

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.01.006

## 渝东地区平桥构造寒武系洗象池群天然气成藏特征及意义

陈绵琨, 梁西文, 刘 漪, 盛贤才

CHEN Mian-Kun, LIANG Xi-Wen, LIU Yi, SHENG Xian-Cai

中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北 武汉 430073

Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan 430073, Hubei, China

**摘要:** 位于渝东地区南部平桥一带的平桥1井在洗象池群中获得天然气勘探突破。本文通过对洗象池群气藏中的天然气碳同位素研究, 认为气藏中烃类来源于五峰组—龙马溪组页岩气; 基于平桥1井岩心、成像测井, 结合毗邻的南川三泉等洗象池群剖面的储层初步研究, 认为: 平桥1井的产气层段孔洞发育, 气藏属于孔洞型或裂缝—孔洞型; 平桥1井洗象池群岩心裂缝中的白云石、石英及方解石等矿物充填序列及包裹体特征研究表明, 裂缝形成及矿物充填主要发生在燕山—喜山期, 发育构造变形的燕山期是洗象池群气藏充注的重要时期, 燕山—喜山期的隆升期也是气藏进一步充注的时期。渝东南部平桥一带洗象池群的成功勘探证实早期页岩气藏通过部分页岩气释放及侧向供烃可以形成工业气藏, 对整个渝东高陡构造带下组合的油气勘探具有推动意义。

**关键词:** 寒武系; 洗象池群; 成藏特征; 平桥构造; 渝东地区

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)01-0085-10

**Chen M K, Liang X W, Liu Y and Sheng X C. 2024. Gas Reservoir Forming Characteristics and Significance of the Middle–Upper Cambrian Xixiangchi Group in Eastern Chongqing area. *South China Geology*, 40(1):85–94.**

**Abstract:** A major gas exploration breakthrough was made in the Xixiangchi group through Well Pingqiao 1 which located in Pingqiao area, south of eastern Chongqing. Based on the study of carbon isotope of natural gas, it is considered that the hydrocarbons in Xixiangchi group reservoir come from Wufeng-Longmaxi formation source rocks. A preliminary study on the reservoir through core, logging of Well Pingqiao 1, combined with Xixiangchi Group section from nearby Sanquan of Nanchuan and etc reveals that the vug of Xixiangchi group are developed, and the gas reservoir belongs to vuggy reservoir or fracture - vuggy reservoir. Based on study of the sequence of filling minerals such as dolomite, quartz, calcite and etc. and mineral inclusion characteristics of fractures of core from Well Pingqiao 1, the results show that the fracture formation and mineral filling mainly occurred in Yanshan-Himalayan period, the Yanshan tectonic deformation period is an important period for hydrocarbon charging in Xixiangchi group, and the Yanshan-Himalayan uplift period is also a period for further hydrocarbon charging. The successfully exploration of Xixiangchi Group in Pingqiao area, south of eastern Chongqing proves that partial shale gas release and the lateral hydrocarbon supply of early shale gas can form industrial gas reservoirs, which is of great significance to hydrocarbon exploration of the lower assemblage of the whole high-steep structural belt in Eastern Chongqing.

**Key words:** Cambrian; Xixiangchi group; reservoir forming; characteristics; Eastern Chongqing

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2023-11-22

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研项目(P22077)

第一作者: 陈绵琨(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事常规天然气及页岩气的勘探评价工作, E-mail: 153640761@qq.com

四川盆地寒武纪筇竹寺组是国内重要的烃源岩,主要分布于绵竹-长宁裂陷槽(周慧等,2015;周国晓等,2020)和万源-达州裂陷(赵文智等,2017)及周缘;渝东地区位于四川盆地东部,除其东南边缘(赵瞻等,2017;陈孝红等,2022;李海等,2022;李培军等,2022;罗胜元等,2022)外,寒武系烃源岩并不发育。晚奥陶世-早志留世早期是四川盆地另一个烃源岩主要发育时期,渝东地区主体处于志留纪前陆盆地的隆后拗陷位置,五峰组等地层发育齐全(陈旭等,2015),以深水陆棚沉积为主(孙莎莎等,2018)的优质页岩厚度大(郭彤楼和张汉荣,2014),是海相页岩气有利区(董大忠等,2018)和我国目前最大的页岩气开发区。洗象池群白云岩是渝东地区下组合(即震旦系-下古生界)最重要的天然气储集层系之一,贾鹏等(2017)建立了洗象池群的层序地层格架,认为高频海平面升降旋回控制了高能浅滩的发育;李文正等(2020)认为浅滩型储层是洗象池群主要的储层类型,加里东期古岩溶改造是储层形成的关键;石书缘等(2020)提出大气淡水岩溶作用的叠加是膏盐岩不发育区规模优质储层形成的主控因素,埋藏溶蚀作用的叠加改造是膏盐岩发育区优质储层形成的关键。

渝东地区下组合虽然具备一定的成油气地质条件,但历经数十年的油气勘探一直未取得进展。聂海宽等(2012;2016)认为断裂、裂缝以及盖层隆升幅度对四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气藏的成藏具有重要影响,因而笔者认为在较强构造改造区,如四川盆地构造改造适中的渝东地区高陡构造带,在上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组优质烃源岩与洗象池群白云岩储层形成侧向对接的地质背景下,先期页岩气藏的改造,即断裂、裂缝及盖层隆升导致页岩气的泄压释放可以形成油气藏。基于这一认识,优选渝东南部平桥构造钻探了平桥1井,并获得工业气流。通过对其稳定同位素以及包裹体分析测试资料的研究,认为勘探结果证实了钻探前的认识。这一成果对渝东地区以及国内相似地质条件的油气勘探区块具有重要的借鉴意义。

## 1 区域地质背景

渝东地区区域构造位置主体隶属于川东高陡构造带,东南以齐岳山断裂带为界,西北以华蓥山断裂为界并与川中隆起地区相邻,北至南大巴断裂带,南至重庆-南川-武隆一带。地面构造为中国最典型的隔挡式褶皱发育区,背斜窄长而高陡,出露较老地层,向斜宽阔而平坦,为较新地层出露区,以北东向、北北东向构造为主(图1)。梅廉夫等(2010)认为渝东地区南段主体构造形成于早白垩世早中期,而北段主体构造形成稍晚,为早白垩世晚期,是江南-雪峰中生代陆内变形向北西陆内扩展的结果;汤济广等(2021)认为渝东南主体NE向构造形成于中燕山期(早白垩世)。晋宁运动形成扬子地块统一基底之后,震旦纪及早古生代以升降运动为特征,可以分为伸展分异台地(震旦纪-早寒武世沧浪铺期)、稳定统一台地(早寒武世龙王庙期-中奥陶世宝塔期)以及挤压前陆拗陷(晚奥陶世-志留纪)等三个阶段(孙自明等,2021)。

## 2 平桥1井寒武系洗象池群天然气聚集的基本条件

针对渝东地区寒武纪烃源岩不发育的特点,本区下组合勘探对象主要考虑以寒武系洗象池群大套白云岩作为勘探目标层,以志留系烃源岩(页岩气)侧向对接供烃的油气藏为目标,按照“页岩气供烃,晚期成藏”的勘探思路,遵循“圈闭构造清晰、源储对接可靠”的具体井位部署原则,为探索上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气侧向对接供烃的“晚期它源成藏模式”,推动川东高陡构造带下组合勘探,部署钻探风险探井-平桥1井。钻探依据包括:①平桥构造为一个较完整的长轴型断背斜圈闭,为可靠圈闭;②区域上寒武系洗象池群发育台内浅滩白云岩储层,具有分布范围广、厚度稳定的特点,其厚度50~100 m,孔隙度可达2%~4%,预测平桥构造优质储层发育;③上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组为一套区域性优质烃源层,生烃强度为 $40 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。晚白垩世以来进入构

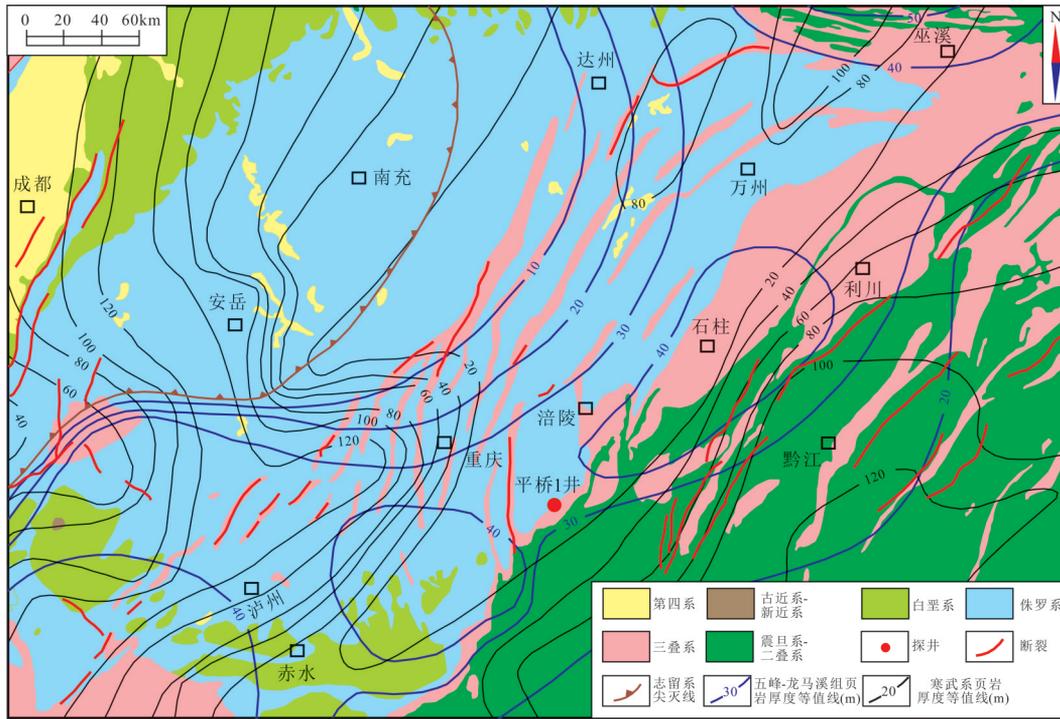


图1 渝东及周缘地质简图和优质页岩厚度等值线

Fig. 1 Geological sketch showing high-quality marine shale thickness isoline in the Eastern Chongqing area and its adjacent are 五峰组-龙马溪组优质页岩厚度资料据郭彤楼等(2014),寒武系页岩厚度资料据朱光有等(2020)

造抬升泄压阶段,初步计算晚期排烃量占总生烃量的60%左右,能为常规圈闭提供充注的气源;④盖层条件优越,发育志留系砂泥岩区域性盖层,厚度1000~1100 m;⑤平桥构造西南部存在上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组烃源与寒武系-下奥陶系储层良好的对接关系。

### 2.1 钻探简况

平桥1井于2019年6月25日开钻,2019年10月18日完钻,完钻层位为洗象池群。录井中平桥1井洗象池群见9层油气显示,其中第6层(全烃含量0.08%~5.91%;甲烷含量0.076%~5.644%)和第7层(全烃含量0.07%~4.94%;甲烷含量0.050%~4.645%)油气显示相对较好,两层厚26.00 m。洗象池群取心井段岩性相对致密,现场统计含气及微含气心长10.87 m。测井解释结果显示平桥1井钻遇洗象池群储层108.2 m,其中相对优质孔洞型储层10.5 m。优选井段3039~3125 m(86 m)试气,针对洗象池群优质储层“多而薄”的特征,优选“多级交替注入”酸压改造工艺,采用12 mm油嘴×20 mm孔板求产,日产气25.1万方。

### 2.2 测试方法简介

本文研究共采集4个天然气样品,2个样品取自平桥1井洗象池群,另2个样品取自平桥1井同一平台的生产井五峰组-龙马溪组,所有天然气样品均在井口分离后采取,采用钢瓶装样后密封,天然气组分分析及碳同位素测试均在中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院分析实验中心完成。天然气组分分析采用Agileng GC6890N气相色谱仪,以He为载体,用双TCD检测器进行检测。碳同位素测试采用MAT253气体同位素质谱仪进行检测。

本文研究的15个岩心样品产自平桥1井洗象池群,在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心完成包裹体测试。应用AXIOPLAN-2偏光显微镜以及MDS600全自动冷热台完成样品裂缝中充填的白云石、石英和方解石包裹体的均一温度检测,15个样品中有14个检测出流体包裹体,有1个检测出包裹体的样品应用Horiba HR拉曼光谱仪进行了流体包裹体成分检测。

### 2.3 气源对比

渝东平桥1井洗象池群天然气组份以烃类气体为主,其中甲烷( $\text{CH}_4$ )含量介于95.46%~95.65%之间,乙烷等( $\text{C}_2\text{-C}_4$ )含量很低,因此天然气具有很高的干燥系数。将平桥1井洗象池群天然气气体组分与平桥1井同一平台的开发井中的志留

系页岩气进行比较(表1),结果表明,两者甲烷含量均大于95%,但志留系页岩气甲烷、乙烷含量稍高,平桥1井洗象池群气藏含更多的非烃气体(主要为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ ),如 $\text{CO}_2$ 平均含量为2.17%, $\text{H}_2\text{S}$ 平均含量为0.485%,与之对应的志留系龙马溪组页岩气 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 平均含量分别只有0.315%和0%(表1)。

表1 平桥地区洗象池群与五峰组-龙马溪组天然气地球化学数据

Table 1 Natural gas geochemical data of Xixiangchi group and Wufeng Formation - Longmaxi Formation from Pingqiao block

样号	井号	层位	气组分(%)								$\delta^{13}\text{CPDB}(\text{‰})$		
			$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2$	He	$\text{C}_1(\text{CH}_4)$	$\text{C}_2(\text{C}_2\text{H}_6)$	$\text{C}_3(\text{C}_3\text{H}_8)$
L62601143	平桥1井	洗象池群	95.65	0.33	0.01	2.48	0.48	0.89	0.11	0.05	-29.906	-34.958	-33.654
L62601012	平桥1井	洗象池群	95.46	0.33	0.01	1.86	0.49	1.77	0.03	0.05	-30.202	-35.898	-33.728
L62601026	生产井	龙马溪组	99.04	0.46	0.01	0.3	0	0.11	0.03	0.05	-32.024	-37.064	-37.413
L62601137	生产井	龙马溪组	98.58	0.45	0.01	0.33	0	0.56	0.02	0.05	-31.927	-35.869	-37.43

取自渝东平桥1井洗象池群的天然气碳同位素分析样品, $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于-29.906‰~-30.202‰之间(表1),较与平桥1井同一平台开发井中志留系页岩气(表1中L62601026和L62601137样品)、卧龙河-相国寺黄龙组(戴金星等,2010)偏大; $\delta^{13}\text{C}_2$ 介于-34.958‰~-35.898‰之间,与平桥1井同一平台开发井中志留系页岩气以及供烃来自于志留系烃源岩的卧龙河-相国寺黄龙组天然气中的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 极为接近(略偏大),小于供烃来自于二叠系龙潭组煤系地层的龙岗长兴组和飞仙关组天然气(邓焱等,2018)、供烃来自于寒武系烃源岩的磨溪龙王庙组(魏国齐等,2014)以及供烃来自于安岳-德阳裂陷槽寒武系筇竹寺组泥岩的高石-磨溪灯影组(吴伟等,2016)等层系的 $\delta^{13}\text{C}_2$ (图2a)。在乙烷等碳数较高烃类的碳同位素应用中,一般认为乙烷等的碳同位素值较甲烷碳同位素具有较强的稳定性和母质类型继承性(戴金星等,1992)。显然,根据前述对比结果,平桥1井洗象池群天然气来自于四川盆地志留系气源岩,而不是来自于其它层系如二叠系龙潭组和寒武系筇竹寺组的气源岩。在甲烷碳同位素应用中,人们普遍认为甲烷受热演化程度和原始母质双重影响,即在低成熟度条件下形成的天然气富集 $^{12}\text{C}$ ,随着烃源岩成熟度的提高,形成的

天然气越来越富集 $^{13}\text{C}$ 。朱光有等(2006)认为,由于 $^{12}\text{C}$ - $^{12}\text{C}$ 键优先破裂, $^{12}\text{C}$ 更多参与了TSR反应(硫酸盐热化学还原反应),而 $^{13}\text{C}$ 则更多保留在残留的烃类中,使反应后残留的烃类中相对富集 $^{13}\text{C}$ 。平桥1井洗象池群天然气碳同位素分析样品中 $\delta^{13}\text{C}_1$ (包括 $\delta^{13}\text{C}_2$ )较焦石坝志留系页岩气、卧龙河-相国寺黄龙组偏大,可以认为是烷烃类参与了TSR反应的结果。在 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ (图2a)以及 $\delta^{13}\text{C}_2$ - $(\delta^{13}\text{C}_2\text{-C}\delta^{13}\text{C}_1)$ 的关系图(图2b)上,平桥1井洗象池群气藏与五峰-龙马溪页岩气藏以及石炭系气藏(气源岩为志留系)的碳同位素落在同一区域,进一步表明他们具有同源关系,而远离龙王庙组和灯影组(气源岩为寒武系)、二叠系、三叠系(气源岩为二叠系)等其它层系气藏所处区域。

### 2.4 天然气成藏配置分析

#### 2.4.1 供烃条件

渝东地区平桥1井洗象池群气藏的烃源为五峰组-龙马溪组优质烃源岩,厚度在30~40m之间,埋藏深度普遍超过6000m,其成熟度 $\text{Ro}>2.0\%$ 。由于优质烃源岩的顶底岩层封闭性较好,侧向上没有流体运移动力,存在由烃源岩生烃及热解作用造成的流体膨胀(Bark,1990),形成早期超压页岩气气藏(李双建等,2016),高键等(2015)基于焦石坝

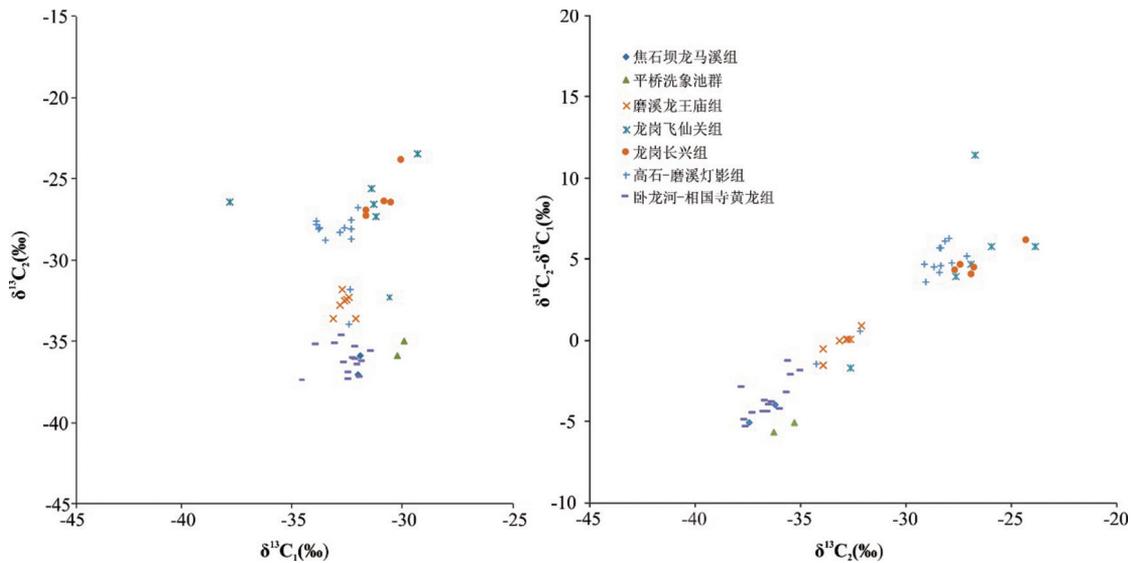


图2 平桥1井洗象池群气藏及渝东其它地区主要气田天然气 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2$ (a)、 $\delta^{13}C_2-(\delta^{13}C_2-C\delta^{13}C_1)$ (b)关系图

Fig. 2 Relationship diagram showing  $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2$  (a),  $\delta^{13}C_2-(\delta^{13}C_2-C\delta^{13}C_1)$  (b) of natural gas in Well Pingqiao 1 and other main gas field in the Eastern Chongqing area

页岩气田中高密度甲烷包裹体研究认为,燕山运动抬升初期页岩气藏的压力为102.6~137.3 MPa,压力系数达到1.63~2.18。在早燕山构造变形期,超压五峰组—龙马溪组页岩气藏与洗象池群的对接,形成了较好的供烃条件。燕山期以来地层的抬升过程中,流体压力总体降低,但流体压力的降低不足以弥补地层剥蚀的影响,造成整个抬升过程中页岩气储层的流体压力系数进一步增加,在抬升期构造调整的情形下,可形成页岩气藏的进一步排烃。现今五峰组—龙马溪组页岩气藏的压力系数为1.0~1.6,存在大量页岩气释放,能够为晚期常规气藏的形成提供充注的气源。

#### 2.4.2 储集条件

平桥1井位于川东南一带,寒武系洗象池群洗三段整体为局限-开阔海台地沉积环境,具有北西向南东水体变深的趋势,平桥及周缘处于局限-开阔台地过渡带,具有发育台内颗粒滩的沉积背景。平桥1井取心段主体属于潮坪环境,但并非对应主产层段,利用该井的密度、中子孔隙度、声波时差等测井资料解释出洗象池群储层厚度在50~160 m之间,储层孔隙度在1.5%~12.2%之间。从后续在平桥构造钻探井的储层研究结果来看,洗象池群发育的储层主体属于台内滩型(砂屑滩),晚燕山期-

喜山期与TSR有关的埋藏溶蚀作用对相对优质储层的形成具有重要作用,也是导致气藏含 $H_2S$ 气体的原因,储集空间包括膏溶孔、非组构溶蚀孔洞等等。

#### 2.4.3 保存条件

渝东地区平桥构造洗象池群区域盖层为五峰组-龙马溪组页岩,由于这套区域盖层为页岩气产层,可以形成烃浓度封闭,防止天然气散失。此外,洗象池群上覆的桐梓组、红花园组页岩、致密灰岩等可作为直接盖层,因此平桥构造盖层条件优越。

与平桥构造有关的断层断距适中,使得页岩气层与洗象池群直接对接,形成页岩气侧向供烃,但也没有因为断距过大导致大量烃类气体沿断层散失,这一特点决定平桥构造具有相对优越的保存条件。

#### 2.4.4 输导体系

平桥构造为逆断层所夹持(图3),这类断层成为重要气态烃运移通道。地震剖面资料(张勇等,2023)表明,平桥周缘均为断距不大的断层,断层大都消失于志留系等滑脱层中,应属于封闭性断-盖空间配置类型(张一平,2016),这种配置可以对油气侧向运移起连接作用。洗象池群本身发育孔洞型储层,而其岩心资料显示还存在与燕山期构造变

形、隆升过程有关的裂缝,因此相关逆断层、孔洞层、裂缝组成五峰组—龙马溪组页岩气运移至洗象池群的完整输导体系。由于烃类充注时期为气态,且超压的页岩气藏对常压的洗象池群具有较高的压力差,可以认为相关的输导体系具有较高的输导效率。

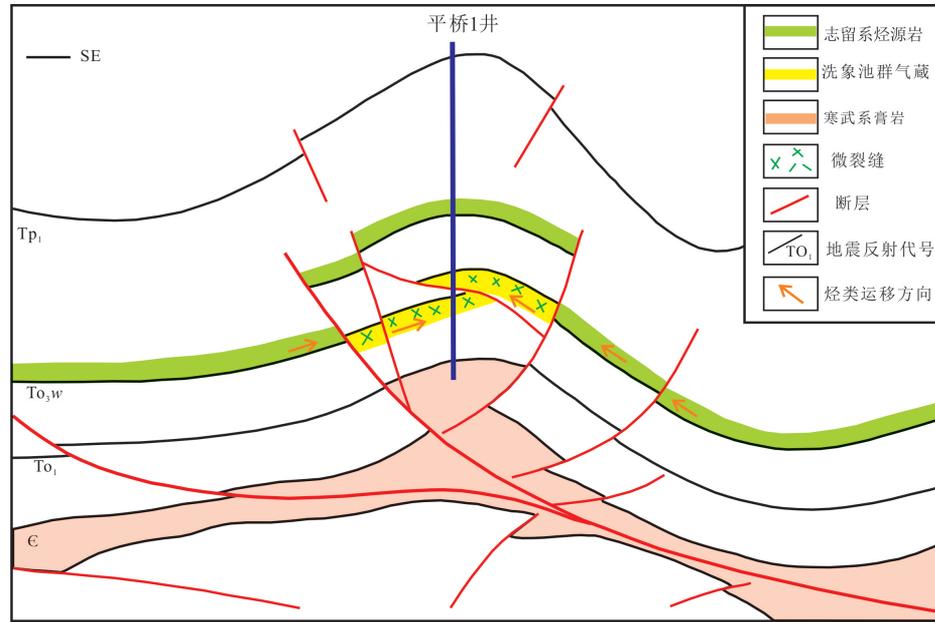


图3 渝东地区过平桥1井北西-南东向气藏解释剖面示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing the SE-NW-trending cross section across Well Pingqiao 1 in eastern Chongqing

## 2.5 裂缝充填物包裹体特征与成藏演化分析

裂缝中充填矿物的充填关系、不同脉体的交切关系是划分裂缝矿物充填次序的重要依据,矿物阴极发光是划分充填期次的重要手段。早期充填物多沿裂缝边缘生长,晚期充填物则充填于裂缝的中央或早期矿物的晶间孔中。矿物阴极发光主要受控于矿物的微量元素特征,尤其是Fe、Mn元素,其中Fe作为猝灭剂,Mn作为激发剂。同期矿物来自于相同流体源,微量元素特征相似,阴极发光特征相近;而不同时期充注的流体,微量元素特征往往存在差异,矿物阴极发光特征不尽相同。平桥1井洗象池群裂缝相对完整的矿物充填期次见图4。第1期为晶粒状白云石,阴极发光为暗棕色光,一般单独充填裂缝,形成白云石脉(图4a);第2期亦为晶粒状白云石,但阴极发光为桔红色,常和石英、方解石等共同作为单一裂缝的充填物(图4a、c、d、e),亦可单独充填裂缝形成白云石脉,可见其切割第1期裂缝充填物;第3期为自生石英,阴极发光为暗色光或不发光,常见与白云石等矿物共同充填单一裂缝

(图4a、c),亦见其单独充填裂缝形成石英脉;第4期为方解石,阴极发光为中等强度桔黄色光,常与发桔红色的白云石共同充填裂缝(图4c、d),亦见其单独充填裂缝形成方解石脉(图4b);第5期为石英,可见其切割第2期白云石(图4e)或第4期方解石(图4f),与更晚期的晶粒状白云石共同组成复合矿物充填脉体,亦可单独组成脉体,阴极发光为暗色光或不发光;第6期为白云石,见其切割第4期方解石(图4f),可单独充填裂缝形成白云石脉,亦可见其与石英矿物共同充填裂缝,阴极发光为桔红色光。

平桥1井岩心裂缝中充填的矿物包括白云石、石英、方解石等,这些矿物捕获的包裹体以气液两相为主,未见单相气体包裹体,激光拉曼测试结果显示包裹体中的气体组分以甲烷为主。第1期白云石充填物包裹体不发育,未检出可供分析的包裹体。第2期白云石充填物检测到含烃盐水包裹体成群出现,均一温度较集中,为137.6℃~174.4℃,平均值为155.0℃(图5a)。第3期石英充填物亦检测到

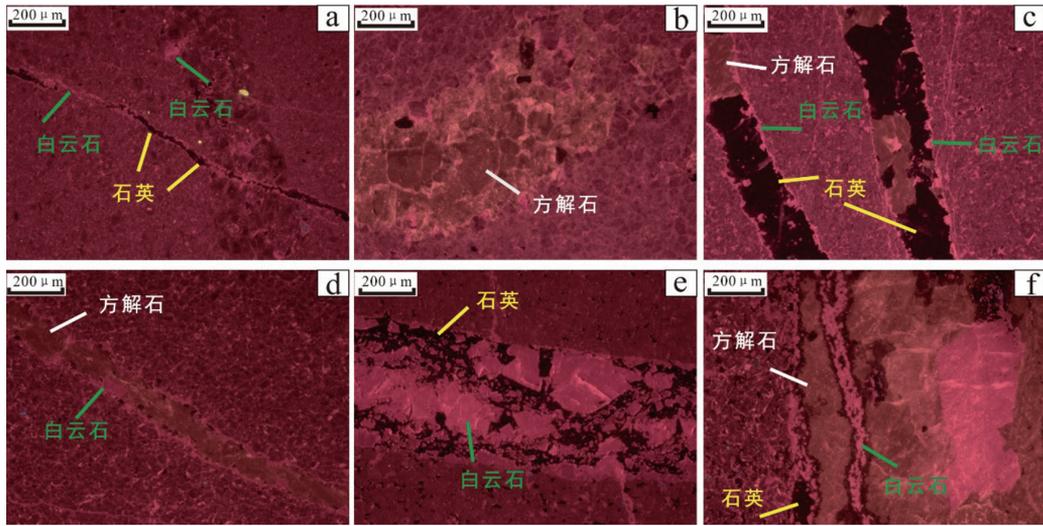


图4 渝东地区平桥1井洗象池群裂缝充填矿物阴极发光显微照片

Fig. 4 The cathodoluminescence micrograph of fissure filling of Xixiangchi group of Well Pingqiao 1 in Eastern Chongqing area

a. 井深3013.89m, 裂缝第2期白云石充填物、第3期石英充填物截切第1期白云石充填物, 第1期白云石发暗棕色光, 第2期白云石发桔红色光, 第3期石英不发光; b. 井深3014.84 m, 裂缝被第4期方解石充填, 发桔黄色光; c. 井深3019.96 m, 裂缝被第2期白云石、第3期石英和第4期方解石充填, 白云石发桔红色光, 石英不发光, 方解石发桔黄色光; d. 井深3030.62 m, 裂缝被第2期白云石和第4期方解石充填, 白云石发桔红色光, 方解石发桔黄色光; e. 井深3133 m, 裂缝被第2期白云石和第5期石英充填, 白云石发桔红色光, 石英不发光; f. 井深3134.3m, 裂缝中第4期方解石被第5期石英及第6期白云石截切, 方解石发桔黄色光, 石英不发光, 白云石发桔红色光

含烃盐水包裹体, 多成群出现, 均一温度主要集中在 $126.4^{\circ}\text{C} \sim 155.1^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均值为 $134.5^{\circ}\text{C}$ 。第4期方解石充填物检测到含烃盐水包裹体成群出现, 均一温度较集中, 为 $95.3^{\circ}\text{C} \sim 135.4^{\circ}\text{C}$ , 平均值为 $117.3^{\circ}\text{C}$  (图5b)。截切第2期白云石、第4期方解石的第5期石英充填物目前未获包裹体。截切第3期充填物的第6期白云石亦捕获成群出现的气液两相包裹体, 均一温度为 $105.2^{\circ}\text{C} \sim 118.7^{\circ}\text{C}$ , 平均值为 $111.6^{\circ}\text{C}$ 。可以看出: 平桥1井洗象池群裂缝充填物第2期至第6期充填物包裹体均一温度依次降低, 且第2期至第4期可出现在同一裂缝中, 笔者认为这些裂缝充填物应该形成于构造隆升期。裂变径迹资料揭示本区隆升起始时间为 $95 \sim 60 \text{ Ma}$ , 即晚白垩世晚期-古近纪早期 (李双建等, 2011); 朱传庆等 (2017) 认为, 大致以 $30 \text{ Ma}$ 为界, 重庆北碚地区表现为两期冷却, 先期冷却缓慢, 后期冷却迅速。晚燕山-喜山期的构造隆升阶段是平桥1井洗象池群裂缝形成的重要时期, 形成了第2至5期矿物充填物, 并捕获均一温度依次降低的气液两相包裹体。洗象池群第1期裂缝及白云石充填物由于具有较暗的阴极发光性, 早于缝合线形成, 缺乏

包裹体, 与第2期至第5期差别较大, 推测其形成于加里东期。

渝东地区平桥1井系统的普通薄片、岩心观察资料显示: 洗象池群很少观察到沥青, 包裹体测试分析也未见到含液态烃的包裹体或沥青包裹体, 显然油气成藏主要依赖于气态烃充注。渝东地区在晚侏罗世至早白垩世达到最大埋深, 埋藏史一热史分析模拟结果表明洗象池群达到的最大古地温为 $220^{\circ}\text{C}$ 左右。早白垩世晚期是主变形期和储层裂缝形成的重要时期, 是五峰组-龙马溪组页岩气层与洗象池群对接的重要时期, 亦是气态烃充注的重要时期, 推测这一时期仅产生硫酸盐热还原反应以及埋藏溶蚀, 没有矿物生成及相关包裹体产生。在晚燕山-早燕山期的构造缓慢隆升期以及晚喜山期的快速隆升期, 早期裂缝进一步演化, 除了发生由于页岩气卸压导致的气态烃进一步充注外, 同时还相继发生了白云石、石英、方解石等复杂的矿物充填作用, 形成了多矿物充填的脉体以及单矿物成分的白云石脉、石英脉、方解石脉, 并记录了反映本区隆升时期流体特征的含烃盐水包裹体。

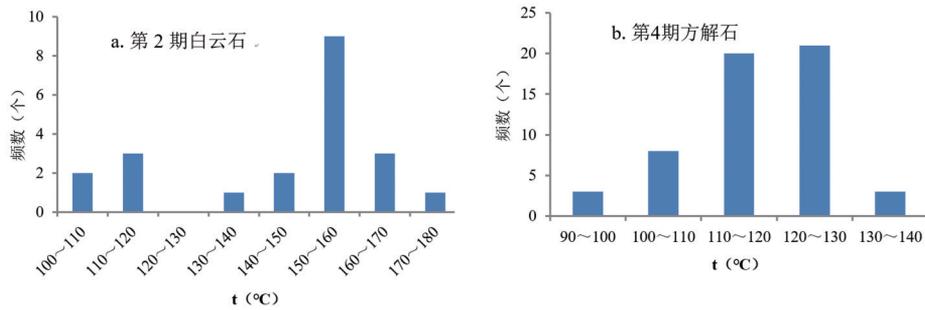


图5 渝东地区平桥1井洗象池群裂缝充填矿物含烃盐水包裹体均一温度分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of homogenization temperature of hydrocarbon-containing inclusion of minerals in fractures of Xixiangchi Group of Well Pingqiao 1 in the eastern Chongqing

## 2.6 成藏主控因素

渝东地区平桥构造页岩气侧向供烃、晚期成藏型的油气主要来自页岩气藏的抬升泄压排烃作用,因此,以页岩气的生成改造作用为研究主线,是确定和寻找这一类型油气藏的关键。通过解剖平桥洗象池群页岩气藏,认为成藏的关键因素在于:(1)平桥一带发育五峰组-龙马溪组优质烃源岩,在前燕山期处于持续沉降深埋,在烃源岩达到(过)成熟阶段后形成页岩气层。(2)后期适中的构造变形和隆升-剥蚀幅度是晚期油气能否成藏的关键。平桥一带构造变形适中,保证了五峰组-龙马溪组页岩气层供烃与寒武系储层的空间匹配,使得气态烃充注不存在阻隔;适度的隆升作用,是页岩气层晚期再次大规模排烃的动力,保证了对寒武系储层油气充注过程中不发生大量的油气散失。(3)优质的圈闭是晚期成藏的有利场所,圈闭的类型起着重要作用,平桥一带发育断背斜圈闭,是一种较好的圈闭类型,保证在构造变形及隆升过程中页岩气卸压释放的气态烃得以有效聚集。

渝东地区普遍发育五峰组-龙马溪组烃源岩,在前燕山期构造活动不强,确保了页岩气藏未遭破坏,后期构造变形强度、隆升幅度以及源储对接关系、圈闭类型是此类油气藏形成的主控因素。

## 3 勘探启示

### 3.1 证实了以页岩气供烃为核心的油气藏勘探思路的可行性

在以往我国南方海相层系发现的油气藏中,油

气成藏过程大都经历了古油藏形成、古油藏裂解生气成古气藏、古气藏晚期调整形成今气藏等过程(姜华等,2014),这种模式是一种早期成藏晚期调整的成藏模式,现今气藏主要分布在古油气藏周缘。渝东地区早寒武世烃源岩欠发育,且离烃源岩发育区有一定距离,不具备与早寒武世烃源岩供烃有关的古油藏形成、裂解及调整的油气成藏条件。晚奥陶世-早志留世地层处于烃源岩发育有利区,但与之配套的志留系储层欠发育,亦难以形成相关与之有关的古油藏形成、裂解及调整型油气藏。这两点因素是导致区内以往针对下组合的探井未获勘探发现的主要原因。在近期的勘探实践中,针对渝东地区前构造变形-隆升期页岩气普遍存在,以及在构造变形-隆升期形成高陡构造导致前期的页岩气层与之下的储集层系对接,形成页岩气侧向供烃型油气藏。在这一成藏模式基础上,开展区带评价及圈闭优选,提出钻探平桥构造的建议。钻探结果表明,通过页岩气侧向供烃形成油气藏,可以取得有工业意义的勘探发现。

### 3.2 渝东地区整体具有的勘探潜力

渝东地区五峰组-龙马溪组烃源岩普遍发育,在晚白垩世前主体处于深埋阶段,可以形成广泛分布的页岩气藏。早白垩世晚期本区先后卷入褶皱变形,在构造变形适中地区可以导致五峰组-龙马溪组页岩气层与寒武系等层系的储层侧向对接,在有利的圈闭内形成天然气聚集。这种天然气成藏方式在渝东这样的高陡构造发育区可形成规模聚集。此外,在燕山期沟通上奥陶统-下志留统页岩气的断裂系统,是成藏的主要通道,通源断裂向上沟通的

其它储集层系,在合适的圈闭条件下也能聚集成藏,由此可构成一立体复式成藏系统,开辟渝东地区新的勘探领域。国内与渝东地区的成油气地质条件相似勘探区块亦可借鉴这一认识。

## 4 结论

(1)基于油气成藏配置条件的再认识,在渝东地区平桥一带发现洗象池群气藏,天然气碳同位素分析结果显示烃类主要来源于五峰组-龙马溪组烃源岩,储层研究揭示了气藏类型属于孔洞型或裂缝-孔洞型。

(2)平桥1井洗象池群岩心裂缝存在6期矿物充填,捕获的包裹体记录了均一温度渐次降低的充填序列,综合研究揭示:所观察的裂缝形成及矿物充填主要发生在燕山期-喜山期的构造变形及隆升期;认为晚燕山构造变形期是平桥洗象池群气态烃充注的重要时期,燕山期以来的隆升期,平桥地区还继续接受来自于页岩气卸压释放引起的油气充注,最终形成现今的平桥洗象池气藏。

(3)平桥气藏的发现证实了页岩气侧向供烃可以形成有工业意义的油气藏,渝东地区在五峰组-龙马溪组中形成的页岩气分布广泛,构造变形使得源储形成对接及侧向供烃成藏,是这类油气藏勘探的有利区,国内相似油气地质条件的油气区块借鉴这一认识亦可展开进一步勘探评价。

### 参考文献:

陈旭,樊隽轩,张元动,王红岩,陈清,王文卉,梁峰,郭伟,赵群,聂海宽,文治东,孙宗元.2015.五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J].地层学杂志,39(4):351-358.

陈孝红,李海,苗凤彬,罗胜元.2022.中扬子古隆起周缘寒武系页岩气赋存方式与富集机理[J].华南地质,38(3):394-407.

戴金星,倪云燕,黄士鹏.2010.四川盆地黄龙组烷烃气碳同位素倒转成因的探讨[J].石油学报,31(5):710-717.

戴金星,裴锡古,戚厚发.1992.中国天然气地质学:卷一[M].北京:石油工业出版社,65-86.

邓焱,胡国艺,赵长毅.2018.四川盆地龙岗气田长兴组-飞仙关组天然气地球化学特征及成因[J].天然气地球科

学,29(6):892-907.

董大忠,施振生,管全中,蒋珊,张梦琪,张晨晨,王书彦,孙莎莎,于荣泽,刘德勋,彭平,王世谦.2018.四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气勘探进展、挑战与前景[J].天然气工业,38(4):67-76.

高键,何生,易积正.2015.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,36(3):472-480.

郭彤楼,张汉荣.2014.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J].石油勘探与开发,41(1):28-36.

贾鹏,李明,卢远征,樊茹,李鑫,邓胜微,曾乙洋,刘鑫.2017.四川盆地寒武系洗象池群层序地层划分及层序地层格架的建立[J].地质科技情报,36(2):119-127.

姜华,王泽成,杜宏宇,张春明,王瑞菊,邹妞妞,王铜山,谷志东,李永新.2014.乐山-龙女寺古隆起构造演化与新元古界震旦系天然气成藏[J].天然气地球科学,25(2):192-200.

李海,张保民,陈孝红,苗凤彬,陈林.2022.湖南省安化地区寒武系小烟溪组页岩气成藏条件分析[J].华南地质,38(3):431-440.

李培军,陈孝红,刘秀岩,张保民.2022.流体包裹体记录的原油裂解成气温度:以湖北宜昌地区水井沱组为例[J].华南地质,38(3):408-416.

李双建,李建明,周雁,沃玉进,汪新伟.2011.四川盆地东南缘中生代构造隆升的裂变径迹证据[J].岩石矿物学杂志,30(2):225-233.

李双建,袁玉松,孙炜,孙冬胜,金之钧.2016.四川盆地志留系页岩气超压形成与破坏机理及主控因素[J].天然气地球科学,27(5):924-931.

李文正,文龙,谷明峰,夏茂龙,谢武仁,付小东,马石玉,田瀚,姜华,张建勇.2020.川中地区加里东末期洗象池组岩溶储层发育模式及其油气勘探意义[J].天然气工业,40(9):30-38.

罗胜元,李培军,陈孝红,倪方杰,李海,刘安.2022.鄂西宜昌地区寒武系页岩测井评价及优质储层识别[J].华南地质,38(3):417-430.

梅廉夫,刘昭茜,汤济广,沈传波,凡元芳.2010.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,35(2):161-174.

聂海宽,包书景,高波,边瑞康,张培先,武晓玲,陈新军.2012.四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J].地学前缘,19(3):280-294.

聂海宽,金之钧,边瑞康,杜伟.2016.四川盆地及周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气“源-盖控藏”富

- 集[J].石油学报,37(5):557-571.
- 石书缘,王铜山,刘伟,姜华,李秋芬,刘鑫,曾乙洋,邹翔,胡丽.2020.四川盆地寒武系洗象池组储层特征及天然气勘探潜力[J].天然气地球科学,31(6):773-785.
- 孙莎莎,芮昀,董大忠,施振生,拜文华,马超,张磊夫,武瑾,昌燕.2018.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,39(6):1087-1106.
- 孙自明,张荣强,孙炜,郝运轻,卞昌蓉.2021.四川盆地东部海相下组合油气勘探领域与有利勘探方向[J].现代地质,35(3):798-806.
- 汤济广,汪凯明,秦德超,张玥,冯涛.2021.川东南南川地区构造变形与页岩气富集[J].地质科技通报,40(5):11-21.
- 魏国齐,谢增业,白贵林,李剑,王志宏,李爱国,李志生.2014.四川盆地震旦系—下古生界天然气地球化学特征及成因判识[J].天然气工业,34(3):44-49.
- 吴伟,罗冰,罗文军,王文之.2016.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,27(8):1447-1453.
- 张勇,李彦婧,潘兰,俞若水,张一陶.2023.构造特征对重庆南川地区页岩气保存条件的影响[J].地质通报,42(5):680-686.
- 张一平.2016.断-盖空间配置类型及其对油气成藏的控制作用[J].大庆石油地质与开发,35(1):25-31.
- 赵瞻,余谦,周小琳,刘伟,何江林,谢渊.2017.重庆黔江地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件[J].地质科技情报,36(3):122-129.
- 赵文智,魏国齐,杨威,莫午零,谢武仁,苏楠,刘满仓,曾富英,武赛军.2017.四川盆地万源—达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义[J].石油勘探与开发,44(5):659-669.
- 周慧,李伟,张宝民,刘静江,邓胜徽,张师本,单秀琴,张静,王晓波,姜华.2015.四川盆地震旦纪末期—寒武纪早期台盆的形成与演化[J].石油学报,36(3):310-323.
- 周国晓,魏国齐,胡国艺,武赛军,田亚杰,董才源.2020.四川盆地早寒武世裂陷槽西部页岩发育背景与有机质富集[J].天然气地球科学,31(4):498-506.
- 朱传庆,邱南生,曹环宇,刘一锋,江强.2017.四川盆地东部构造-热演化:来自镜质体反射率和磷灰石裂变径迹的约束[J].地学前缘,24(3):94-104.
- 朱光有,张水昌,马永生,梁英波,郭彤楼,周国源.2006. TSR ( $H_2S$ )对石油天然气工业的积极性研究— $H_2S$ 的形成过程促进储层次生孔隙发育[J].地学前缘,13(3):141-149.
- 朱光有,赵坤,李婷婷,付小东,张志遥,陈志勇,王鹏举.2020.中国华南地区下寒武统烃源岩沉积环境、发育模式与分布预测[J].石油学报,41(12):1567-1586.
- Barker C. 1990. Calculated Volume and Pressure Changes During the Thermal Cracking of Oil to Gas in Reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 74(8): 1254-1261.