

文章编号: 0253-9985(2007)02-0274-06

# 川东石炭系原油裂解型气藏成藏史分析

李艳霞<sup>1</sup>, 钟宁宁<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学 油气资源学院, 陕西 西安 710065 2. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

**摘要:** 应用碳酸盐岩储层次生方解石脉中的烃类流体包裹体研究方法, 对四川盆地东部石炭系气藏的形成及充注史进行了恢复研究。流体包裹体鉴定表明, 现今气藏储层中除气态烃 + 液态烃 + 盐水包裹体外, 还存在大量多相态 (气相、固相及三相) 包体, 流体包裹体捕获的温度从 100~135℃至 140~180℃至 185~220℃逐渐增高, 同时由低温包裹体低含量的甲烷逐渐演变成高温包裹体高含量的甲烷, 现今气藏的形成演变是古油藏经历了油气的生成、聚集、破坏乃至受热裂解为气藏的过程。

**关键词:** 充注期次; 气态烃包裹体; 固体包裹体; 原油裂解型气藏; 石炭系; 四川盆地东部

**中图分类号:** TE122.3 **文献标识码:** A

## An analysis on pooling history of the Carboniferous thermal methane gas pool eastern Sichuan basin

Li Yanxia<sup>1</sup> Zhong Ningning<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Resources Xi'an Shiyou University, Shaanxi 710065

2. Faculty of Natural Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249)

**Abstract** The formation process and charging history of the Carboniferous gas pools in eastern Sichuan basin are reconstructed through the study of hydrocarbon fluid inclusions from the secondary calcite vein in carbonate reservoirs. Besides gaseous hydrocarbons, liquid hydrocarbons, and saline inclusions, large quantity of multiphase inclusions exist in the present gas reservoirs. These fluid inclusions experienced an increase in their homogenization temperatures from 100℃~135℃ to 140℃~180℃, and to 185℃~220℃, and during the process, low temperature inclusions with low CH<sub>4</sub> content evolved into high temperature inclusions with high CH<sub>4</sub> content. The present gas reservoirs are the result of a process through which the ancient hydrocarbon reservoirs went through hydrocarbon generation, accumulation, destruction, and finally thermal cracking into gases.

**Key words** charging episode; gaseous hydrocarbon inclusions; solid inclusion; oil cracking gas reservoir; Carboniferous; eastern Sichuan basin

流体包裹体是矿物结晶生长过程中被捕获在矿物晶体缺陷、空穴、晶格空位、位错及微裂隙中的成岩、成矿溶液, 至今在主矿物中完好封存、并与主矿物有着相的界限的封闭体系。流体包裹体记录了存在于地下岩层中的古流体 (水、油和气) 的特征, 是成藏流体保留下来的唯一“化石”样品, 近年来已成为油气地质和地球化学研究的热点。目前, 在成藏年代学与成藏史方面的研究主要体现在下述 3 个方面: 一是烃类包裹体形成的世代, 代表了油

气运移充注的期次; 二是烃类流体包裹体的均一温度, 记录了油气运移充注时储层的古地温, 通过热史和储层埋藏史的恢复即可确定包裹体形成时的埋藏深度, 其对应的地层时代即是油气藏的成藏年代; 三是烃类包裹体的成分, 可以反映油气注入时的地球化学特点和相态特点<sup>[1~6]</sup>。

本文基于上石炭统黄龙组碳酸盐岩储层裂缝中发育的流体包裹体, 通过对包裹体的均一温度、包裹体成分、产状、类型等测试和鉴定, 揭示古油

藏的生成、聚集、破坏乃至受热裂解为气藏过程, 重塑古油藏- 古气藏的成藏演化期次及过程。

1 地质概况

川东地区是四川盆地稳定地块中构造相对活动的地带。它西与华蓥山- 石龙峡相邻, 东至七跃山, 北起大巴山, 南至南川- 开隆一线, 面积约为  $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是大断裂控制的以高背斜带为主体的平行褶皱区。川东地区自西向东分布有 10 排以北东东向为主的高陡构造带, 现今构造为北北东及北东向隔挡式褶皱, 背斜带常具有多高点, 呈狭长形延伸百余千米, 核部多出露三叠系碳酸盐岩层, 翼部地层陡峻或直立倒转, 向斜宽缓, 分布侏罗系红色碎屑岩层, 地貌为低缓丘陵, 地形起伏不大。高陡背斜与向斜宽度比例为 1:3 具隔挡式褶皱组合特征, 主干背斜与大断裂相伴生<sup>[7]</sup> (图 1)。

四川盆地作为一大型海陆叠合盆地, 具有多套烃源层、多套储集层及多变的生储盖组合, 经历多期生烃、运移和成藏过程。其中, 石炭系气藏是其相对独立的一个成藏系统, 具有自己的烃源层

和储集层。气源对比发现, 川东石炭系气藏的气源主要来自其下伏的志留系龙马溪组<sup>[8]</sup>, 该层为石炭系油气藏最初的烃源灶。

龙马溪组为深水陆棚相的黑色页岩、深灰色泥岩及钙质页岩, 属于缺氧、还原环境下的沉积, 含丰富的笔石。少数钻井揭示, 川东地区龙马溪组厚度为 300~ 672 m; 下部的笔石页岩相烃源岩平均厚度约 400 m, 变化在 100~ 900 m; 黑色页岩厚度变化在 20~ 70 m, 有机碳含量高, 露头剖面有机残碳含量为 0.5% ~ 7.5%, 钻井揭示有机碳含量为 0.07% ~ 2.77% (五科 1 井), 为一套优质烃源岩, 其上覆石炭系天然气气源主要来自该套烃源层的贡献。

2 样品与实验条件

使用 Linkm TH600 冷、热两用台与 Leica DMR XP 偏光和荧光显微镜组成的测温系统, 采用透射光和荧光显微镜相结合的方法, 在显微镜下区分烃类包裹体与盐水包裹体, 描述烃类包裹体的产状特征, 划分流体包裹体的形成期次。运

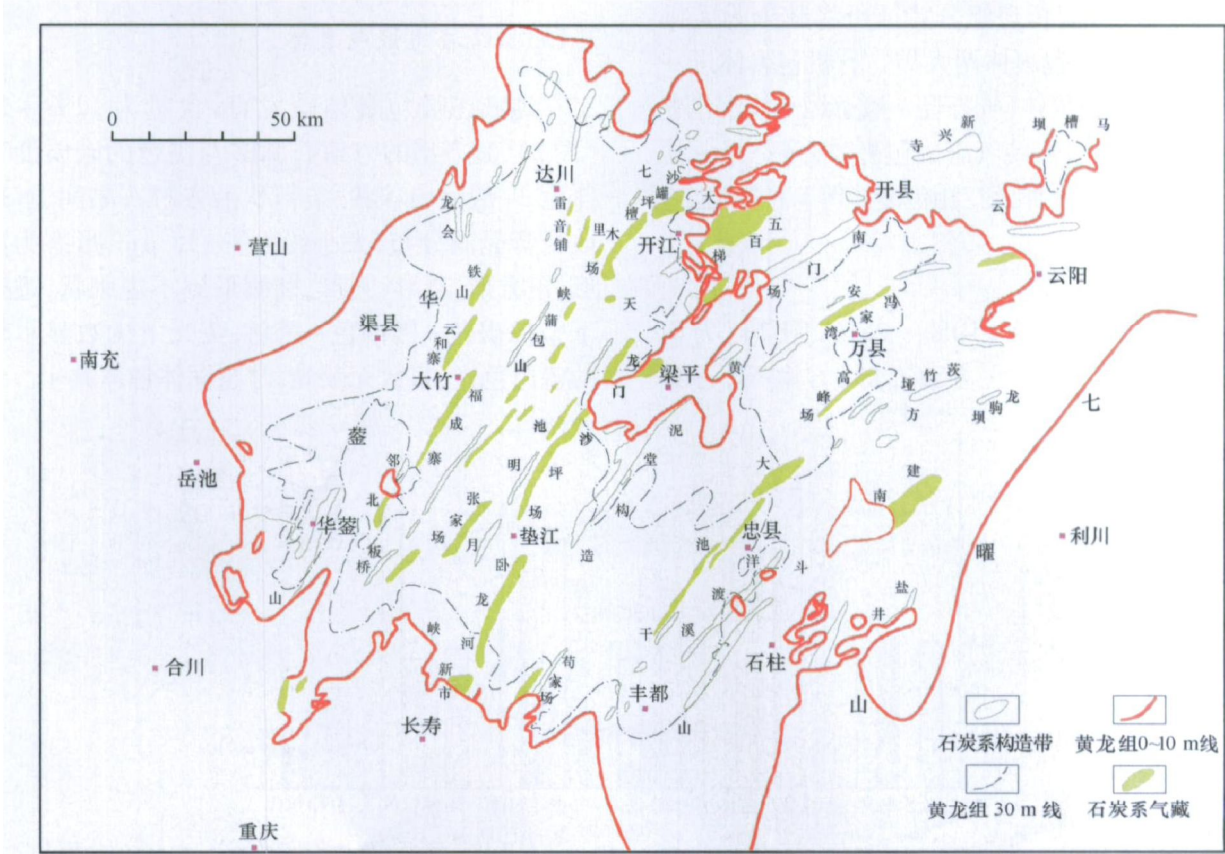


图 1 川东构造分布及石炭系大、中型气田展布

Fig.1 Map showing the distribution of structures and large- and middle-sized Carboniferous gas fields in eastern Sichuan basin



用显微镜与冷、热台相结合,以冷冻-回温法识别均相或非均相捕获的流体包裹体,选取与烃类包裹体共生的均相捕获的盐水包裹体,测定其均一温度,用以判别不同期次形成的包裹体。

### 3 结果与讨论

在川东气区,在不同构造带从南到北选择有代表性的铁山 4、板东 1、相 28、黄龙 5、罐 14、双 19、天东 88、池 62 及罗家 1 等 9 口井,进行上石炭统黄龙组及下二叠统长兴组碳酸盐岩储层流体包裹体的测定研究,同时还对罗家 1 井下三叠统飞仙关组碳酸盐岩储层包裹体进行了分析,总计观察测定 39 块岩心样品。

#### 3.1 流体包裹体特征

上石炭统黄龙组碳酸盐岩储层裂缝中发育的流体包裹体,一般分布在灰色、深灰色粉-泥晶云岩、灰白色泥晶鲕粒云岩、深灰色泥晶灰岩及深灰色角砾云岩裂缝中的次生方解石脉中,同时在其溶蚀孔、缝中的方解石充填物、石膏充填物及石英充填物中也见及,根据相态组分特征可将其分为无机盐水包裹体及有机包裹体两大类。有机包裹体进一步分为含烃盐水包裹体(气态烃+液态烃+盐水包裹体)、纯液态烃包裹体、纯气态烃包裹体(气态烃+盐水包裹体)、固体包裹体及三相包裹体等 5 种类型。

##### 3.1.1 无机盐水包裹体

此类包体数量较多(10%~25%,图 2),为均相捕获的包体,多分布在方解石脉、方解石、石膏

及石英的充填物中,常呈串珠状成群成带分布在方解石晶间或解理缝中,多呈现四边形、正方形、菱形、长条形、圆形、椭圆形及不规则状,个体较小(5~10  $\mu\text{m}$ ),气液比为 5%~10%,气相多为  $\text{CO}_2$ ,透射光下为无色-浅褐色,荧光下不发光,加热时均一为液相。

##### 3.1.2 气态烃+液态烃+盐水包裹体

此类包裹体数量最多,为含烃盐水包体,含量为 25%~35%(图 2),常与盐水包裹体伴生,呈串珠状成群成带分布在方解石晶间、石膏晶间,大小不均,多数较小(<5  $\mu\text{m}$ ),一般为 5~15  $\mu\text{m}$  左右,形态为四边形、正方形、菱形、圆形、椭圆形及不规则状,有时可见立方体状,气液比为 5%~15%,包体壁厚,液烃附着在包体内壁和气泡外缘,单个包体从边缘到中心依次为盐水相-液态烃相-气态烃相。单偏光下,液态烃无色,边缘由于透射光的原因,在低倍镜下显示黑色-褐色;气相无色。荧光下液态烃相显示弱蓝白色或淡黄-白色光环;气态烃相不发光,居中;盐水相也不发光,居四周(图 3a b)。

##### 3.1.3 纯液态烃包裹体

纯液态烃包裹体较发育,含量为 12%~26%(图 2),其产出的方解石脉多与黑色的碳质沥青脉伴生,一般呈串珠状、条带状沿方解石晶间、解理缝或石膏晶间分布,大小约为 1~15  $\mu\text{m}$ ,形态为四边形、正方形、菱形、圆形、椭圆形到不规则状,透射光下呈棕褐色-黑褐色-黑色,荧光下少数显示较弱的蓝白色光、多数无荧光,常与固体包体共生。

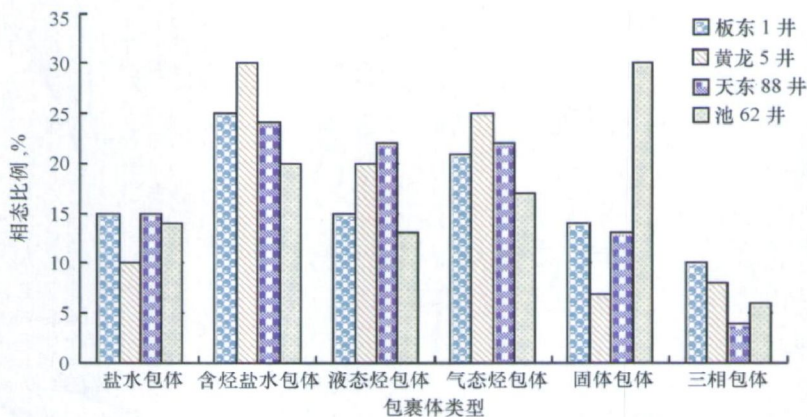


图 2 川东上石炭统储层流体包裹体类型

Fig. 2 Types of fluid inclusions from the Upper Cretaceous reservoirs in eastern Sichuan basin

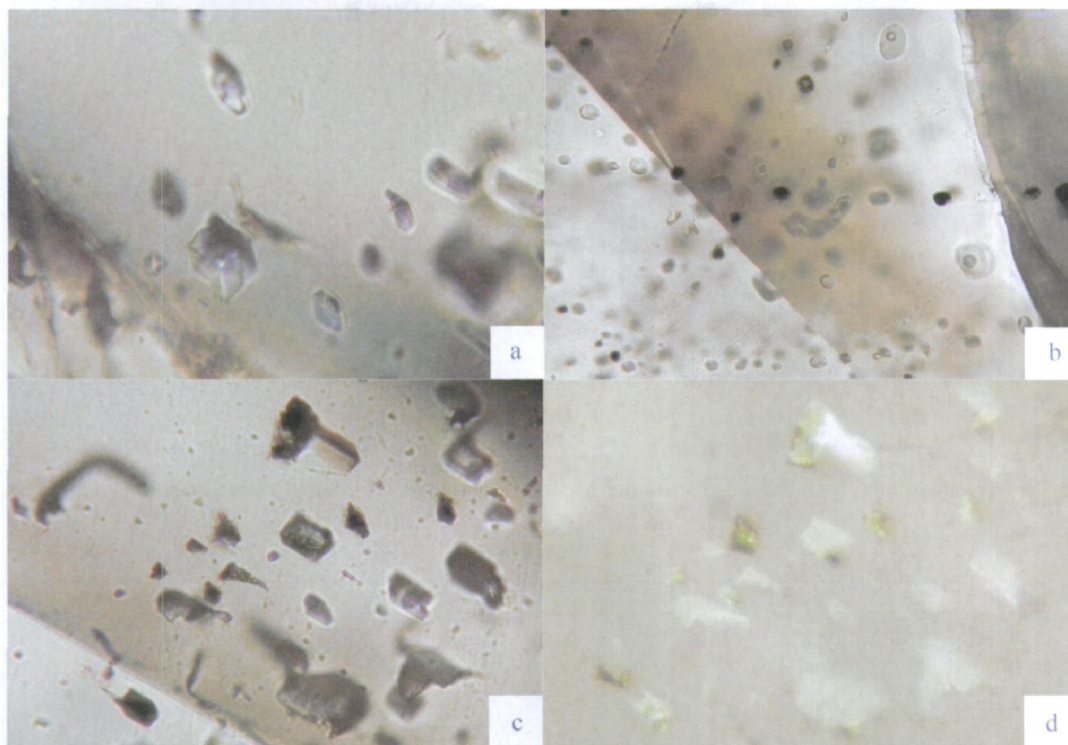


图 3 川东上石炭统储层流体典型包裹体显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of typical fluid inclusions from the Upper Cretaceous reservoirs in eastern Sichuan basin

a. 方解石脉中立方体晶形中的含烃包裹体, 500倍, 池 62井,  $C_2H_4$  b. 石英脉中与固体包体共生的含烃包体, 透射光, 200倍, 黄龙 5井,  $C_2H_4$  c. 方解石脉中的固体沥青和黄铁矿包体, 500倍, 池 62井,  $C_2H_4$  d. 方解石脉中的固体包体, 灰白色 (白色) 晶粒可能为固体沥青或黄铁矿, 反射光, 500倍, 池 62井,  $C_2H_4$

### 3.1.4 气态烃 + 盐水包裹体 (纯气态烃包裹体)

此类包体发育, 含量为 15% ~ 33% (图 2), 一般呈串珠状、条带状与液态烃包体伴生, 沿方解石晶间、解理缝或石膏晶间分布, 大小为 1~10  $\mu\text{m}$ , 形态为四边形、正方形、圆形、椭圆形到不规则状, 透射光下呈无色-浅褐色, 荧光下一般不发光。

### 3.1.5 固体包裹体

此类包体分布不均, 与井的位置及岩石中方解石脉和沥青脉的充注状态有关, 一般含量为 7% ~ 15%, 高可达 30% (图 2), 呈串珠状、条带状与液态烃包体伴生, 沿方解石晶间、解理缝或石膏晶间分布, 大小为 1~10  $\mu\text{m}$ , 最大 20  $\mu\text{m}$ , 形态为四边形、圆形、椭圆形至不规则状, 固相为黑色碳质沥青和黄铁矿小晶体, 透射光下呈黑褐色-黑色 (图 3 b, c, d), 反射光下呈灰白色-亮白色。

### 3.1.6 三相包裹体

此类包裹体分布不均, 只在个别样品见到, 数

量较少 (4% ~ 10%, 图 2), 多属非均相捕获的包裹体, 常分布在与沥青脉伴生的粗晶方解石脉中, 与液态烃包裹体和固体包体伴生, 呈串珠状分布在方解石晶间, 大小不均, 一般为 5~10  $\mu\text{m}$ , 形态为四边形、正方形、圆形、椭圆形, 一般为浅棕色, 具气相、液相、固相, 气泡外缘具有拖动的棕褐色固体子晶尾部, 无荧光。

上述包裹体从含烃盐水包体-气态烃包体-三相包体-固相包体的演化, 反映了川东古油藏到原油裂解气藏的变迁。

## 3.2 流体包裹体成分

在不同温度段捕获的包裹体中甲烷相对含量 ( $\text{CH}_4$ /总烃) 及乙烷相对含量 ( $\text{C}_2\text{H}_6$ /总烃) 变化较大。成藏演化早期低温阶段 (100~130 $^{\circ}\text{C}$ ) 形成的包体中, 甲烷相对含量较低, 多在 60% ~ 90%, 最高可达 97.88%<sup>[9]</sup>, 而乙烷相对含量较高 (2% ~ 7%), 最高可达 15%, 反映当时基本上为油藏; 成藏演化中、后期高温阶段 (135~180 $^{\circ}\text{C}$ ) 形成的包体中, 甲烷相对含量较高, 在 90% ~ 97%, 而乙烷相对含量



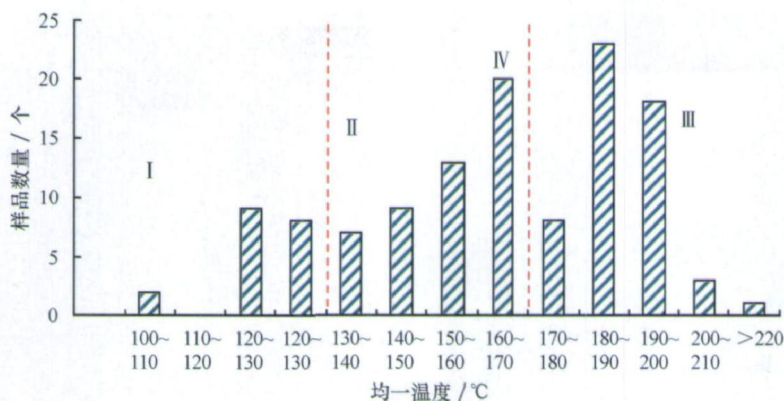


图 4 川东上石炭统储层流体包裹体均一温度

Fig. 4 Homogenization temperature distribution of fluid inclusions from the Upper Cretaceous reservoirs in eastern Sichuan basin

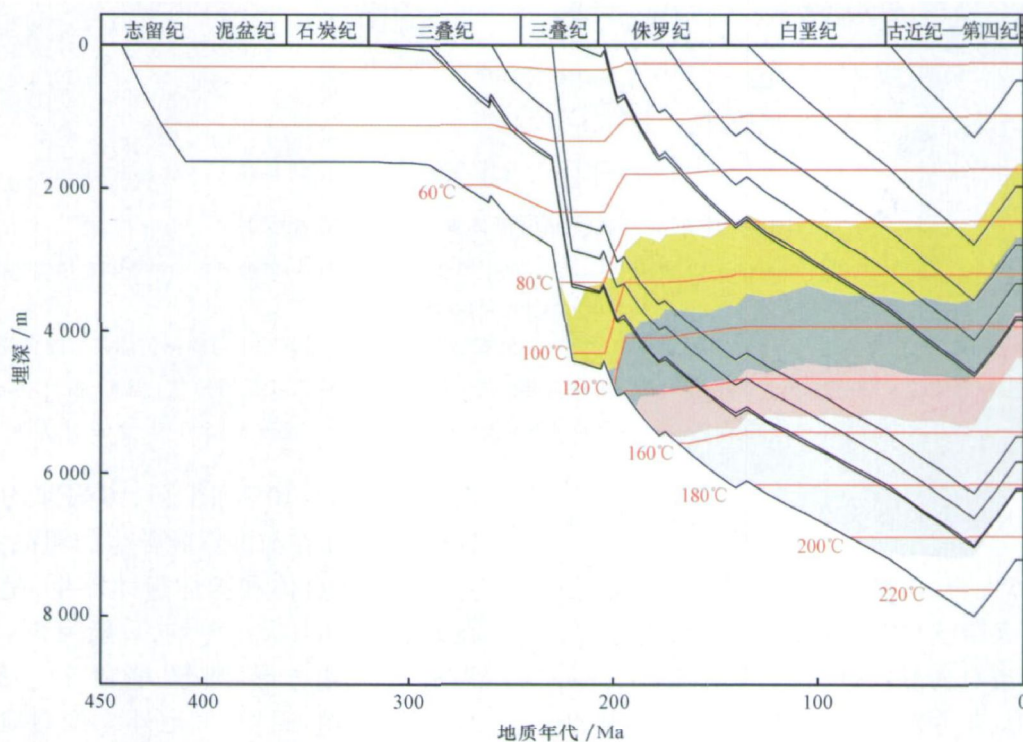


图 5 川东地区五科 1 井的埋藏史

Fig. 5 Burial history of Well Wuke-1 in eastern Sichuan basin

较低 (1% ~ 4%), 可能为油气藏; 成藏演化后期高温阶段 (180~220°C) 捕获的包体中, 甲烷相对含量最高, 多在 98% ~ 99%, 接近演化的终点, 而乙烷相对含量较低 (0.45% ~ 0.89%), 基本上演变为气藏。

## 4 原油裂解气藏成藏过程分析

### 4.1 油气充注期次

上石炭统 ( $C_2hl$ ) 粉-泥晶云岩和粉-泥晶灰岩裂缝方解石脉中发育的包体通常可观测到 4 期

包裹体 (图 4): 1) iv 期盐水包体, 温度范围为 100~135°C; 2) ㊟期含烃盐水包体, 温度范围为 140~180°C, 包体发黄白色或蓝白色荧光; 3) ㊟期含烃盐水包体, 温度范围为 185~200°C, 包裹体发弱的蓝白色荧光; 4) ㊟期含烃盐水包体, 温度范围为 200~220°C, 包体无荧光; 5) ㊟期含烃盐水包体, 温度范围为 140~180°C, 包体无荧光, 从温度上难与第 ㊟期包体区分开, 该期为喜马拉雅运动构造抬升剥蚀后流体充注形成的, 可从流体包裹体荧光颜色及成分分析中得到证实。其中, 第 ㊟期包体尤为发育, 为主充注期; 第 ㊟和第 ㊟期包

体较发育,也为主充注期。

## 4.2 成藏史分析

对沉积-构造演化史的正确反演至关重要。根据流体包裹体测温数据恢复的剥蚀厚度一般为 2 000~2 500 m。结合实测的镜质体反射率模拟的热演化史,应用 BasinMod 1D 盆地模拟软件,反演五科

白垩世,含烃盐水包体均一温度范围为 140~180℃,包体发黄白色或蓝白色荧光,主要为干酪根晚期生成的石油和天然气继续充注到上覆上石炭统储层中,形成古油气藏。

第④期成藏时间为 38~65 Ma 为古新世-渐新世早期,主要为原有的古油气藏裂解生成的古天然气藏,含烃盐水包体均一温度范围为 185~220℃,包裹体发弱的蓝白色荧光或无荧光。Waples<sup>[10]</sup>认为,原油保持液相的最高温度为 170~174℃,因此当古油藏温度在 185~220℃就开始裂解,当温度持续升高,最终会全部裂解为古气藏,其结果就是高含量的甲烷和固体碳质沥青。在现今的川东气藏中,甲烷含量高达 95.5%~98.0%,为典型的干气,同时储层中发现大量的固体碳质沥青,另外非烃气体中还含有少量的 H<sub>2</sub>S。与该期包裹体伴生的除了大量的气态包裹体外,还有大量的含沥青和黄铁矿的三相包裹体和固体包裹体。沥青是原油热裂解的产物<sup>[11]</sup>,黄铁矿和 H<sub>2</sub>S 是硫酸盐热化学反应的产物<sup>[12]</sup>。

古近纪末的喜马拉雅构造运动中,川东地区由于造山抬升,遭受了强烈的挤压及剥蚀,开江古隆起上形成的石炭系巨型古气藏被分裂瓦解,并遭受严重的散失。五百梯潜伏构造作为古气藏范围内的一个局部隆起,能最先捕获从古气藏运移来的天然气,最后其圈闭充满度很高,重新调整成

藏<sup>[7-13]</sup>。这为第⑤期成藏,时间在 0~23.3 Ma 为新近纪-第四纪。

## 5 结论

川东地区下志留统龙马溪组高效烃源岩现已处于高-过成熟阶段( $R_o$  高达 2.5%~3.5%)。这

- 柳少波,顾家裕. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论[J]. 石油与天然气地质, 1997, 8(4): 326~331, 342
- 赵靖舟. 油气包裹体在成藏年代学研究中的应用实例分析[J]. 地质地球化学, 2002, 30(2): 83~89
- 郑有业,王思源,李小菊,等. 有机包裹体研究在石油地质领域中的应用现状[J]. 地质地球化学, 1998, 26(2): 72~76
- 侯建国,任丽华,董春梅. 有机包裹体技术在油气运移与聚集中的应用研究[J]. 石油实验地质, 2005, 27(4): 409~413
- 廖仕孟,王强,徐志明,等. 液体包裹体分子组成分析技术应用中存在的问题[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2): 170~172
- 胡光灿,谢姚详. 中国四川东部高陡构造石炭系气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 王兰生,陈盛吉,杨家静,等. 川东石炭系天然气成藏的地球化学模式[J]. 天然气工业, 2002, 22(S0): 102~106
- 王一刚,刘志坚,文应初. 川东石炭系储层有机包裹体、储层沥青与烃类运聚关系[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 77~83
- Waples D W. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas formation: constraints from experimental and empirical data and from thermodynamics[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(5): 553~575
- 王振平,付晓泰,卢双舫,等. 原油裂解成气模拟实验、产物特征及意义[J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 12~15
- 谢增业,李剑,单秀琴,等. 川东北罗家寨飞仙关组气藏成藏过程及聚集效率[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 765~769
- 王庭斌. 中国气藏主要形成、定型于新近纪以来的构造运动[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 126~132

(编辑 李 军)