

四川盆地资中—威远地区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏演化过程

李海¹, 赵文韬¹, 刘文磊¹, 李其鑫¹, 唐梓俊^{2,3}, 范青青^{2,3}, 刘达东^{2,3*}, 赵帅^{2,3}, 姜振学^{2,3}, 唐相路^{2,3}

1 中国石油西南油气田分公司蜀南气矿, 泸州 646000

2 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

3 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

* 通信作者, liudd@cup.edu.cn

收稿日期: 2025-02-20; 修回日期: 2025-04-27

国家自然科学基金(42472185)、中国石油西南油气田分公司蜀南气矿科研项目(XNS-蜀南矿JS2023-539)、中国石油西南油气田分公司开发事业部科研项目(2024D104-01-07) 联合资助

摘要 四川盆地下寒武统筇竹寺组页岩气资源潜力大, 在德阳—安岳裂陷槽取得了巨大勘探突破。然而, 多期构造背景下, 页岩气成藏过程复杂, 制约了页岩气富集区带优选和高效勘探开发。本论文以德阳—安岳裂陷槽资中—威远地区筇竹寺组典型页岩气藏为研究对象, 通过裂缝脉体岩相学观察、流体包裹体测温、激光拉曼分析和盆地模拟等方法, 明确了资中—威远地区筇竹寺组页岩气成藏演化过程及其差异。研究结果表明, 资中—威远地区寒武系筇竹寺组页岩主要发育三期裂缝脉体, 第Ⅰ期脉体形成于加里东运动晚期(ca.420–405 Ma), 脉体中捕获了大量原生沥青包裹体, 表明该时期处于生油高峰阶段; 第Ⅱ期脉体形成于印支运动时期(ca.235–215 Ma), 脉体中捕获了原生沥青包裹体和原生甲烷包裹体, 表明该时期页岩处于高一过成熟阶段; 第Ⅲ期脉体形成于燕山—喜山期气藏保存调整阶段, 脉体中含大量原生甲烷包裹体。威远和资中地区脉体分别形成于晚白垩世(ca.75–60 Ma)和始新世(ca.45–35 Ma)。威远地区处于裂陷槽缘, 燕山期抬升较槽内资中地区要早约 10 Ma, 故脉体形成时间更早。同时, 槽内资中地区较槽缘威远地区发育更好的底板地层(麦地坪组), 形成良好的气体封存箱。另外, 资中地区位于槽内斜坡带, 其断层和裂缝发育程度较威远背斜地区要较弱。多种因素共同导致了槽内资中地区较槽缘威远地区筇竹寺组整体含气性更好。

关键词 四川盆地; 德阳—安岳裂陷槽; 流体包裹体; 页岩气; 成藏演化; 筇竹寺组

中图分类号: P618.13; TE122

Hydrocarbon evolution of the Cambrian Qiongzhusi shale in the Zizhong-Weiyuan Region, Sichuan Basin

LI Hai¹, ZHAO Wentao¹, LIU Wenlei¹, LI Qixin¹, TANG Zijun^{2,3}, FAN Qingqing^{2,3}, LIU Dadong^{2,3}, ZHAO Shuai^{2,3}, JIANG Zhenxue^{2,3}, TANG Xianglu^{2,3}

引用格式: 李海, 赵文韬, 刘文磊, 李其鑫, 唐梓俊, 范青青, 刘达东, 赵帅, 姜振学, 唐相路. 四川盆地资中—威远地区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏演化过程. 石油科学通报, 2025, 10(03): 460–477

LI Hai, ZHAO Wentao, LIU Wenlei, LI Qixin, TANG Zijun, FAN Qingqing, LIU Dadong, ZHAO Shuai, JIANG Zhenxue, TANG Xianglu. Hydrocarbon evolution of the Cambrian Qiongzhusi shale in the Zizhong-Weiyuan Region, Sichuan Basin. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(03): 460–477. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.013

1 *Shu'nan Gas-mine Field, Southwest Oil & Gas Field Branch Company of PetroChina, Luzhou 646000, China*

2 *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*

3 *Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*

Received: 2025-02-20; Revised: 2025-04-27

Abstract The Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin exhibits significant shale gas resource potential, with major exploration breakthroughs achieved in the Deyang-Anyue rift sag. However, the complex hydrocarbon accumulation processes under multi-phase tectonic activities have constrained the optimization of shale gas enrichment zones and efficient exploration and development. This study focuses on typical Qiongzhusi Formation shale gas reservoirs in the Zizhong-Weiyuan area of the Deyang-Anyue Rift Sag. Through petrographic observations of fracture veins, fluid inclusion thermometry, laser Raman analysis, and basin modeling, the evolutionary processes and differences in shale gas accumulation in the Zizhong-Weiyuan area were elucidated. Results reveal three distinct stages of fracture vein development in the Cambrian Qiongzhusi shale: Stage I veins formed during the late Caledonian movement (ca.420~405 Ma), containing abundant primary bitumen inclusions indicative of peak oil generation; Stage II veins developed during the Indosinian movement (ca.235~215 Ma), characterized by both primary bitumen and methane inclusions reflecting high-to-over mature shale conditions; Stage III veins formed during the Yanshanian-Himalayan reservoir preservation and adjustment stage, predominantly hosting primary methane inclusions. The Weiyuan and Zizhong areas exhibit vein formation during the Late Cretaceous (ca.75~60 Ma) and Eocene (ca.45~35 Ma), respectively. This may due to that the Weiyuan area is situated in the aulacogen margin, whereas the Zizhong area is located in the inner zone of aulacogen. Therefore, the Weiyuan area began to uplift ~10 Ma before the Zizhong area during the Yanshanian orogeny. Additionally, the Zizhong area benefits from superior basal sealing by the Maidiping Formation, forming an effective gas containment system. Its location on the intra-sag slope belt features less developed faults and fractures compared to the Weiyuan anticlinal region. These combined factors contribute to the overall superior gas-bearing characteristics of the Qiongzhusi Formation in the intra-sag Zizhong area relative to the sag-margin Weiyuan area.

Keywords Sichuan Basin; Deyang-Anyue rift trough; fluid inclusions; shale gas; accumulation evolution; Qiongzhusi Formation

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.013

0 引言

四川盆地页岩气资源潜力大,是我国页岩气勘探开发的主战场^[1-3]。盆地内发育寒武系、志留系、二叠系等多套富有机质页岩层系,其中上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组已实现了商业开发,年产气量超250亿m³^[4-5]。作为四川盆地最主要的页岩层系之一,下寒武统筇竹寺组有机质丰度高、累积厚度大、分布范围广,同样具备巨大的页岩气勘探潜力。然而,筇竹寺组早期页岩气勘探效果不佳,多口钻井呈现低产或不产气现象^[6-8]。近年来,中石油和中石化相继在资中、威远、乐山等地区筇竹寺组页岩气勘探取得了重大突破,在Z201井、ZY2井、JY3井试气分别获得了73.88万m³/d、125.7万m³/d和82.6万m³/d的工业气流,展现出了该层系巨大的页岩气勘探潜力^[8-9]。

精确厘定页岩气成藏演化过程对于揭示页岩气藏差异富集规律和成因机制至关重要^[10-11]。前人应用低温热年代学、流体包裹体分析、盆地模拟等方法对四川盆地及其周缘的五峰组—龙马溪组页岩气成藏过程做了比较全面的研究^[12-14]。相较于五峰组—龙马溪组,寒武系筇竹寺组具有复杂多期生排烃历史^[15],进入生

油窗时间更早,经历的构造活动期次更多,气藏改造过程更复杂。前人对筇竹寺组页岩气成藏研究多集中于烃源岩热演化,缺乏页岩热演化与古温压、关键成藏期关系等系统性研究^[15-17],且研究井位多为高过成熟($R_o>3.6\%$)页岩气藏^[15-16,18],对于实现高产突破的德阳—安岳裂陷槽内筇竹寺组页岩气成藏研究仍相对薄弱。

本论文以四川盆地德阳—安岳裂陷槽资中—威远地区筇竹寺组页岩气藏为研究对象,通过岩心和裂缝脉体薄片观察、流体包裹体分析和盆地模拟等方法,厘定了资中—威远地区筇竹寺组页岩热演化史,重建了页岩气藏的压力演化过程,揭示了筇竹寺组页岩气成藏过程。成果有利于深化寒武系古老页岩气藏成藏演化的认识,为筇竹寺组页岩气高效勘探开发提供理论支撑。

1 地质概况

四川盆地德阳—安岳裂陷槽(以下简称“裂陷槽”)形成于晚震旦—早寒武世,沉积中心位于绵阳—乐至—资中—长宁一带,整体呈南北向展布(图1a),

呈南北宽中间窄的构造格局。乐山—龙女寺古隆起(以下简称“古隆起”)是四川盆地形成时间最早、规模最大、持续活动时间最长的大型古隆起(图 1a),隆起轴线西起乐山,东至龙女寺地区,其形成与演化对寒武系页岩气藏具有重要的控制作用^[19],古隆起是形成于震旦纪的继承性古隆起,受前寒武桐湾期区域性侵蚀岩溶的影响,川中地区的差异沉积与剥蚀形成了震旦纪古隆起的雏形,并以同沉积构造隆起一直持续至晚志留世,随后受加里东运动影响进入强烈隆升剥蚀阶段,于二叠纪至中三叠世进入埋藏阶段,至晚三叠世,由于差异构造活动,古隆起呈东南部隆升、西北部沉降的不均衡演化。受侏罗纪—白垩纪燕山运动影响,龙门山褶皱冲断带逆冲推覆及川西前陆盆地快速沉降,古隆起快速隆升并进入调整定型阶段^[20]。

研究区位于裂陷槽中段资中地区和古隆起区威远背斜,是目前四川盆地筇竹寺组页岩气主力勘探区。根据前人地震资料可知^[21](图 1b),裂陷槽内断裂发育程度低于裂陷槽外,仅发育个别 III 级断层,裂陷槽缘威远地区断层发育程度略高于裂陷槽内资中地区,发育几处断距较小的 III 级断层。

早寒武世,裂陷槽内沉积了厚层的麦地坪组和筇竹寺组富有机质泥页岩,筇竹寺组页岩厚度达 200~700 m,而裂陷槽两侧的隆起区厚度较薄,仅为

100~300 m,筇竹寺组东西向连井剖面显示筇竹寺组页岩自西向东呈先增厚再变薄的趋势(图 2),裂陷槽沉积中心主要在 Z4 井—GS17 井一带,厚度超过 500 m,而威远背斜的页岩厚度相对较低, WY1H 井筇竹寺组厚度约为 310 m。筇竹寺组上覆地层为沧浪铺组,与筇竹寺组呈整合接触关系,具有厚度大、分布广泛等特点,能够作为区域性顶板^[22-24];下伏地层麦地坪组是一套在灯影组不整合面之上大规模海侵后形成的地层^[25],岩性以含磷白云岩、泥灰岩和泥质粉砂岩为主,可以作为优良底板,受桐湾运动 II 幕和 III 幕导致的差异剥蚀作用影响^[26-28],横向上,麦地坪组厚度分布具有较大差异,裂陷槽内资中地区麦地坪组保存完好,厚度介于 100~200 m,而威远背斜核部缺失麦地坪组(图 1c)。

筇竹寺组岩性以碳质页岩、硅质岩为主,自上而下分为第一段和第二段,第一段又可细分为第一 1 亚段和第一 2 亚段。测井响应显示,第一段自然伽马值整体高于第二段,纵向上发育 SQ1—SQ4 四个层序,各层序底部为黑色富有机质页岩,顶部渐变为低有机质粉砂质页岩或粉砂岩;区域上,裂陷槽内资中地区层序完整,裂陷槽外威远地区缺失层序 SQ1(图 3),前人根据纵向岩性、沉积旋回及古生物演变,将其细分为 8 个小层^[17,21]:第一 1 亚段分为 1~4 小层,

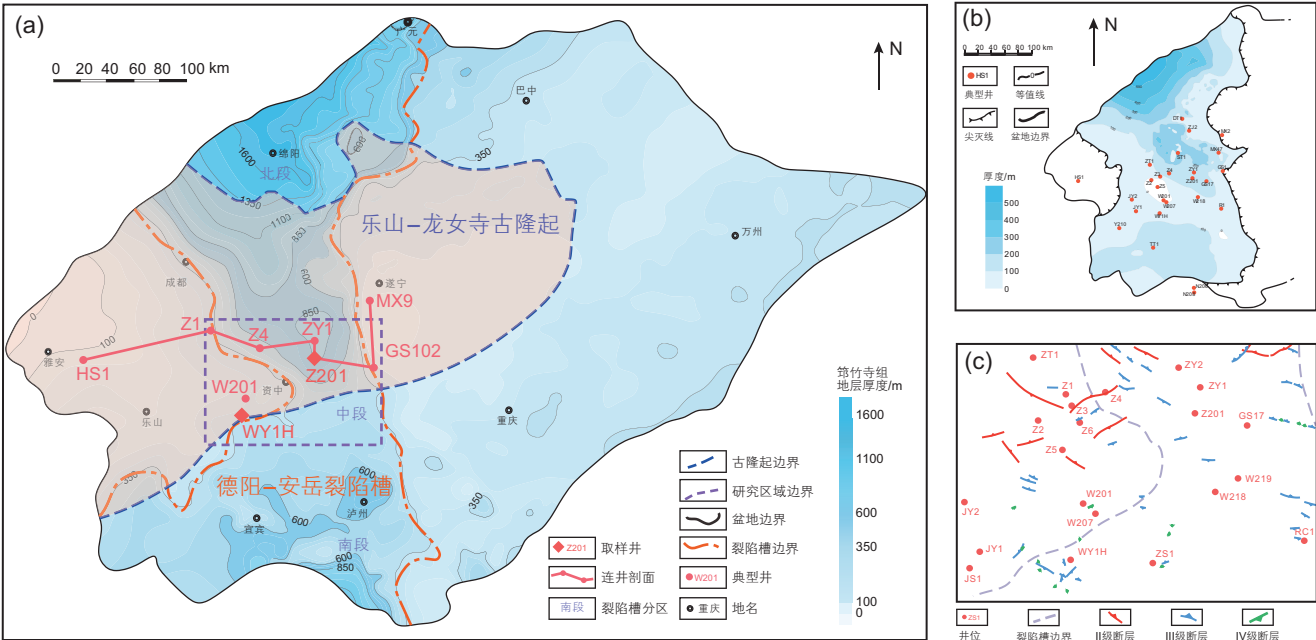


图 1 (a) 四川盆地筇竹寺组烃源岩厚度分布图及典型井位置; (b) 四川盆地麦地坪组厚度分布图; (c) 裂陷槽中段发育断裂分布图

Fig. 1 (a) Thickness distribution of hydrocarbon source rock and typical well location of Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin; (b) thickness distribution of Maidiping Formation in Sichuan Basin; (c) fracture distribution map developed in the middle of the rift trough

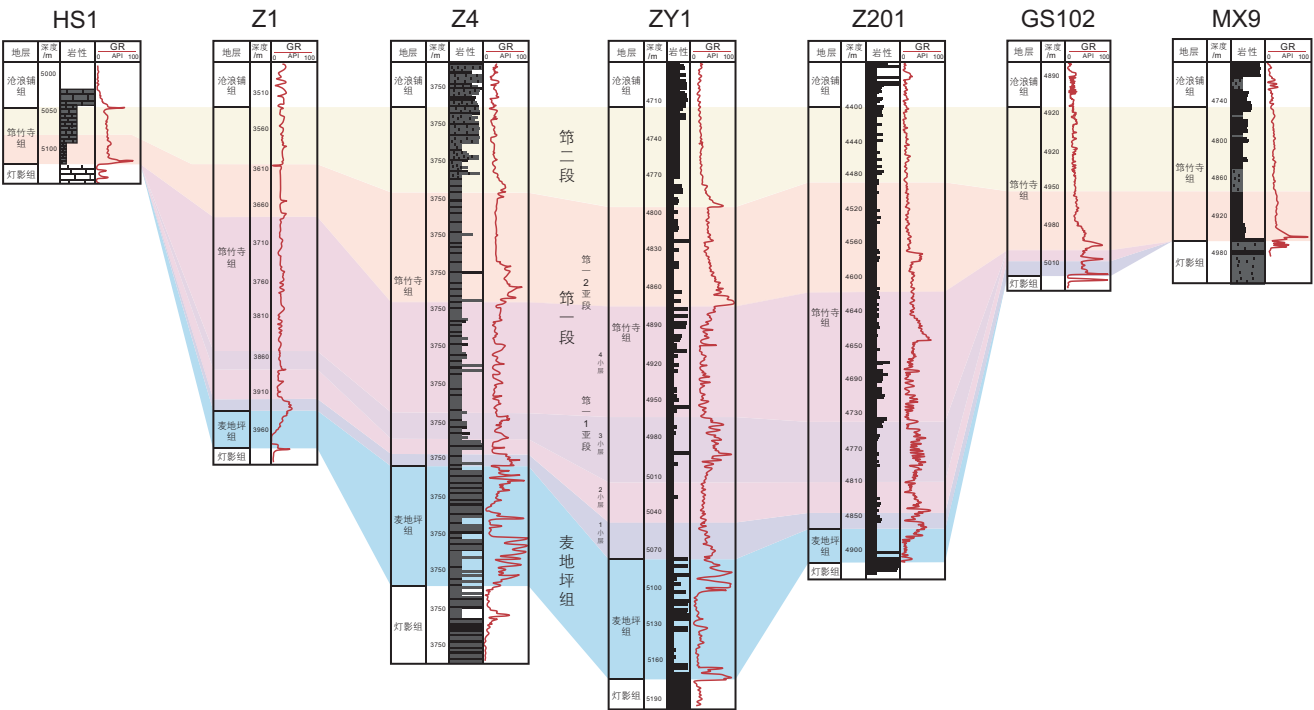


图2 筇竹寺组东西向地层对比连井图

Fig. 2 The east-west stratigraphic correlation well diagram of Qiongzhusi Formation

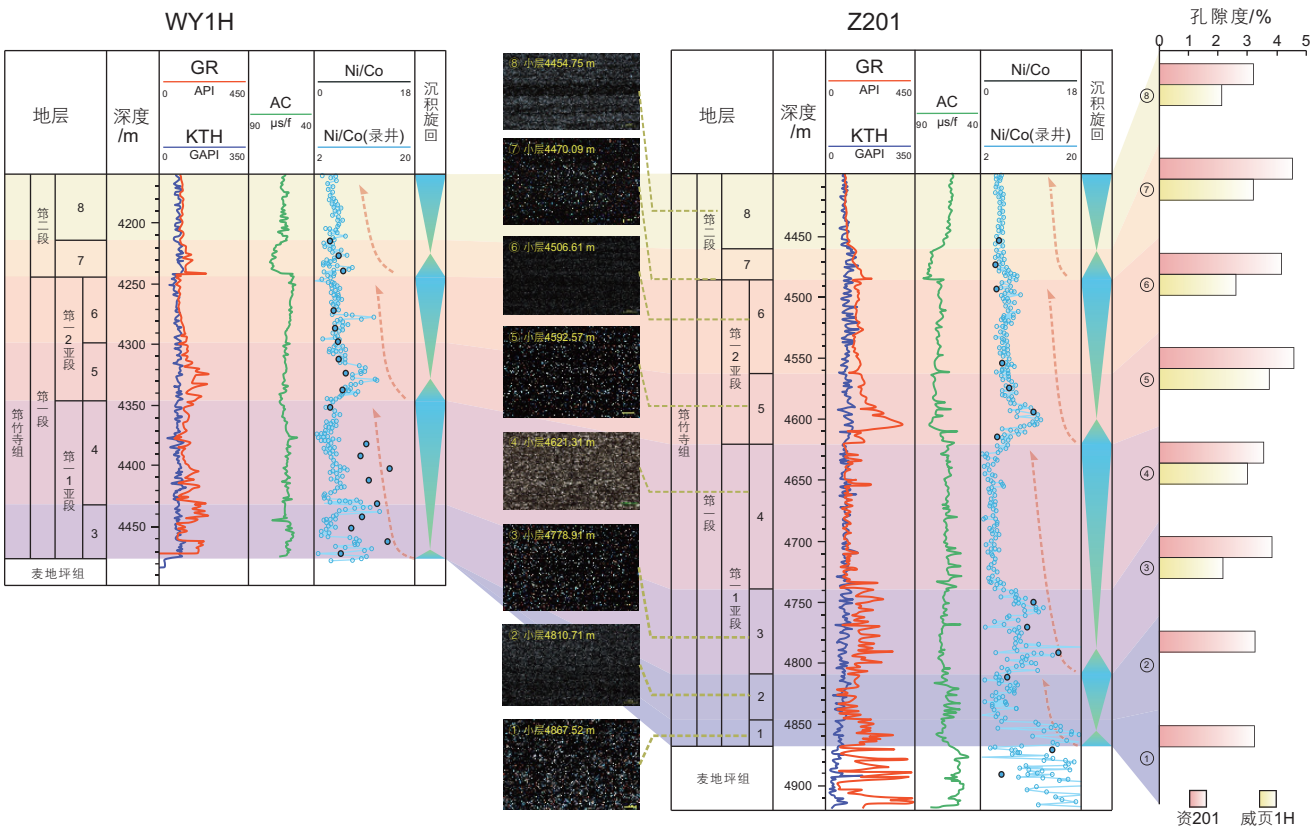


图3 WY1H井与Z201井筇竹寺组综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive histogram of Qiongzhusi Formation in Well WY1H and Well Z201

第一2亚段分为5~6小层，第二段分为7~8小层。其中，1、3、5、7小层为黑色页岩段，2、4、6、8小

层为粉砂质页岩段。筇竹寺组页岩有机碳含量分布在0.5%~7.3%之间，平均值为4.4%，整体的热演化程度

较高, R_o 介于 3.2%~4.0%, 槽外隆起区的成熟普遍较低, 范围在 3.0%~3.4%, 裂隙槽内成熟相对较高, 介于 3.4%~3.8%, 裂隙槽南部宜宾—泸州等地区甚至达到 4.2%^[21]。物性方面, Z201 井筇竹寺页岩的孔隙度显著高于 WY1H 井, 其平均值分别为 4.3%、2.98%。

2 样品及实验方法

本论文研究样品取自 WY1H 井和 Z201 井筇竹寺组岩心裂缝脉体, 具体取样信息见表 1。每个裂缝脉体样品均磨制成普通薄片、双面抛光薄片, 分别用于岩相学观察与阴极发光测试、流体包裹体测温与激光拉曼分析, 用以确定油气成藏期次、恢复气藏关键地质时间的地层压力。裂缝脉体薄片和流体包裹体岩相学观察采用 Zeiss Axioscope Al APOL 显微镜, 阴极发光测试采用 CL8200-MKSCL 检测仪, 运行时加载电压 15 kV, 曝光时间均为 2 s。流体包裹体测温采用 LinKam-350 冷热台, 测试均一温度为盐水气液两相包裹体均一温度 $T_h(LV-L)$, 分析精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 上述实验均在中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室完成。流体包裹体激光拉曼分析采用 Horiba Xplora Plus 型激光拉曼光谱仪, 设置光栅 1800 cm^{-1} , 激光波长 532 nm, 功率 20 mW, 数据单次采集时间约 10~30 s, 在每次分析甲烷包裹体的拉曼位移之前, 使

用硅片 (520.7 cm^{-1}) 标样对仪器的激光波束进行校正归位, 流体包裹体激光拉曼分析在中国地质大学(武汉)油气资源与勘探技术教育部重点实验室完成。

基于现今地层数据、实测地层温度和等效镜质体反射率等实测模拟参数, 耦合前人同一区域的低温年代学数据, 通过盆地模拟技术, 重建裂隙槽内资中地区 Z201 井和裂隙槽缘威远地区 WY1H 井的埋藏—热演化史。盆地模拟采用 BasinMod 盆地模拟软件。地层岩性、层位、厚度、井温、实测成熟度等参数根据西南油气田实钻资料, 地层剥蚀量、抬升时间参数通过邻区对比法和参考前人低温热年代学分析结果确定, 大地热流值、地温梯度热历史参数根据邻区资料确定^[18], 具体盆地模拟参数如表 2 所示。

3 分析结果

3.1 裂缝脉体岩相学特征

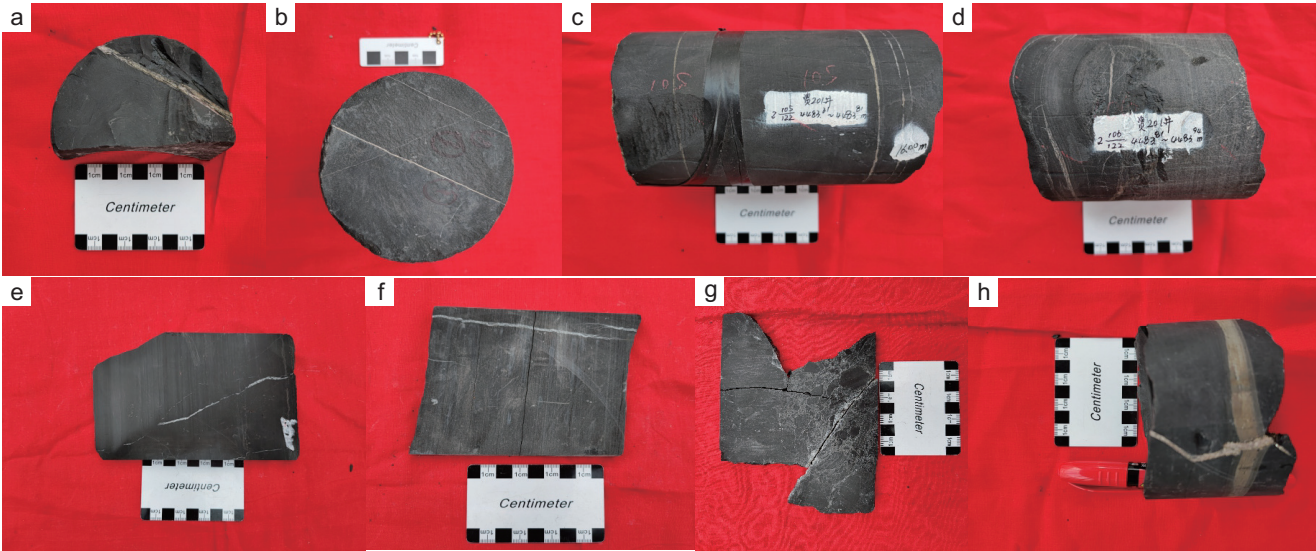
岩心观察表明, 研究区筇竹寺组页岩裂缝发育普遍较少, 大部分裂缝被矿物充填。根据裂缝的产状和力学成因可将筇竹寺组页岩裂缝分为高角度剪切缝、水平滑脱缝、水平张裂缝和高角度张裂缝^[29](图 4)。薄片观察显示, 筇竹寺组页岩裂缝充填矿物类型主要为方解石和石英, 局部可见重晶石和黄铁矿(图 5)。页岩裂缝脉体多为多矿物充填复合脉, 指示经历了多

表 1 Z201 井和 WY1H 井页岩裂缝脉体样品信息表
Table 1 Sample information of shale fracture veins in Well Z201 and Well WY1H

井号	深度 /m	层系	编号	主要充填矿物
Z201	4474.34	筇竹寺组	Z201-1	石英
	4482.72	筇竹寺组	Z201-2	石英
	4482.72	筇竹寺组	Z201-3	方解石
	4483.81	筇竹寺组	Z201-4	石英
	4608.40	筇竹寺组	Z201-5	方解石
	4741.73	筇竹寺组	Z201-6	方解石
	4741.73	筇竹寺组	Z201-7	方解石
	4741.73	筇竹寺组	Z201-8	方解石、石英
	4758.30	筇竹寺组	Z201-9	石英
	4767.26	筇竹寺组	Z201-10	石英、方解石
	4795.06	筇竹寺组	Z201-11	石英
	4795.06	筇竹寺组	Z201-12	石英
	4892.35	筇竹寺组	Z201-13	方解石、石英
WY1H	4471.49	筇竹寺组	WY1H-1	石英
	4472.60	筇竹寺组	WY1H-2	方解石、石英
	4473.00	筇竹寺组	WY1H-3	方解石、石英
	4475.81	筇竹寺组	WY1H-4	石英

表 2 Z201 井和 WY1H 井盆地模拟参数表
Table 2 Simulation parameters of Well Z201 and Well WY1H

参数设置	地区	裂陷槽中段	裂陷槽缘威远背斜
	典型井	Z201	WY1H
剥蚀量参数设置	加里东运动剥蚀量/m	1150	1200
	海西运动剥蚀量/m	140	140
	印支运动剥蚀量/m	160	160
	燕山—喜山运动剥蚀量/m	2000	2500
地热参数设置	二叠纪以前古热流 (300 Ma)/(mW/m ²)	57	58
	最大古热流 (259 Ma)/(mW/m ²)	82	94
	现今热流/(mW/m ²)	64	64
	现今地表温度/℃	20	20
	现今地温梯度/(℃/100 m)	2.39	2.39



(a) 黑色页岩中发育高角度剪切缝，石英，黄铁矿充填，Z201 井，筇竹寺组，埋深 4474.34 m；(b) 黑色页岩中发育两期相切高角度剪切缝，W201 井，筇竹寺组，埋深 2774.56 m；(c) 黑色页岩中发育水平滑脱缝，镜面擦痕和台阶，Z201 井，筇竹寺组，埋深 4483.81 m；(d) 黑色页岩中发育水平张裂缝，Z201 井，筇竹寺组，埋深 4483.94 m；(e)~(f) 黑色页岩中发育高角度剪切缝，WY1H 井，筇竹寺组，埋深 4292.78 m；(g) 黑色页岩中发育两期相切高角度剪切缝，WY1H 井，筇竹寺组，埋深 4292.28 m；(h) 黑色页岩中发育高角度剪切缝，Z201 井，筇竹寺组，埋深 4482.72 m

图 4 筇竹寺组页岩裂缝脉体特征
Fig. 4 Characteristics of shale fracture veins in Qiongzhusi Formation

期构造和流体活动(图 5)。如 Z201 井裂缝脉体中可见方形黄铁矿和石英镶嵌于微晶方解石脉中，黄铁矿主要分布在裂缝壁两侧，而石英主要镶嵌在脉体中部，指示微晶方解石先沿着裂缝壁两侧开始生长，随后是黄铁矿和石英，石英的结晶时间略晚于黄铁矿。脉体中重晶石和石英主要呈两种形式产出，第一种为重晶石/石英和粗晶方解石分别沿着裂缝壁两侧向中部对置生长(图 5c~e)，两者几乎是同期形成；另一种为早期的方解石沿着裂缝壁两侧向中部生长，晚期生长重晶

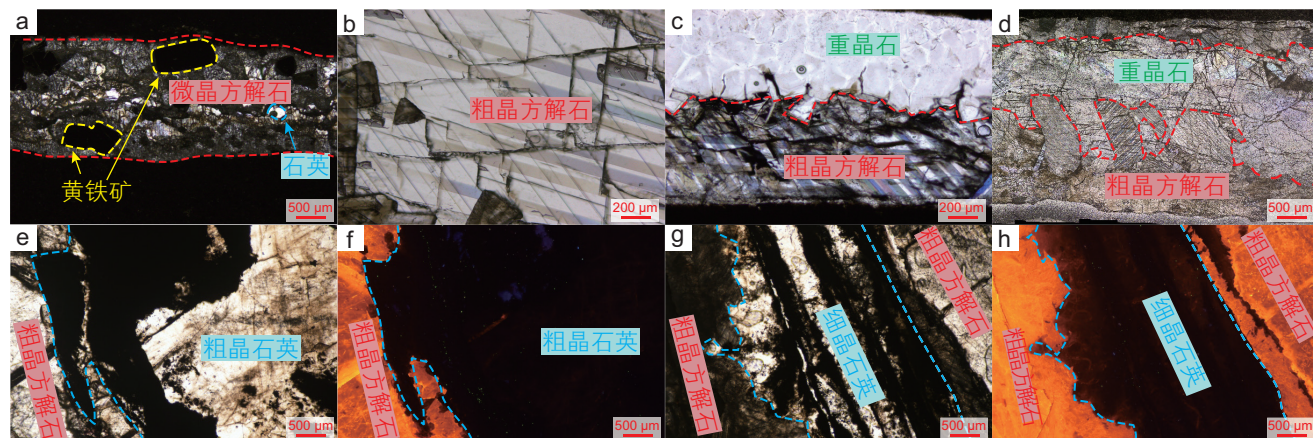
石/石英充填剩余的裂缝空间(图 5d~g)，重晶石/石英的形成时间晚于方解石。因此，裂缝复合脉体指示筇竹寺组页岩储层经历了多期构造和流体改造作用。

3.2 裂缝脉体流体包裹体岩相学和激光拉曼特征

资中地区 Z201 井筇竹寺组页岩裂缝脉体捕获的流体包裹体组合主要为单一气相甲烷包裹体、甲烷—盐水气液两相包裹体、沥青两相包裹体，而单一气相甲烷包裹体与甲烷—盐水气液两相包裹体，三者基本上

具有共生关系。方解石中捕获的甲烷和沥青包裹体普遍较小,直径介于 $2\sim 10\ \mu\text{m}$, 甲烷包裹体形态以方形、不规则多边形为主(图 6a~b), 团状分布或带状分布, 具有包裹体边缘暗黑、中间透亮的特征。沥青包裹体形态以长条状、不规则状为主(图 6c~d), 带状分布,

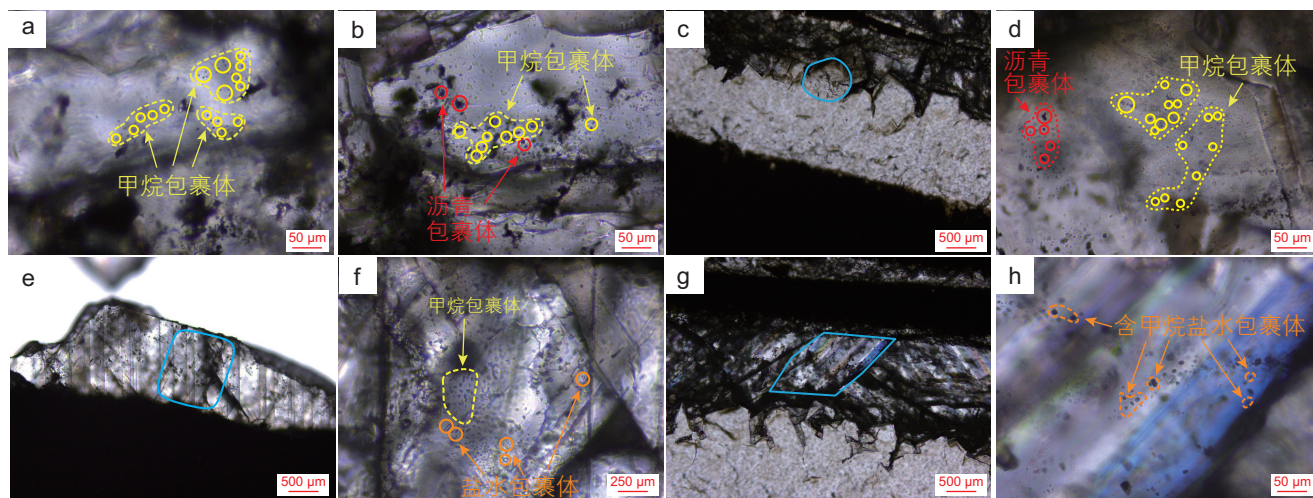
特征是包裹体全黑不透明。捕获的甲烷—盐水气液两相包裹体尺寸相对较大,直径 $>10\ \mu\text{m}$, 在其内部能看到明显的气泡, 伴生或孤立分布。流体包裹体均一温度测试结果表明(图 7), Z201 井页岩细晶方解石与石英复合脉捕获包裹体均一温度分布于 $117.4\sim 221.6\ ^\circ\text{C}$



(a) 微晶方解石脉、黄铁矿和石英充填的复合脉体, Z201 井, 4741.73 m, 筇竹寺组, 单偏光; (b) 粗晶方解石脉, Z201 井, 筇竹寺组, 4608.40 m, 单偏光; (c) 重晶石和粗晶方解石充填的复合脉体, WY1H 井, 筇竹寺组, 4483.81 m, 单偏光; (d) 重晶石和粗晶方解石充填的复合脉体, WY1H 井, 筇竹寺组, 4473 m, 单偏光; (e) 粗晶石英和粗晶方解石充填复合脉体, WY1H 井, 筇竹寺组, 4475.81 m, 单偏光; (f) 粗晶石英和粗晶方解石充填复合脉体, WY1H 井, 筇竹寺组, 4475.81 m, 阴极发光; (g) 细晶石英和粗晶方解石充填的复合脉体, WY1H 井, 筇竹寺组, 4471.49 m, 单偏光; (h) 细晶石英和粗晶方解石充填的复合脉体, WY1H 井, 筇竹寺组, 4471.49 m, 阴极发光

图 5 筇竹寺组页岩裂缝脉体矿物学特征

Fig. 5 Mineralogical characteristics of shale fracture veins in Qiongzhusi Formation



(a) 复合脉体中粗晶方解石捕获的甲烷包裹体, 筇竹寺组, Z201 井, 单偏光, 500 放大倍数; (b) 复合脉体中粗晶方解石捕获的甲烷包裹体、沥青包裹体, 筇竹寺组, Z201 井, 单偏光, 500 放大倍数; (c) 复合脉体中重晶石, 筇竹寺组, Z201 井, 单偏光, 50 放大倍数; (d) c 图重晶石捕获的沥青包裹体、甲烷包裹体, 筇竹寺组, Z201 井, 单偏光, 500 放大倍数; (e) 石英脉体, 筇竹寺组, WY1H 井, 单偏光, 50 放大倍数; (f) e 图石英捕获的沥青包裹体、甲烷包裹体, 筇竹寺组, Z201 井, 单偏光, 500 放大倍数; (g) 粗晶方解石脉体中方解石, 筇竹寺组, WY1H 井, 单偏光, 50 放大倍数; (h) g 图方解石捕获的甲烷包裹体、盐水包裹体, 筇竹寺组, WY1H 井, 单偏光, 500 放大倍数

图 6 筇竹寺组页岩裂缝脉体流体包裹体显微特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of fluid inclusions in shale fracture veins of the Qiongzhusi Formation

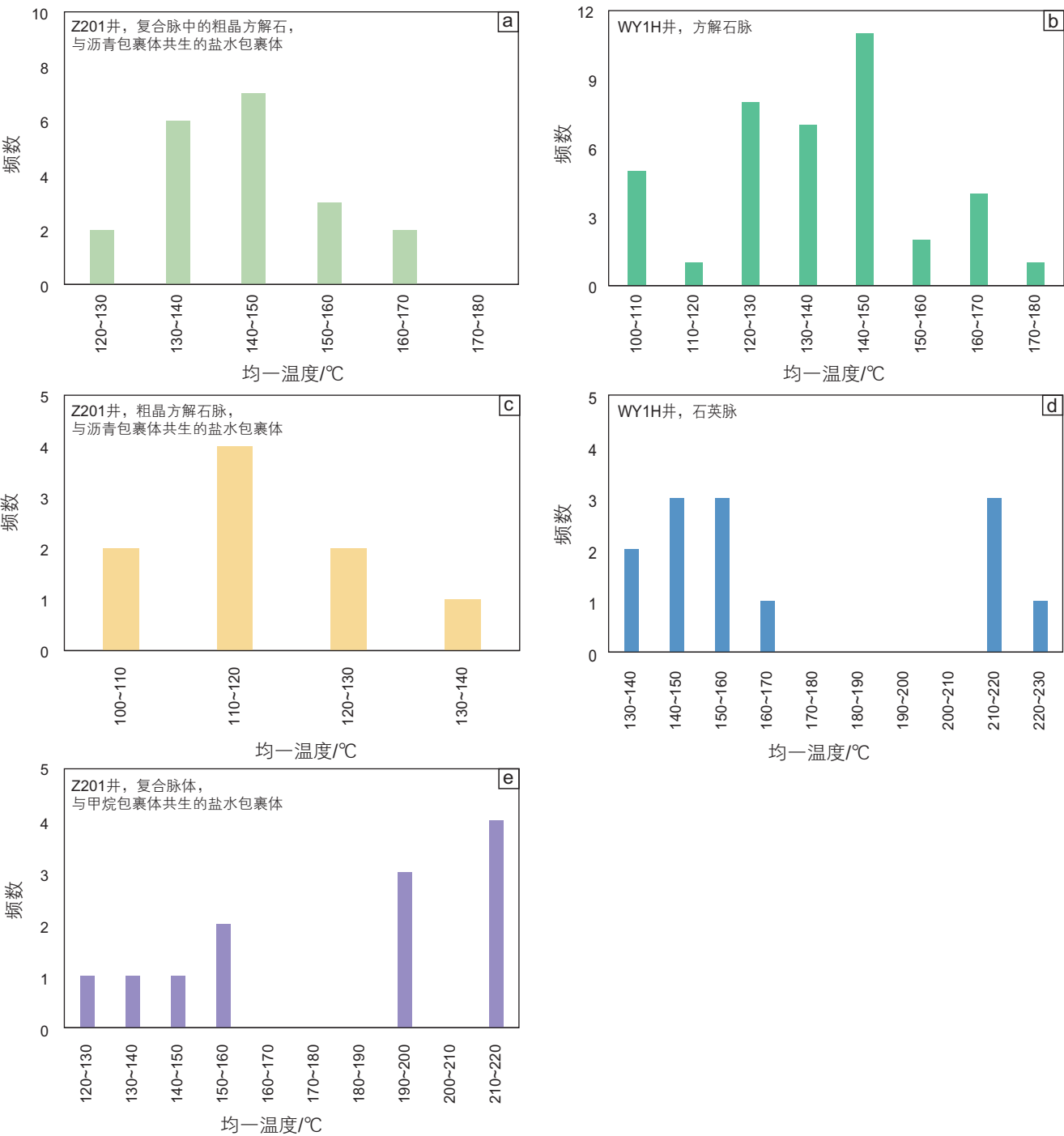


图7 筇竹寺组页岩裂缝脉体流体包裹体组合均一温度柱状分布直方图
Fig. 7 Homogeneous temperature histogram of fluid inclusion combination of shale fracture veins in the Qiongzhusi Formation

之间, 主要存在两期峰值, 峰值温度区间分别为 150~160 °C、210~220 °C, 方解石脉捕获包裹体均一温度分布在 107.5~173.8 °C 之间, 包裹体均一温度峰值温度区间分别为 110~120 °C、140~150 °C。

威远地区 WY1H 井筇竹寺组页岩裂缝脉体捕获的流体包裹体组合主要为单一气相甲烷包裹体、沥青包裹体。石英脉体中捕获的甲烷包裹体普遍较小, 直

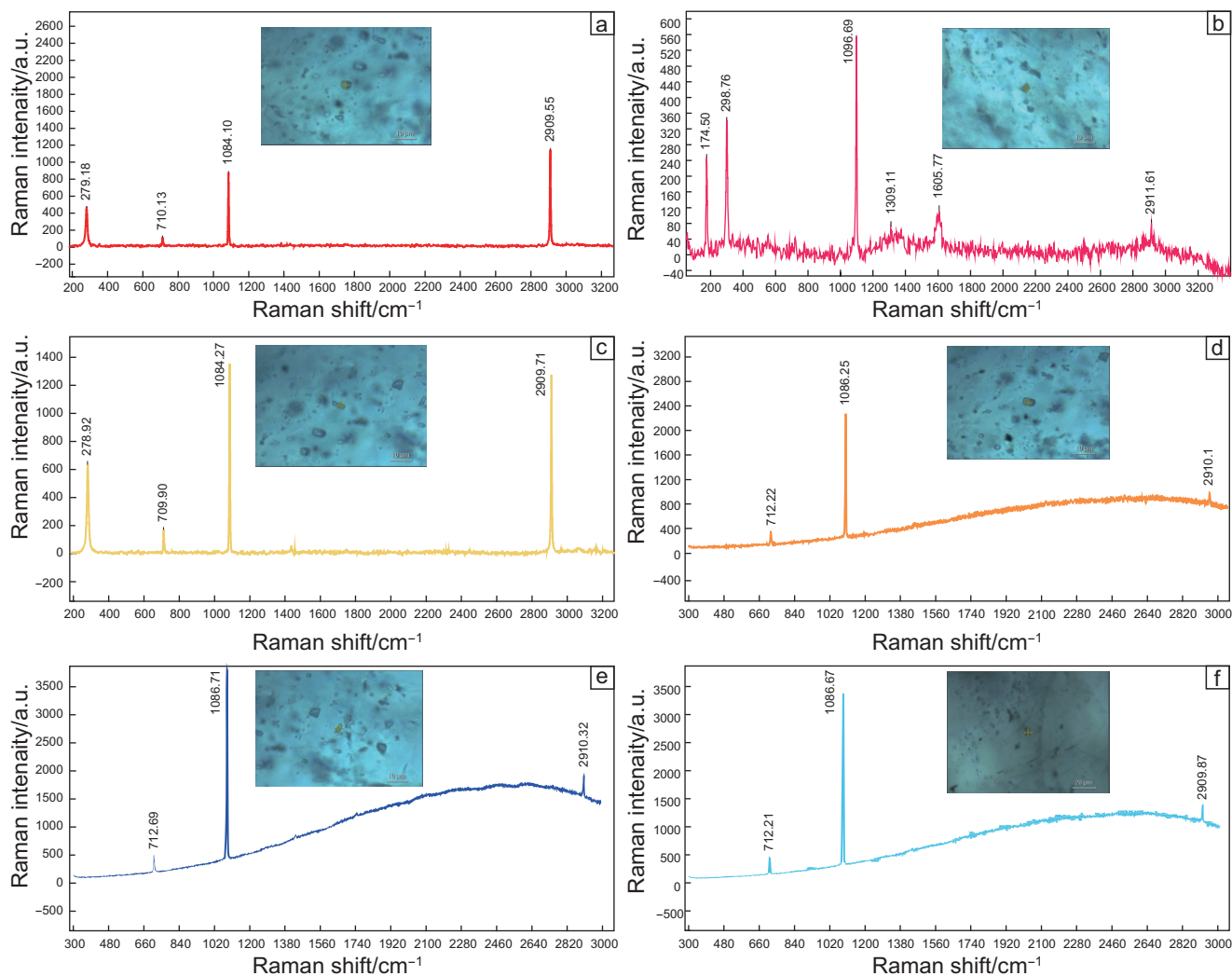
径介于 3~8 μm , 包裹体形态以椭圆形、多边形为主 (图 6e~f), 在脉体中以聚团分布或带状分布, 捕获的气液两相盐水包裹体同样尺寸较小, 在脉体中单独聚团分布。石英脉体中捕获的沥青包裹体分布丰度极小, 都是孤立随机分布。WY1H 井页岩方解石脉包裹体均一温度分布于 105.5~173.3 °C, 主要存在三期峰值, 峰值温度区间分别为 120~130 °C、140~150 °C、

160~170 °C, 石英脉体中捕获了多期不同类型的烃类包裹体, 伴生盐水包裹体的均一温度分布在分布在 130.3~164.5 °C 和 215.7~224.5 °C 两个区间内, 峰值温度区间分别为 140~160 °C, 210~220 °C。

激光拉曼光谱可用于定性分析宿主矿物及流体包裹体成分, 因此在对 Z201 井和 WY1H 井筇竹寺组裂缝脉体中的气—液两相盐水包裹体和甲烷包裹体进行显微观察的基础上, 选取形态比较规则、保存较完整的包裹体开展激光拉曼分析。结果显示(图 8), Z201 井裂缝脉体中的甲烷拉曼位移主要分布在 2909.55~2911.61 cm^{-1} , 沥青包裹体中识别出 1306~1365 cm^{-1} 和 1587~1606 cm^{-1} 的碳双峰位移, 以及 2911.61 cm^{-1} 的甲烷峰位移。WY1H 井裂缝脉体中的甲烷拉曼位移主要分布在 2909.87~2910.32 cm^{-1} 。

通过甲烷包裹体的拉曼位移和共生盐水包裹体

的均一温度以及冰点温度测试, 计算室温条件下的甲烷包裹体内压和密度, 进而获取甲烷包裹体的最小捕获压力, 基于激光拉曼光谱分析恢复甲烷捕获压力的具体计算过程参考文献^[30-31]。资中地区 Z201 井和威远地区 WY1H 井甲烷包裹体捕获压力计算结果如表 3 所示, Z201 井方解石脉的甲烷包裹体内压介于 82.79~121.87 MPa, 甲烷密度较高, 为 0.312~0.345 g/cm^3 , 属于高密度甲烷, 表明这一时期地层中的甲烷处于超临界状态, 计算的捕获压力为 143.64~219.20 MPa; WY1H 井方解石脉中的甲烷包裹体内压分布在 54.98~71.47 MPa 之间, 对应的密度为 0.277~0.300 g/cm^3 , 计算的包裹体最小捕获压力为 114.52~136.86 MPa。



(a)~(c) Z201 井包裹体激光拉曼光谱; (d)~(f) WY1H 井包裹体激光拉曼光谱

图 8 筇竹寺组页岩裂缝脉体流体包裹体激光拉曼谱图

Fig. 8 Laser Raman spectrum of fluid inclusions in shale fractures of the Qiongzhusi Formation

4 讨论

4.1 筇竹寺组页岩热演化过程

低温热年代学技术是通过限定岩石中矿物的某个时间点所处的温度，建立矿物中的退火作用于地质体抬升剥蚀/热史过程之间的函数关系，进而能够有效量化揭示盆地热史和抬升剥蚀过程^[32-33]。采用邻区对比法，并依据前人针对川中威远、高石地区震旦系碎屑砂岩开展的锆石裂变径迹热年代学模拟成果可知^[18]，研究区经历了两期的沉降升温 and 两期的抬升冷却阶段，第一期沉降升温过程发生在震旦—志留纪，在晚志留世时地层温度达到 70~100 ℃；随后受晚加里东运动的影响，研究区开始发生抬升冷却，到早二叠世

时地层温度约 30~50 ℃。早二叠世末，研究区开始沉降迅速升温，在中—晚二叠世受异常热事件影响，地层的增温速率超过正常埋藏升温过程，出现增温小高峰(约 70~90 ℃)，到三叠纪时，尽管研究区处于沉降阶段，但由于热异常作用的减弱，地层温度逐渐降低。随着持续沉降，晚三叠世开始迅速升温并在晚白垩世早期达到最高古地温，约 200~240 ℃。受燕山—喜山运动的影响，研究区于晚白垩世开始抬升冷却。整体上，古隆起区域构造热演化过程基本一致，只有在中—晚二叠世异常热事件和最后一期抬升剥蚀上，不同构造单元存在部分差异。晚白垩世开始的抬升作用，裂隙槽缘威远地区 WY1H 井的抬升冷却速率、冷却幅度要略大于裂隙槽内资中地区 Z201 井。

基于地层深度、低温热年代学、等效镜质体反射

表 3 筇竹寺组页岩裂缝脉体甲烷包裹体最小捕获压力计算数据表

Table 3 Calculation data table of minimum capture pressure of methane inclusions in shale fracture veins of Qiongzhusi Formation

井号	宿主矿物	甲烷拉曼位移/cm ⁻¹	甲烷包裹体内压/MPa	甲烷包裹体密度/(g/cm ³)	盐水包裹体均一温度/℃	甲烷包裹体捕获压力/MPa	地层压力系数
WY1H	方解石	2910.10	62.35	0.288	185.3	124.07	2.39
WY1H	方解石	2909.87	71.47	0.300	184.1	136.86	2.63
WY1H	方解石	2910.32	54.98	0.277	188.7	114.52	2.20
Z201	方解石	2909.55	121.87	0.345	217.8	219.20	2.92
Z201	方解石	2909.71	109.99	0.336	220.4	203.93	2.72
Z201	方解石	2911.61	82.79	0.312	218.1	143.64	2.13

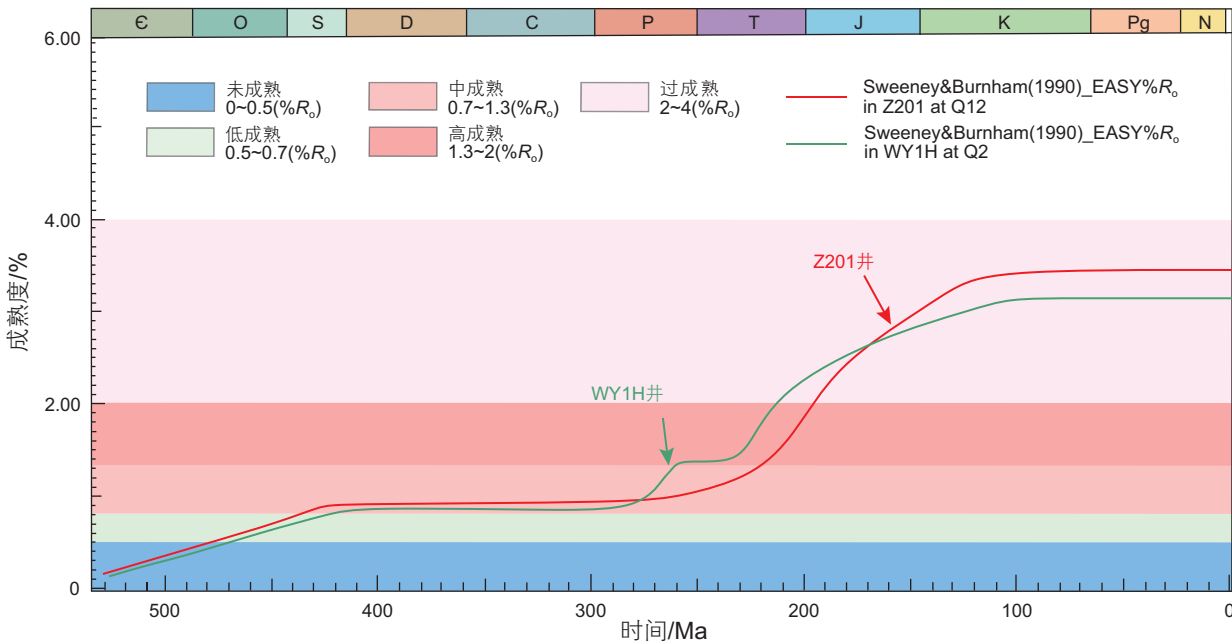


图 9 研究区典型井成熟度演化史

Fig. 9 The maturity evolution history of typical wells in the study area

率、钻井热流值等数据(表 2),对裂陷槽缘威远背斜 WY1H 井与裂陷槽内资中地区 Z201 井筇竹寺页岩生烃演化和埋藏抬升过程进行模拟。结果表明(图 9),裂陷槽内 Z201 井筇竹寺组页岩在早—中奥陶世进入低成熟演化阶段($R_o=0.5\%\sim 0.7\%$),以生成生物气和未熟—低熟油为主;于早志留世进入成熟生油阶段($R_o=0.7\%\sim 1.3\%$),并在早—中三叠世和早侏罗世分别进入高、过成熟演化阶段。至晚白垩世时埋藏增温过程停止,最终成熟度停留在 3.48%;裂陷槽缘威远背斜 WY1H 井筇竹寺组页岩在中奥陶世进入生烃门限($R_o=0.5\%$),随着埋深增大,在中志留世进入成熟演化阶段($R_o=0.7\%\sim 1.3\%$),以热催化有机质生油为主;受加里东期构造抬升作用影响,地层温度开始下降,生烃强度减弱;中二叠世,在异常热事件和埋深增加共同影响下,页岩迅速升温进入高成熟演化阶段($R_o=1.3\%\sim 2.0\%$),大量滞留液态烃裂解生气形成页岩气藏。随着埋深的进一步增加,页岩于晚三叠世进入过成熟演化阶段并持续增温,至晚白垩世早期终止,由于烃源岩埋藏深度小于裂陷槽内 Z201 井,页岩最终成熟度为 3.13%。

从成熟度演化模拟结果可以看出,裂陷槽内资中地区 Z201 井和裂陷槽缘威远地区 WY1H 井筇竹寺组烃源岩热演化过程有所差异,威远地区筇竹寺组烃源岩在中晚二叠世到早白垩世期间有两次快速成熟过程,而裂陷槽内资中地区烃源岩在二叠纪到早白垩世仅有一次快速成熟过程(图 9)。前人研究表明,温度是烃源岩热演化的最主要控制因素,而大地热流与地层埋藏抬升是控制地层温度的两大主要因素^[18],前述低温热年代学数据表明,在二叠纪—侏罗纪期间,资中地区和威远地区地层抬升作用基本一致,因此资中和威远地区筇竹寺组在该时期的烃源岩成熟度演化差异主要受中—晚二叠世异常热事件影响。前人重建的四川盆地晚震旦世以来的热演化历史表明^[15,18,34-40],二叠纪热流高峰是克拉通低热流背景下,川西南峨眉山地幔柱上涌与地壳拉张减薄共同作用的结果,且峨眉山地幔柱对川西南地区热演化影响显著,对外带区域影响有限。威远背斜比裂陷槽内资中地区更靠近峨眉山地幔柱中心区域,在中晚二叠世,热流值较高,导致了烃源岩温度超过了早古生代时期所经历的最高温度,从而比资中地区多发生了一次快速的成熟过程。

4.2 筇竹寺组页岩压力演化与页岩气成藏过程

裂缝脉体中捕获的原生包裹体记录了地层流体的

温度、压力、组分等物理化学信息^[30-31,41]。本论文研究将 Z201 井和 WY1H 井筇竹寺组裂缝脉体中与沥青包裹体、甲烷包裹体伴生的盐水包裹体均一温度测试结果投影到筇竹寺组埋藏—热演化史上,确定油气成藏的大致时间,研究结果显示(图 10),资中和威远地区筇竹寺组页岩均发育三期裂缝脉体,前两期脉体分别形成于早泥盆世(ca. 420~405 Ma)和晚三叠世(ca. 235~215 Ma)。第一期裂缝脉体捕获了大量原生沥青包裹体,表明脉体形成时地层流体中含有大量的液态烃,此时筇竹寺组页岩处于成熟生油阶段,地层埋深大约为 2400 m, Z201 井和 WY1H 井共生盐水包裹体均一温度峰值区间分别为 110~120 °C 和 120~130 °C,裂缝的形成可能与加里东晚期的构造挤压隆升有关;第二期裂缝脉体捕获包裹体组合为原生沥青包裹体和原生甲烷包裹体,说明包裹体捕获于筇竹寺组页岩高一过成熟演化阶段,对应地层埋深介于 3700~4000 m,共生盐水包裹体均一温度峰值区间为 150~170 °C,对应的形成时间大约在晚三叠世(ca. 235~215 Ma),裂缝的形成可能与印支运动东南方向的挤压抬升有关。Z201 井和 WY1H 井第三期裂缝脉体形成时间存在差异, Z201 井第三期脉体形成于始新世(ca. 45~35 Ma),而 WY1H 井第三期脉体形成于晚白垩世(ca. 75~60 Ma)。第三期裂缝脉体捕获包裹体组合为原生甲烷包裹体,说明包裹体捕获于筇竹寺组页岩高一过成熟演化阶段或者之后的保存调整期,共生盐水包裹体均一温度峰值区间为 210~220 °C。威远地区因处于裂陷槽缘,抬升较槽内资中地区要早~10 Ma,故脉体形成时间更早。

气藏的压力状态是评价页岩气保存条件的一个重要指标,气藏超压可作为页岩内流体封存状态良好的证据^[42-49]。通过激光拉曼光谱和包裹体测温对 Z201 井和 WY1H 井筇竹寺组页岩第三期裂缝方解石脉中甲烷包裹体的最小捕获压力进行恢复(见图 11),结果显示始新世槽内与槽缘成藏压力存在较大差异,资中地区 Z201 井筇竹寺组始新世(55~35 Ma)的地层压力为 143.6~219.2 MPa,对应的压力系数为 2.1~2.9,威远地区 WY1H 井筇竹寺组始新世(55~35 Ma)的地层压力为 114.52~136.86 MPa,对应的压力系数为 2.2~2.63,表明多期构造活动对页岩气藏的影响较小,直到始新世气藏依然处于强超压状态。Z201 井、WY1H 井筇竹寺组现今实测压力系数分别为 2.01、1.73,大量的生排烃导致的地层异常超压保存至今,二者都属于强超压气藏, WY1H 井的现今实测压力系数略低于 Z201 井,这可能与后期保存条件差异有关。

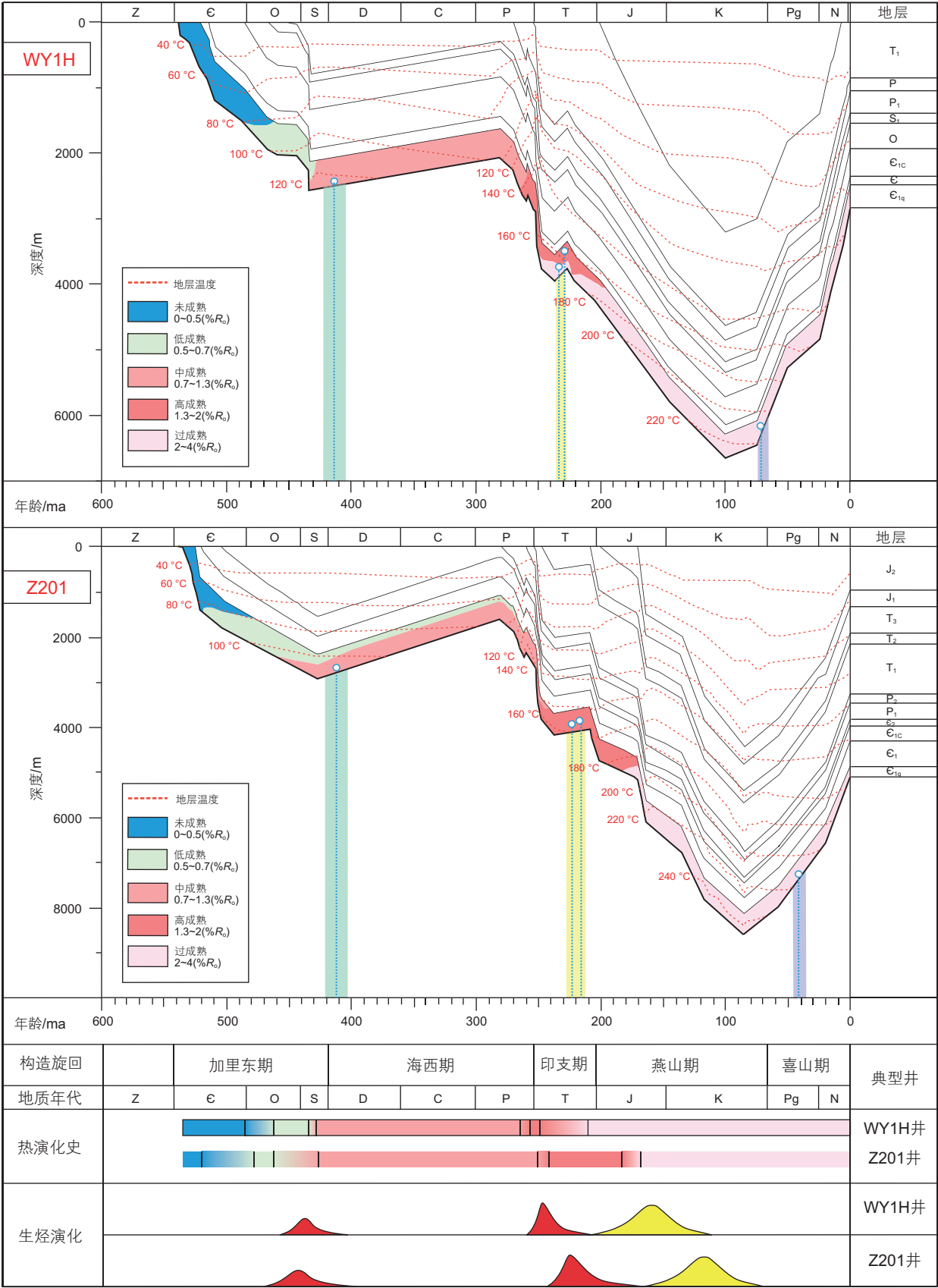


图 10 研究区埋藏史、筇竹寺组热演化史与生烃演化图

Fig. 10 Burial history, thermal evolution history and hydrocarbon generation evolution of the Qiongzhusi Formation in the study area

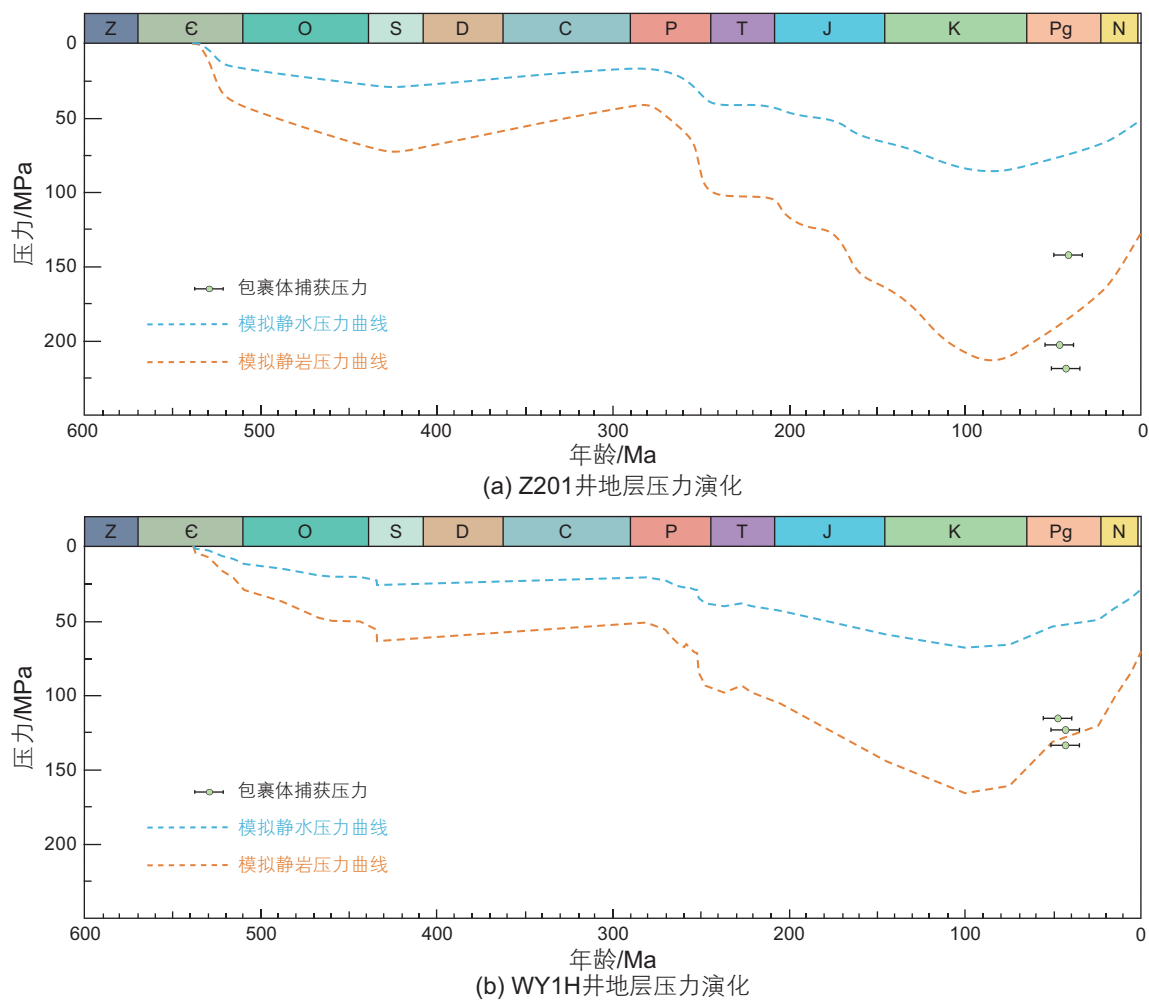


图 11 筇竹寺组地层压力演化史
Fig. 11 The formation pressure evolution history of the Qiongzhusi Formation

根据地震资料(图 1c)可知, 裂隙槽内资中地区断裂发育程度低, 仅发育个别 III 级断层, 构造运动对保存条件的破坏程度较弱, Z201 井和邻近的 GS17 井筇竹寺组岩心中裂缝发育程度都较少可印证上述观点^[17,50]。而裂隙槽外威远地区断层发育程度较槽内要更强, 且威远地区处于背斜高部位, 裂缝发育程度较裂隙槽斜坡位置要更高, 断层和裂缝对保存条件的破坏程度要更高, 该地区的 W201 井和 W207 井筇竹寺组实测压力系数均在 1.0 左右, 这可能是导致威远地区页岩气井位压力系数整体小于槽内资中地区的原因之一。

另外, 资中和威远地区顶底板条件也存在显著差异。筇竹寺组上覆地层沧浪铺组, 能够作为古隆起区域性顶板(图 1b)^[22-24], 下伏地层麦地坪组作为优良底板, 横向上分布具有较大差异。裂隙槽内资中地区麦地坪组保存完好, 厚度介于 100~200 m, 而裂隙槽缘威远背斜麦地坪组厚度较薄甚至缺失。槽内资中地区

麦地坪组与筇竹寺组含气页岩段、顶板沧浪铺组形成流体封存箱, 有效阻隔了向灯影组储层的供烃, 顶底板条件显著优于威远地区。相比之下, 威远地区底板条件相对较差, 筇竹寺组含气页岩段与下伏灯影组呈不整合接触。前人地球化学研究也表明, 下伏地层灯影组气源来自筇竹寺组^[51-55]。根据 Z201 井和 WY1H 井筇竹寺柱状图(图 3), 筇竹寺组中部 5 小层、6 小层孔隙度较大, Z201 井、WY1H 井 5 小层孔隙度平均值分别为 4.89%、3.81%, 顶部和底部小层孔隙度较小, 可以作为气藏直接盖层底板, 而威远地区筇竹寺组缺失了 1 小层、2 小层, 导致筇竹寺组天然气藏底板缺失, 自封闭性显著低于资中地区。

综合分析裂隙槽及其周缘的典型井埋藏史—热演化史和古温压特征可知, 尽管早期受古隆起地形的控制, 震旦—寒武系的厚度差异较大, 随后由于沉积填平补齐作用, 裂隙槽缘威远地区以及裂隙槽内资中地区进入生烃门限的时间几乎一致, 而中—晚二叠世异

常热事件导致威远地区筇竹寺页岩先一步在晚二叠世进入高成熟演化阶段。页岩热成熟度和含气性差异主要体现在晚二叠世异常热事件、中生代以后的差异沉降和后期的抬升剥蚀过程。前人研究表明,乐山—龙女寺古隆起在早侏罗世之后受燕山、喜山运动的调整改造,使得威远背斜开始缓慢变形,与裂陷槽内差异沉降增大,至晚白垩世时隆起区的中生代地层厚度相

对较薄,因此隆起区筇竹寺组页岩的最大古埋深和成熟度要小于裂陷槽内。晚白垩世由于燕山运动引起的断层逆冲推覆,导致威远地区基底隆升形成背斜,而裂陷槽内的构造抬升幅度较弱,燕山期—喜山期的调整改造对裂陷槽内的改造程度要弱于裂陷槽缘威远背斜区,使得裂陷槽内筇竹寺组具有更好的含气性(图 12)。

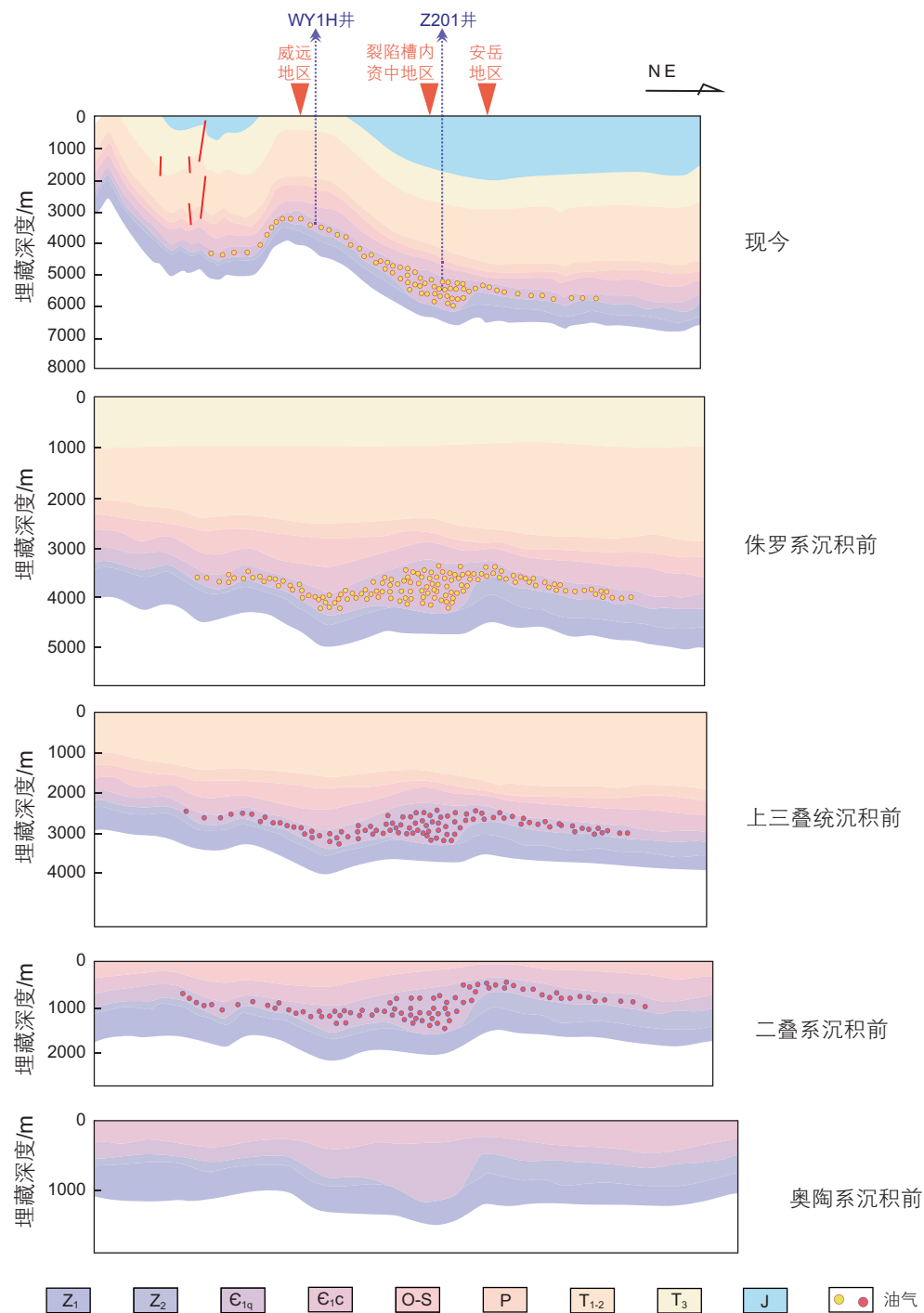


图 12 研究区构造演化历史 (修改自梅庆华^[56])

Fig. 12 The tectonic evolution history of the study area (modified from Mei^[56])

5 结论

1) 四川盆地资中和威远地区寒武系筇竹寺组页岩发育多期裂缝脉体, 脉体矿物主要为方解石、石英、重晶石和黄铁矿, 通过脉体岩相学、阴极发光和流体包裹体分析表明, 资中和威远地区均发育 3 期裂缝脉体, 第 I 期(ca. 420~405 Ma)脉体形成于加里东运动晚期挤压隆升阶段, 此时页岩处于生油高峰; 第 II 期(ca. 235~215 Ma)脉体形成与印支运动东南方向的挤压抬升有关, 此时页岩处于高一过成熟阶段, 第 III 期脉体形成于气藏保存调整期, WY1H 井和 Z201 井对应的形成时间分别在晚白垩世(ca. 75~60 Ma)和始新世(ca. 45~35 Ma), 裂缝的形成与燕山运动和喜山运动挤压作用有关。

2) 资中和威远地区寒武系筇竹寺组页岩于早一中奥陶世和中志留世先后进入生油窗和生油高峰。随后

受加里东期构造抬升作用影响, 地层温度开始下降, 生烃停滞。中二叠世后, 在异常热事件和埋深增加共同影响下, 威远地区筇竹寺组页岩迅速进入高成熟演化阶段, 并于晚三叠世进入过成熟演化阶段, 资中地区筇竹寺页岩则于早一中三叠世和早侏罗世先后进入高、过成熟演化阶段, 由于威远背斜比资中地区更靠近峨眉山地幔柱中心区域, 受到影响更大, 中晚二叠世到早白垩世期间多出一次快速成熟过程。晚白垩世早期地层增温终止, 气藏进入保存调整阶段。

3) 资中地区筇竹寺组断层和裂缝发育程度以及顶底板条件等保存条件指标均优于威远地区。资中地区麦地坪组保存完好, 与筇竹寺组含气页岩段、顶板沧浪铺组形成流体封存箱, 有效阻隔了向灯影组储层的供烃, 威远地区麦地坪组几乎被剥蚀殆尽, 筇竹寺组与下伏灯影组呈不整合接触, 且威远地区筇竹寺组缺失了 1 小层和 2 小层, 底板封闭性较差, 自封闭性显著弱于资中地区筇竹寺组。

参考文献

- [1] 郭旭升, 王濡岳, 申宝剑, 等. 中国页岩气地质特征、资源潜力与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(1): 15–28. [GUO X S, WANG R Y, SHEN B J, et al. Geological characteristics, resource potential, and development direction of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(1): 15–28.]
- [2] 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 等. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 1–15. [DONG D Z, GAO S K, HUANG J L, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 1–15.]
- [3] 王鹏威, 刘忠宝, 金之钧, 等. 川西南地区下寒武统筇竹寺组页岩气纵向差异富集主控因素[J]. 地球科学, 2019, 44(11): 3628–3638. [WANG P W, LIU Z B, JIN Z J, et al. Main control factors of shale gas differential vertical enrichment in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, southwest Sichuan Basin, China[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3628–3638.]
- [4] 刘达东, 赵帅, 田辉, 等. 雪峰隆起西缘下寒武统牛蹄塘组斜坡相海相页岩有机质富集机制[J]. 石油科学通报, 2024, 9(6): 853–865. [LIU D D, ZHAO S, TIAN H, et al. Enrichment mechanisms of organic matter in the marine slope facies shales from the Niutitang Formation in the western Xuefeng Uplift[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(6): 853–865.]
- [5] 刘达东, 田辉, 范青青, 等. 黔北地区复杂构造区下古生界页岩气成藏地质条件及勘探方向[J]. 天然气工业, 2025, 45(2): 51–62. [LIU D D, TIAN H, FAN Q Q, et al. Geologic conditions and exploration prospects of the lower Paleozoic shale gas reservoirs in the northern Guizhou complex structural area, SW China[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(2): 51–62.]
- [6] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69–75. [HUANG J L, ZOU C N, LI J Z, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69–75.]
- [7] 王道富, 王玉满, 董大忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 1–10. [WANG D F, WANG Y M, DONG D Z, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Cambrian Qiongzhusi Shale, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 1–10.]
- [8] 梁峰, 吴伟, 张琴, 等. 四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩孔隙结构特征与页岩气赋存模式[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 131–142. [LIANG F, WU W, ZHANG Q, et al. Shale pore structure characteristics and shale gas occurrence pattern of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 131–142.]
- [9] 何骁, 郑马嘉, 刘勇, 等. 四川盆地“槽-隆”控制下的寒武系筇竹寺组页岩储层特征及其差异性成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 420–439. [HE X, ZHENG M J, LIU Y, et al. Characteristics and differential origin of Qiongzhusi Formation shale reservoirs under the “aulacogen-uplift” tectonic setting, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 420–439.]
- [10] 鲁雪松, 刘可禹, 卓勤功, 等. 库车克拉 2 气田多期油气充注的古流体证据[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 537–544. [LU X S,

- LIU K Y, ZHUO Q G, et al. Palaeo-fluid evidence for the multi-stage hydrocarbon charges in Kela-2 gas field, Kuga foreland basin, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(5): 537–544.]
- [11] 杨鹏, 刘可禹, LI Z, 等. 塔里木盆地跃参地区YJIX井超深层油藏演化[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 262–273. [YANG P, LIU K Y, LI Z, et al. Evolution of Ordovician YJIX ultra-deep oil reservoir in the Yuecan oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 262–273.]
- [12] 吴建发, 吴娟, 刘文平, 等. 页岩气成藏过程的阶段划分以—四川盆地宁西地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏过程为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 83–92. [WU J F, WU J, LIU W P, et al. Stage division of shale gas accumulation process: An example from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Ningxi area of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(01): 83–92.]
- [13] 王奕松, 胡瀚文, 石富伦, 等. 黔北地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏过程及勘探启示: 来自流体包裹体的证据[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(1): 140–152. [WANG Y S, HU H W, SHI F L, et al. Reservoir-forming process of shale gas in Wufeng-Longmaxi formations in northern Guizhou Province and its exploration implications: Evidence from fluid inclusions[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(1): 140–152.]
- [14] 王笑奇. 长宁地区五峰—龙马溪组页岩气成藏过程及富集机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2021. [WANG X Q. Study on shale gas accumulation process and enrichment mechanism of Wufeng-Longmaxi Formation in Changning Area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.]
- [15] 饶松, 杨铁南, 胡圣标, 等. 川西南地区下寒武统筇竹寺组页岩热演化史及页岩气成藏意义[J]. *地球科学*, 2022, 47(11): 4319–4335. [RAO S, YANG Y N, HU S B, et al. Thermal evolution history and shale gas accumulation significance of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southwest Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(11): 4319–4335.]
- [16] 杨梅华, 左银辉, 段新国, 等. 四川盆地寒武统筇竹寺组烃源岩灶演化及其对成藏的启示[J]. *地球科学*, 2023, 48(2): 582–595. [YANG M H, ZUO Y H, DUAN X G, et al. Hydrocarbon kitchen evolution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its enlightenment to hydrocarbon accumulation[J]. *Earth Science*, 2023, 48(2): 582–595.]
- [17] 徐秋晨. 四川盆地中西部海相地层热演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. [XU Q. Thermal evolution of marine strata in the central and western Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.]
- [18] 郭彤楼, 邓虎成, 赵爽, 等. 四川盆地寒武统筇竹寺组新类型页岩气形成机理与勘探突破[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 1–13. [GUO T L, DENG H C, ZHAO S, et al. Formation mechanisms and exploration breakthroughs of new type of shale gas in Cambrian Qiongzhusi Formation, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 1–13.]
- [19] 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 179–188. [YANG Y M, WEN L, LUO B, et al. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnusi paleohigh, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 179–188.]
- [20] 梅庆华, 何登发, 文竹, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起地质结构及构造演化[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 11–25. [MEI Q H, HE D F, WEN Z, et al. Geologic structure and tectonic evolution of Leshan-Longnusi paleo-uplift in Sichuan Basin, China[J]. *Acta petrolei sinica*, 2014, 35(1): 11–25.]
- [21] 雍锐, 吴建发, 吴伟, 等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气勘探发现及其意义[J]. *石油学报*, 2024, 45(9): 1309–1323. [YONG R, WU J F, WU W, et al. Exploration discovery of shale gas in the Cambrian Qiongzhusi Formation of Sichuan Basin and its significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(9): 1309–1323.]
- [22] 李亚丁, 陈友莲, 严威, 等. 四川盆地寒武系沧浪铺组沉积演化特征[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(9): 1334–1346. [LI Y D, CHEN Y L, YAN W, et al. Research on sedimentary evolution characteristics of Cambrian Canglangpu Formation, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(9): 1334–1346.]
- [23] 严威, 罗冰, 周刚, 等. 川中古隆起寒武系沧浪铺组下段天然气地质特征及勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 290–302. [YAN W, LUO B, ZHOU G, et al. Natural gas geology and exploration direction of the Cambrian Lower Canglangpu Member in central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 290–302.]
- [24] 王文之, 范毅, 赖强, 等. 四川盆地寒武统沧浪铺组白云岩分布新认识及其油气地质意义[J]. *天然气勘探与开发*, 2018, 41(1): 1–7. [WANG W Z, FAN Y, LAI Q, et al. A new understanding of dolomite distribution in the Lower Cambrian Canglangpu Formation of Sichuan Basin: Implication for petroleum geology[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2018, 41(1): 1–7.]
- [25] 刘瑞崧, 四川盆地威远地区筇竹寺组页岩气储层特征及富集规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2023. [Shale gas reservoir characteristics and enrichment patterns of the Qiongzhusi Formation in the Weiyuan Area of the Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu university of technology, 2023.]
- [26] 周慧, 李伟, 张宝民, 等. 四川盆地震旦纪末期—寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. *石油学报*, 2015, 36(3): 310–323. [ZHOU H, LI W, ZHANG B M, et al. Formation and evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplateformal basin in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 310–323.]
- [27] 刘翠, 张克银. 井研—犍为地区麦地坪组—筇竹寺组沉积相特征[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(2): 20–25. [LIU J, ZHANG K Y.

- Sedimentary facies characteristics of Maidiping-Qiongzhusi formation in Jingyan-Qianwei area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(2): 20–25.]
- [28] 陈威振, 田景春, 林小兵, 等. 川西南下寒武统麦地坪组—筇竹寺组元素地球化学特征及其古环境意义——以 JS1 井为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(5): 1784–1798. [CHEN W Z, TIAN J C, LIN X B, et al. Element geochemical characteristics of the Lower Cambrian Maidiping Formation-Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan and its paleoenvironmental significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1784–1798.]
- [29] 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 135–144. [DING W L, XU C C, JIU K, et al. The research progress of shale fractures[J]. *Advances in earth science*, 2011, 26(2): 135–144.]
- [30] 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. [GAO J, HE S, YI J Z. Discovery of high density methane inclusions in Jiaoshiba shale gas field and its significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 472–480.]
- [31] 席斌斌, 腾格尔, 俞俊杰, 等. 川东南页岩气储层脉体中包裹体古压力特征及其地质意义[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 473–479. [XI B B, Tenger, YU L J, et al. Trapping pressure of fluid inclusions and its significance in shale gas reservoirs, southeastern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(4): 473–479.]
- [32] 于强, 任战利, 朱增伍, 等. 彬县—铜川地区延长组油页岩晚白垩世以来的抬升剥蚀与冷却历史[J]. *地球科学*, 2018, 43(6): 1839–1849. [YU Q, REN Z L, ZHU Z W, et al. Exhumation, cooling and erosion history of Triassic oil shale since Late Cretaceous, Binxian-Tongchuan area of Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(6): 1839–1849.]
- [33] 吴建发, 吴娟, 刘文平, 等. 页岩气成藏过程的阶段划分——以四川盆地宁西地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏过程为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 83–92. [WU J F, WU J, LIU W P, et al. Stage division of shale gas accumulation process: An example from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Ningxi area of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 83–92.]
- [34] HE L J, XU H H, WANG J Y. Thermal evolution and dynamic mechanism of the Sichuan Basin during the Early Permian-Middle Triassic[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(12): 1948–1954.
- [35] HE L J, HUANG F, LIU Q Y, et al. Tectono-thermal evolution of Sichuan Basin in Early Paleozoic[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, 36(2): 10–17.
- [36] JIANG Q, QIU S, ZHU C Q. Heat flow study of the emeishan large igneous province region: Implications for the geodynamics of the emeishan mantle plume[J]. *Tectonophysics*, 2018, 4(31): 11–27.
- [37] ZHU C Q, HU S B, QIU N S, et al. Geo-thermal constraints on emeishan mantle plume magmatism: Paleotemperature reconstruction of the Sichuan Basin, SW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107(1): 71–88.
- [38] 饶松, 胡迪, 胡圣标, 等. 叠合盆地深层构造—热演化研究方法: 以四川盆地为例[J]. *地质科学*, 2019, 54(1): 159–175. [RAO S, HU D, HU S B, et al. Tectono-thermal reconstruction methods for deep zone in superimposed basins: A case study from Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2019, 54(1): 159–175.]
- [39] 黄方, 刘琼颖, 何丽娟. 晚喜山期以来四川盆地构造—热演化模拟[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3742–3753. [HUANG F, LIU Q Y, HE L J. Tectono-thermal modeling of the Sichuan Basin since the Late Himalayan period[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3742–3753.]
- [40] 何丽娟, 黄方, 刘琼颖, 等. 四川盆地早古生代构造—热演化特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(2): 10–17. [HE L J, HUANG F, LIU Q Y, et al. Tectono-thermal evolution of Sichuan Basin in Early Paleozoic[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, 36(2): 10–17.]
- [41] 李文. 涪陵与宜昌地区海相页岩裂缝脉体成因及流体包裹体古温压特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [LI W. Origins of fractured veins and characteristics of paleo-temperature and pressure of fluid inclusions in marine shales of Fuling and Yichang regions[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.]
- [42] 崔悦, 李熙喆, 郭伟, 等. 川南深层奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩裂缝方解石脉对页岩气运移富集的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(6): 1199–1208. [CUI Y, LI X Z, GUO W, et al. Enlightenment of calcite veins in deep Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi shales fractures to migration and enrichment of shale gas in southern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(6): 1199–1208.]
- [43] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 中国南海相页岩气保存机理及模式[J]. *地质学报*, 2023, 97(9): 2858–2873. [SONG Y, LI Z, JIANG Z X, et al. Preservation mechanism and model of marine shale gas in southern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(9): 2858–2873.]
- [44] 潘占昆, 刘冬冬, 黄治鑫, 等. 川南地区泸州区块五峰组—龙马溪组页岩裂缝脉体中甲烷包裹体分析及古温压恢复[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(3): 242–253. [PAN Z K, LIU D D, HUANG Z X, et al. Paleotemperature and paleopressure of methane inclusions in fracture cements from the Wufeng-Longmaxi shales in the Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(3): 242–253.]
- [45] 刘冬冬, 郭靖, 潘占昆, 等. 页岩气藏超压演化过程: 来自四川盆地南部五峰组——龙马溪组裂缝流体包裹体的证据[J]. *天然*

- 气工业, 2021, 41(9): 12–22. [LIU D D, GUO J, PAN Z K, et al. Overpressure evolution process in shale gas reservoir: Evidence from the fluid inclusions in the fractures of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(9): 12–22.]
- [46] 梁志凯, 姜振学, 吴伟, 等. 川南长宁地区不同构造单元五峰组—龙马溪组流体包裹体特征及其地质意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3652–3665. [LIANG Z K, JIANG Z X, WU W, et al. Characteristics and geological significance of fluid inclusion of Wufeng—Longmaxi Formation in different tectonic units in Changning area, southern Sichuan[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2022, 53(9): 3652–3665.]
- [47] 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. [TANG L, SONG Y, ZHAO Z G, et al. Origin and evolution of overpressure in shale gas reservoirs of the Upper Ordovician Wufeng Formation—Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 37–53.]
- [48] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 中国南方海相页岩气保存机理及模式[J]. 地质学报, 2023, 97(9): 2858–2873. [SONG Y, LI Z, JIANG Z X, et al. Preservation mechanism and model of marine shale gas in southern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(9): 2858–2873.]
- [49] 王强, 魏祥峰, 魏富彬, 等. 川东南涪陵地区五峰组—龙马溪组页岩气藏中的超压作用[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 333–340. [WANG Q, WEI X F, WEI F B, et al. Overpressure in shale gas reservoirs of Wufeng-Longmaxi formations, Fuling area, southeastern Sichuan Basin[J]. PETROLEUM GEOLOGY & EXPERIMENT, 2019, 41(3): 333–340.]
- [50] 陈丽清, 吴娟, 何一凡, 等. 四川盆地绵阳—长宁拉张槽中段下寒武统筇竹寺组页岩裂缝脉体特征及古流体活动过程[J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 142–152. [CHEN L Q, WU J, HE Y F, et al. Fracture vein characteristics and paleofluid activities in the Lower Cambrian Qiongzhusi shale in the central portion of the Mianyang-Changning intracratonic Sag, Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 142–152.]
- [51] 雍锐, 石学文, 罗超, 等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气“槽—隆富集”规律及勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1–16. [YONG R, SHI X W, LUO C, et al. Aulacogen—uplift enrichment pattern and exploration prospect of Cambrian Qiongzhusi Formation shale gas in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(6): 1–16.]
- [52] 梁峰, 姜巍, 戴赟, 等. 四川盆地威远—资阳地区筇竹寺组页岩气富集规律及勘探开发潜力[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(5): 755–763. [LIANG F, JIANG W, DAI Y, et al. Enrichment law and resource potential of shale gas of Qiongzhusi Formation in Weiyuan—Ziyang areas, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(5): 755–763.]
- [53] 戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 473–480. [DAI J X. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gasfield[J]. Petroleum Experimental Geology, 2003, 25(5): 473–480.]
- [54] 吴伟, 罗冰, 罗文军, 等. 再论四川盆地川中古隆起震旦系天然气成因[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(8): 1447–1453. [WU W, LUO B, LUO W J, et al. Further discussion about the origin of natural gas in the Sinian of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Earth Science, 2016, 27(8): 1447–1453.]
- [55] 魏国齐, 谢增业, 杨雨, 等. 四川盆地中部北斜坡震旦系—寒武系大型岩性气藏形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 835–846. [WEI G Q, XIE Z Y, YANG Y, et al. Formation conditions of Sinian-Cambrian large lithologic gas reservoirs in the north slope area of central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 835–846.]
- [56] 梅庆华. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起构造演化及其成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. [MEI Q H. Tectonic evolution and formation mechanism of Leshan-Longnyusi paleo-uplift, Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.]

(编辑 付娟娟)

第一作者: 李海(1978年—), 高级工程师, 主要从事石油与天然气开发研究与技术管理工作, li_hai@petrochina.com.cn。

通信作者: 刘达东(1987年—), 博士, 副研究员, 主要从事非常规油气地质评价研究, liudd@cup.edu.cn。