

四川盆地泸州地区五峰组 - 龙马溪组超压成因及演化过程

周志鹏*, 蒋前前, 梁静怡, 匡龙伟, 谢金旭, 陈卓越

成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都

收稿日期: 2025年4月3日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月9日

摘要

四川盆地泸州地区作为川南页岩气勘探开发主力区块, 五峰组 - 龙马溪组页岩气藏普遍发育强超压, 且超压特征与页岩气高产密切相关。前人研究多聚焦于超压主控因素定性分析, 但对该区多因素复合增压机制及定量贡献缺乏系统研究。文章通过多方法结合, 揭示泸州地区超压成因机制及演化规律, 为页岩气成藏与保存评价提供科学依据。通过测井曲线组合、Bowers图版识别泸州地区为复合型成因超压; 对裂缝脉体开展薄片观察、阴极发光、显微测温及激光拉曼光谱测试, 恢复甲烷包裹体捕获压力为82.76~108.99 MPa; 结合所收集的三轴主应力数据, 利用构造挤压增压模型, 计算构造挤压增压贡献量为4.3~11.5 MPa; 基于钻井基本数据及有机质成熟度等关键边界参数, 利用盆地数值模拟方法, 恢复泸州地区五峰组 - 龙马溪组埋藏 - 热演化史与压力演化历史, 综合分析认为泸州地区为“早期有限聚集 - 中晚期持续富集 - 晚期构造保存型”超压演化模式。

关键词

五峰组 - 龙马溪组, 超压成因, 生烃膨胀, 构造挤压, 流体包裹体, 泸州地区

Genesis and Evolutionary Process of Overpressure in the Wufeng-Longmaxi Formations, Luzhou Area, Sichuan Basin

Zhipeng Zhou*, Qianqian Jiang, Jingyi Liang, Longwei Kuang, Jinxu Xie, Zhuoyue Chen

School of Energy, Chengdu University of Technology (Shale Gas Modern Industry Institute), Chengdu Sichuan

Received: Apr. 3rd, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 9th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 周志鹏, 蒋前前, 梁静怡, 匡龙伟, 谢金旭, 陈卓越. 四川盆地泸州地区五峰组-龙马溪组超压成因及演化过程[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 614-625. DOI: 10.12677/ag.2025.155060

Abstract

The Luzhou area in the Sichuan Basin, as a key block for shale gas exploration and development in southern Sichuan, exhibits widespread strong overpressure in the Wufeng-Longmaxi shale gas reservoirs, with overpressure characteristics closely linked to high gas production. Previous studies primarily focused on qualitative analysis of overpressure controls, but systematic research on the multi-factor composite overpressure mechanisms and their quantitative contributions remains lacking. This study integrates multiple methods to unravel the genetic mechanisms and evolutionary patterns of overpressure in the Luzhou area, providing scientific insights for shale gas accumulation and preservation assessment. By combining well-log curves and Bowers plots, the overpressure in the Luzhou area was identified as having a composite origin. Thin-section observations, cathodoluminescence, microthermometry, and laser Raman spectroscopy of fracture veins revealed methane inclusion entrapment pressures of 82.76~108.99 MPa. Combined with triaxial principal stress data, tectonic compression overpressure contributions of 4.3~11.5 MPa were calculated using a tectonic compression overpressure model. Basin numerical modeling, constrained by drilling data and key boundary parameters (e.g., organic matter maturity), reconstructed the burial-thermal evolution history and pressure evolution history of the Wufeng-Longmaxi Formation. Comprehensive analysis suggests an overpressure evolution model characterized by “limited early accumulation, sustained mid-late enrichment, and late-stage tectonic preservation” in the Luzhou area.

Keywords

Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Overpressure Genesis, Hydrocarbon Generation Expansion, Structural Compression, Fluid Inclusions, Luzhou Area

Copyright © 2025 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

中国页岩气研究和勘探开发从起步到初见成效已历经 20 年，勘探实践表明，四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩气产量与压力系数具有较明显的正相关关系，高压系数是页岩气井高产的必要条件之一，绝大部分已发现工业页岩气井均位于压力系数大于 1.2 的超压区[1]。前人认为压力系数是保存条件的综合判别指标，压力系数的高低直接反映储层内流体的充足程度和气藏的封闭条件。并且储层流体长期持续超压对于页岩气层孔隙度保持具有重要作用[2]。由实钻资料来看，泸州地区五峰组—龙马溪组广泛发育强超压，与此同时，泸州页岩气田年产量 $24.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组总年产量的 9.83%。因此，探究泸州地区五峰组—龙马溪组超压成因及其演化过程对该区页岩气成藏研究具有重要意义。

前人研究认为，页岩气藏超压主要有 5 种成因类型：不均衡压实、流体膨胀、成岩作用、构造挤压、压力传递。其中流体膨胀形成的超压包括生烃作用、油裂解气及水热膨胀等[3]。四川盆地五峰组—龙马溪组地层年代老，埋藏深度大，经历多期次构造运动，各地区保存条件差异大，现今压力特征受多种因素影响。然而，大部分学者仅对超压成因进行定性分析，判断出超压主控因素，忽略了其他地质作用在超压形成中的贡献。

为此，本文以泸州地区关键钻井为研究对象，通过分析其测井响应特征初步判断其超压成因，再对

其裂缝脉体进行薄片观察、阴极发光、流体包裹体显微测温及激光拉曼光谱等分析测试, 结合盆地数值模拟方法, 揭示了该区五峰组-龙马溪组页岩气藏超压的形成机制及各成因贡献占比。

2. 地质背景

四川盆地隶属于扬子准台地的次级构造单元,四川盆地是一个多期旋回的海陆叠合盆地,主要经历加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动及喜马拉雅多期构造运动,形成了复杂的构造变形特征及沉积环境。在构造上,被华蓥山背斜与龙泉山背斜将四川盆地划分为川西凹陷区、川北低平褶皱区、川东高陡褶皱区、川南低陡褶皱带以及川中平缓褶皱带 5 个构造区[4]。

泸州地区属于川南低陡构造带，处于川中古隆起南斜坡与川东南拗褶之间，区域构造稳定。主要构造大多形成于喜山期大规模挤压造山环境下，以低陡背斜夹宽缓向斜为特征，广泛发育逆断层。东北部靠近构造转换带，褶皱强度较低，发育多个低陡背斜带，向斜构造宽缓，向斜-斜坡所占面积在背斜所占面积 20 倍以上。

泸州地区是川南地区深层页岩气的主力勘探与开发区块。川南地区在五峰-龙马溪期由陆到海依次发育滨岸-陆棚相沉积单元, 泸州地区处于陆棚静水、缺氧、还原环境的沉积相带之内, 沉积厚度普遍介于 500~650 m, 远高于长宁、威远区块的五峰组-龙马溪组沉积厚度(190~450 m) [5]。龙马溪组自下而上可划分为龙一段和龙二段, 其中龙一段包括下部的龙一₁亚段和上部的龙一₂亚段, 主要发育黑色、灰黑色薄层状页岩或块状页岩(图 1)。五峰组与上覆龙马溪组整合接触, 主要发育黑色页岩。其中, 五峰组和龙一₁亚段为主要产气层段[6]。

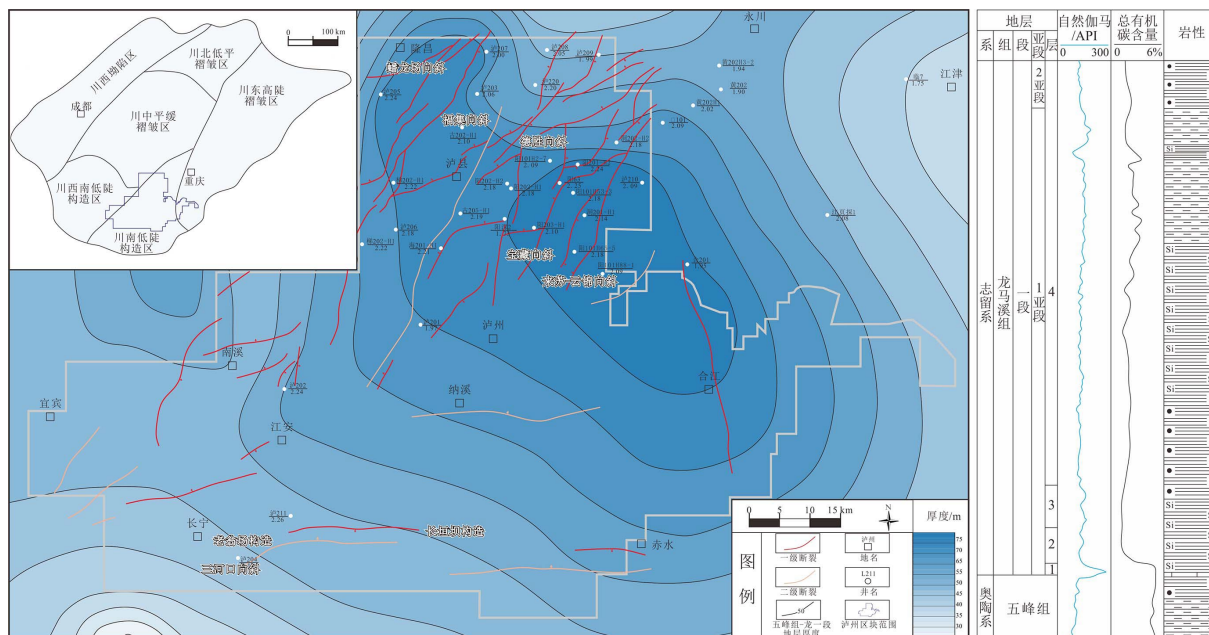


Figure 1. Geological diagrams of the research area
图 1. 研究区地质简图

3. 现今地层压力展布情况

四川盆地内五峰组-龙马溪组地层压力系数相对较高,大部分地区为地层压力系数大于 1.2 的超压区,富顺、永川、泸州等部分地区的地层压力系数超过 2.0,系川南地区龙马溪组超压中心之一。

笔者通过收集泸州及相邻地区压力实测资料与钻井泥浆密度,使用克里金插值法,绘制出泸州地区五峰组-龙马溪组现今地层压力展布图(图 2)。由图可知,泸州地区五峰组-龙马溪组压力系数处于 1.7~2.3 之间,表现为强超压-极强超压,存在 Y201 井、L205 井至 T202 井一带及 L211 井至 L202 井一带三个超压中心,并且由 L220 井沿 NE-SW 方向至 L211 井,地层压力系数都在 2.1 以上。

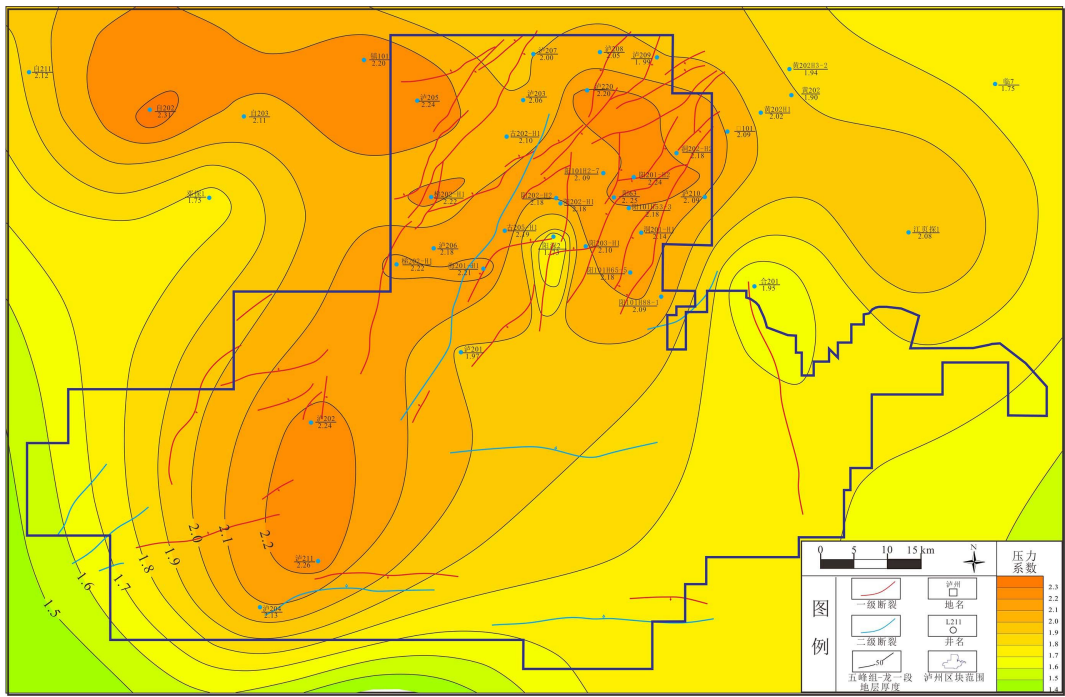


Figure 2. Current formation pressure coefficient contour map of the Wufeng formation-Longmaxi formation in the Luzhou area

图 2. 泸州地区五峰组-龙马溪组现今地层压力系数等值线图

4. 超压成因识别

沉积盆地超压成因主要分为五种类型,包括不均衡压实增压、流体膨胀增压、成岩作用增压、构造挤压增压及压力传递增压,其中流体膨胀增压又可分为生烃作用、油裂解气及水热膨胀增压等[3]。前人认为泸州地区龙马溪组超压主要为原油裂解成因。泸州区块五峰组-龙马溪组晚白垩世以来至少经历了两期三幕构造变形,早期受到近 N-S 向挤压,晚期又受到晚期受到近 E-W 向和 N-W 向联合挤压[7]。并且五峰组沉积末期,沉积环境由深水陆棚转化为浅水陆棚,陆源碎屑供给量以及沉积速率显著增加[8]。因此笔者认为构造挤压作用及不均衡压实作用等均会对泸州地区龙马溪组压力演化过程产生一定程度的影响,并通过多种方法分别计算出各种超压成因的贡献量。

4.1. 测井响应特征

自 20 世纪 90 年代中期,尤其是进入 21 世纪以来,超压成因研究在国际上已经取得了许多重要进展,主要体现在超压成因识别方法上,如测井曲线组合法[9]、鲍尔斯法[10]、孔隙度对比法[11]等。以上方法均基于测井曲线对于不同成因超压的响应特征差异。在测井序列中,通常使用声波时差测井(AC)、密度测井(DEN)、中子测井(CNL)以及电阻率测井(RT)进行超压成因分析。其中,密度与中子反应孔隙度的变化,而声波时差与电阻率反应孔隙度及孔隙结构的变化。

通过泸州地区关键钻井测井曲线组合(图 3)分析,发现泸州地区龙马溪组超压为复合成因。以 L211 井为例,该井在龙马溪组超压段,声波时差增大及密度增大,而电阻率减小。电阻率在生烃膨胀及构造挤压增压时会出现增大趋势,在不均衡压实引起的超压下表现为减小趋势,因此判断该井龙马溪组存在不均衡压实作用。而不均衡压实作用的直接证据却是孔隙度增加与密度减小,反倒是构造挤压作用会使地层密度增大,故判断构造挤压作用对该区域超压有一定贡献。

Bowers 图版法密度-声波速度交会图中不均衡压实引起的超压会位于加载曲线上,而流体膨胀造成的超压则位于卸载曲线上,Tingay 等[1]认为传递型超压也位于卸载曲线上。以 L211 井为例,利用泸州地区正常压实地层声波速度及密度,拟合出该区加载曲线:

$$V = 1524 + 1759.90 \times (\rho - 1.03)^{1.43} \quad (1)$$

其中, V 为声波速度, m/s ; ρ 为地层密度, g/cm^3 , 1524 为有效应力接近于 0 时的海水波速, $R^2 = 0.63$ 。

由此可以看出,五峰组-龙马溪组声波速度-密度交会图对应 Bowers 图版的复合成因,其中生烃膨胀、构造挤压及不均衡压实作用均有一定贡献。

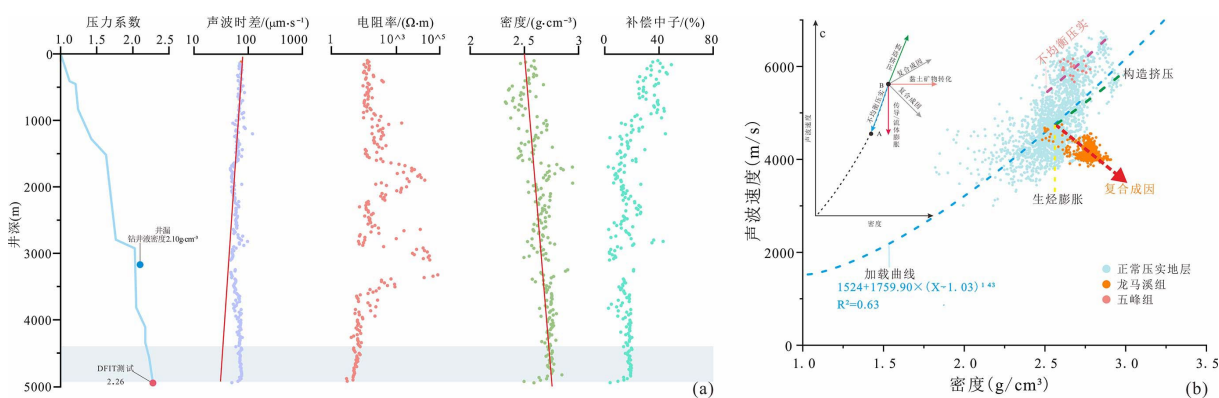


Figure 3. Logging response characteristics of well L211

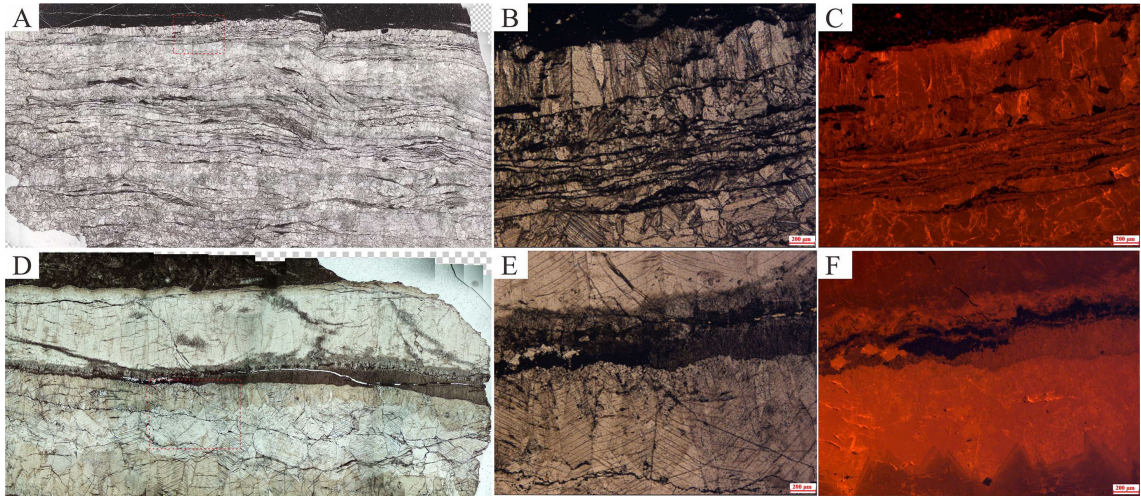
图 3. L211 井测井响应特征

4.2. 生烃膨胀增压

前人研究表明川南地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组超压,生烃作用尤其是原油裂解作用贡献率最大。同时,泸州地区五峰组-龙马溪组优质页岩层段具有高有机质含量,高成熟度($R_o > 2.50\%$)及厚度大(30~60 m)的特点,游离气平均含量 $8.5 \text{ m}^3/\text{t}$ [12]。上述测井响应特征分析也表明生烃膨胀作用对泸州地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组超压存在贡献。流体包裹体可以对流体类型、成分、充注期次、温度和盐度等参数进行表征,进而恢复流体充注时的古压力[13]。为了明确生烃膨胀作用的贡献率,本文基于岩相学观察,通过流体包裹体显微测温及激光拉曼光谱分析,得出流体包裹体捕获压力。

本文对泸州地区关键钻井进行取样,L211 井样品取自五峰组一缝宽 1.5 cm 的方解石脉,该样品自围岩向内发育纤维状方解石-细晶方解石-中晶方解石,细-中晶方解石成堆叠状,且样品纹层十分发育,指示了该裂缝可能经历多期次开启、闭合[2]。在 L203 井龙马溪组一顺层方解石脉中,同样发现充填有纤维状方解石。前人研究表明,纤维状方解石的形成与地层超压环境有较强关联性(图 4)。

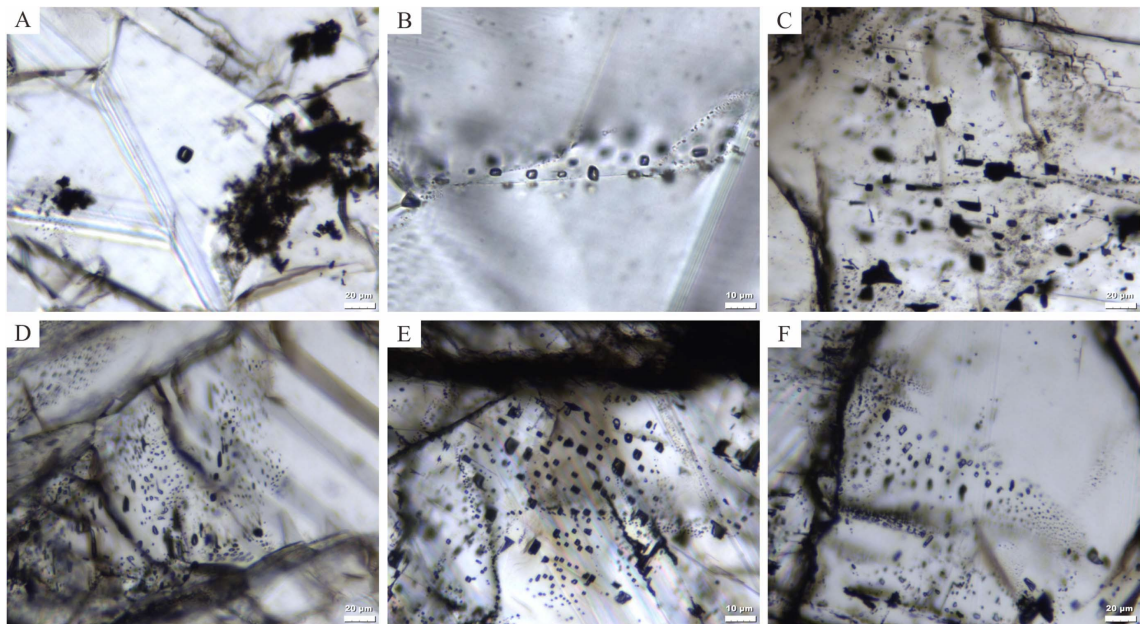
在上述样品相同位置磨制双面抛光的包裹体薄片,通过显微观察,在方解石与石英中发现大量甲烷包裹体及其伴生的气液两相盐水包裹体组合与单偏光下黑色不透明状的沥青包裹体组合。上述流体包裹体组合多呈群状分布,少数呈孤立状或串珠状分布(图 5)。



(A) 黑色页岩中的水平缝，缝宽 1.5 cm，方解石全充填，纹层发育，五峰组，L211 井，4926.04 m；(B) 脉体中发育纤维状方解石、细 - 中晶堆叠状方解石，纹层发育，薄片拼接照片，五峰组，L211 井，4926.04 m；(C) 纤维状方解石及中 - 粗晶堆叠状方解石，五峰组，L211 井，4926.04 m；(D) 图片 C 的阴极发光照片，纤维状方解石发红色阴极光，细晶方解石发暗红色阴极光；(E) 灰黑色页岩中的水平缝，被方解石充填，龙马溪组，L203 井，3812.56 m；(F) 脉体中发育纤维状方解石、栉壳状方解石、中 - 粗晶方解石，薄片拼接照片，龙马溪组，L203 井，3812.56 m；(G) 板柱状方解石，龙马溪组，L203 井，3812.56 m；(H) 图片 G 的阴极发光照片，板柱状方解石阴极光颜色相较于中粗晶方解石明显较暗。

Figure 4. Petrographic characteristics of Wufeng formation-Longmaxi formation samples in the Luzhou area

图 4. 泸州地区五峰组 - 龙马溪组样品岩石学特征



(A) 中晶方解石中孤立分布的甲烷包裹体，50×，龙马溪组，L204 井，3828.37 m；(B) 中晶方解石中串珠状分布的甲烷包裹体，100×，龙马溪组，L204 井，3828.37 m；(C) 叶片状方解石中群状分布的沥青包裹体，50×，龙马溪组，Y101H91-4 井，4113.60 m；(D) 纤维状方解石中群状分布的甲烷包裹体，五峰组，100×，L203 井，3815.44 m；(E) 中粗晶方解石中群状分布的甲烷包裹体，五峰组，100×，L211 井，4956.19 m；(F) 中晶方解石中群状分布的甲烷包裹体及伴生的气液两相盐包裹体，五峰组，50×，L211 井，4956.19 m。

Figure 5. Microscopic features of fluid inclusions in Wufeng formation-Longmaxi formation samples from the Luzhou area

图 5. 泸州地区五峰组 - 龙马溪组样品流体包裹体显微特征

由于在利用流体包裹体组合均一温度反应古流体活动时期的地层温度的过程中, 受实验人员所选择测试的包裹体的均一温度影响较大, 观测过程中将该期流体活动所捕获的所有包裹体均进行测试又是不太可能的, 并且方解石中两相盐水包裹体体积较小, 部分包裹体均一过程观测不准, 为此笔者对各期矿物中两相盐水流体包裹体均一温度进行频率统计与正态分布检验。笔者在流体包裹体显微观察的基础之上, 测定 L211 井脉体样品的各期方解石中盐水包裹体的均一温度。细晶方解石中捕获的两相盐水包裹体均一温度范围为 104.8℃~152.7℃, 纤维方解石中捕获的两相盐水包裹体均一温度范围为 140.1℃~243.6℃, 中晶方解石中捕获的两相盐水包裹体均一温度范围为 184.6℃~245.2℃。对其进行正态分布检验, 发现 L211 井五峰组 - 龙马溪组流体包裹体可划分为 3 期, 第一期流体活动中捕获的两相盐水包裹体附近未见烃类包裹体, 其均一温度 95% 置信区间为 115.2℃~132.4℃; 第二期与第三期包裹体均与气相烃类包裹体共生, 均一温度置信区间分别为 161.1℃~187.8℃、197.0℃~215.6℃。而在纤维状方解石与中晶方解石中均观测到多个均一温度高于 230℃ 的两相盐水包裹体, 表明泸州地区五峰组 - 龙马溪组曾受热液影响(图 6)。

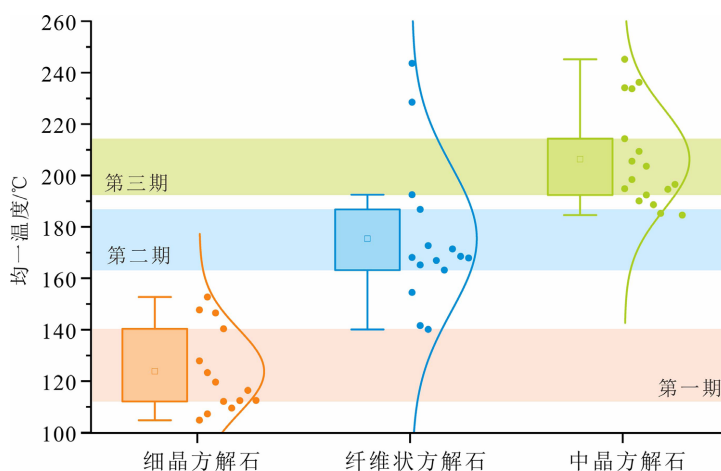


Figure 6. Box plot of homogenization temperature of two-phase saline fluid inclusions in vein samples from Wufeng formation-longmaxi formation in well L211

图 6. L211 井五峰组 - 龙马溪组脉体样品两相盐水包裹体均一温度箱形图

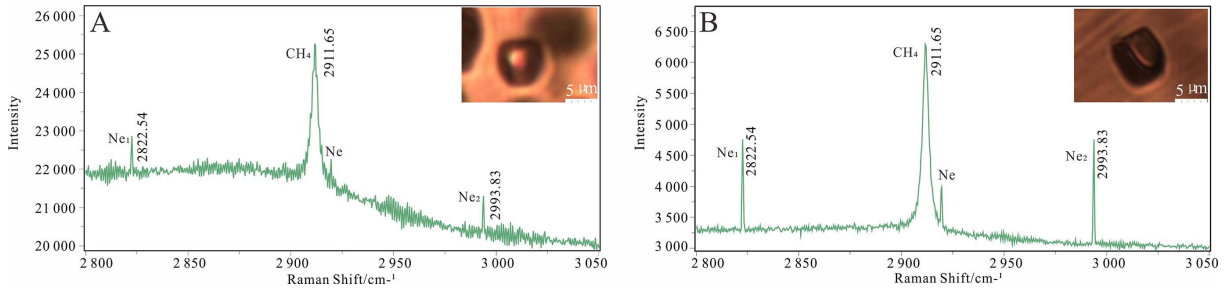
近年来, 激光拉曼光谱实验被学者广泛用于恢复流体包裹体内压。在激光拉曼光谱中 Δv 的数值与入射光的波数无关, 仅取决于分子本身固有的振动频率与转动能级的结构, 而分子间相互作用引起的振动模式的改变会受到温度、压力(密度)等因素的影响, 因此可以通过测定包裹体激光拉曼位移来恢复流体包裹体捕获压力。

对于同样初始压力的 CH_4 气体, 不同实验室测得的拉曼位移初始值不同, 但任何压力下的拉曼位移相对初始值的差值是一定的。针对该情况, Lu 等根据实验结果拟合出甲烷含量在 90% 以上的甲烷包裹体拉曼散射峰 ν_1 位移与甲烷包裹体密度 ρ 间良好的线性关系[14]:

$$\rho = -5.17331 \times 10^{-5} D^3 + 5.53081 \times 10^{-4} D^2 - 3.51387 \times 10^{-2} D \quad (2)$$

其中: ρ 为甲烷包裹体密度, g/cm^3 ; $D = \nu_1 - \nu_0$; ν_1 是氙灯校正后的实测甲烷包裹体的甲烷拉曼散射峰; ν_0 为当压力接近于 0 时的甲烷包裹体的甲烷拉曼散射峰, ν_0 主要受实验室校正方法的影响, 不同实验室 ν_0 的取值不同, 本文 ν 值采用南京大学“内生金属矿床成矿机制研究”国家重点实验室, 其值为 2917.96 cm^{-1} 。

激光拉曼光谱分析均在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, 采用英国 Renishaw 公司生产的 RM2000 显微激光拉曼光谱仪, 激光波长为 532 nm, 物镜为 100 倍, 使用 1800 光栅。并在实验开始前使用标准硅片对仪器进行校准, 甲烷包裹体激光拉曼光谱采集过程中同时采集氦灯激光拉曼光谱, 利用氦灯激光拉曼光谱标准峰 Ne_1 和 Ne_2 对甲烷包裹体的激光拉曼光谱进行校正, 采集时间 100 s 左右(图 7)。



(A) 板柱状方解石中纯甲烷包裹体激光拉曼峰位移为 2911.65 cm^{-1} , Y101H91 井, 4175.87 m; (B) 中晶方解石中纯甲烷包裹体激光拉曼峰位移为 2911.65 cm^{-1} , L211 井, 4956.19 m。

Figure 7. Laser Raman spectra of CH_4 inclusions in veins from key wells in the Luzhou area

图 7. 泸州地区关键钻井脉体中甲烷包裹体激光拉曼光谱

由于包裹体组分越复杂, 对各组分进行精确测定就会越难, 并且由于在进行流体包裹体研究的过程中, 应选择满足均一捕获、封闭体系、等容体系三个特点的流体包裹体才能保证数据有效性, 本文中所有用于恢复古流体压力的均为高纯度单组分甲烷包裹体。

本文利用 Duan 等建立的适用于超临界 CH_4 体系的状态方程[15], 计算方解石中高密度甲烷包裹体的捕获压力:

$$Z = \frac{PV}{RT} = \frac{P_r V_r}{T_r} = 1 + \frac{B}{V_r} + \frac{C}{V_r^2} + \frac{D}{V_r^4} + \frac{E}{V_r^5} + \frac{F}{V_r^2} \left(\beta + \frac{\gamma}{V_r^2} \right) e^{\frac{\gamma}{V_r^2}} \quad (3)$$

$$B = a_1 + \frac{a_2}{T_r^2} + \frac{a_3}{T_r^3} \quad (4)$$

$$C = a_4 + \frac{a_5}{T_r^2} + \frac{a_6}{T_r^3} \quad (5)$$

$$D = a_7 + \frac{a_8}{T_r^2} + \frac{a_9}{T_r^3} \quad (6)$$

$$E = a_{10} + \frac{a_{11}}{T_r^2} + \frac{a_{12}}{T_r^3} \quad (7)$$

$$F = \frac{\alpha}{T_r^3} \quad (8)$$

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (9)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (10)$$

$$V_r = \frac{V}{V_c} \tag{11}$$

$$V_c = \frac{RT_c}{P_c} \tag{12}$$

式中, P 为压力, bar; T 为温度, K; R 为气体常数, $R = 0.08314467 \text{ bar} \cdot \text{dm}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$; V 为摩尔体积, dm^3/mol ; Z 为压缩因子; P_r 、 T_r 代表对比压力和对比温度, 量纲均是 1; P_c 、 T_c 表示临界压力(46 bar)、临界温度(190.4 K);

$a_1 = 0.0872553928$; $a_2 = -0.752599476$; $a_3 = 0.375419887$; $a_4 = 0.01072 \ 91342$; $a_5 = 0.0054962636$; $a_6 = -0.0184772802$; $a_7 = 0.000318993183$; $a_8 = 0.000211079375$; $a_9 = 0.0000201682801$; $a_{10} = -0.0000165606189$; $a_{11} = 0.000119614546$; $a_{12} = -0.000108087289$; $\alpha = 0.0448262295$; $\beta = 0.75397$; $\gamma = 0.077167$ 。

基于上述方法计算出泸州地区 L211 井方解石脉体中甲烷包裹体密度, 再结合甲烷包裹体同期共生的气-液两相盐水包裹体的均一温度, 恢复出高密度甲烷包裹体捕获压力为 82.76~108.99 MPa (表 1)。

Table 1. Key Parameters and results for calculating the trapping pressure of CH₄ inclusions in calcite veins from the Luzhou area

表 1. 泸州地区方解石脉中甲烷包裹体捕获压力计算关键参数及结果

编号	激光拉曼位移 (cm^{-1})	密度 (g/cm^3)	均一温度 ($^{\circ}\text{C}$)	捕获压力 (MPa)
L211-1	2911.65	0.23	208	82.76
L211-2	2911.65	0.23	192	83.79
L211-3	2910.61	0.27	232	108.99
L211-4	2911.56	0.24	194	84.14

4.3. 构造挤压增压

川南泸州地区经历多期构造活动和构造叠加, 古构造应力场复杂。加里东早期-印支早期, 泸州区块主要处于抬升剥蚀与伸展背景, 印支中-晚期, 来自江南雪峰山活动的 NW 向远程挤压应力, 在川东地区形成泸州古隆起, 晚侏罗世-早白垩世, 中国东部处于太平洋板块向西俯冲至欧亚板块的大地构造背景之下, 四川盆地及周缘表现为燕山期强烈褶皱变形期及陆内挤压造山期, 川南泸州地区受到 NW 向挤压作用, 燕山期构造运动对泸州地区改造最大。

前人基于构造压实作用, 建立了实际地层条件下构造挤压引起流体增压的定量评价模型[15]:

$$\Delta p = \xi(\sigma_1 - S) \tag{13}$$

式中, Δp 为构造挤压增压量, MPa; ξ 为封闭系数, 无量纲; σ_1 为水平最大主应力, MPa; S 为上覆负荷, MPa。

由于页岩在沉积时便具有层理结构, 因此页岩气的扩散和运移也具有方向性, 页岩的垂向自封闭性显著好于侧向自封闭性。而页岩气的侧向自封闭性与页岩所受到的上覆压力密切相关: 当页岩地层的埋深不断增加时, 页岩所受的上覆压力也随之增加, 此时页岩的侧向渗透率会出现明显的下降。有效压力从 0 MPa 升到 40 MPa 的过程中, 页岩的侧向渗透率下降了两个数量级[16][17]。泸州地区五峰组-龙马溪组现今埋深普遍大于 3500 m, 垂向应力普遍大于 80 MPa, 并且在泸州地区关键钻井岩心观察段高角度

裂缝发育程度低，裂缝开度小、沿伸长度短，并通过下文盆地数值模拟发现，泸州地区自沉积开始直至今今，地层压力系数始终呈现增加趋势，认为五峰组 - 龙马溪组页岩自封闭性良好，可近似看做封闭体系，因此，将封闭系数 ξ 取值为 1。

前人对泸州地区五峰组 - 龙马溪组应力场做了大量研究[18]，泸州地区水平最大主应力在 94.5~114.7 MPa 之间，垂向主应力在 89.8~109.1 MPa 之间。基于前人数据，利用上述计算结果显示，泸州地区构造挤压增压量在 4.3~11.5 MPa 之间(表 2)，超压贡献量约在 10%~20%之间。

Table 2. Calculation results of structural compression overpressure contribution in the Luzhou area
表 2. 泸州地区构造挤压增压贡献量计算结果

区块	井号	三向主应力(MPa)			ΔT
		水平最大	水平最小	垂向	
荔枝滩构造	L201	101.1	87.2	94.4	6.7
海潮构造	L202	114.7	93.8	108.4	6.3
福集向斜	L203H57-3	102.6	89.7	95.5	7.1
	L207	94.5	83.6	89.8	4.7
德胜向斜	Y101H4-4	112.6	98.7	103.6	9.0
	Y101H53-3	111.8	95.5	106.5	5.3
宝藏向斜	Y101H56-1	115.8	100.0	106.7	9.1
	Y101H65-5	106.4	94.2	102.1	4.3
来苏 - 云锦向斜	Y101H91-4	113.5	98.9	108.9	4.6
	L210	113.8	98.4	109.1	4.7
老翁场构造	L204	111.3	95.9	99.8	11.5

注：钻井三向主应力数据自姜振学等，2023 [18]。

5. 流体压力演化过程

笔者以钻井基础数据和实测有机质成熟度等关键边界参数为约束(表 3)，利用 Basinmod 盆地数值模拟软件，反演泸州地区五峰组 - 龙马溪组地层压力演化历史，结果显示：泸州地区五峰组 - 龙马溪组页岩有机质在晚二叠世开始进入大量生油阶段，与此同时地层超压开始形成；在持续埋藏过程中，有机质持续热演化，压力逐渐聚集，多期流体矿物均捕获烃类包裹体；直至晚白垩世燕山期构造抬升，压力逐渐释放，但因为在此期间，高角度穿层裂缝发育较少，且抬升幅度不大，又受到构造挤压增压作用影响，压力释放程度有限，直至今今，地层压力仍为极强超压。分析研究区页岩封闭性整体较好，因此页岩气持续富集并被有效保存，可归纳为早期有限聚集 - 中晚期持续富集 - 晚期保存超压型气藏(图 8)。

Table 3. The key boundary parameters and model selection in basin numerical simulation
表 3. 盆地数值模拟关键边界参数及模型选取

盆地数值模拟关键边界条件				
深度(m)	TOC (%)	Ro (%)	井底温度(℃)	压力系数
4402~4931	3.02	3.50	136.2	2.26
模型选取情况				
压实模型	渗透率模型	热演化模型	热流模型	
Fluid flow	Modified Kozeny-Carman	Efficiency Method VR	Transient Heat Flow	

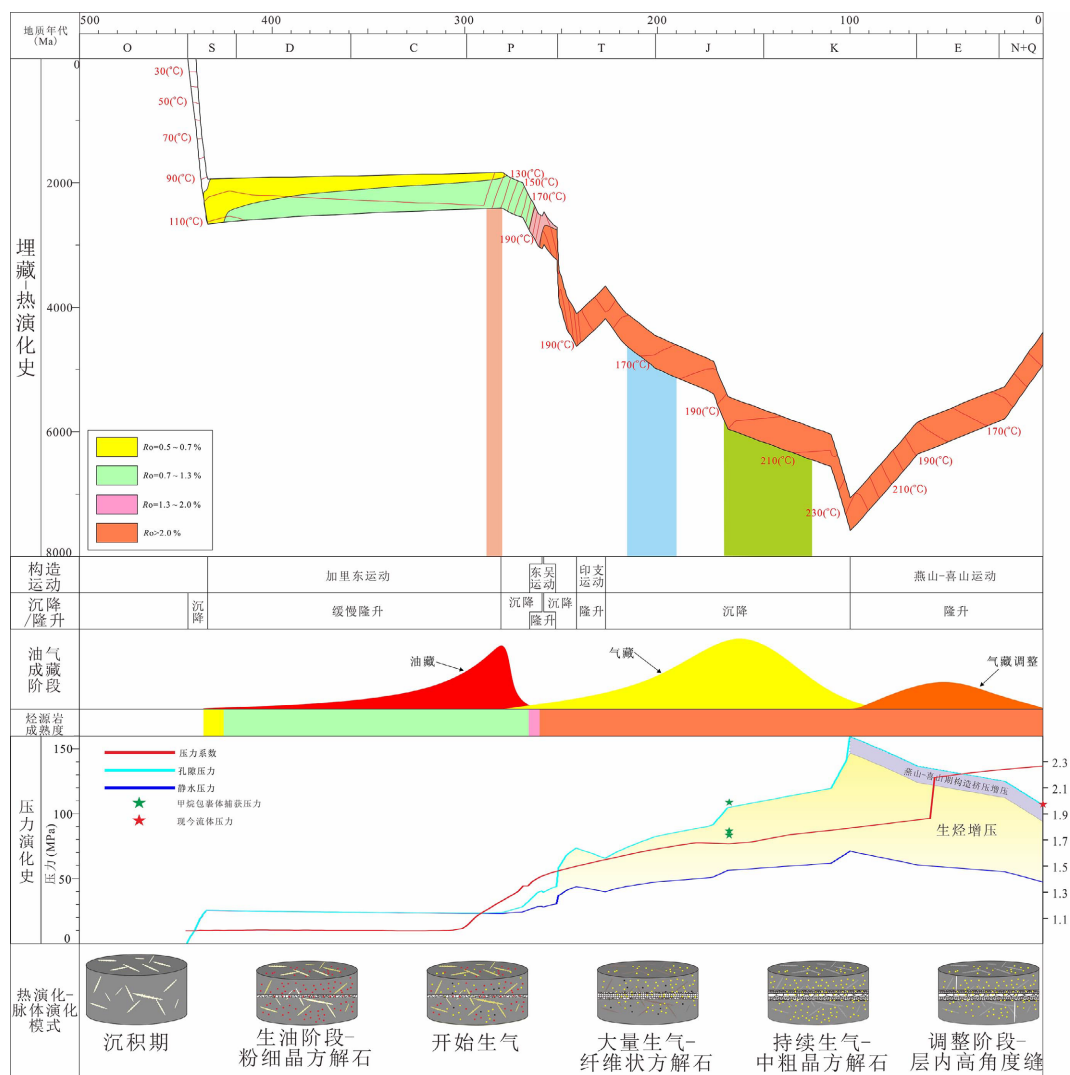


Figure 8. Pressure evolution and shale gas accumulation-modification processes of the Wufeng formations-Longmaxi formations in the Luzhou area

图 8. 泸州地区五峰组 - 龙马溪组压力演化过程及页岩气聚集 - 调整过程

6. 结论

- 1) 四川盆地泸州地区五峰组 - 龙马溪组普遍发育强超压 - 极强超压, 存在 Y201 井一带、L205 井至 T202 井一带及 L211 井至 L202 井一带三个超压中心。
- 2) 泸州地区五峰组 - 龙马溪组为复合成因型超压, 其中生烃增压贡献率达 80%以上, 叠合燕山期 - 喜山期构造挤压增压 4.3~11.5 MPa, 贡献率在 10%~20%之间。
- 3) 泸州地区五峰组 - 龙马溪组在晚二叠世伴随有机质大量生油开始形成超压, 晚白垩世燕山 - 喜山期构造抬升, 压力逐渐释放, 表现为早期有限聚集 - 中晚期持续富集 - 晚期保存超压型气藏。

参考文献

- [1] 周文, 徐浩, 余谦, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组与筇竹寺组页岩含气性差异及成因[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(5): 18-25.
- [2] 姜鹏飞, 吴建发, 朱逸青, 等. 四川盆地海相页岩气富集条件及勘探开发有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 91-

109.

- [3] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 973-998.
- [4] 李跃纲, 周安富, 谢伟, 等. 四川盆地南部泸州地区五峰组-龙一 1 亚段页岩岩相划分及储层发育主控因素[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 112-123.
- [5] 邱晨, 闫建平, 钟光海, 等. 四川盆地泸州地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩沉积微相划分及测井识别[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 117-130.
- [6] 唐令, 宋岩, 赵志刚, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气藏超压成因及演化规律[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 37-53.
- [7] 罗超, 李金玺, 李智武, 等. 四川盆地泸州区块构造变形特征及形成过程[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 665-673.
- [8] 杨雪, 石学文, 朱逸青, 等. 四川盆地南部泸州地区凯迪阶-埃隆阶深水页岩沉积演化与有机质富集[J]. 石油学报, 2022, 43(4): 469-482.
- [9] Fertl, W.H. (1976) Abnormal Formation Pressures: Implications to Exploration, Drilling, and Production of Oil and Gas Resources. Elsevier Science Publisher Co.
- [10] Bowers, G.L. (1995) Pore Pressure Estimation from Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms Besides Undercompaction. *SPE Drilling & Completion*, **10**, 89-95. <https://doi.org/10.2118/27488-PA>
- [11] Tingay, M.R.P., Hillis, R.R., Swarbrick, R.E., Morley, C.K. and Damit, A.R. (2009) Origin of Overpressure and Pore-Pressure Prediction in the Baram Province, Brunei. *AAPG Bulletin*, **93**, 51-74. <https://doi.org/10.1306/08080808016>
- [12] 邹晓艳, 李贤庆, 王元, 等. 川南地区五峰组-龙马溪组深层页岩储层特征和含气性[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(4): 654-665.
- [13] 高键, 何生, 易积正. 焦石坝页岩气田中高密度甲烷包裹体的发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 472-480.
- [14] Lu, W., Chou, I., Burruss, R.C. and Song, Y. (2007) A Unified Equation for Calculating Methane Vapor Pressures in the CH₄-H₂O System with Measured Raman Shifts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**, 3969-3978. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.06.004>
- [15] Duan, Z., Møller, N. and Weare, J.H. (1992) An Equation of State for the CH₄-CO₂-H₂O System: I. Pure Systems from 0 to 1000°C and 0 to 8000 Bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, 2605-2617. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90347-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90347-1)
- [16] 张凤奇, 王震亮, 钟红利, 等. 沉积盆地主要超压成因机制识别模式及贡献[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1151-1158.
- [17] 郭旭升, 胡东风, 俞凌杰, 等. 页岩自封闭性与页岩气保存的微观机理研究[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 821-831.
- [18] 姜振学, 梁志凯, 申颖浩, 等川南泸州地区页岩气甜点地质工程一体化关键要素耦合关系及攻关方向[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 110-129.