

威远基底结构与龙马溪组地层构造及沉积相关系研究

范宏娟, 刘 殊

中石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都
Email: fhj328@163.com

收稿日期: 2021年1月12日; 录用日期: 2021年2月10日; 发布日期: 2021年2月19日

摘 要

威远向斜钻井揭示, 龙马溪组I段为主力气藏, 其页岩厚度、品质变化较大, 与产能关系密切。沉积微相的研究是储层目标评价、气藏描述的关键。但用地震资料精细描述龙马溪组I段优质页岩分布, 还有一定难度。为此, 通过基底结构分析上覆地层构造、沉积微相变化规律, 并分析其形成机理; 采用单井旋回划分, 结合地震反射结构识别, 建立层序地层格架; 综合构造、沉积相描述, 预测龙马溪I段页岩气藏分布规律。研究表明: 下震旦统发育一个大型的洼陷, 东南侧发育一个大型的隆起; 上覆地层的向斜和背斜, 与下震旦统的洼陷-隆起正好对应。其次, 威远向斜中部优质页岩厚度较大、品质优, 正对下方古洼陷位置; 龙马溪组2-3段在东南侧发育由东南向西北进积的斜交反射, 正对下震旦统古隆起位置, 页岩品质也相对较差。威远向斜的构造、沉积相明显受下震旦统古洼陷-隆起控制。下震旦统大型洼陷上方的志留系洼陷, 预测为龙马溪组I段优质页岩、最佳气藏分布带。

关键词

威远向斜, 基底结构, 龙马溪组, 层序地层格架, 自贡低隆

The Relationship Study between the Basement Structure and the Structure-Sedimentary Facies of Longmaxi Formation in Weiyuan Syncline

Hongjuan Fan, Shu Liu

Exploration & Production Institute of Southwest Petroleum Branch Company of SINOPEC, Chengdu Sichuan
Email: fhj328@163.com

Received: Jan. 12th, 2021; accepted: Feb. 10th, 2021; published: Feb. 19th, 2021

Abstract

In the Weiyuan syncline, the shale of I section of Longmaxi group is the main gas reservoir. The thickness and the quality of the shale changes greatly, which is closed to the capacity. The study of sedimentary microfacies is the key to evaluate the reservoir targets and to describe gas reservoirs. However, it is difficulty using seismic data to describe the shale's distribution. The structure of overlying strata and sedimentary microfacies are analyzed by studying basement structure and its formation mechanism. The sequence stratigraphic framework is established by single well cycle and seismic reflection structure. The description of structure and the sedimentary facies is synthesized to predict the shale gas reservoir of Longmaxi group. The research shows that: a large depression develops in the Lower Sinian and a large uplift in the southeast. The syncline and anticline of the overlying strata correspond to the depression-uplift of the Lower Sinian. Secondly, the shale of Weiyuan syncline, which is of great thickness and high quality, directly faces the ancient depression. Section 2-3 of the Longmaxi Formation develops oblique reflections from southeast to northwest which is opposite to the ancient uplift of the Lower Sinian, and of relatively poor quality. In Weiyuan syncline, the tectonic and sedimentary facies are obviously controlled by lower Sinian depression-uplift. It is forecasted that the Silurian depression, which is at the top of the sub-sag of the lower Sinian, is the best shale's gas reservoir distribution zone.

Keywords

Weiyuan Syncline, Basement Structure, Longmaxi Group, Sequence Stratigraphic Framework, Zigong Low Lung

Copyright © 2021 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

基底先存构造对上覆地层的构造运动学模式具有重要的控制作用[1] [2]。构造模拟实验可清晰的描述基底构造对上伏构造的影响[3]。数值模拟也被广泛的用于构造形成机理的分析, 如 S. B. Wissing [4]用数值模拟分析瑞士 Klippen 推覆带的盆地继承性。四川盆地, 基底先存构造也影响了盆地后期构造变形、沉积环境, 以及断层的形成和演化[5] [6]。

四川盆地页岩气取得重大突破, 其主力产层为龙马溪组 1 段 1 亚段底部的 1 小层笔石带(简称龙 1-1¹, S₁₁¹)。截至 2019 年底, 涪陵-威远页岩气田累计探明页岩气地质储量 7255 × 10⁸ m³, 2019 年生产页岩气 73.4 × 10⁸ m³, 预计 2020 年产量将达 80 × 10⁸ m³ [7]。龙 1 段厚度为 35~45 米, 但其最佳优质页岩段为龙 1-1¹(S₁₁¹)小层笔石带, 厚度只有 5~11 m。其反射波组变化不大, 常规地震预测方法难以精细描述笔石带变化规律。有机质泥页岩的构造-古沉积背景的不同, 影响着页岩笔石带的生烃潜力和可压性[8] [9]。威远地区的大量口钻井揭示: 在局部较小范围, 龙 1-1¹(S₁₁¹)笔石带的厚度、品质都表现出明显的横向变化。多个相关专题都注意到这一特征。孙莎莎[10]等研究发现: 五峰期, 板内基底起伏不平、隆-坳相间, 由此形成沉积微相差异, 将威远地区的水下凸起称之为“自流井水下隆起”; 王同[11]等运用残余厚度刻画五峰组观音桥段古地貌, 将该凸起称之为“自贡低隆”。这些研究依据钻井资料进行, 重点描述了威远地区龙马溪组存在水下古隆起。在隆起区, 龙 1-1¹(S₁₁¹)笔石带厚度明显变薄, 气井产量明显较差。但这些专题均未探讨“自贡低隆”的形成机理, 也未深入研究预测和描述龙 1-1¹(S₁₁¹)笔石带分布的方法。

四川盆地南华纪基底发育有大量裂谷洼陷[12]。在威远向斜, 其基底震旦统内也发育一个大型洼陷, 该古洼陷有继承性发展特征。为此, 通过对比基底以研究龙马溪组沉积期的古地理, 再用志留系沉积前的古地理以描述龙马溪沉积微相变化, 以此精细描述页岩笔石段(S_{11}^1)品质、厚度分布, 以指导钻井部署。

2. 威远向斜地质背景

2.1. 区域构造特征简述

威远向斜位于川中隆起低缓区, 东南-南侧侧为川西南坳陷, 北邻威远构造(图 1)。东南部为自流井背斜。受到威远大型穹窿背斜的控制和制约, 整体表现为向斜。加里东期, 为川中隆起带南斜坡, 威远构造穹窿状背斜构造南缘[12]。经历多期、多旋回构造沉积演化-震旦系桐湾运动、寒武系、加里东运动、二叠系东吴运动、三叠系印支运动, 以及后期的燕山运动和喜山运动[12]。

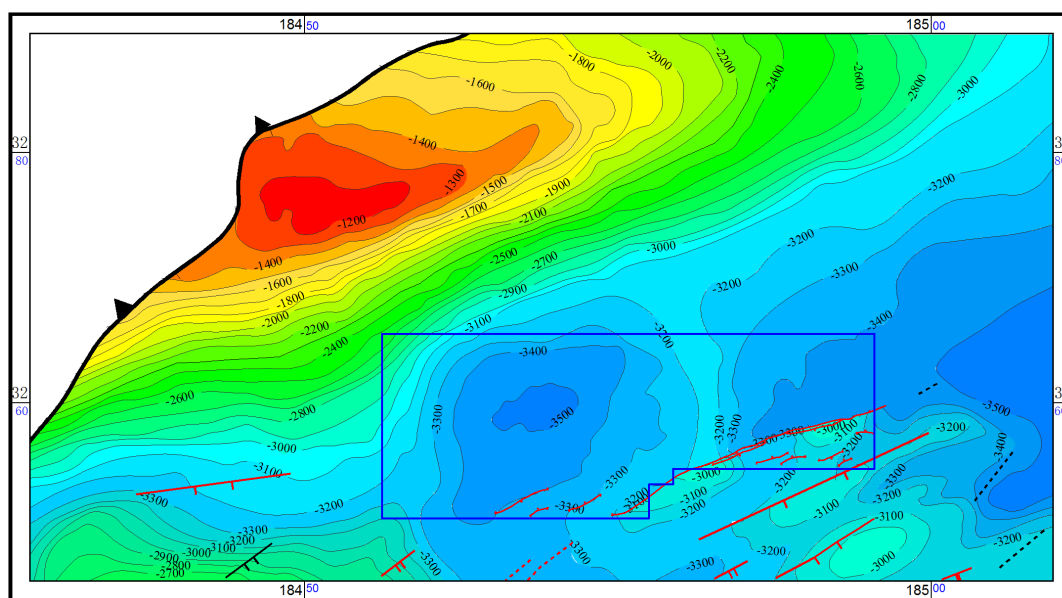


Figure 1. The tectonic map of Longmaxi Formation of low uplift area, central Sichuan

图 1. 川中隆起低缓区龙马溪组构造图

2.2. 威远向斜局部构造特征

1) 构造特征(图 2): 威远向斜构造简单, 整体为一宽缓向斜; 各层构造形态基本相似, 深部震旦系构造, 与浅层上三叠统须家河组构造总体一致, 从浅至深构造变化不大。这表明威远向斜的构造有明显的继承性。

2) 拉平二叠系底, 也即剔除加里东以后的构造运动, 描述二叠系以上的构造特征、以及二叠系下方的古构造(图 3), 从图 3 可见: ① 二叠系以上的地层基本没有构造形变, 其反射波总体平行连续, 表明印支期-燕山期构造运动对威远向斜的影响不大, 现今的威远向斜总体上是喜山期形成的构造。这一结论与前人结论基本相同[13], 尽管该区经历多期次构造运动, 但构造变形总体上是最后一期, 也即喜山期形成。② 南华系地层内, 存在一个明显的古隆起-古洼陷, 在南华系洼陷内, 反射波平行连续, 明显是沉积岩充填特征; 洼陷与隆起之间有明显的反射界面, 表明两侧是明显不同地质体; ③ 在南华纪古隆起正上方, “自贡低隆”已经明显可见, 南华系古洼陷正好与威远向斜对应。二叠系以下的地层, 其早期构造变形并不强烈, 因其动力背景总体是拉张背景[14], 形成较多的拉张断层[12]。

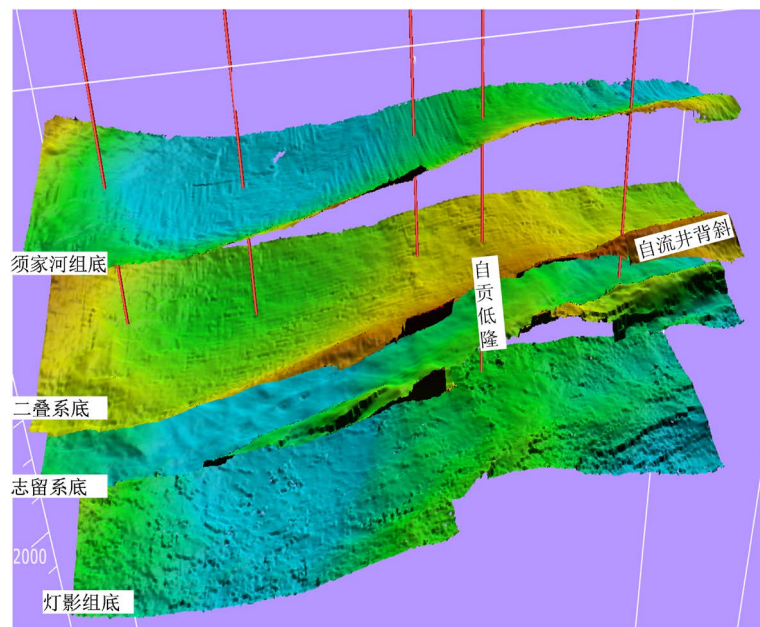


Figure 2. The structural characteristics of each layer of Weiyan syncline
图 2. 威远向斜各层构造特征

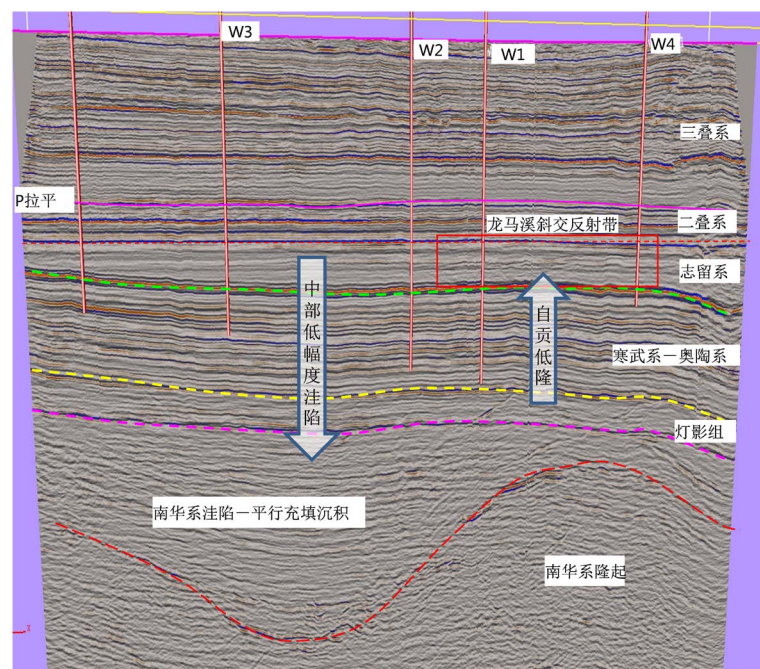


Figure 3. The evolution characteristics of Weiyan syncline (flattening bottom reflection of Permian)
图 3. 威远向斜构造演化特征(拉平二叠系底反射)

3) “自贡低隆”形成机理: 拉平二叠系地层, 其上的“自贡低隆”幅度较小(图 3)。现今构造上, “自贡低隆”有一定幅度(图 1、图 2)。与基底的对比(图 2、图 3), 威远向斜正对南华系古洼陷, “自贡低隆”正对南华纪古隆起。在一特征在川南很多地方都能见到[12]。依据模拟实验、数字模拟结论[3] [4] [15], 表明: 威远向斜是古洼陷的继承性发展, “自贡低隆”是南华纪古隆起的继承发展。威远南华纪古隆起-洼陷对后期的沉积、构造均产生重大的控制作用。

南侧的自流井背斜(图 1), 很可能就是威远向斜内的古隆起阻挡形成。后面的研究表明: 基底构造隆起-洼陷还控制志留系洼陷的形成, 由此形成志留系沉积中心。

3. 威远向斜龙马溪组页岩气藏地质、地震层序特征

3.1. 威远向斜龙马溪组页岩气藏地质特征

志留系龙马溪组 2~3 段地层, 还见到两侧向洼陷中心对冲的斜交反射(图 4)。对冲的斜交反射带表明: 威远向斜中部(W3-W2 之间), 为志留系沉积期的洼陷中心。

四川盆地及周缘地区下古生界最有利的页岩层位, 为上奥陶统-下志留统, 即五峰-龙马溪组(S_{11}^1)页岩。加里东期的构造活动对于该套页岩的发育有明显的控制, 黑色页岩形成于深海一半深海的封闭环境[16] [17]。从沉积环境分析, 页岩的变化应该较小, 在局部范围, 通常认为页岩分布稳定、是均质的。川南地区, 龙马溪组页岩沉积相带为陆棚相带, 地质条件基本稳定, 早期研究通常认为其厚度、品质变化不大。随着钻井增多, 龙 1-1¹ 页岩笔石段呈现明显的非均质性。这一特征在多个开发区也得到证实[17]。

在威远向斜, 龙马溪组龙 1-1¹ 段优质页岩笔石段厚度的变化如下:

龙一段优质页岩段厚度: W3 井厚 46.6 m, W2 井厚 40.86 m, W1 井厚 35.5 m, W4 井厚 37.7 m; (改成优质页岩段厚度)

优质页岩段 TOC 值: W3 井 TOC 值 3.9%, W2 井 TOC 值 2.76%, W1 井 TOC 值 2.79%, W4 井 TOC 值 3.0%;

硅质含量: W3 井硅质含量 40%, W2 井硅质含量 40.2%, W1 井硅质含量 37.2%, W4 井硅质含量 39.8%。

以上数据表明: 龙马溪组 1 段地层也具有明显的沉积差异, W3 井优质页岩厚度大、品质优, W2 次之, W1、W4 相对较差。精细描述优质页岩分布带, 具有重要的意义。

3.2. 威远向斜龙马溪组页岩气藏地震层序特征

龙 1 段地震相特征: 龙 1 段总体厚 80 米左右, 总体为平行、连续的反射波(图 4)。其变化为: W3-W2 之间连续强反射, W1-W4 之间为连续的弱反射, 但总体变化不大。产层是龙 1-1¹ 段优质页岩笔石段, 只是龙马溪组底部的一套夹层, 厚度只有 5~11 米。精细描述、预测龙 1-1¹ 段优质页岩笔石段, 直接依据龙 1 段的地震反射特征是难以做到的。

尝试用龙马溪组总体特征预测龙 1-1¹ 的沉积相。龙马溪组测井相特征(图 4): 龙马溪整体可划分为三个旋回; 龙一段(S_{11}^1)为明显反旋回, 测井曲线为漏斗形; 龙二段(S_{11}^2) - 龙三段(S_{11}^3)底部岩性差异较小, 整体为正旋回; 龙三段上部为明显多期反旋回, 测井特征为漏斗形。

地震相分析: 龙一段连续稳定、平行反射波, 表明沉积相总体为深水沉积相; 龙二段(S_{11}^2) - 龙三段(S_{11}^3), 由东向西(W2-W4 之间), 发育斜交反射带, 这是一个非常明显的特征, 表明东南为古地理高, 且沉积相较高; 而研究区中部, 即 W2 以西, 其沉积相相对较低。据此地震相可得到结论: 连续、平行的龙 1 段才能成为页岩气藏的分布层段, 且 W2 井以西, 为优质页岩发育带; 龙 2 - 龙 3 段因沉积相较高, 不可能沉积优质页岩;

4. 威远向斜龙马溪组沉积中心形成机理、富集带预测

地化数据表明: W3 井优质页岩厚度大、品质优; W2 次之, W1、W4 相对较差。

地震相特征表明: 连续平行反射的龙一段, 其沉积相较深; 龙二段(S_{11}^2) - 龙三段(S_{11}^3)由东向西发育的斜交反射带, 表明东南为古地理高、且沉积相较高。

基底洼陷-隆起控制了龙 1-1¹ 段优质页岩笔石段的分布。拉平二叠系底, 可见志留系在 W3-W2 之

间有一个低幅度的洼陷(图3、图4); 这一洼陷内, 龙1段的反射为相对强震幅; 在其上方, 龙2段-龙3段发育向洼陷对冲的斜交反射; 表明这个洼陷是志留系的沉积中心。对比志留系沉积洼陷位置, 正对南华系大型洼陷的位置; 而W1-W4正对下方古隆起位置(图2、图3)。

构造形成机理表明: 威远向斜是南华纪洼陷的继承, “自贡低隆”是南华系古隆起的继承(图2)。南华纪洼陷-自贡低隆控制龙马溪的沉积, 还控制了后期构造发育。

由此预测: W3-W2之间的龙马溪1段沉积中心, 志留系洼陷内发育龙1段的优质页岩, 是最佳页岩气藏发育带, 且厚度相对较大。

综上所述, 上覆地层气藏的研究, 需要重视基底结构的研究。基底结构是上覆地层构造、沉积相分布的主要控制因素。

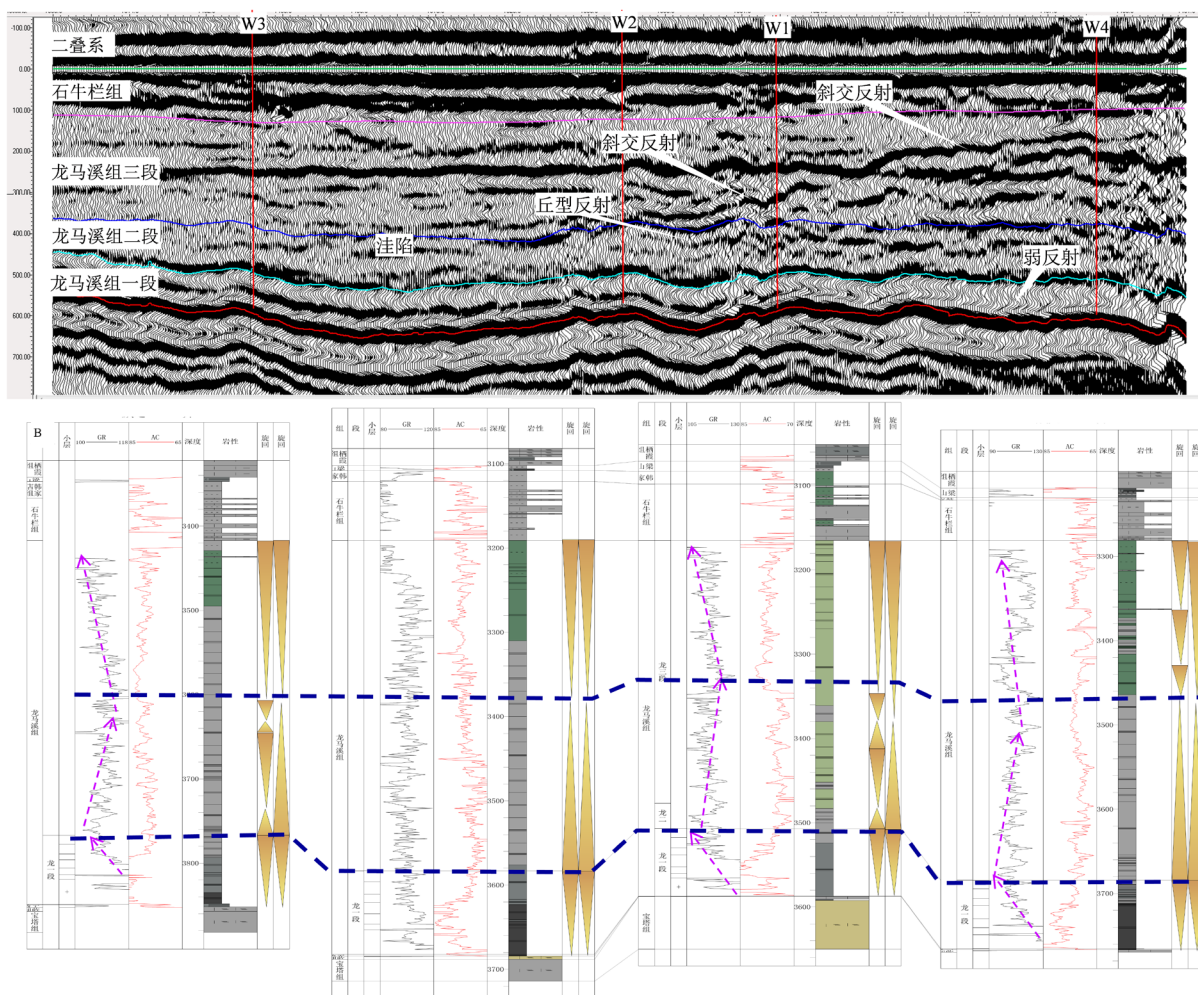


Figure 4. The sequence stratigraphic framework of Longmaxi strata in Weiyuan syncline

图4. 威远向斜志留系龙马溪层序地层格架特征

5. 结论

1) 威远向斜内, 各层构造形态基本相似, 从浅至深构造变化不大。表明构造变形总体上是最后一期, 也即喜山期形成。南华系洼陷-古隆起与上方的威远向斜-“自贡低隆”正好对应, 古洼陷-隆起控制了威远向斜“自贡低隆”的形成和发展。

2) 在古洼陷上方, 志留系发育低幅度洼陷; 该洼陷内龙 1-1¹ 页岩笔石段品质较好、厚度大。依据南华纪古洼陷、古隆起描述龙马溪沉积微相, 据此可以预测优质页岩分布。这一方法可有效弥补地震预测方法的陷阱。

参考文献

- [1] 童亨茂, 蔡东升, 吴永平, 李晓光, 李绪深, 孟令箭. 非均匀变形域中先存构造活动性的判定[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(2): 158-168. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-3080-6>
- [2] 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 等. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J]. 地学前缘, 2009(4): 97-104.
- [3] 钟嘉猷. 实验构造地质学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 201-217.
- [4] Wissing, S.B. and Pfiffner, O.A. (2003) Numerical Models for the Control of Inherited Basin Geometries on Structures and Emplacement of the Klippen Nappe (Swiss Prealps). *Journal of Structural Geology*, **25**, 1213-1227. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00159-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00159-1)
- [5] 汪泽成, 赵文智, 李宗银, 江兴福, 李军. 基底断裂在四川盆地须家河组天然气成藏中的作用[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 541-547. <http://dx.chinadoi.cn/10.3321/j.issn:1000-0747.2008.05.003>
- [6] 王英民, 童崇光, 徐国强, 樊生利. 川中地区基底断裂的发育特征及成因机制[J]. 成都地质学院学报, 1991, 18(3): 52-60.
- [7] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 王红岩, 施振生, 武瑾, 等. 中国页岩气的开发进展、开发潜力及发展前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
- [8] 徐政语, 梁兴, 王维旭, 张介辉, 王希有, 舒红林, 等. 上扬子区页岩气甜点分布控制因素探讨——以上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 35-43. <http://dx.chinadoi.cn/10.3787/j.issn.1000-0976.2016.09.004>
- [9] 金之钧, 胡宗全, 高波, 赵建华. 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10. <http://dx.chinadoi.cn/10.13745/j.esf.2016.01.001>
- [10] 孙莎莎, 苗响, 董大忠, 施振生, 拜文华, 马超, 等. 中、上扬子地区晚奥陶世-早志留世古地理演化及页岩沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1087-1106.
- [11] 王同, 张克银, 熊亮, 史洪亮, 董晓霞, 魏力民, 等. 四川自贡地区五峰组-龙马溪组下段古地貌刻画及其油气意义[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 764-770.
- [12] 魏国齐. 四川盆地构造特征与油气[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 94-174.
- [13] 刘顺. 四川盆地威远背斜的形成时代及形成机制[J]. 成都理工学院学报, 2001(4): 340-343. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1671-9727.2001.04.002>
- [14] 孙玮, 罗志立, 刘树根, 陶晓风, 代寒松. 华南古板块兴凯地裂运动特征及对油气影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 1-8. <http://dx.chinadoi.cn/10.3863/j.issn.1674-5086.2011.05.001>
- [15] Mter Borgh, M., Oldenhuis, R. and Biermann, C. (2011) The Effects of Basement Ramps on Deformation of the Prebetics (Spain): A Combined Field and Analogue Modelling Study. *Tectonophysics*, **502**, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.04.013>
- [16] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156. <http://dx.chinadoi.cn/10.3787/j.issn.1000-0976.2008.02.045>
- [17] 孟志勇. 四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段纵向非均质性及其发育主控因素[J]. 石油天然气地质, 2016, 37(6): 828-846.