

川东南A区构造特征与保存条件评价

张迪, 张旭亮

中国石化勘探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年7月18日; 录用日期: 2023年8月17日; 发布日期: 2023年8月29日

摘要

近期川东南盆缘复杂构造带A区W1井测试获高产工业气流, 揭示了该区良好的保存条件。本文针对顶底板条件以及构造变形两个影响保存的关键因素, 结合岩性、ADS轴面分析法与断面正应力分析技术, 详细解剖了A区构造保存条件, 认为: ① 顶底板岩性致密, 封隔性好, 上下构造层分层滑脱, 顶板滑脱层距页岩气层远, 对页岩气层未造成破坏; ② 主控断层与最大主应力方向呈大角度相交, 断面正应力大, 封堵性好; ③ 盆缘“断注”有效, 有利于页岩气保存与富集。川东南盆缘复杂构造带可进一步划分为阳春沟段、新场段、丁山-东溪段以及良村段, 各段在构造样式和变形强度方面存在一定差异性。

关键词

保存条件, 顶底板, 封堵性, 断注

Tectonic Characteristics and Preservation Condition Evaluation of Area A in Southeast Sichuan

Di Zhang, Xuliang Zhang

Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan

Received: Jul. 18th, 2023; accepted: Aug. 17th, 2023; published: Aug. 29th, 2023

Abstract

Recently, the W1 well in Area A of the complex structural zone of the southeast Sichuan basin margin obtained high-yield industrial airflow, which revealed the good preservation conditions in this area. In this paper, aiming at the two key factors affecting the preservation of the lithology

and structural deformation, combined with lithology, ADS axial surface analysis method and stress analysis technology, this paper analyzes the structural preservation conditions of Area A in detail, and concludes: 1) The top and bottom slate lithology is dense, the sealing property is good, the upper and lower detachment layers do not affect each other, and the detachment layer is far from the shale gas layer, which does not damage to the shale gas layer; 2) The main control fault intersects with the maximum principal stress direction at a large angle, and the fault plane has large stress which means the gas is sealed; 3) The “depression” of the basin margin is effective, which is conducive to the preservation and enrichment of shale gas. The complex tectonic belt of the southeast Sichuan basin margin can be further divided into Yangchungou, Xinchang, Dingshan-Dongxi and Liangcun, and there are certain differences in structural style and deformation strength.

Keywords

Preservation Condition, Top and Bottom Plate, Sealing Property, Depression

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

涪陵页岩气田发现后, 中国石化勘探分公司持续攻关川东南盆缘复杂构造带页岩气关键问题, 取得一系列勘探突破。丁山地区已有 14 口井在五峰组 - 龙马溪组一段页岩气进行压裂测试并获得突破, 已提交页岩气探明地质储量 1459.68 亿方。东溪地区 W2 井和 W3 井分别取得日产气 31.18、41.2 万方/天的高产。A 区 W1 井试获 53.19 万方/天的高产, 新增页岩气预测地质储量 1196.52 亿方。川东南盆缘复杂构造区深层页岩气勘探的突破实现了新场 - 东溪 - 丁山 - 林滩场整体连片, 目前落实盆缘复杂富气带资源量 11930.5 亿方, 是中国石化涪陵之外第二个万亿方增储上产富气带。前期评价认为 A 区历经多期断层改造, 保存条件存在较大的风险, 页岩气层可能受到破坏, 但 W1 井实钻压力系数 1.9, 测试产量 53.19 万方/天, 揭示了 A 区具有“超压富气”特征, 本文将对 A 区构造特征与保存条件进行详细解剖, 并结合区域构造特征, 进一步分析了盆缘复杂构造带不同构造单元构造样式与保存条件的差异性, 为下一步勘探方向奠定基础。

2. 区域概况

2.1. 区域构造

川东南地区受多期次构造应力影响, 构造表现为多构造边界和多构造体系特征, 南部大娄山、东南雪峰山隆起至齐岳山、大巴山为四川盆内 - 盆外构造边界。主要构造带有盆外的湘鄂西断褶带、黔北断褶带、黔东北断褶带, 盆内有川东高陡褶皱带、川南低陡褶皱带、川中平缓构造带[1] [2] [3] [4] [5] (图 1)。

川东南盆缘复杂构造带主要受将江南雪峰推覆与大娄山推覆影响, 发育两组构造, 共七个构造单元。燕山中期, 雪峰山构造应力挤压, 形成北东向断层与构造; 燕山晚期 - 喜山期, 联合挤压, 叠加改造形成近南北向断层与构造; 从北到南分别发育东胜、阳春沟、新场、东溪、丁山、良村北和林滩场七个构造单元。

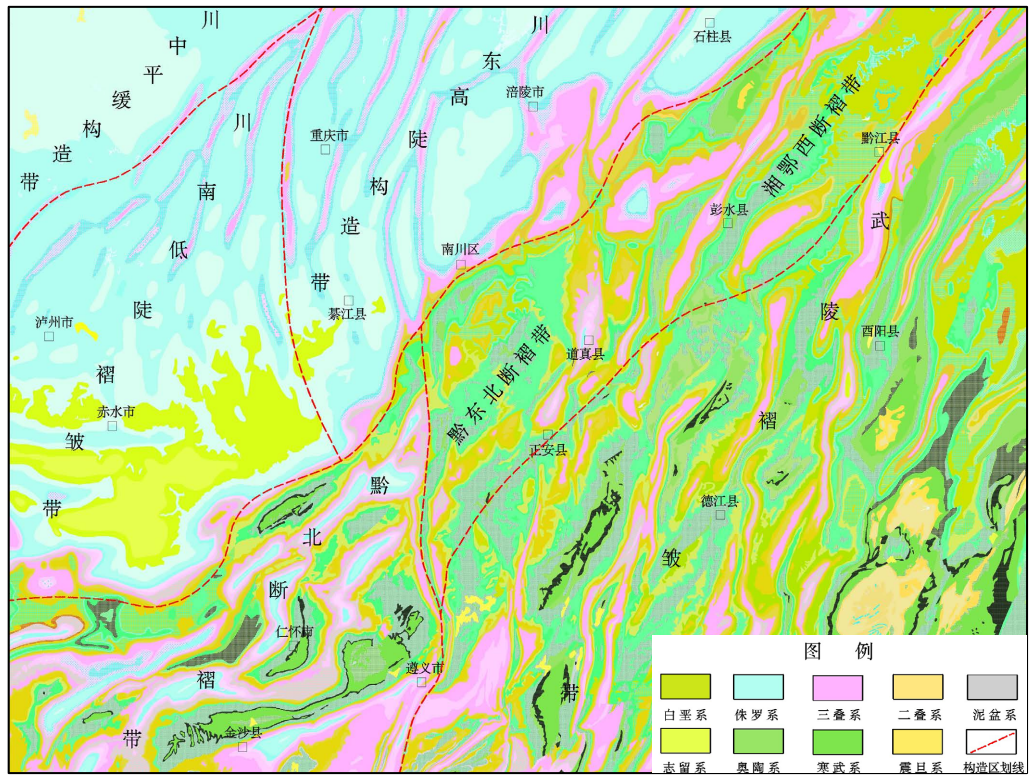


Figure 1. Structural unit division map of Southeast Sichuan
图 1. 川东南地区构造单元划分图

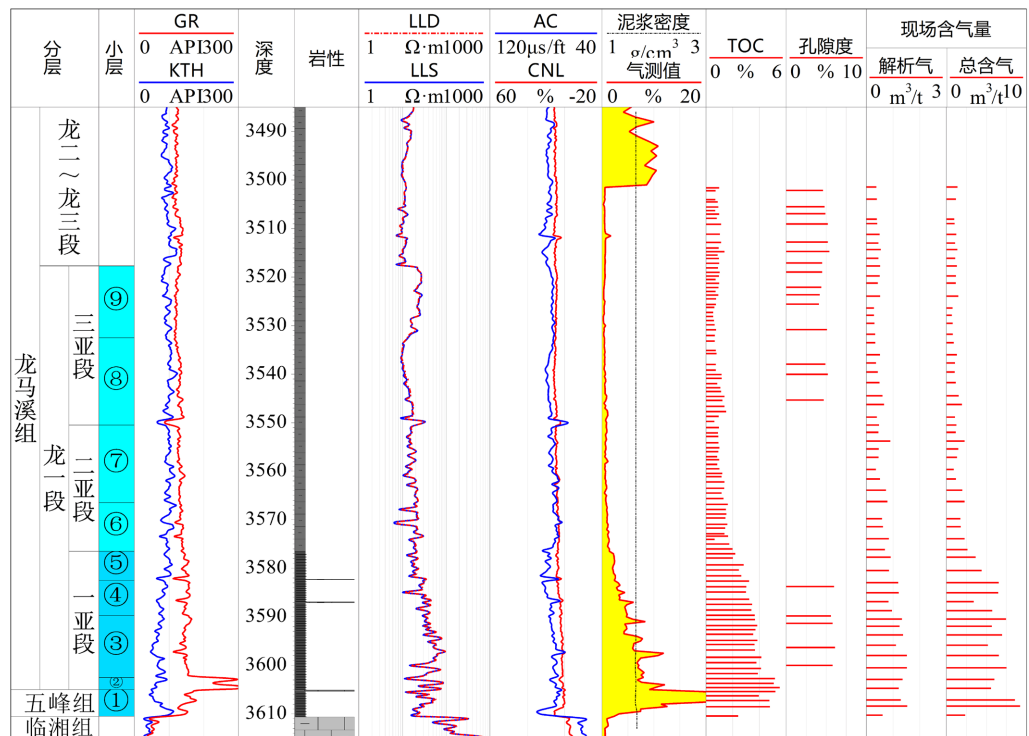


Figure 2. Comprehensive column of Wufeng-Longmaxi Formation of W1 well
图 2. W1 井五峰 - 龙马溪组综合柱状图

2.2. 地层与沉积

川东南綦江地区五峰组-龙马溪组为浅水陆棚-深水陆棚沉积环境,深水陆棚主要分布于五峰组、龙马溪组龙一段,浅水陆棚分布于龙二-三段。平面上新场-东溪-丁山地区位于五峰组-龙马溪组一段深水陆棚相区内,沉积相带展布稳定,富有机质页岩厚度在75~90 m之间,有机碳含量高,脆性矿物含量高,为页岩气层发育的有利相带。

W1 钻井资料揭示 A 区优质页岩段在纵向上主要分布在五峰组-龙马溪组一段,横向展布比较稳定,优质页岩厚 34.00 m,平均 TOC3.67%,孔隙度 5.95%,硅质矿物含量 50.6%,含气量平均 5.95 m³/t (图 2)。W1 井的钻探揭示 A 区具有良好的生烃潜力,为页岩气藏形成提供了良好的物质基础,具有“高 TOC、高孔、高含气量”且大面积含气的特征。

3. 局部构造特征

3.1. 平面展布特征

A 区整体为受齐岳山断裂、南川遵义断裂及其主控断裂夹持的三角区,与齐岳山“断洼”相隔,为近南北向的构造带。断背斜主体为北西向,向东北方向倾伏,长轴长 21 km,短轴长 4 km,高点埋深 2500 m,闭合幅度 900 m,褶皱系数 0.11。断背斜核部断裂相对较发育,翼部地层产状稳定,断裂相对不发育,五峰组底界主要埋深为 2000~5500 m,倾角 4°~20°。构造主体与盆缘“断洼”相隔,断洼结构清晰,由南向北延伸,呈北东向展布(图 3)。

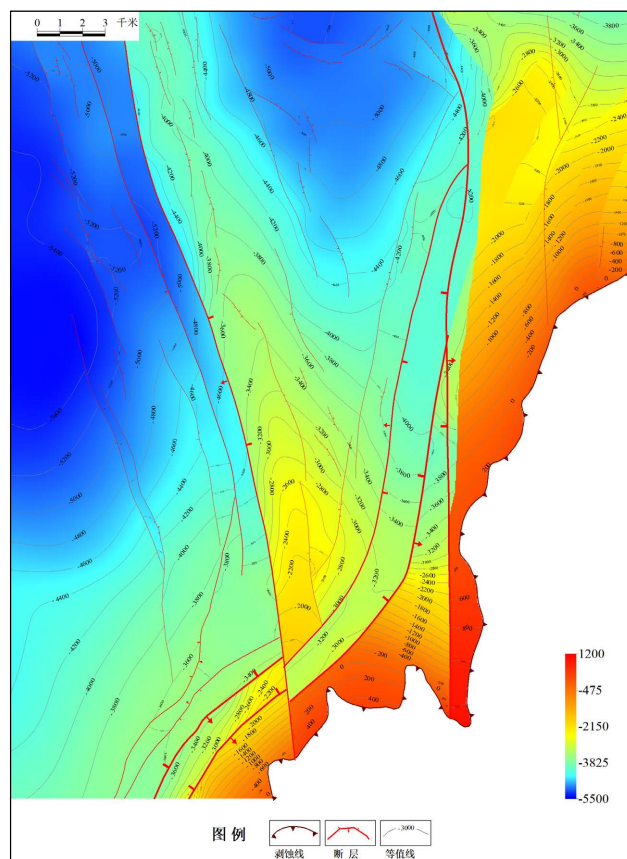


Figure 3. Structural map of Wufeng-Longmaxi Formation in A area
图 3. A 区五峰-龙马溪组底界构造图

3.2. 纵向特征

A区纵向上主要发育寒武系膏岩、志留系砂泥岩两套塑性滑脱层,分为上、中、下三个构造形变层,上构造层为嘉陵江组膏岩-地表,中构造层为嘉陵江组膏岩-寒武系膏岩地层,下部构造层包含寒武系膏岩以下地层。上构造层、中构造层构造形态基本一致,构造作用相对较弱,多发育层间小断层。页岩气目的层五峰-龙马溪组位于中构造层,构造作用相对较弱,断裂发育程度相对较低。下构造层(寒武系膏岩以下)由于处于盆缘断褶带,构造作用较强(图4)。

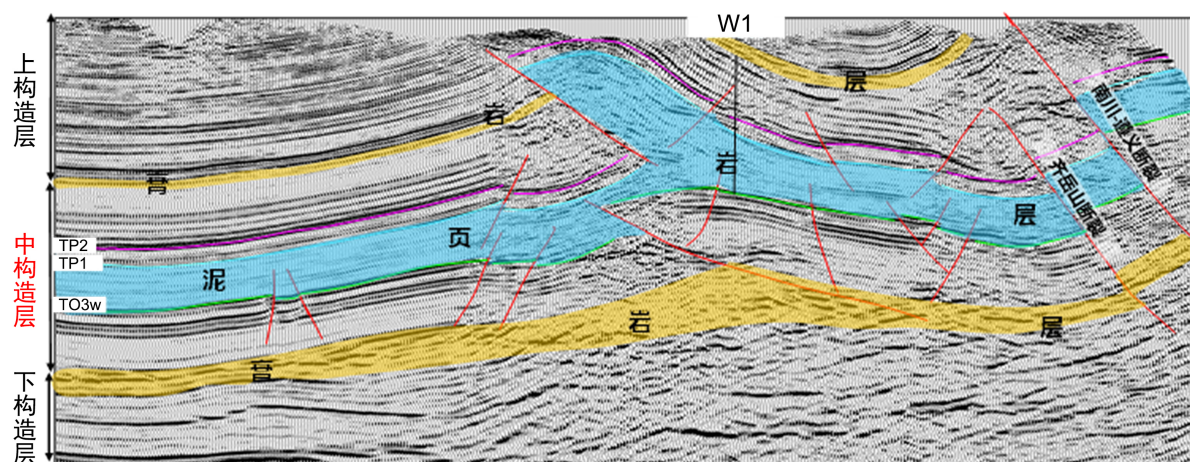


Figure 4. Structural model of detachment layer in A area

图4. A区分层滑脱构造模式

3.3. 断裂发育特征

A区主要受两期两个方向的构造应力作用,主要发育东北~北北东、北西~北北西等两个方向的断裂。其中,南-北向断裂为南川-遵义二级断裂,为加里东期就已经形成的早期先存走滑断裂;东北、北北东走向断裂受雪峰山北西向推覆形成,形成时期相对较早,主要发育齐岳山二级断裂及一系列的次级断裂;北西、北北西走向断裂受大娄山楔入及印-亚板块碰撞持续作用形成的北东向挤压而形成,断背斜的主控断层为三级断裂,主要形成时期为喜山期,呈北西走向,向南消失于剥蚀区,向北延伸出A区。二级断层延伸程度、规模相对较大,对构造保存影响较大,三、四级断裂规模较小,断距较小,对构造保存影响较小。

3.4. 构造变形机理

3.4.1. 构造应力期次

川东南燕山期以来的构造变形作用可拆分为三个主要期次,这三期挤压作用在平面上呈弧形分布向外扩张,弧形前端受力强,两翼受力弱,虽然启动时间存在一定差异,但因构造活动在空间和时间上的延续性,其不仅在空间上相互叠加,在活动时间上也存在部分重合。第一期弧形扩张为始于早燕山期的雪峰弧形推覆,于早-中白垩世传递至盆缘,导致南川-遵义断裂以东的齐岳山北东段隆升。受南川-遵义断裂与石柱东-胡家园断裂等一系列近N-S向的先存走滑断裂影响,弧形西南翼有所收敛。雪峰山继续向前推覆,构造样式由“基底卷入型”过渡到“盖层滑脱型”,随后受东吴期基底断裂的影响,弧形西南翼轴迹进一步收敛。这一时期的雪峰大型逆冲弧形推覆,为后续的构造变形奠定了基调。第二期挤压为始于晚燕山期之后的川中反向阻挡。雪峰山跨东吴期基底断裂之后,继续向外扩散,受川中刚

体的反向阻挡, 形成帚状三角带。第三期为始于晚燕山 - 早喜山期由南向北的大娄山逆冲推覆, 主要作用于川南褶皱带[6] [7] [8]。A 区受多期次多方向构造应力影响, 构造整体表现为大型断背斜构造, 呈北西向展布。

3.4.2. 构造变形模式

A 区受多期构造运动的叠加改造, 为深部构造楔控制的厚皮逆冲构造, 基底三角楔入使整体被动隆升, 且以垂直抬升为主, 水平方向挤压较弱, 非叠瓦强逆冲改造, 早期滑脱作用形成断洼得到持续保存(图 5)。

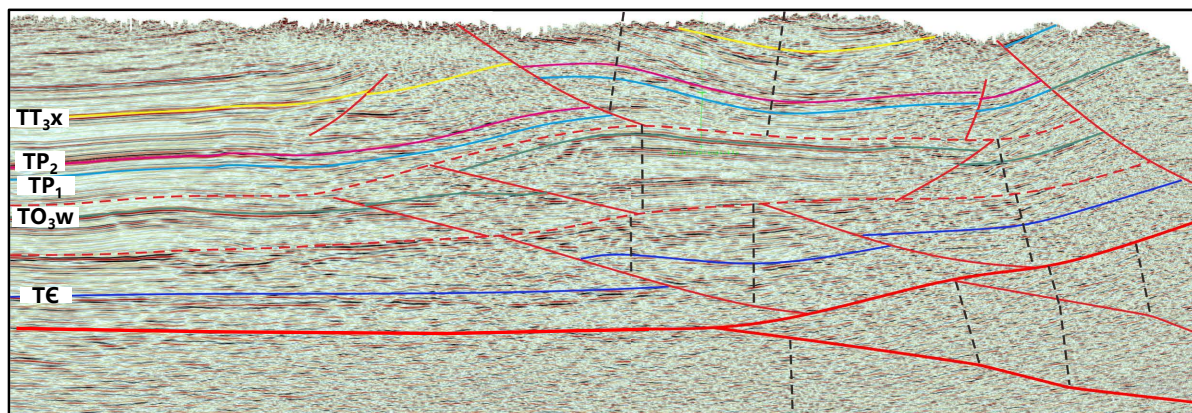


Figure 5. Structural deformation model in A area

图 5. A 区构造变形模式

4. 保存条件评价

W1 实钻揭示了 A 区具有超高压特征, 保存条件好, 主要从顶底板条件与构造变形两方面开展保存条件评价[9]-[15]。

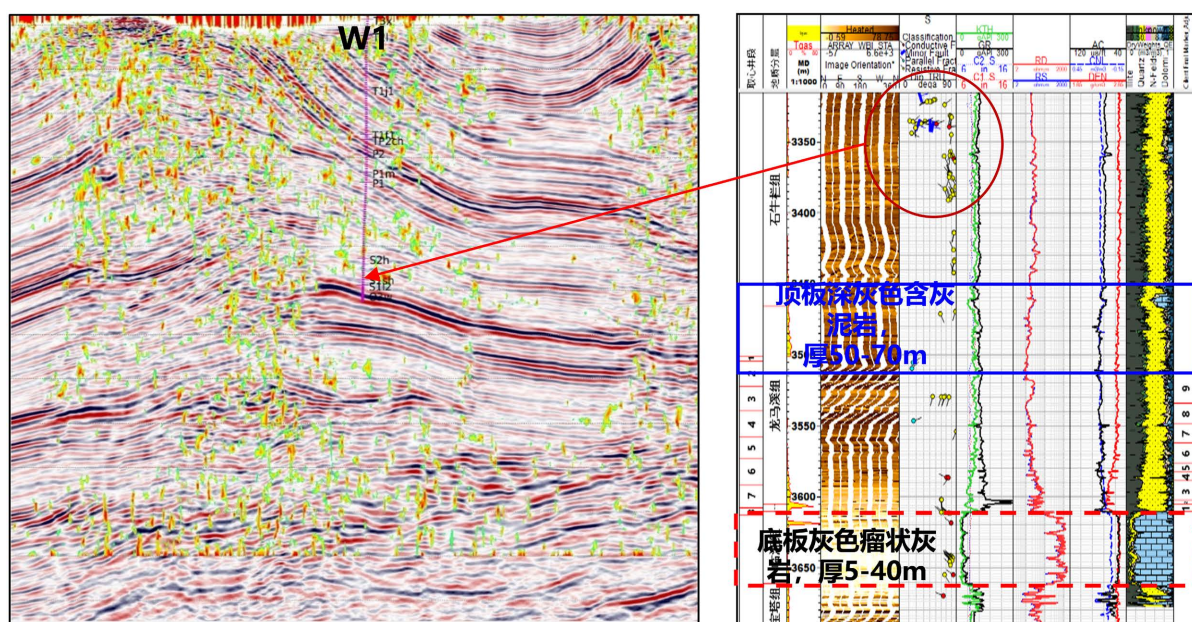


Figure 6. Fracture distribution of top and bottom plate

图 6. W1 顶底板裂缝发育情况

4.1. 顶底板条件

顶底板对保存条件的影响除了自身的封盖条件外, 顶板滑脱层的位置对保存条件也有一定的影响。

4.1.1. 自身封盖条件

A 区五峰组 - 龙马溪组页岩气层顶、底板与页岩气层连续沉积, 顶、底板岩性致密、厚度大、展布稳定、突破压力高, 封隔性好。页岩气层底板为临湘组和宝塔组, 岩性为含泥瘤状灰岩、灰岩, 岩石致密、横向展布稳定, 基质孔隙度、渗透率一般小于 2% 和 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。顶板为龙马溪组二 - 三段和上覆的石牛栏组, 龙马溪组二 - 三段岩性主要为深灰色含灰泥岩, 石牛栏组岩性主要为灰色 - 深灰色泥质灰岩、灰质泥岩, 岩石致密, 地层横向展布稳定, 厚度大。总体来看 A 区顶底板都属于低孔、特低渗致密地层, 在页岩气形成和后期构造过程中对页岩气层都具有很好的封隔作用。后期的构造改造也对页岩气顶底板未造成破坏: 成像测井显示小断裂(minor fault)消失于石牛栏组中部, 裂缝预测显示顶、底板裂缝均不发育(图 6), 顶底板保存条件好。

4.1.2. 顶板滑脱层距页岩气层远

多口探井实钻数据表明, 不同构造带的保存条件有所差异, 其原因可能与页岩气目的层龙马溪组顶板滑脱层的位置有关。顶板滑脱层是一套区域性滑脱层, 在整个区域内广泛存在, 但具体的深度一直难以确定。为了确定顶板滑脱层对保存条件的影响, 现采用 ADS 法来辅助判定滑脱层的深度[16]:

ADS (area-depth-strain)法, 即面积(area) - 深度(depth) - 应变(strain)法, 是一种针对冲断坡背斜的定量分析方法, 是在面积平衡法基础上发展起来的, 对于局部均衡的构造, 多个地层的数据点确定一条直线(方程)。利用高于标志层(某层系)的面积(excess area, s)和标志层距参考面(参考面的选择是任意的)的深度(depth, h), 以及滑移量(D), 基于变形前后物质(质量)守恒的准则来确定基底拆离面或滑脱层的深度(Detachment depth, H), 计算公式如下:

$$H = h - (1/D)S \quad (1)$$

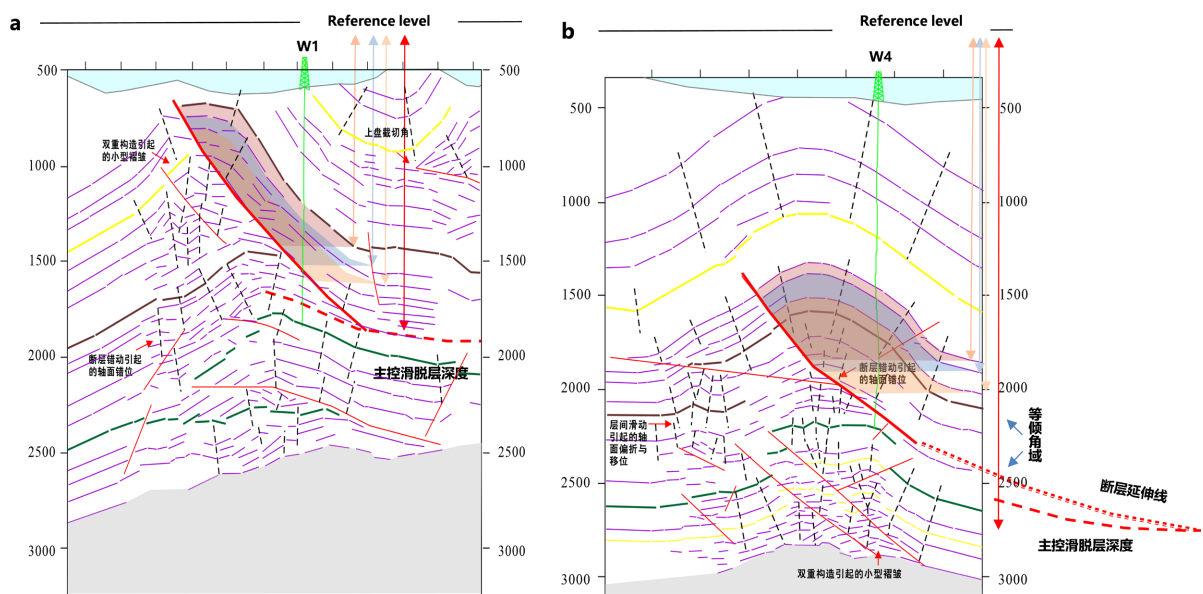


Figure 7. Location of detachment layer through ADS axial surface analysis ((a): ADS section of well W1, (b): ADS section of well W4)

图 7. ADS 轴面分析法确定顶板滑脱层位置((a): 过 W1 井 ADS 剖面, (b): 过 W4 井 ADS 剖面)

采用 ADS 轴面分析法确定顶板滑脱层的位置(图 7), 通过对具有相似构造变形背景的已钻井实测含气量进行统计(见表 1), 顶板滑脱层距页岩气层越远, 即上构造层断裂距页岩气层越远, 对页岩气层的破坏作用越小, 保存条件越好。

Table 1. Influence of roof detachment layer on preservation conditions
表 1. 顶板滑脱层对页岩气层保存条件影响能力统计表

	W1 井	W4 井
含气量(m ³ /t)	6.17	1.88
距目的层垂直距离(km)	0.56	0.192

4.2. 构造变形与保存

4.2.1. 断层走向与最大主应力夹角大, 断面正应力大, 封闭性好

近期綦江构造勘探开发表明, 控构造断层走向与地应力的夹角和断面正应力是影响页岩气保存条件的重要因素。控构造断层与地应力的夹角的大小反映断层对页岩气层的侧向封堵性, 通过对綦江已钻井断层走向与地应力夹角和含气量的统计(见表 2), 结果揭示控构造断层走向与最大主应力方向近垂直或大角度相交, 断层的侧向封堵性越好, 页岩气层保存越好, 实钻井含气量高(W1 井), 反之, 则断层走滑, 封堵性较差, 页岩气层随之逸散, 含气量低(W4 井)。A 区最大水平主应力方向为近东西向(90°), 与近南北向(0°)控构造断层几乎垂直相交, 断层封堵性好。

除此之外, 断面正应力同样能反映断层对页岩气层的封堵性。断面正应力可表达为:



















$$P = \rho gh \cos \theta \quad (2)$$

其中, g 为重力加速度, h 为断面埋深, θ 为断面倾角。

根据计算公式可知, 同等埋深条件下, 主控断层断面越平缓, 断面正应力越大, 断层的封堵性更好。结合 ADS 轴面分析法落实主控断层形态, 并计算得到 A 区与 B 区断面正应力大小(图 8), B 区断面压力变化大, W4 井处断面正应力相对较低(90 MPa), A 区断面正应力较高, W1 处断面正应力高(120 MPa), A 区主控断层断面正应力 100~160 MPa, 揭示 A 区主控断层对页岩气层的封闭性较好。

Table 2. Statistics of angle between fault strike and stress and gas content in different wells

表 2. 不同井断层走向与地应力夹角和含气量统计表

井名	最大主应力方向	控制断层走向	夹角	含气量
W5 井	105	207	 78	 6.69
W1 井	75	155	 80	 5.95
W6 井	65	7	 58	 5.7
W7 井	110	46	 64	 5.1
W8 井	95	148	 53	 4.18
W9 井	80	162	 82	 4.06
W10 井	60	7	 53	 3.5
W4 井	175	170	 5	 2.05
W11 井	135	156	 21	 1.04

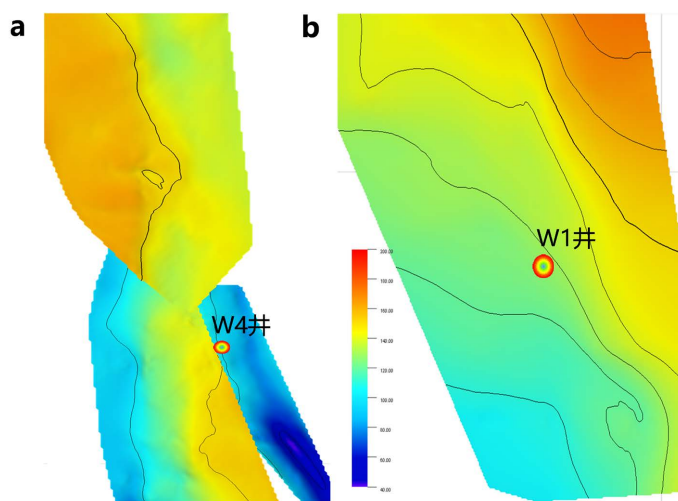


Figure 8. Normal stress distribution map of main control fault section ((a): B area; (b): A area)

图 8. B 区与 A 区主控断层断面正应力分布图((a): B 区; (b): A 区)

4.2.2. 与盆缘呈有效断注相隔, 有利于保存

A 区地层宽缓, 与盆缘呈“断注”相接, 断注特征清晰, 由南向北连续分布。控注断层封堵性好, 且控注属于负向构造, 有利于页岩气的滞留和保存。随着埋藏深度的增加, 页岩储层表现出超压的特征, 页岩气藏滞留富集程度高[16]。与盆缘“断注”相隔、控注断层封堵性和地层超压等特征都揭示 A 区具有良好的保存条件(图 9)。

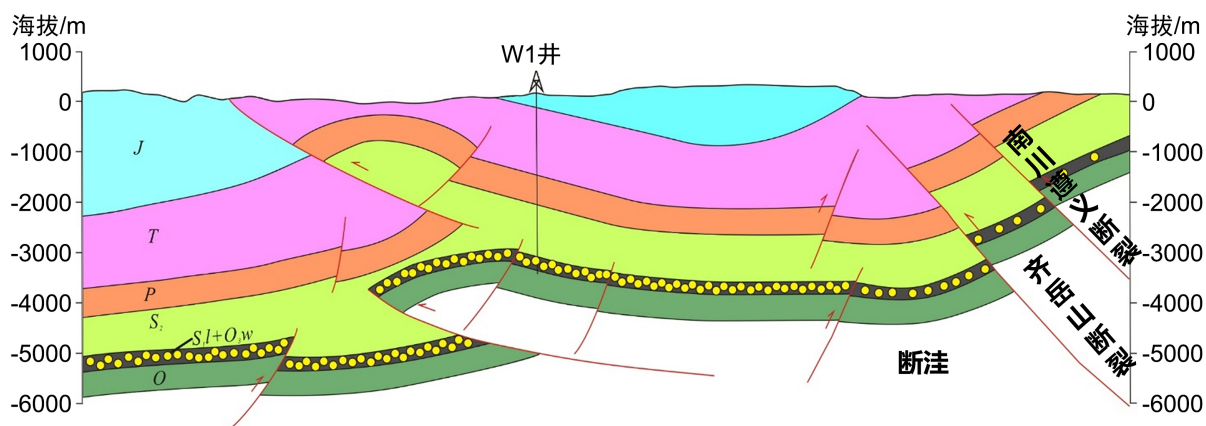


Figure 9. Fault-shielded structure preservation mode of well W1

图 9. W1 井-断层遮挡型构造保存模式

5. 讨论与认识

A 区是继丁山 - 东溪后在川东南盆缘复杂构造带上取得的新突破, 在保存条件上也带来了新的启示。通过对多期次的构造运动的分析, 结合不同构造变形模式, 进一步分析复杂构造带上不同构造单元的保存条件, 为下一步的勘探方向奠定基础。

依据主要构造作用和与盆缘接触关系进一步将盆缘复杂构造带划分为 4 段, 不同段的构造和强度有所差异, 导致页岩含气性和地层压力存在差异(图 10)。① 阳春沟 - 东胜段: 以斜坡型接触为主, 受区域

走滑断裂——南川遵义断裂(弱-中等走滑)以及雪峰逆冲推覆(中等)双重影响, 油气以侧向散失为主, 随着埋深的逐渐加深, 与剥蚀区距离越远, 压力系数呈增加趋势, 保存条件逐渐变好。② 新场段: 与盆缘呈断洼型接触, 受区域走滑断裂(弱走滑)、雪峰逆冲推覆(中等)与大娄山逆冲(弱)三重作用影响, 保存整体较好。③ 丁山-东溪段: 与盆缘呈断洼-斜坡接触, 断洼-斜坡接触, 受雪峰双幕逆冲推覆(多期应力叠合, 中等)与大娄山逆冲(中等)控制, 保存可能受一定影响。④ 良村段: 断洼型接触, 受雪峰逆冲推覆(弱)与大娄山逆冲(中等)双重作用, 保存条件复杂。

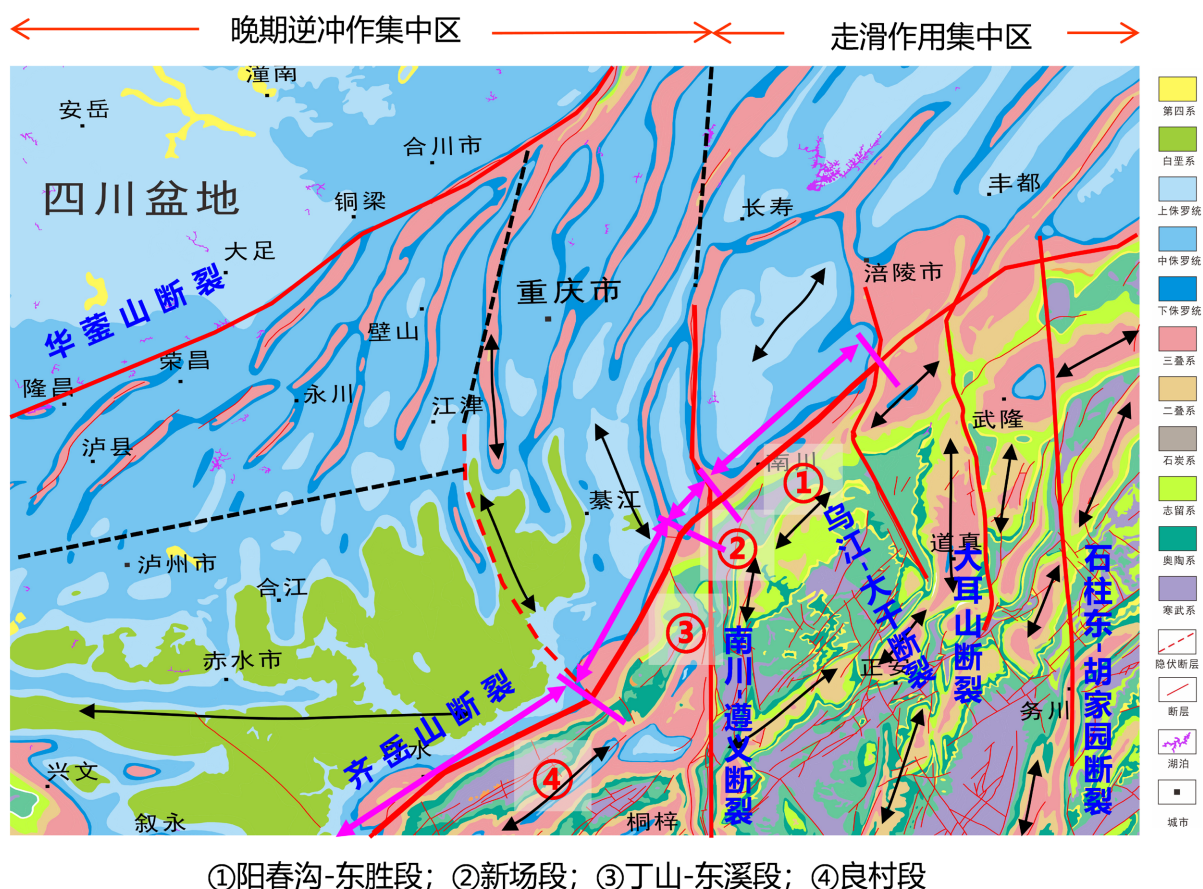


Figure 10. Segmentation of differential deformation in complex structural zones along the basin margin

图 10. 盆缘复杂构造带差异变形分段

6. 结论

1) A 区顶底板保存条件好。页岩气层自身封盖条件好, 顶、底板与页岩气层均连续沉积, 岩性致密、厚度大、展布稳定、突破压力高, 且顶底板裂缝均不发育, 封隔性好。顶板滑脱层距页岩气层远, 上构造层断裂距页岩气层远, 对页岩气层的破坏作用小。

2) A 区主控断层封堵性好, 保存条件好。主控断层与最大主应力几乎呈垂直相交, 主控断层断面正应力 100~160 MPa, 断层封堵性好。

3) A 区主体构造形态宽缓, 与盆缘呈有效断洼接触, 且断洼特征清晰, 由南向北连续分布, 保存条件好。

4) 依据构造作用期次与盆缘接触关系可将盆缘复杂构造带分为四段: 阳春沟段、新场段、丁山-东溪

段以及良村段, 各段在构造样式和变形强度方面存在一定差异性。

参考文献

- [1] 何登发, 李德生, 童晓光, 等. 多期叠加盆地古隆起控油规律[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 475-488.
- [2] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589-606.
- [3] 刘若冰, 田景春, 魏志宏, 等. 川东南地区震旦系——志留系下组合有效烃源岩综合研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 824-828.
- [4] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(10): 1553-1582.
- [5] Li, C.X., He, D.F., Sun, Y.P., *et al.* (2015) Structural Characteristic and Origin of Intra-Continental Fold Belt in the Eastern Sichuan Basin, South China Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, **111**, 206-221.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.07.027>
- [6] 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 沈传波, 凡元芳. 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.
- [7] 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(自科版), 2013, 40(6): 703-711.
- [8] 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.
- [9] 胡东风, 张汉荣, 倪凯, 等. 四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 17-23.
- [10] 胡东风, 魏志红, 李宇平, 等. 四川盆地东南部地区复杂构造带深层页岩气勘探进展与突破[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 35-44.
- [11] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 161-169.
- [12] 马永生, 楼章华, 郭彤楼, 等. 中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 406-417.
- [13] 龙胜祥, 冯动军, 李凤霞, 等. 四川盆地南部深层海相页岩气勘探开发前景[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(4): 443-451.
- [14] 何治亮, 聂海宽, 胡东风. 深层页岩气有效开发中的地质问题——以四川盆地及其周缘五峰组——龙马溪组为例[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 379-391.
- [15] 郭旭升, 腾格尔, 魏祥峰, 等. 四川盆地深层海相页岩气赋存机理与勘探潜力[J]. 石油学报, 2022, 43(4): 453-468.
- [16] Epard, J.L. and Groshong Jr, R.H. (1993) Excess Area and Depth to Detachment. *AAPG Bulletin*, **77**, 1291-1302.
<https://doi.org/10.1306/BDF8E66-1718-11D7-8645000102C1865D>