

川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩储层地质特征差异研究

龙海岑¹, 李刚权^{2*}, 蓝宝锋³, 吴松²

¹贵州乌江能源集团有限责任公司, 贵州 贵阳

²贵州页岩气勘探开发有限责任公司, 贵州 遵义

³贵州能源产业研究院有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年5月27日; 录用日期: 2022年6月21日; 发布日期: 2022年6月28日

摘要

上奥陶统五峰组 - 下志留统龙马溪组广泛分布于四川、重庆、湖北、贵州等中上扬子地区, 是目前我国页岩气最主要的勘探开发地层。通过对比川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩储层地质背景、地球物理测井及岩心测试结果, 分析了川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩地质特征、源岩品质、物性、测井响应及构造特征的差异及其原因, 探索四川盆地盆内和盆外页岩气有效开发对策。结果表明: 四川盆地五峰组 - 龙马溪组页岩厚度大, 优质厚度达30米, 而盆外地区页岩厚度逐渐减薄。页岩有机质含量以大于1%为主; 涪陵地区有机碳含量最高, 平均达2%以上。正安、涪陵、南川三个区块页岩孔隙度高频为2%~4%, 但正安区块页岩的低频分布主要小于2%, 而涪陵地区页岩孔隙度低频分布为5.5%~7.5%。涪陵地区页岩含气性最高, 解析气分布主频约2 m³/t。正安、凤冈页岩的脆性指数高, 达到60%以上, 可能与陆源碎屑供给有关。地球物理测井响应方面, 四川盆地内部页岩呈现高自然伽马、声波时差大、密度小, 含气量高, 盆外的正安、凤冈地区页岩则呈现电阻率高的特点, 且含气量相对较低。四川盆地内部页岩地层普遍为“背斜”型正向构造, 盆外则多为“向斜型”负向构造形态。盆外页岩地层产状陡, 黔北地区龙马溪页岩地层倾角达20°以上。通过对比分析, 认为盆外页岩气勘探开发面临的主要问题是“效益开发”。“降本增效、提产提效”是四川盆地外部页岩气产业发展的攻关方向。

关键词

四川盆地, 五峰组 - 龙马溪组, 页岩气, 地质特征, 差异分析

Geological Characteristics Difference Study of Wufeng-Longmaxi Shale Formations from Sichuan, Chongqing and Guizhou Regions

Haicen Long¹, Gangquan Li^{2*}, Baofeng Lan³, Song Wu²

*通讯作者。

文章引用: 龙海岑, 李刚权, 蓝宝锋, 吴松. 川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩储层地质特征差异研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(6): 913-924. DOI: 10.12677/ag.2022.126087

¹Guizhou Wujiang Energy Group Co., Ltd., Guiyang Guizhou

²Guizhou Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Zunyi Guizhou

³Research Institute of Guizhou Energy Industry Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: May 27th, 2022; accepted: Jun. 21st, 2022; published: Jun. 28th, 2022

Abstract

The Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation, widely distributed in Sichuan, Chongqing, Hubei, Guizhou and other middle and upper Yangtze regions, is the main shale gas exploration and development strata in China. By comparing the geological background, geophysical and core testing results of Wufeng-Longmaxi shale formation from Sichuan, Chongqing, and Guizhou regions, the geological characteristics, source rock quality, physical properties, logging response, and tectonic characteristics of shales in Wufeng-Longmaxi Formation from these three regions are analyzed. Then the effective development strategies of shales from Sichuan Basin and out of Sichuan Basin are proposed. Results show that the thickness of high-quality Wufeng-Longmaxi Formation in Sichuan Basin is high and up to 30 meters, while the total thickness significantly decreases out of Sichuan Basin. The total organic carbon content of these shales is commonly higher than 1%. Shales in Fuling block have the highest organic carbon content with an average value of being more than 2%. Main porosity in Zheng'an, Fuling and Nanchuan blocks is between 2% and 4%. Many shales in Zheng'an block have porosity less than 2%, while some shales in Fuling block have porosity of about 5.5%~7.5%. Shales in Fuling block have the highest gas content, with the dominant gas content of about 2 m³/t. The brittleness index of Zheng'an and Fenggang shales is higher than 60%, which may be related to the supplement of terrigenous detrital. In terms of geophysical logging responses, shales in Sichuan Basin have high natural gamma ray, large acoustic time difference, low density and high gas content, while shales in Zheng'an and Fenggang areas, outside the basin, have high resistivity and relatively low gas content. Shale formations in the Sichuan Basin generally have positive anticlinal structure, while the structure of shale formations outside Sichuan basin is mostly negative synclinal. Longmaxi shale formation in northern Guizhou region has a dip angle of over 20°. Through comprehensively comparative analysis, it is concluded that the main problem of shales outside Sichuan basin is how to develop shale gas with benefit. Reducing cost and improving production are the key direction for the development of shale gas industry outside of Sichuan Basin.

Keywords

Sichuan Basin, Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Shale Gas, Geological Features, Difference Analysis

Copyright © 2022 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

历经 10 余年的探索与发展, 我国在海相、陆相、海陆过渡相页岩气勘探均取得了突破, 逐步建立了“多层系、多类型、多地区”的页岩气立体式勘探开发格局[1] [2]。2020 年我国页岩气年产量已经超过

200 亿方, 尤其是以四川盆地及其周缘为代表的南方中浅层海相页岩气已经进入规模效益开发阶段。四川盆地及其周缘主要发育四套页岩层系, 即下寒武统牛蹄塘组海相页岩、上奥陶统五峰组 - 下志留统龙马溪组海相页岩、上二叠统龙潭组海陆过渡相页岩和下侏罗统自流井组陆相页岩[3] [4]。上奥陶统五峰组 - 下志留统龙马溪组海相页岩是我国南方最有利的页岩气勘探开发层系。

五峰组 - 龙马溪组页岩地层分布非常广, 从以深水陆棚相沉积环境为主体的四川盆地内部, 一直延伸过渡到浅水陆棚沉积环境的贵州等地区均有分布[5] [6]。以五峰组 - 龙马溪组为目的层系, 中石油在四川盆地内部的长宁、威远、泸州等地区发现了多个大型页岩气田; 中石化在重庆涪陵地区建立了国际页岩气勘探开发示范区, 并逐步开展了南川、綦江等地区的页岩气产能建设。前人对五峰 - 龙马溪组页岩沉积地质特征的研究表明五峰 - 龙马溪组有质页岩受缓慢沉降的稳定海盆、相对较高的海平面、弱 - 半封闭水体和低沉积速率等 4 大因素叠加控制, 但不同探区构造活动、海平面变化、古生产力、沉积速率和古地理环境等沉积主控因素不同[7], 所表现出的在沉积环境及优质页岩厚度、有机地球化学特征、储集物性等页岩储层地质特征存在差异。川南长宁地区深水碳质陆棚相沉积优质页岩 21~31 米, 机碳含量 2.0%~7.12%, 含气量 2.6~6.51 m^3/t 。威远地区还发育半深水钙质陆棚相, 钙质页岩 24~35 米, 总体机碳含量 0.35%~6.44%, 含气量 1.0~3.2 m^3/t [8]。在盆外黔北正安地区五峰 - 龙马溪组有机碳含量为 0.7%~6.5%, 干酪根类型以 I 型为主, 脆性矿物含量 64.1%~86.5%, 平均 79.4%, 总含气量一般大于 1 m^3/t , 最高达 6.5 m^3/t [9]。不难看出, 前人针对五峰 - 龙马溪组在不同地区的页岩储层特征开展了大量的研究工作, 但是缺乏储层特征整体的对比分析, 同时对于储层地球物理测井响应特性及保存条件缺乏定性参数的表征及对比研究。

贵州省近年来在正安、习水、道真等地区的页岩气勘探已取得了重大进展, 多口井试气日产量超过 5 万立方米, 显示了良好的勘探开发前景。但与四川、重庆等四川盆地内部的构造稳定区相比, 黔北地区正安、习水等页岩气区块的五峰组 - 龙马溪组主要位于四川盆地以东至黔中隆起、江南雪峰隆起之间的强烈变形构造带[10] [11]。如何在四川盆地外部的强烈构造变形带取得页岩气勘探开发突破, 是四川盆地外部广泛分布的常压页岩气勘探开发亟需解决的问题。本文通过对比贵州与四川、重庆等典型地区的上奥陶统五峰组 - 下志留统龙马溪组页岩地层, 分析四川盆地内部和外部的五峰组 - 龙马溪组页岩地质特征、储层物性、含气性、保存条件等差异, 进而浅析盆外页岩气勘探前景与方向。

2. 地质特征

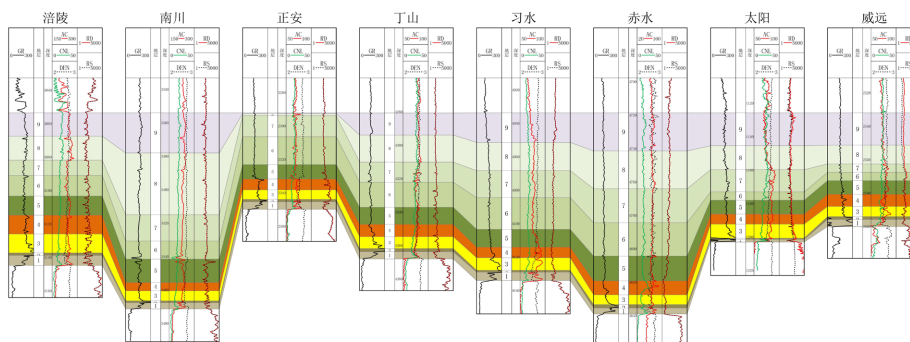
2.1. 沉积环境

四川盆地及其周缘地区的五峰组 - 龙马溪组页岩主要沉积于扬子准地台, 为海相沉积地层[12]。构造运动控制了五峰组 - 龙马溪组页岩地层的沉积和分布。五峰组 - 龙马溪组页岩地层主要分布在北至米伦山 - 大巴山断裂、西至龙门山大断裂、南抵娄山褶皱带。自东向西主要位于丰都 - 涪陵 - 巴县 - 江津 - 合江 - 泸州 - 长宁 - 雷波及周边地区为深水陆棚沉积。贵州德江 - 凤冈 - 绥阳 - 仁怀 - 大关沿线以及四川西部的甘洛、西昌, 重庆北部的邻水、大竹地区为浅水陆棚沉积环境。近年来在黔北绥阳桴焉、凤冈地区的钻井资料分析, 区域龙马溪组笔石变小, 长度变短, 间接反应还原环境的黄铁矿结核也在此类地区少见, 整体处于浅水沉积环境。

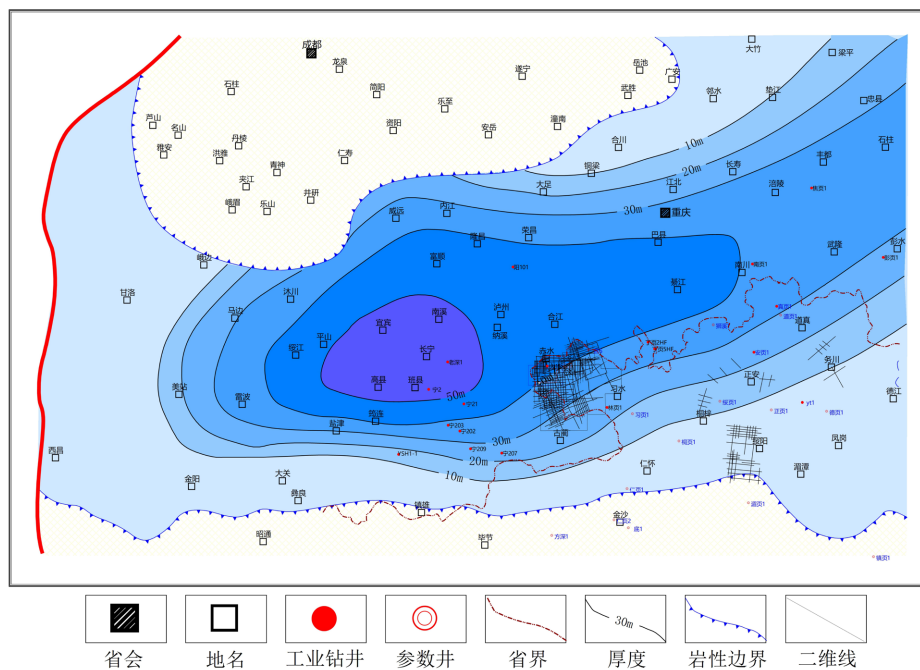
2.2. 地层厚度

上扬子地区五峰组 - 龙马溪组钻井资料丰富, 通过各页岩气田的典型井对比, 页岩地层呈北东 - 南西向展布特征, 沿四川盆地边缘, 涪陵、南川、丁山、赤水、泸州地区的页岩厚度达到 90 米以上(图 1(a)), 其中优质页岩厚度 30~40 米; 泸州地区优质页岩厚度最厚, 最厚达到 50 米左右。盆陆过渡带的正安地区,

页岩厚度减薄至 50 米，优质页岩厚度不足 25 米，优质页岩厚度与叙永地区的太阳气田相当。贵州省境内优质页岩厚度分布特征主要可以分三条线，从道真至赤水沿线的真页 1 井、狮溪 1 井、梓页 1 井、丁页 2 井、林页 3 井、宝源 1 井所钻遇的优质页岩厚度大于 25 米。正安 - 桐梓南部 - 仁怀一带地层厚度 20 米左右，德江 - 凤冈 - 湄潭 - 绥阳地区优质页岩厚度约 15 米(图 1(b))。本次研究发现沿德江 - 凤冈 - 湄潭 - 绥阳一线及以南地区五峰组厚度有明显增厚的趋势，如凤冈地区的 YT1 井五峰组厚度近 10 米，绥阳枫坝地区的露头剖面，测量厚度达到了 15 米左右，与前期五峰组区域认识仅有 3~5 米的认识存在较大差异。



(a) 川渝黔地区五峰组-龙马溪组钻井剖面对比图



(b) 川渝黔地区五峰组-龙马溪组优质页岩厚度分布图

Figure 1. Stratigraphic correlation and thickness distribution of Wufeng-Longmaxi shales in Sichuan, Chongqing, and Guizhou provinces

图 1. 川渝黔地区五峰龙马溪组地层对比与厚度展布图

3. 源岩品质

3.1. 有机碳含量

通研究表明，川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩热演化程度在 2%~3%之间，干酪根类型以 I 型为主，

II₁ 型次之, 平面上热演化程度整体变化较小[13]。有机碳含量是生成油气母岩的一个基础指标, 其大小指示了母岩生成页岩气资源量的大小, 同时页岩气可以以吸附态方式赋存于页岩有机质和黏土颗粒表面, 因此有机碳含量不仅影响了页岩的生烃强度, 同时也影响着页岩中有机质孔隙的发育以及吸附气的含量[14]。通常具有高有机质丰度的含气页岩具有高的生烃潜力以及高的吸附气含量[15]。通过对贵州省正安、赤水, 重庆涪陵、南川、丁山, 以及四川省长宁、泸州、自贡等地区典型井的有机质碳含量分布频率进行对比研究, 结果显示川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩有机碳含量具有较大差异(图 2(a))。正安、丁山(部分位于习水)、泸州、长宁四个区块 25% 以上页岩层段的有机碳含量小于 1%。涪陵、南川区块页岩有机碳含量以大于 2% 为主, 整体反应了涪陵地区有机质含量较高。从频率分布图可以看出, 许多区块都呈现双峰状特征, 这与五峰组 - 龙马溪组页岩层段纵向上存在两性有关, 即底部 20~30 米地层页岩的有机质丰度高, 上部地层页岩有机质丰度低。

3.2. 含气量

目前进入整体勘探评价的区块的五峰组 - 龙马溪组页岩现场解析气量(未含残余、损失气)主要集中于 0.5~3 m³/t, 区域对比则有比较明显的差异。长宁、泸州、涪陵、大足等地区五峰组 - 龙马溪组页岩解析气含量高, 含气频带宽, 大于 1 m³/t 的含气频率达到 60% 以上(图 2(b)), 平均解析气含量大于 1.5 m³/t。解析气含量最高的为涪陵区块页岩, 其解析气量达到 2 m³/t。而正安、丁山、自贡地区页岩的解析气含量相对较低, 解析气含量小于 1 m³/t 的页岩占比达 30% 以上。尤其是正安区块, 含气频带窄, 解析气含量分布范围主要 0~2.5 m³/t, 平均解析气含量仅为 0.98 m³/t。

3.3. 物性

相对常规储层, 页岩储层的孔隙度、渗透率很低。五峰组 - 龙马溪组页岩孔隙度普遍小于 10%, 渗透率则小于 1 mD [16] [17]。根据正安、涪陵、南川、赤水四个区块页岩覆盖孔隙度频率分布(图 2(c)), 正安、涪陵、南川三个区块页岩孔隙度高频在 2%~4% 之间。涪陵区块页岩孔隙度分布频带宽, 低频主要分布在 5.5%~7.5% 的高孔隙度区间, 正安区块页岩孔隙度低频则集中于小于 2%。赤水地区五峰组 - 龙马溪组由于埋深较深, 普遍大于 4500 米, 五峰组 - 龙马溪组孔隙度高频主要集中于 1%~1.5%, 分布频带窄。页岩地层渗透性极差, 正安区块五峰组 - 龙马溪组页岩渗透率主频分布在 0.15~0.2 × 10⁻³ mD 之间(图 2(d)), 涪陵地区分布在 0.3~0.45 × 10⁻³ mD, 但整体不具备规律性, 对比性差。

3.4. 脆性

川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩需要进行大规模的体积改造获得产能。压裂改造效果与页岩地层中脆性矿物含量有关, 根据目前研究成果, 处于浅水陆棚沉积环境的黔北地区五峰组 - 龙马溪组页岩的脆性矿物含量较高, 脆性指数达到 64%~87%, 高于威远区块(脆性指数 37%~70%)和太阳构造(脆性指数 55%~65%)等地区五峰组 - 龙马溪组页岩的脆性指数。黔北地区页岩成分为以长英质为主, 含一定量黏土及少量碳酸盐矿物, 局部黏土矿物较高, 整体可划分为 4 种岩相: 富泥硅质页岩、硅质页岩、硅岩和灰质页岩。黔北地区页岩岩相与焦石坝等地区差异较为明显, 这可能与物源供给和沉积环境变化等因素有关。从四川盆地内部的焦石坝地区到黔北正安、道真等区块, 沉积环境逐渐由深水陆棚过渡到浅水陆棚沉积环境。黔北地区页岩尽管脆性矿物含量高, 但混有陆源碎屑石英, 这与四川盆地内部以生屑石英为主的焦石坝地区龙马溪组优质页岩存在显著区别[18] [19]。对比发现, 五峰 - 龙马溪组整体储层品质与沉积环境具有相关性, 与前期研究认识基本一致。本次研究发现五峰组 - 龙马溪组优质页岩段, 储层品质差异不大, 处于浅水陆棚沉积地区的正安及以南地区, 有机质含量与深水沉积区相当, 脆性指数更高。

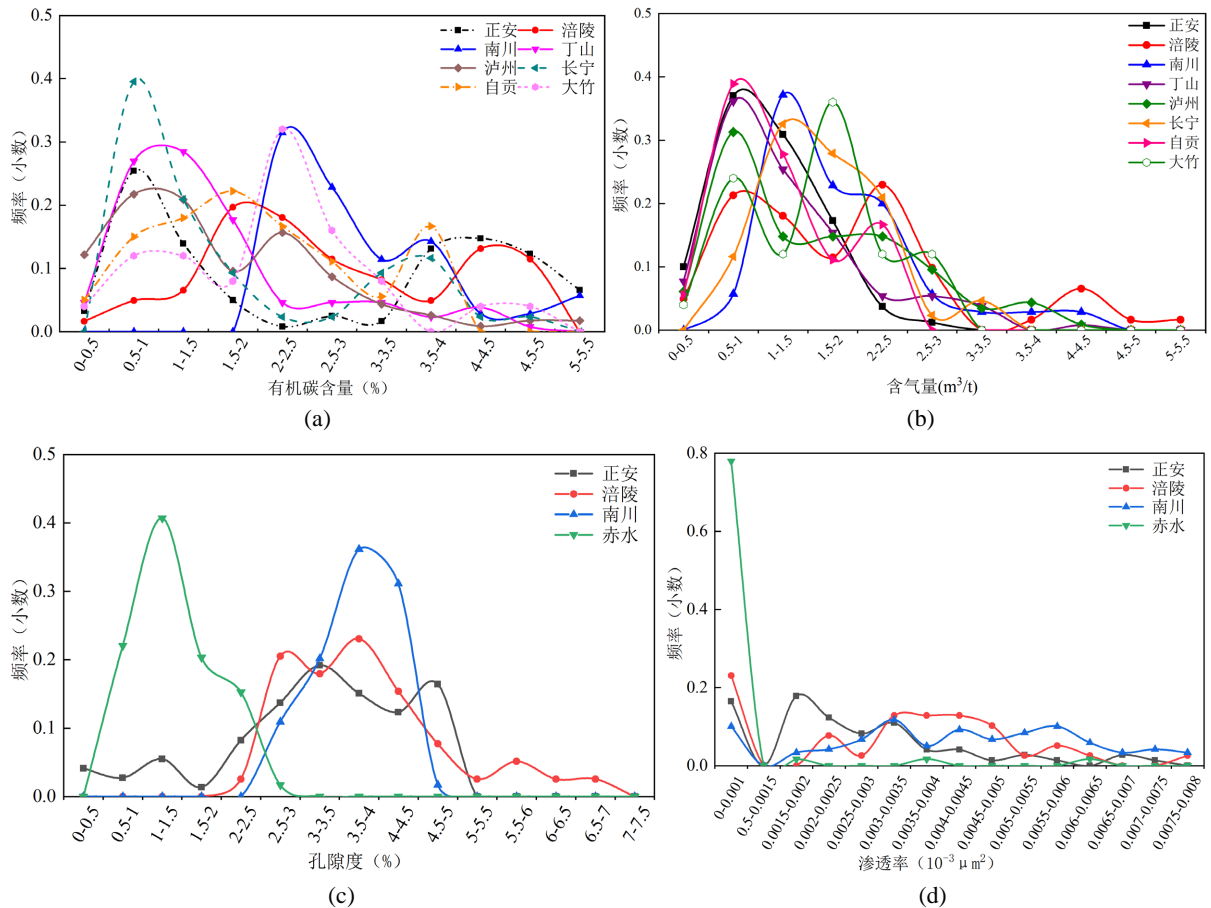


Figure 2. Source-rock quality parameters frequency distribution of Wufeng-Longmaxi shales in Sichuan, Chongqing, and Guizhou provinces (a) Total organic carbon content frequency distribution; (b) Gas content frequency distribution; (c) Porosity frequency distribution; (d) Permeability frequency distribution

图 2. 川渝黔地区烃源岩品质参数频率分布对比图。(a) 有机碳含量频率分布；(b) 含气量频率分布；(c) 孔隙度频率分布；(d) 渗透率频率分布

4. 地球物理特性

地球物理测井可以反映页岩储层沉积环境、储层品质、含气性等特征。优质页岩的地球物理测井具有“高声波时差、高放射性、高电阻率、低密度、低中子”的“三高两低”响应特征[20]。通过系统分析涪陵、南川、正安、凤冈、丁山、习水、赤水、叙永、自贡等地区的页岩声波时差、自然伽马、电性等测井参数响应特征，可以进一步明确五峰组-龙马溪组页岩在四川盆地内部和外部的平面展布规律与差异。

4.1. 声波时差

岩石的声波时差测井主要反应了岩石的物性。同一均值岩性，声波时差越大，物性越好。川渝黔地区五峰组-龙马溪组页岩声波时差在平面和纵向上都呈现了明显的差异性(图 3(a))：在浅水陆棚沉积区，越靠近沉积边缘，页岩储层的声波时差分布越靠近低值区域。位于浅水陆棚沉积边缘的凤冈地区五峰组-龙马溪组页岩声波时差主要分布频带为 60~65 $\mu\text{s}/\text{ft}$ ；位于深水陆棚向浅水陆棚过渡带的正安地区页岩声波时差主要分布在 65~70 $\mu\text{s}/\text{ft}$ ；涪陵地区五峰组-龙马溪组页岩声波时差分布主频最高，达到了 80~85 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。同时，位于深水陆棚沉积环境地区的页岩储层，整体则呈现深度越深，声波时差分布频率向低值区域靠近的整体趋势，这应与岩石受到上覆地层的压实作用有一定关系。

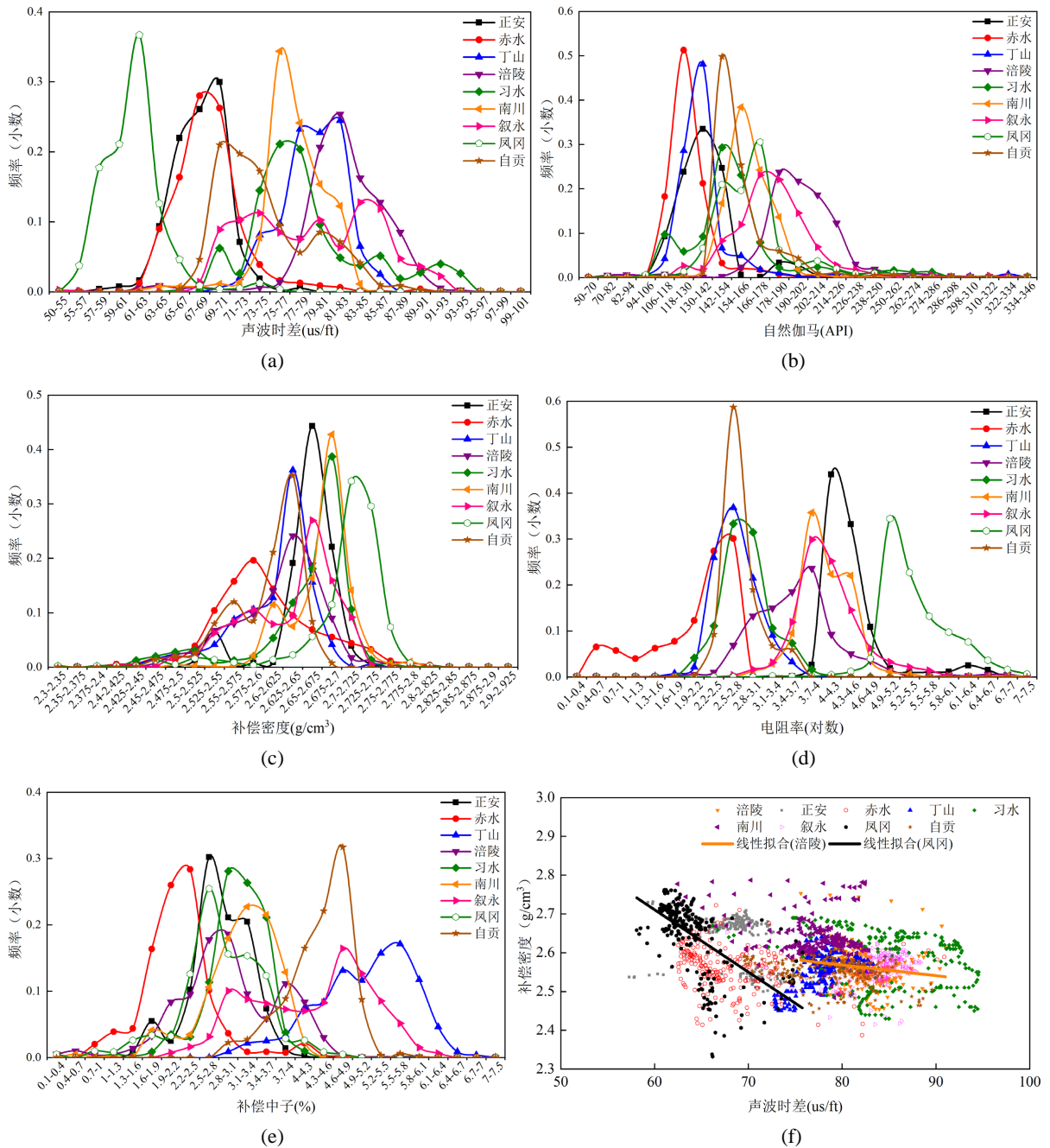


Figure 3. Geophysical parameters frequency distribution and cross plot of Wufeng-Longmaxi shales in Sichuan, Chongqing, and Guizhou provinces. (a) Sonic differential time logging frequency distribution; (b) Natural gamma ray logging frequency distribution; (c) Density frequency distribution; (d) Electrical resistivity frequency distribution; (e) Compensated neutron logging frequency distribution; (f) Cross plot between sonic differential time and density of shales

图 3. 川渝黔地区五峰组-龙马溪组页岩地球物理测井参数频率分布与交会图。(a) 声波时差频率分布; (b) 自然伽马频率分布; (c) 密度频率分布; (d) 电阻率频率分布; (e) 补偿中子频率分布; (f) 声波时差与密度交会图

4.2. 自然伽马

自然伽马能谱测井通过测试铀、钍、钾等放射性核素在衰变时放出的伽马射线能谱来确定岩石中铀、钍、钾的含量，而泥页岩中铀元素的存在使得干酪根的自然伽马值增高，因此自然伽马测井反应了页岩

中有机质含量的多少[21]。目前大量五峰组 - 龙马溪组页岩气钻井实践也证实,高自然伽马与烃源岩品质、产气量呈正相关关系。川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组自然伽马频率分布具有一定的差异性(图 3(b)):赤水、正安、丁山区块页岩自然伽马能谱主频主要分布在 120~150 API 之间,相对较低;习水、南川、自贡区块页岩自然伽马能谱主要分布在 150~190 API;涪陵地区五峰组 - 龙马溪组页岩自然伽马能谱则最高,主频达到了 200 API。根据自然伽马能谱频率分布特征,平面上深水陆棚沉积页岩储层的放射性高,浅水陆棚页岩的自然伽马能谱相对较低。

4.3. 补偿密度

五峰组 - 龙马溪组优质页岩具有低密度特征,有机碳含量越高,页岩密度越低,并且纵向上呈现了由上至下密度值降低的趋势特征。从川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩补偿密度测井的频率分布显示:凤冈地区五峰组 - 龙马溪组页岩密度较高,主要分布频率为 2.75 g/cm^3 (图 3(c));其次为南川、习水区域,分布主频为 $2.66\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$;正安与叙永分布主频相当,主要分布在 2.66 g/cm^3 ;涪陵区块密度分布主频在 2.64 g/cm^3 ,优质页岩特征明显。

4.4. 电阻率

电阻率测井是通过测量地层的电阻率来区分地层岩性以及地层孔隙中的介质类型。五峰组 - 龙马溪组底部优质页岩段基本都呈现了高电阻率特征。页岩电阻率越高,含水饱和度越低,含气性越好。川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组页岩电阻率分布频率结果显示:赤水地区电阻率最低,但通过综合分析,该区钻井岩心放置一段时间后表面填满了白色斑点状物质,其味道具有苦涩的特征,镁离子含量高,岩心含水饱和度高,导致电阻率低,底部优质页岩段电阻率平均 $2.5 \Omega\cdot\text{m}$ (图 3(d))。正安、南川、叙永地区五峰组 - 龙马溪组页岩电阻率分布频率相当,主要分布频率在 $50\sim 100 \Omega\cdot\text{m}$ 。自贡、丁山、习水等区域电阻率分布主频在 $15\sim 25 \Omega\cdot\text{m}$ 。正安与凤冈电阻率相对较高,应与区域陆源碎屑沉积有关。

4.5. 补偿中子

中子测井主要是识别地层岩性和区分油、气、水层。纵向上五峰组 - 龙马溪组优质页岩整体呈低中子测井响应特征。涪陵、南川、正安等区块页岩中子测井均出现“挖掘效应” [22],补偿中子测量范围为 $2\%\sim 15\%$ 。丁山、叙永、自贡地区中子测井值主要分布在 $4\%\sim 6\%$ (图 3(e))。正安、涪陵、习水等区块分布主频在 $2\%\sim 4\%$ 之间。赤水地区中子测量值低,分布主频约为 2% 。

通过以上自然伽马、电性等地球物理测井分布频率,结合声波时差与岩石密度交会图(图 3(f))可以看出:凤冈、赤水、正安的页岩储层地球物理性质与目前页岩气勘探取得突破的涪陵、南川、丁山、习水等地区存在明显差异。

5. 保存条件

5.1. 构造特征

目前四川地区页岩气开发主体位于川南区域,构造上发育两大构造体系,分别为盆内滑脱构造体系和盆缘推覆构造体系[23] [24]。川南地区的泸州 - 赤水复合叠加构造带属盆内滑脱构造体系,该构造带是燕山晚期大娄山向北的挤压,沿寒武系滑脱层向凹陷内传递形成的,发育四排背斜构造,其中太阳 - 大寨构造为第一排构造,长宁北、高木顶为第二排构造,莲花寺、长垣坝、旺隆为第三排构造,桐梓园、纳溪、合江为第四排构造。叙永、长宁、威远等页岩气区块都位于四排构造区域,重庆涪陵地区五峰组 - 龙马溪组构造也属于宽缓背斜。习水北部、丁山、南川、武隆等区块位于大娄山、齐岳山盆陆过度带,

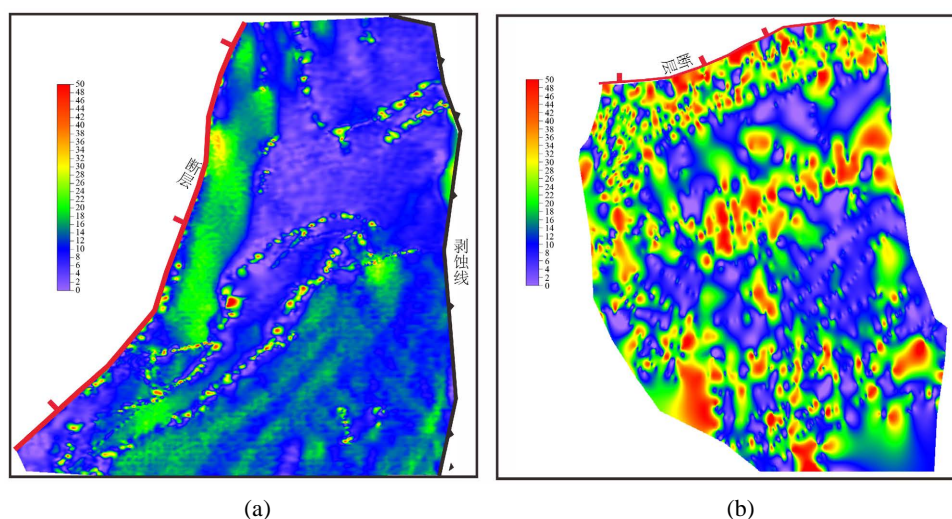
整体呈断鼻、向斜型构造。道真、正安、凤冈等区块位于受到多期构造叠加改造的武陵褶皱带，五峰组-龙马溪组页岩位于褶皱带的残余向斜中，向斜呈北东向、条带状展布。从构造特征分析，大娄山、齐岳山以南地区均为对油气资源保存不利的负向构造；大娄山、齐岳山以北为长轴背斜、宽缓背斜等对油气资源保存有利的正向构造。本次收集的钻井资料中，处于负向构造的桐梓狮溪、绥阳桴焉、凤冈土溪地区的钻井 SX1、FD1、YT1 井，三口井钻探的五峰组-龙马溪组均位于残余向斜内，构造上都属于武陵褶皱带，距离区域的 II 级断裂遵义-桐梓、遵义凤冈大断裂不足 10 千米，尤其是 SX1、YT1 井，距离大断裂仅 5 千米左右，但均见到了较好的页岩气显示，现场解析总含气量约 $4 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

5.2. 地层埋深

国内页岩气目前勘探开发的主体埋深在 3500 米以浅区域，并且页岩气埋深越深，越有利于页岩气的保存。根据目前勘探开发实践，同一区块内，埋深与产量存在一定的正相关性，但从四川、重庆、贵州等地区的页岩气勘探开发情况看，埋藏较浅的叙永、昭通区块主要以浅层页岩气勘探开发为主，并取得了明显突破。贵州省桐梓县北部的 SX1 井，五峰组-龙马溪组页岩埋深约 1300 米，浸水试验见线状气泡快速冒出，见喷泉状、串珠状气泡逸出，并伴有“嘶嘶”声响，出气处密集分布于整个岩心表面，含气性较高。川渝地区在大于 3500 米的深层依然存在巨大的页岩气资源，近年来四川盆地勘探方向也逐渐转向深层页岩气。根据贵州省赤水地区深层页岩气勘探情况，深层页岩气勘探不但面临成本问题，同时也需要防止地层含水和有机质碳化问题[25]。

5.3. 地层倾角

研究表明地层倾角越小，越有利于页岩气保存。四川盆地内部的页岩气区受到的构造作用有限，整体地层产状呈宽缓形态，地层倾角普遍小于 15 度。地层产状较陡的区域主要位于云南昭通-四川西南部的叙永-贵州北部正安等沿线地区。应用三维地震资料，提取桐梓 SX、叙永 YS、正安 AC 三个区块的地层倾角(图 4(a)~(c))。虽然受到西部的遵义-桐梓大断裂影响，桐梓 SX 区块五峰组-龙马溪组地层仍比较宽缓，平均地层倾角仅 12 度，主体为 10~15 度(图 4(d))。叙永地区的 YS 区块位于大娄山北侧，属于盆缘推覆构造体系，地层倾角较陡，平均地层倾角约 16 度。而位于武陵褶皱带内的正安 AC 区块，为典型的“条带状”残余向斜代表，地层产状陡，平均地层倾角 23 度。相比较盆地内的涪陵、南川、长宁等地区，四川盆地盆缘以南地区的页岩气保存条件相对较差。



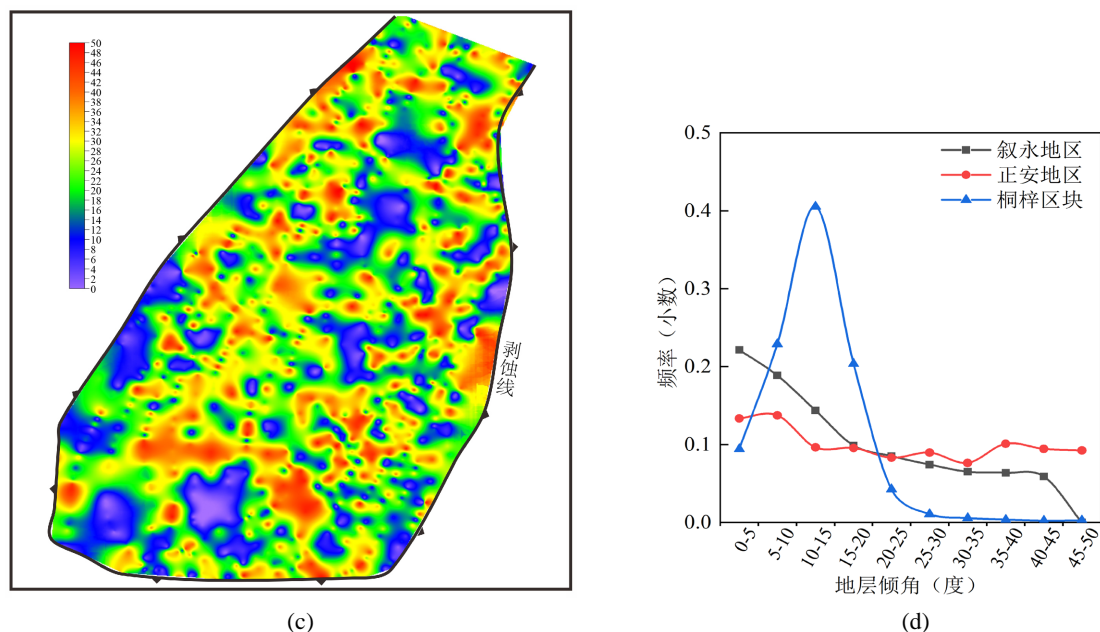


Figure 4. 3D earthquake inclination and frequency distribution of Wufeng-Longmaxi shales in Sichuan, Chongqing, and Guizhou provinces. (a) 3D earthquake inclination of SX block in Tongzi area; (b) 3D earthquake inclination of YS block in Xuyong area; (c) 3D earthquake inclination of AC block in Zheng'an area; (d) inclination of shale formation from Tongzi, Xuyong, and Zheng'an areas

图 4. 川渝黔地区五峰组 - 龙马溪组三维地震倾角分布与频率统计图。(a) 桐梓 SX 区块三维地震倾角提取图; (b) 叙永 YS 区块三维地震倾角提取图; (c) 正安 AC 区块三维地震倾角提取图; (d) 桐梓、叙永、正安页岩地层倾角频率分布

综合沉积环境、储层品质、构造背景、保存条件等方面可以发现，四川盆地盆缘以南地区的五峰组 - 龙马溪组页岩整体比盆地以北地区差。与前期认识也存在差异性，黔北地区五峰组大部分地区处于深水沉积环境，五峰组 - 龙马溪组优质页岩段有机质含量与深水区相当，脆性矿物含量高，电阻率高，构造、断裂、埋深等构造因素对页岩气保存的影响不具有普遍性。盆地以南地区(以贵州为主)页岩气勘探开发面临的主要问题是如何实现“效益开发”。对此笔者结合盆缘以南地区的勘探现状，认为要实现此类区域的效益开发，应围绕“降本增效、提产提效”两个方面加强攻关研究。“降本增效”方面如适当加长水平段长度，分次压裂，并向浅层页岩气等方向攻关。“提产提效”方面，深化五峰组 - 龙马溪组储层、应力研究，向“大排量、高砂比”压裂模式等方向攻关。

6. 结论

1) 四川盆地内部的川南、重庆等地区的五峰组 - 龙马溪组页岩整体处于深水陆棚沉积环境，优质页岩厚度大，平均 30 米以上，而四川盆地外部优质页岩向南逐渐变薄，如黔北地区整体处于浅水陆棚沉积，优质页岩厚度仅为 20 米左右。

2) 根据有机质丰度、储层物性、含气性等参数频率分布规律，涪陵地区五峰组 - 龙马溪组页岩源岩品质最优，其次是长宁、丁山、习水等地区，贵州省赤水、丁山、正安地区则较差。可压性方面，贵州省内的正安、凤冈地区脆性指数高，可能与贵州省北部的深水 - 浅水陆棚过渡带和浅水陆棚带沉积环境下的陆源碎屑沉积有关。

3) 地球物理测井响应方面，声波时差、自然伽马、岩石密度与所处沉积环境相关。靠近深水陆棚沉积区，页岩声波时差和自然伽马越大，岩石密度越小。五峰组 - 龙马溪组勘探开发主体区内的电阻率主

要分布在 15~100 $\Omega\cdot\text{m}$, 凤冈地区五峰组 - 龙马溪组页岩地层电阻率较高, 优质页岩段电阻率 150~250 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间。

4) 四川盆地内构造较为宽缓, 盆内长宁、泸州、涪陵等地区五峰组 - 龙马溪组地层构造整体呈“长轴背斜”形态, 为有利页岩气保存的正向构造; 盆地以南和盆地外部则受到滑脱、推覆的多期构造运动叠加改造, 多为“断鼻”、“条带状残余向斜”的负向构造, 此类构造区域地层产状普遍较陡, 不利于页岩气保存。

5) 四川盆地盆缘以南地区的五峰组 - 龙马溪组页岩地层无论是从沉积环境、储层品质、构造背景、保存条件等参数都比盆地以北地区差。盆外地区(以贵州为主)页岩气勘探开发面临的主要问题是“效益开发”。四川盆地外部页岩气产业发展应加强“降本增效、提产提效”等方面的研究攻关, 贵州省黔北地区断裂发育、埋深较浅的向斜型负向构造具备一定勘探潜力。

基金项目

贵州省科技重大专项: 贵州省页岩气效益开发关键技术及工程试验(黔科合战略找矿[2022]ZD005); 贵州省科技支撑项目: 复杂构造区页岩气水平井压裂工艺研究(黔科合支撑[2022]一般 230); 贵州省科技支撑项目: 常压页岩气排水采气技术及装备研发([2022]一般 010); 贵州省科技支撑项目: 黔北向斜型常压页岩气富集条件评价([2021]一般 405)。

参考文献

- [1] 郭彤楼, 何希鹏, 曾萍, 等. 复杂构造区页岩气藏地质特征与效益开发建议——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(12): 1490-1500.
- [2] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007.
- [3] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- [4] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16.
- [5] 汤济广, 汪凯明, 秦德超, 等. 川东南南川地区构造变形与页岩气富集[J]. 地质科技通报, 2021, 40(5): 11-21.
- [6] 梁峰, 张琴, 熊小林, 等. 四川盆地及周缘五峰组-龙马溪组富有机质页岩沉积演化模式[J]. 沉积学报, 2019, 37(4): 847-857.
- [7] 王玉满, 李新景, 董大忠, 等. 上扬子地区五峰组-龙马溪组优质页岩沉积主控因素[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 9-20.
- [8] 蒲泊伶, 董大忠, 耳闯, 等. 川南地区龙马溪组页岩有利储层发育特征及其影响因素[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 41-47.
- [9] 张福, 黄艺, 蓝宝锋, 等. 正安地区五峰组-龙马溪组页岩储层特征及控制因素[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 49-56.
- [10] 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 等. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 1-12.
- [11] 张浩然, 姜华, 陈志勇, 等. 四川盆地及周缘地区加里东运动幕次研究现状综述[J]. 地质科技通报, 2020, 39(5): 118-126.
- [12] 苗凤彬, 彭中勤, 汪宗欣, 等. 雪峰隆起西缘下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征及主控因素[J]. 地质科技通报, 2020, 39(2): 31-42.
- [13] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 黄金亮. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.
- [14] Yang, F., Ning, Z.F., Zhang, R., et al. (2015) Investigations on the Methane Sorption Capacity of Marine Shales from Sichuan Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, **146**, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.05.009>
- [15] Xu, S., Hao, F., Shu, Z.G., et al. (2020) Pore Structures of Different Types of Shales and Shale Gas Exploration of the Ordovician Wufeng and Silurian Longmaxi Successions in the Eastern Sichuan Basin, South China. *Journal of Asian*

Earth Sciences, **193**, Article ID: 104271. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104271>

- [16] Yang, F., Xu, S., Hao, F., *et al.* (2019) Petrophysical Characteristics of Shales with Different Lithofacies in Jiaoshiaba Area, Sichuan Basin, China: Implications for Shale Gas Accumulation Mechanism. *Marine and Petroleum Geology*, **109**, 394-407. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.06.028>
- [17] 胡德高, 杨峰, 舒志国, 等. 川南地区龙马溪页岩气体滑脱效应实验研究[J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 36-41.
- [18] 李琪琪, 蓝宝锋, 李刚权, 等. 黔中隆起北缘五峰-龙马溪组页岩元素地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学, 2021, 46(9): 3172-3188.
- [19] 张福, 黄艺, 戴岑璞, 等. 黔北地区五峰组-龙马溪组页岩储层特征分析[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(3): 94-101.
- [20] 曾棒, 刘小平, 刘国勇, 等. 陆相泥页岩层系岩相测井识别与预测: 以南堡凹陷拾场次洼为例[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 69-79.
- [21] 李延钧, 张烈辉, 冯媛媛, 等. 页岩有机碳含量测井评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 169-175.
- [22] 谭茂金. 有机页岩测井岩石物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- [23] Li, S.J., Li, Y.Q., He, Z.L., *et al.* (2020) Differential Deformation on Two Sides of Qiyueshan Fault along the Eastern Margin of Sichuan Basin, China, and Its Influence on Shale Gas Preservation. *Marine and Petroleum Geology*, **121**, Article ID: 104602. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104602>
- [24] Liu, R., Hao, F., Engelder, T., *et al.* (2021) Influence of Tectonic Exhumation on Porosity of Wufeng-Longmaxi Shale in the Fuling Gas Field of the Eastern Sichuan Basin, China. *AAPG*, **104**, 939-959. <https://doi.org/10.1306/08161918071>
- [25] 侯宇光, 张坤朋, 何生, 等. 南方下古生界海相页岩极低电阻率成因及其地质意义[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 80-89.