵—南川地区可见密集的南北向构造。地表出露地层以三叠系与侏罗系为主,东侧少数地区可见寒武系—震旦系。

(2) 齐岳山断层受自南东向北西方向挤压应力的作用,基底构造层控制着整个研究区的构造变形。断层定型于早燕山运动期,中燕山运动期断层整体受挤压作用,其中中段挤压作用最为强烈,北段次之,南段受影响最小。晚燕山运动期,齐岳山断层东侧受拉伸作用,其中中段伸缩率最小,其次为南段,北段伸缩率最大。喜马拉雅期区域整体发生地层抬升剥蚀,构造变形不强烈。

(3) 齐岳山断层表现为分段式结构,其中寒武

系断距自北向南增大,断层倾角向南变大,至焦石坝达到最大值,往南变小。齐岳山断裂带分段差异性与冲断方式控制着西侧构造样式类型,在焦石坝—南川段齐岳山西侧从深层到浅层有大量的中小型对冲、冲起构造,其构造样式自北向南由巫山—吐祥段的隐冲加断滑褶皱至吐祥—焦石坝段的断展加滑脱褶皱至焦石坝—涪陵段的基底冲断—断展褶皱至涪陵—南川段的冲断褶皱转变,构造变形强烈。而在齐岳山断层东侧发育冲断构造变形,小型构造较少。

(4)齐岳山断层周缘已知探明油气田均位于断层西侧,其中位于断层南段二级台阶构造形态呈铲形处发育有涪陵气田,武隆—道真亦有油气显示;中段构造形态呈“之”字形处发现有建南气田;断层北段构造形态呈反“y”字形周缘区域无气田发现。据此推断,断层周缘二级台阶构造形态呈铲形处为有利油气勘探区。

参考文献:

- [1] 陈绵琨.鄂西—渝东地区天然气勘探潜力分析[J].江汉石油学院学报,2003,25(1):27-29.
CEHN Miankun.Exploration potential of natural gas in western Hubei-eastern Chongqing area[J].Journal of Jiangnan Petroleum Institute,2003,25(1):27-29.
- [2] 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.
- [3] 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):238-246.
DING Daogui, LIU Guangxiang. Progressive deformation in Yangtze Plate: series 2 of the southern structure studies [J]. Petroleum Geology & Experiment,2007,29(3):238-246.
- [4] 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):2046-2052.
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):2046-2052.
- [5] 覃作鹏,刘树根,邓宾,等.川东南构造带中生代多期构造特征及演化[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(6):703-711.
QIN Zuopeng, LIU Shugen, DENG Bin, et al. Multiphase structural features and evolution of southeast Sichuan tectonic belt in China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2013,40(6):703-711.
- [6] 陈玉明,高星星,盛贤才.湘鄂西地区构造演化特征及成因机理分析[J].石油地球物理勘探,2013,48(S1):157-162.
CHEN Yuming, GAO Xingxing, SHENG Xiancai. Tectonic evolution characteristics and mechanism in western Hunan-Hubei [J]. Oil Geophysical Prospecting,2013,48(S1):157-162.
- [7] 柏道远,熊雄,杨俊,等.齐岳山断裂东侧盆山过渡带褶皱特征及其变形机制[J].大地构造与成矿学,2015,39(6):1008-1021.
BAI Daoyuan, XIONG Xiong, YANG Jun, et al. Characteristics and dynamic mechanisms of the folds in the basin-mountain transition zone, east of the Qiyueshan Fault [J]. Geotectonica et Metallogenia,2015,39(6):1008-1021.
- [8] 洪克岩,李博,姜生玲,等.湘鄂西低勘探程度区构造解释及页岩气保存条件:以夙凤咸丰区块为例[J].断块油气田,2017,24(6):779-782.
HONG Keyan, LI Bo, JIANG Shengling, et al. Structural interpretation and shale gas preservation conditions of low exploration level region, western Hunan-Hubei: taking Laifeng-Xianfeng Block as an example [J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2017,24(6):779-782.
- [9] 赵文韬,荆铁亚,姚光华,等.复杂构造区页岩气保存条件研究[J].特种油气藏,2018,25(6):83-89.
ZHAO Wentao, JING Tiewa, YAO Guanghua, et al. Shale gas preservation condition in complex tectonic zone [J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2018,25(6):83-89.
- [10] 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.
- [11] 杨坤光,李学刚,戴传固,等.断层调整与控制作用下的叠加构造变形:以贵州地区燕山期构造为例[J].地质科技情报,2012,31(5):50-56.
YANG Kunguang, LI Xuegang, DAI Chuangu, et al. Superimposition deformation controlled and adjusted by faults: an example from Yanshanian structural deformation in Guizhou Province [J]. Geological Science and Technology Information,2012,31(5):50-56.
- [12] 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,等.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[J].地球科学(中国地质大学学报),2010,35(2):161-174.
MEI Lianfu, LIU Zhaoqian, TANG Jiguang, et al. Mesozoic intra-continental progressive deformation in western Hunan-Hubei-eastern Sichuan Provinces of China: evidence from apatite fission track and balanced cross-section [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences),2010,35(2):161-174.
- [13] 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.
- [14] 王令占,田洋,涂兵,等.鄂西利川齐岳山高陡背斜带的古应力分析[J].大地构造与成矿学,2012,36(4):490-503.
WANG Lingzhan, TIAN Yang, TU Bing, et al. Paleostress analysis of the Qiyue Shan high-angle anticline in the Lichuan area, western Hubei Province, China [J]. Geotectonica et Metallogenia,2012,36(4):490-503.

Sishichang section, western Tarim Basin [J]. *Geoscience*, 2011, 25(1): 48-54.

[20] 王勇, 李宇平. 塔中地区志留系柯坪塔格组储层物性的主控因素 [J]. *天然气技术*, 2009, 3(4): 7-11.
WANG Yong, LI Yuping. Main controlling factors of reservoir physical property in Silurian Kepingtage Formation, central Tarim Basin [J]. *Natural Gas Technology*, 2009, 3(4): 7-11.

[21] 刘金库, 孙永亮, 焦旭, 等. 碎屑岩储层低渗成因及优质储层发育机理: 以歧口凹陷歧北斜坡沙二段储层为例 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 799-808.
LIU Jinku, SUN Yongliang, JIAO Xu, et al. The genesis of low permeability of high-quality reservoirs in deep-buried clastic rock reservoirs and its development mechanism: a case study of Es₂ Formation in the slope area of Qikou Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 799-808.

[22] 杨晓萍, 赵文智, 邹才能, 等. 低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布 [J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 57-61.
YANG Xiaoping, ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, et al. Origin of low-permeability reservoir and distribution of favorable reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 57-61.

[23] 岳绍飞, 黄传炎, 严德天, 等. 洛伊地区三叠系上统致密砂岩储层孔隙特征及物性影响因素 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2015, 46(1): 208-216.
YUE Shaofei, HUANG Chuanyan, YAN Detian, et al. Characteristics of pore evolution and its influencing factors of petrophysical properties of tight sandstone reservoir in Upper Triassic, Luoyi District [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(1): 208-216.

[24] DOS ANJOS S M C, DE ROS L F, DE SOUZA R S, et al. Depositional and diagenetic controls on the reservoir quality of Lower Cretaceous Pendencia sandstones, Potiguar rift basin, Brazil [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(11): 1719-1742.

[25] AJDUKIEWICZ J M, LANDER R H. Sandstone reservoir quality prediction: the state of the art [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1083-1091.

[26] BJØRLYKKE K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties: some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 301: 1-14.

[27] MORAD S, AL-RAMADAN K, KETZER J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: a review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1267-1309.

[28] MANSURBEG H, MORAD S, SALEM A, et al. Diagenesis and reservoir quality evolution of Palaeocene deep-water, marine sandstones, the Shetland-Faroes Basin, British continental shelf [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(6): 514-543.

[29] 胡鹏, 鲍志东, 于兴河, 等. 长岭凹陷乾北地区青三段低渗透储集层特征与主控因素 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(2): 308-318.
HU Peng, BAO Zhidong, YU Xinghe, et al. Characteristics and main controlling factors of low permeability sandstone reservoir of the 3rd member of the Qingshankou Formation in the Qianbei area, Changling Sag [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(2): 308-318.

(编辑 黄娟)



(上接第 354 页)

[15] 魏祥峰, 李宇平, 魏志红, 等. 保存条件对四川盆地及周缘海相页岩气富集高产的影响机制 [J]. *石油实验地质*, 2017, 39(2): 147-153.
WEI Xiangfeng, LI Yuping, WEI Zhihong, et al. Effects of preservation conditions on enrichment and high yield of shale gas in Sichuan Basin and its periphery [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(2): 147-153.

[16] 邓模, 吕俊祥, 潘文蕾, 等. 鄂西渝东地区油气保存条件分析 [J]. *石油实验地质*, 2009, 31(2): 202-206.
DENG Mo, LÜ Junxiang, PAN Wenlei, et al. Hydrocarbon preservation conditions in west Hubei and east Chongqing [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(2): 202-206.

[17] 周立夫, 陈孔全, 唐永, 等. 川南綦江—赤水地区晚燕山期以来差异构造变形 [J]. *地质科技情报*, 2016, 35(4): 66-73.
ZHOU Lifu, CHEN Kongquan, TANG Yong, et al. Tectonic deformation in Qijiang - Chishui area of South Sichuan since late Yanshanian [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(4): 66-73.

[18] 罗兵, 郁飞, 陈亚琳, 等. 四川盆地涪陵地区页岩气层构造特征与保存评价 [J]. *石油实验地质*, 2018, 40(1): 103-109.
LUO Bing, YU Fei, CHEN Yalin, et al. Structural features and preservation evaluation of shale gas reservoirs in the Fuling area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(1): 103-109.

[19] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化 [J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(3): 288-299.
SHEN Chuanbo, MEI Lianfu, XU Zhenping, et al. Architecture and tectonic evolution of composite basin - mountain system in Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(3): 288-299.

[20] 邓铭哲, 何登发, 张煜颖. 鄂西仙女山断裂构造演化及其对长阳背斜圈闭性的影响 [J]. *石油实验地质*, 2018, 40(2): 177-184.
DENG Mingzhe, HE Dengfa, ZHANG Yuying. Tectonic evolution of Xiannüshan fault and its influence on hydrocarbon traps in Changyang anticline, Western Hubei Fold Belt [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(2): 177-184.

(编辑 徐文明)